



ปัจจัยของปริมาณซิลิคอนที่มีผลต่อการเกิดเฟสซิกมาของเหล็กหล่อ

โครเมียมสูงเฟอร์ริติก

THE EFFECT OF SILICON ON SIGMA PHASE OF HIGH CHROMIUM
FERRITIC CAST IRON

นายพรวุฒิ ศุภกิจกาญจนา รหัส 51362404

นางสาวสุภาพร ขวัญคง รหัส 51365207

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่รับ..... ๗ ก.ค. ๒๕๕๕

เลขทะเบียน..... ๑๖๙๔๕๑๙๗

เลขเรียกหนังสือ..... ๗๕

มหาวิทยาลัยนเรศวร ๗๒๗๙

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา ๒๕๕๔

ชื่อหัวข้อโครงการ	ปัจจัยของปริมาณซิลิคอนที่มีผลต่อการเกิดเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติก		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายพรวุฒิ	ศุภกิจกาญจนา	รหัส 51362404
	นางสาวสุภาพร	ขวัญคง	รหัส 51365207
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาปริมาณซิลิคอนที่มีผลต่อการเกิดเฟสซิกม่า และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีส่วนผสมของโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาชิ้นงานในสภาพหล่อของแต่ละส่วนผสม และหลังจากผ่านการอบโดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบ โดยอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน จากการศึกษาในสภาพหล่อพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจะประกอบด้วยเฟสยูเทคติกคาร์ไบด์ กระจายตัวอยู่บนโครงสร้างที่เป็นเฟสเฟอร์ไรท์ และพบเฟสซิกม่า (σ phase) เกิดขึ้นบริเวณขอบของเฟสยูเทคติกคาร์ไบด์เล็กน้อย และเมื่อนำไปผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างที่เป็นเฟสเฟอร์ไรท์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่พบว่าเฟสซิกมามีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งเฟสซิกม่าส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งปริมาณของซิลิคอนที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ปริมาณของเฟสซิกม่า และความแข็งของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ ดร.อัมพร เวียงมูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ตลอดจนแนะนำวิธีการในการแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา จนสามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์มานะ วีรวิกรม ดร.ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และอาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอนโครงการ รวมไปถึงการแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณครูช่างประเทือง โมรราย ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัฒนภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ รวมไปถึงการแนะนำใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่าย และให้กำลังใจจนสามารถทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม
นายพรวุฒิ ศุภกิจกาญจนานา
นางสาวสุภาพร ขวัญคง

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎี.....	5
2.1 เหล็กหล่อ (Cast Irons).....	5
2.2 เหล็กหล่อทนความร้อนสูง (Heat Resistance Cast Iron).....	5
2.3 การเกิดเฟสซิกม่า (Sigma Phase).....	8
2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope : OM).....	11
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	13
2.6 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD).....	15
2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....	16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	21
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ	21
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์.....	22
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์	26
4.1 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกในสภาพหล่อ	26
4.2 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกหลังผ่านกระบวนการอบ.....	34
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 บทสรุป.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา	49
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา.....	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก	53
ภาคผนวก ข	59
ภาคผนวก ค	64
ภาคผนวก ง	85
ภาคผนวก จ	88
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน.....3
2.1	สัดส่วนทางเคมีที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และการใช้งาน 8
2.2	การเกิดเฟสซิกม่า และค่าความแข็งเมื่ออบที่อุณหภูมิสูง..... 9
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่ใช้ในการทดลอง.....22
ก.1	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกในสภาพหล่อ54
ก.2	การวิเคราะห์หาธาตุ ที่บริเวณโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ และบริเวณเฟสซิกม่าของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ..... 55
ก.3	การวิเคราะห์หาธาตุ ที่บริเวณโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ และบริเวณเฟสซิกม่าของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ.....56
ก.4	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านกระบวนการอบ 57
ก.5	การวิเคราะห์หาธาตุ ที่บริเวณโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ และบริเวณเฟสซิกม่าของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน58
ข.1	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ60
ข.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน 61
ข.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน 62
ข.4	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน 63
ค.1	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักในสภาพหล่อ ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.10 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน	93



สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เมื่ออบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน.....9
2.2	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เมื่ออบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วัน.....10
2.3	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เมื่ออบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 วัน.....10
2.4	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....11
2.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....13
2.6	Bragg's Law.....15
2.7	ห้วงเขตเพรชปลายเป็นรูปพีรามิดฐานสี่เหลี่ยมมุมยอด 136 องศา และรอยกด.....18
2.8	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ผ่านการอบ.....19
2.9	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบเป็นเวลา 150 ชั่วโมง.....20
2.10	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบเป็นเวลา 300 ชั่วโมง.....20
2.11	การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่เวลาการอบแตกต่างกัน.....20
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....21
3.2	ตำแหน่งการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....24
4.1	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ.....26
4.2	การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรต์ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ.....27
4.3	การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ.....28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	29
4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	30
4.6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	31
4.7 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	33
4.8 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ	34
4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน	35
4.10 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน	35
4.11 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน	36
4.12 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ และเมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสอบเป็นระยะเวลา 8 วัน	39
4.13 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ และเมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน	40
4.14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 เศษส่วนปริมาตรของเฟสชีกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน.....	43
4.16 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน.....	44
4.17 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และ ซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน.....	45
4.18 เศษส่วนปริมาตรของเฟสชีกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน	47
4.19 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน.....	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

เหล็กหล่อโครเมียมสูงเป็นเหล็กหล่อที่มีสมบัติทนทานต่อการเสียดสี ความร้อนสูง และการกัดกร่อน มีความสำคัญในอุตสาหกรรมเหมาะสำหรับใช้ทำส่วนประกอบของเตาอบต่างๆ เช่น ทำหัวเผาตะแกรงรองรับงานสำหรับการชุบเหล็ก และตะแกรงรองรับเชื้อเพลิงของเตาเผาต่างๆ ซึ่งเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ผลิตใช้ในอุตสาหกรรมจำแนกเป็น 3 ประเภทตามปริมาณของคาร์บอน และโครเมียม คือ ประเภทมาร์เทนซิติก (Martensitic) เฟอริติก (Ferritic) และออสเทนนิติก (Austenitic) จากการนำเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอริติกไปใช้งานด้านเตาเผา พบว่าเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอริติกนั้นเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการแตกร้าว เนื่องจากเกิดเฟสซิกม่า (Sigma Phase) บนโครงสร้างพื้น ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งเปราะ

โดยทั่วไปแล้วเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอริติกมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มีความแข็งไม่สูงมากนัก จึงทำการเติมซิลิคอน และให้ความร้อนเพื่อให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น ซึ่งในกระบวนการเติมซิลิคอนจะมีผลต่อการเกิดเฟสซิกม่า และช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ส่วนกระบวนการให้ความร้อนจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น เพราะว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาานาน ๆ จะทำให้เกิดเฟสซิกม่า

ดังนั้นโครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปริมาณซิลิคอนที่เติมลงไป อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอริติกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคการเกิดเฟสซิกม่า และความแข็ง เพื่อให้โครงการวิจัยนี้ก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมงานหล่อโลหะรวมทั้งอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาปริมาณซิลิคอนที่เติมลงไปในเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอริติกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของการเกิดเฟสซิกม่า และความแข็ง

1.2.2 ศึกษาอุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอริติกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของการเกิดเฟสซิกม่า และความแข็ง

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาคของเฟสซิกม่า และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก

1.3.2 โครงสร้างจุลภาคของเฟสซิกม่า และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคของเฟสซิกม่า และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก

1.4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคของเฟสซิกม่า และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติก ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 8 วัน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง คือ เหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีส่วนผสมของโครเมียมร้อยละ 31 และคาร์บอนร้อยละ 1 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมของซิลิคอนเป็น ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก

1.5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองผ่านกรรมวิธีการหล่อแบบทรายขึ้น

1.5.3 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

1.5.4 ตรวจสอบองค์ประกอบธาตุด้วยเครื่อง Emission Spectroscopy

1.5.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy-dispersive X-ray Spectrometry : EDXS)

1.5.6 ตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดของการเกิดสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

1.5.7 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

1.5.8 ตรวจสอบเศษส่วนปริมาตร (Volume Fraction) ของเฟสซิกม่าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกด้วยโปรแกรม Image J

1.5.9 ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบมาโครวิกเกอร์ (Macro Vickers Hardness Test)

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีของเหล็กหล่อโดยเน้นไปที่เหล็กหล่อทนความร้อนสูง การเกิดเฟส ชิกม่า กล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรค-โทมิเตอร์ การทดสอบความแข็ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 เหล็กหล่อ (Cast Irons)

เหล็กหล่อจัดเป็นเหล็กชนิดหนึ่งที่รู้จักกัน และใช้งานอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลาอันแล้ว เหล็กหล่อคล้ายกับเหล็กกล้า (Steel) ตรงที่เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เหมือนกัน แต่ปริมาณธาตุคาร์บอนในเหล็กหล่อจะมีมากกว่าในเหล็กกล้า คือ ตั้งแต่ร้อยละ 2-6.67 โดยน้ำหนัก ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อ จะผลิตเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนร้อยละ 2.5-4 โดยน้ำหนัก เพราะถ้ามีปริมาณคาร์บอนมากกว่านี้จะทำให้เหล็กสูญเสียสมบัติทางด้านความเหนียว คือ จะเปราะ และแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกแรงกระแทก

แม้ว่าเหล็กหล่อส่วนใหญ่จะขาดสมบัติทางด้านความเหนียว แต่เหล็กหล้อมีราคาถูกกว่า มีจุดหลอมตัวต่ำสามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่ายกว่าเหล็กกล้า และยังสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ โดยการเติมธาตุผสม ทำให้สมบัติของเหล็กหล่อเปลี่ยนแปลงได้อย่างกว้างขวางจนเหล็กหล่อบางชนิดมีสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้า ทำให้การพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมเหล็กหล่อเป็นไปอย่างกว้างขวาง

2.2 เหล็กหล่อทนความร้อนสูง (Heat Resistance Cast Iron)

เหล็กหล่อทนความร้อนสูง จะต้องมีความสำคัญ 3 ประการ คือ

ประการแรก เหล็กหล่อทนความร้อนสูง จะต้องมีความแข็งแรง รับแรงได้ที่อุณหภูมิสูง โดยไม่เกิดการแตกหัก หรือเปลี่ยนแปลงรูปทรง ประการที่สอง ต้องมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) แม้จะอยู่ในสภาพที่สัมผัสกับก๊าซร้อน และประการที่สาม จะต้องมีความต้านทานต่อการเกิดอาการพองตัว และมีโครงสร้างที่คงสภาพ ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานซึ่งจะสูงเกินกว่า 600 องศาเซลเซียส

เหล็กหล่อทนความร้อนที่ผลิตใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายประเภท แยกออกเป็น 4 กลุ่มที่สำคัญดังนี้

2.2.1 เหล็กหล่อนิกเกิลสูง

เป็นเหล็กหล่อที่อาศัยธาตุผสมสำคัญ คือ นิกเกิล โดยมีโครเมียม และโมลิบดีนัมเป็นธาตุผสมร่วม นิกเกิลจะมีบทบาททำให้โครงสร้างของเหล็กหล่อเป็นออสเทนไนท์ (Austenite) ซึ่งจะมี

เสถียรภาพสูงในช่วงอุณหภูมิใช้งาน โครเมียมจะมีบทบาทร่วมกับนิกเกิล คือ สร้างผิวบางๆ ที่เป็นออกไซด์ และสามารถต้านทานการแทรกซึมของก๊าซออกซิเจน เรียกว่าเป็นเกาะป้องกันการเกิดออกซิเดชัน สำหรับโมลิบดีนัม จะมีส่วนเสริมทางด้านความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง เพิ่มสมบัติต้านทานการคืบตัวที่อุณหภูมิสูง (Creep Resistance)

2.2.2 เหล็กหล่อซิลิคอนสูง

เหล็กหล่อประเภทนี้จะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรท์ (Ferrite) เนื่องจากอิทธิพลของซิลิคอนซึ่งจะผสมในเหล็กร้อยละ 4-6 โดยน้ำหนัก เพื่อทำให้มีสมบัติทนต่อความร้อน เหล็กหล่อทั่วไปเมื่อถูกให้ความร้อนจะเกิดออกซิเดชันที่ผิว แต่ออกไซด์ที่เกิดขึ้นขาดสมบัติที่จะต้านทานต่อการแทรกซึมของก๊าซออกซิเจนได้ ทำให้การเกิดออกซิเดชันยังคงเกิดต่อไป ซิลิคอนเมื่อผสมในเหล็กจะละลายได้ดีในเฟอร์ไรท์ ทำให้เฟอร์ไรท์มีความแข็งแรง และความแข็งสูงขึ้นเป็นการเพิ่มความต้านทานต่อแรงได้ดี ซิลิคอนมีบทบาท คือ เพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของเฟอร์ไรท์ไปเป็นออสเทนไนท์ที่สูงขึ้น ทำให้การขยายตัวในขณะใช้งาน และหดตัวในขณะเลิกใช้งาน เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจะทำให้ลดอัตราการแตกร้าวของเหล็กให้น้อยลงด้วย

2.2.3 เหล็กหล่ออะลูมิเนียมสูง

อะลูมิเนียมเมื่อผสมในเหล็กหล่อ จะมีบทบาททำให้เฟอร์ไรท์มีเสถียรภาพ และมีส่วนช่วยให้เกิดกราไฟต์ (Graphite) และช่วยให้เกิดคาร์ไบด์ (Carbide) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของอะลูมิเนียม กล่าวคือ ถ้าผสมอะลูมิเนียมไม่เกินร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมจะช่วยให้เกิดกราไฟต์เป็นแผ่น ถ้าผสมร้อยละ 7-18 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้คาร์ไบด์มีเสถียรภาพทำให้เหล็กเย็นตัวเป็นเหล็กหล่อขาว และเมื่อผสมร้อยละ 18-25 โดยน้ำหนัก เหล็กจะเย็นตัวโดยให้กราไฟต์ขนาดเล็กละเอียด โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรท์ ถ้าปริมาณอะลูมิเนียมสูงเกินกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก โครงสร้างของเหล็กจะกลับเป็นเหล็กหล่อขาวอีก ผลของอะลูมิเนียมที่ทำให้เหล็กทนความร้อนสูง คือ เมื่อเหล็กหล่ออะลูมิเนียมอยู่ในอุณหภูมิสูง 500-980 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดฟิล์มบางๆ ของอะลูมิเนียมออกไซด์ขึ้นที่ผิวเหล็ก และเป็นฟิล์มที่มีความแน่นทึบมาก สามารถป้องกันการแพร่ซึมของออกซิเจนที่จะผ่านลงไปทำปฏิกิริยากับเหล็กที่อยู่ใต้ฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นการป้องกันทั้งการเกิดสเกล และการพองตัวของเหล็กในขณะที่ใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยปกติแล้วเหล็กหล่ออะลูมิเนียมสูง จะมีส่วนดีกว่าเหล็กหล่อผสมซิลิคอนอยู่บ้างโดยเฉพาะทางด้านราคาจะถูกกว่า

2.2.4 เหล็กหล่อโครเมียมสูง

โครเมียมเมื่อผสมในเหล็กปริมาณสูงจะช่วยให้เหล็กมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี โดยธาตุโครเมียมจะรวมตัวกับออกซิเจนร่วมกับเหล็กเกิดเป็น

ฟิล์มออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งฟิล์มออกไซด์นี้จะต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่เกิดต่อไปได้เป็นอย่างดีทำให้เหล็กหล่อโครเมียมสูงมีสมบัติต้านทานต่อการเกิดสเกลได้เป็นอย่างดีจนถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียม โครเมียมเป็นธาตุที่รวมกับคาร์บอนได้ดี ดังนั้นโครงสร้างของเหล็กหล่อผสมโครเมียมจึงเป็นเหมือนเหล็กหล่อขาว โดยจะปรากฏคาร์ไบด์ชนิดยูเทคติก (Eutectic) ซึ่งมีส่วนทำให้เหล็กมีความแข็งสูง แต่จะขาดสมบัติด้านความเหนียวถ้าเหล็กมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก มีเหล็กหล่อโครเมียมสูงหลายประเภทที่สามารถกลึงหรือตัดเจาะได้ โดยเฉพาะชนิดที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ หรือออสเทนไนต์ แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนสูงถึงประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักขึ้นไปการกลึงหรือตัดเจาะจะทำได้ยาก จะตบแต่งได้วิธีเดียว คือ การเจียรนัย

เนื่องจากมีเหล็กหล่อทนความร้อนหลายชนิดที่ผลิตในอุตสาหกรรม การจะเลือกใช้เหล็กหล่อผสมโครเมียมจะต้องพิจารณาความเหมาะสมหลายประการ โดยเฉพาะเรื่องราคา การรับแรงกระแทกในขณะใช้งาน และรูปร่างของชิ้นงานหล่อ เพราะเหล็กหล่อชนิดนี้มีความสามารถในการไหลต่ำกว่าเหล็กชนิดอื่นๆที่กล่าวมา สิ่งทีเหล็กหล่อชนิดนี้เหนือกว่าเหล็กหล่อทนความร้อนประเภทอื่น คือ มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันได้สูงมาก

เหล็กหล่อโครเมียมที่ผลิตใช้อยู่ในอุตสาหกรรมจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียม และโครงสร้างพื้นฐาน คือ

2.2.4.1 ประเภทมาร์เทนซิติก

เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และมีโครเมียมระหว่างร้อยละ 12-28 โดยน้ำหนัก เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นมาร์เทนไซด์ (Martensite) ความแข็งในสภาพหล่อสูง คือ อยู่ในช่วง 800-1,000 HV ความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิปกติประมาณ 600-700 เมกกะปาสคาล ที่อุณหภูมิสูง 900 องศาเซลเซียส ความต้านทานแรงดึงจะลดลงเหลือประมาณ 200-300 เมกกะปาสคาล

2.2.4.2 ประเภทเฟอร์ริติก

เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก และผสมโครเมียมสูงประมาณร้อยละ 30-34 โดยน้ำหนัก โดยที่โครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ ความแข็งจึงไม่สูงมาก อยู่ในช่วง 200-400 HV ในสภาพหล่อ สามารถกลึงหรือตัดเจาะได้สะดวก ความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิปกติอยู่ในช่วง 500-600 เมกกะปาสคาล และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความต้านทานแรงดึงจะลดลงอยู่ในช่วง 90-110 เมกกะปาสคาล

2.2.4.3 ประเภทออสเทนนิติก

เหล็กหล่อประเภทนี้จะมีคาร์บอนประมาณร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนัก และโครเมียมร้อยละ 15-30 โดยน้ำหนัก มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ จำเป็นต้องผสมนิกเกิลประมาณร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก ความมุ่งหมายที่ต้องผสมนิกเกิลในเหล็กประเภทนี้ ก็เพื่อต้องการให้เหล็กมีสมบัติรับแรงกระแทกในขณะใช้งานได้ดีขึ้น และมีอัตราการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง ต่ำกว่า

เหล็กหล่อทนความร้อนประเภทอื่นโดยเฉพาะงานหล่อที่มีลักษณะเป็นแผ่น และมีรูมาก ถ้าเหล็กมีการขยายตัวสูงในขณะที่ใช้งานจะเกิดการแตกร้าว และบิดงอได้ง่าย ทำให้อายุการใช้งานสั้น จำเป็นจะต้องใช้เหล็กหล่อประเภทนี้แม้ว่าราคาจะสูงกว่าก็ตาม ความแข็งของเหล็กหล่ออสเทนนิติกในสภาพหล่อจะอยู่ในช่วง 200-300 HV ความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิปกติประมาณ 500 เมกกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะลดลงมาเหลือประมาณ 200 เมกกะปาสคาล

2.3 การเกิดเฟสซิกม่า (Sigma Phase)

J. W BOYES ได้ทำการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยการใช้งานของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงนั้นสามารถต้านทานการกัดกร่อน และรอยขีดข่วนได้ โดยการใช้งานของเหล็กหล่อโครเมียมสูงนั้นจะใช้ในการผลิตท่อ พาเลท ชิ้นส่วนเตาเผา และหัววาล์ว โดยปริมาณโครเมียม และคาร์บอนที่ต่างกัน มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และการใช้งาน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนทางเคมีที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และการใช้งาน

ร้อยละของโครเมียม	ร้อยละของคาร์บอน	โครงสร้างจุลภาค	การใช้งาน
12-18	2.4-3.6	เกิดยูเทคติกคาร์ไบด์ มีโครงสร้างพื้นเป็นเพอร์ไลต์ (Perlite)	ใช้งานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
25-29	2.5-2.9	เกิดยูเทคติกคาร์ไบด์ มีโครงสร้างพื้นเป็น ออสเทนไนต์ และมาร์เทนไซด์ หรือเฟอร์ไรต์	ใช้งานที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
27-35	1.0-2.0	เกิดยูเทคติกคาร์ไบด์ มีโครงสร้างพื้นเป็นเพอร์ไรต์	ใช้งานที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส

ที่มา: J. W BOYES (1966)

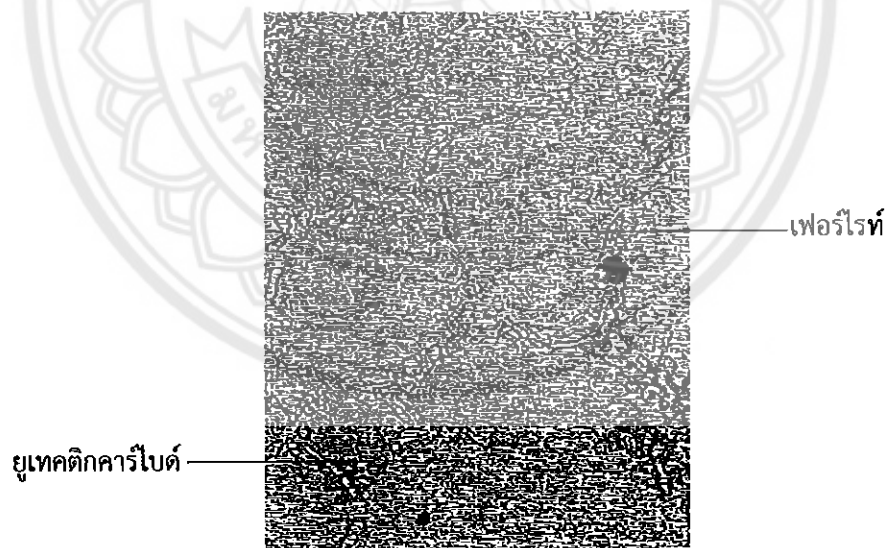
เมื่อศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 25-70 โดยน้ำหนัก มีซิลิคอน แมงกานีส และฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบทางเคมี พบว่าที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส จะเกิดการเกิดการเปราะ (Embrittlement) เมื่ออุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส เกิดเฟสซิกม่า เกิดการแตกร้าว และเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียส จะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเกิดเฟสซิกม่า และค่าความแข็งเมื่ออบที่อุณหภูมิสูง

อุณหภูมิ	400-550 องศาเซลเซียส		625-800 องศาเซลเซียส (เกิดเฟสซิกม่า)		800 องศาเซลเซียส	
องค์ประกอบทางเคมี	โครเมียม 33.0 คาร์บอน 1.1 ซิลิคอน 2.0		โครเมียม 33.0 คาร์บอน 1.1 ซิลิคอน 2.0		โครเมียม 33.1 คาร์บอน 2.1 ซิลิคอน 1.2	
เงื่อนไขการอบ	สภาพหล่อ	475 องศาเซลเซียส 8 วัน	สภาพหล่อ	700 องศาเซลเซียส 16 วัน	สภาพหล่อ	1000 องศาเซลเซียส 1 วัน
ความแข็ง (HV)	300	390	300	490	325	395

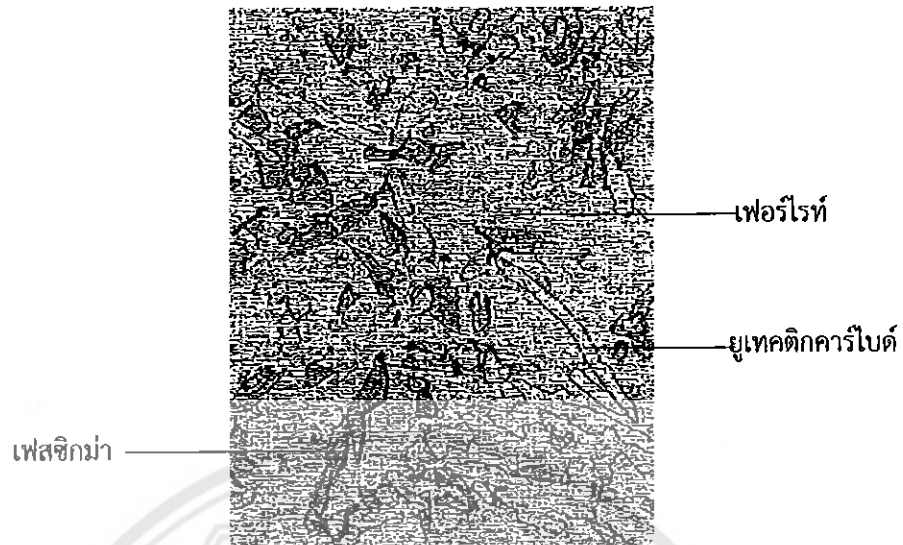
ที่มา: J. W BOYES (1966)

เมื่อนำเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 16 วัน มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อดูการเกิดเฟสซิกม่า จะได้ผลดังรูปที่ 2.1-2.3



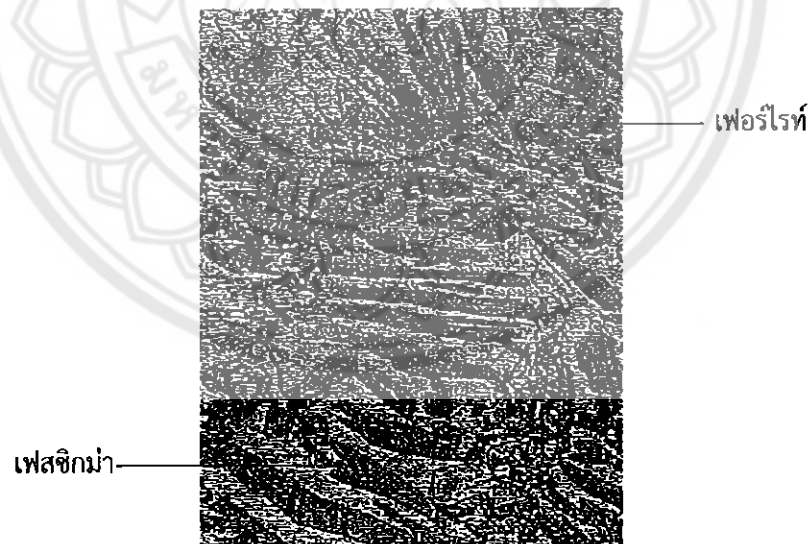
รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เมื่ออบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน

ที่มา: J. W BOYES (1966)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เมื่ออบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วัน

ที่มา: J. W BOYES (1966)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เมื่ออบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 วัน

ที่มา: J. W BOYES (1966)

จากรูปการเกิดเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงโดยมีโครเมียมร้อยละ 34.7 คาร์บอนร้อยละ 1.1 และซิลิคอนร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก เมื่ออบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2, 4 และ 16 วันตามลำดับ พบว่าเมื่อผ่านการอบไป 2 วัน แสดงดังรูปที่ 2.1 จะมีโครงสร้างของยูเทคติกคาร์ไบด์ และเฟอร์ไรท์ เมื่อผ่านการอบ 4 วัน แสดงดังรูปที่ 2.2 เฟอร์ไรท์ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ยูเทคติกคาร์ไบด์เปลี่ยนเป็นเฟสซิกม่า และเมื่อผ่านการอบไป 16 วัน แสดงดังรูปที่ 2.3 เฟอร์ไรท์ไม่เปลี่ยนแปลง แต่เฟสซิกม่ามีขนาดใหญ่ขึ้น และมีปริมาณมากขึ้นด้วย

2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope : OM)

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ใช้ขยายขอบเขตของการมองเห็นอีกชนิดหนึ่งที่มีมนุษย์สร้างขึ้น ใช้สำหรับส่องดูวัตถุเล็กๆ ให้เห็นชัดขึ้น กล้องจุลทรรศน์แบบแสง คือ กล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงใช้ส่องให้เห็นวัตถุ ขยายใหญ่กว่าเดิมได้อย่างมากที่สุดประมาณสองพันเท่า ไม่อาจมีกำลังขยายที่ใหญ่ขึ้นไปกว่านี้อีกได้ เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นภายในกล้องจุลทรรศน์เป็นภาพที่เกิดจากคลื่นแสง ซึ่งมีขีดจำกัดขึ้นกับขนาดของภาพกับช่วงคลื่นของแสง ถ้าภาพมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับช่วงคลื่นของแสง ก็จะไม่อาจส่องขยายภาพให้เห็นใหญ่มากๆ ได้ แสดงดังรูปที่ 2.4

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ สามารถที่จะช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดได้สูงสุด ในระดับของช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตรเพียงเท่านั้น (หรือที่ดีที่สุดก็อยู่ในช่วงระดับความละเอียด 200-400 นาโนเมตร) (วิรุจน์, 2553)



รูปที่ 2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ที่มา: http://flintstone-flint.blogspot.com/2009/06/blog-post_21.html

2.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในการตรวจสอบ

ในการเตรียมชิ้นงานนี้จะต้องมีผงขัดทำหน้าที่ขัดถูเอาผิวชิ้นงานออกไป จนได้คุณภาพของผิวงานที่เราต้องการ ผงขัดที่มีขนาดละเอียดมาก ๆ จะยิ่งทำให้ผิวชิ้นงานเรียบยิ่งขึ้นเท่านั้น การเตรียมชิ้นงานจะเสร็จสิ้นขึ้นอยู่กับการต้องการผิวชิ้นงานที่ยอมรับได้ การเตรียมชิ้นงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ การขัดระนาบ และละเอียด (Grinding) และการขัดมัน (Polishing)

2.4.1.1 การขัดระนาบ และละเอียด ปกติแล้วในขั้นตอนนี้จะเอาผิวของชิ้นงานที่เสียหายหรือแปรรูปไปบ้างในขั้นตอนการตัดออกไป ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้ผิวที่เกิดขึ้นใหม่เกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ก. การขัดระนาบ (Plane Grinding; PG) การขัดระนาบเป็นขั้นตอนแรกในการขัดผิวชิ้นงาน เพื่อปรับแต่งผิวชิ้นงานให้มีระนาบผิวที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยใช้กระดาษทราย

ข. การขัดละเอียด (Fine Grinding; FG) ผิวที่เกิดจากการขัดละเอียดจะมีความเสียหายเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย โดยใช้กระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดต่างกันในการขัด จะเริ่มจากขัดด้วยกระดาษทรายที่มีขนาดละเอียดต่ำไปจนถึงมีขนาดละเอียดสูงเพื่อทำให้ผิวชิ้นงานมีความเสียหายเหลือน้อยที่สุด

2.4.1.2 การขัดมัน มีวิธีการเหมือนกับการขัดละเอียดเพียงแต่ทำหน้าที่ขัดผิวที่เสียหายเนื่องจากขั้นตอนการขัดละเอียดออกไป เพื่อที่จะได้ผิวที่ดีกว่าโดยไม่ทำให้ผิวเกิดความเสียหายขึ้นอีก การขัดมันแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

ก. การขัดมันด้วยผงขัดเพชร (Diamond Polishing; DP) ผงขัดเพชรเป็นผงขัดที่มีอำนาจในการขัดสูง และได้ระนาบที่ดีที่สุด ทำให้ลดเวลาในการขัดลงได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากผงขัดมีความแข็งประมาณ 8000 HV ทำให้สามารถขัดวัสดุได้ทุกชนิด

ข. การขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing; OP) เช่น ผงขัดอะลูมินา เป็นการขัดมันวัสดุที่มีความเหนียว

2.4.2 วิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ขั้นแรก วางชิ้นตรวจสอบบนที่วางของกล้องจุลทรรศน์ ที่วางชิ้นตรวจสอบนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ ทั้งนี้เพื่อการปรับชิ้นตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยังเป็น การปรับระยะชัดของภาพอีกด้วย ขั้นที่สอง เปิดสวิตช์ และปรับความเข้มของแสงตามต้องการ ขั้นที่สาม ปรับระยะชัดของภาพ (Focus) ซึ่งสามารถปรับได้ 2 ระบบ คือ การปรับหยาบ (Coarse- Focus Control) จะสามารถปรับระยะชัดของภาพได้รวดเร็ว แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ แต่สำหรับการปรับละเอียด (Fine Focus Control) นั้น จะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มี ความผิดพลาดเกิดขึ้น ขั้นที่สี่ เมื่อได้ภาพชัดแล้วก็อาจจะมีการถ่ายภาพไว้ในกรณีที่กล้องจุลทรรศน์นั้นสามารถติดตั้งกล้องถ่ายภาพได้ และขั้นสุดท้าย เมื่อต้องการหยุดการทำงาน ให้ปิดสวิตช์ และนำชิ้นตรวจสอบออกจากที่วาง

2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคเฉพาะทางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้าง และสมบัติบางประการของสสาร ค่าความชัดลึก (Spatial Resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งนี้เป็นเพราะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้มีอำนาจแยกแยะได้ถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ภาพที่ได้มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDXS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WED) เพื่อตรวจสอบชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบทางเคมี เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงเคมีอีกด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า จึงเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์ อื่นหลายสาขา แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ที่มา: <http://www.sec.psu.ac.th/sem.html>

2.5.1 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 และบอกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุนั้น ๆ และสามารถบอกเป็นพื้นที่ว่าบริเวณใดมีธาตุใดอยู่บ้าง

2.5.2 ลักษณะของตัวอย่าง และชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบที่มีต้องการสภาพความเป็นสุญญากาศสูง การเตรียมตัวอย่างที่จะศึกษาต้องแห้ง ไม่มีความชื้น และไม่ปนเปื้อนสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น น้ำมัน) เพราะเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้น หรือสารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ชัดขวางเส้นทางของอิเล็กตรอนทำให้ภาพที่ไม่ชัดเจน อีกทั้งโมเลกุลเหล่านี้อาจไปเกาะยังส่วนต่าง ๆ ของกล้อง เช่น ผิวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีอายุการใช้งานสั้นลง

2.5.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในแบบทั่วไป

- ก. อยู่ในสถานะของแข็งทุกลักษณะ เช่น เป็นผง เป็นแผ่น เป็นแท่ง ฯลฯ
- ข. ถ้ามีขนาดใหญ่ต้องตัดส่วนที่จะดูให้เล็กอยู่ที่ประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ค. ต้องแห้งไม่มีความชื้น ไม่มีการระเหยของสารใด ๆ และไม่มีการฟุ้งกระจายของตัวอย่าง
- ง. ถ้าตัวอย่างมีการนำไฟฟ้าจะสามารถนำเข้าเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดูได้เลย

2.5.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในแบบตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า

- ก. โดยทั่วไปจะเหมือนการเตรียมตัวอย่างแบบทั่วไป
- ข. ต้องมีการเคลือบทองจึงจะสามารถนำเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้
- ค. การใช้งานในระบบนี้จะใช้ได้ยากกว่าแบบปกติ และเสียเวลามากกว่าแบบปกติดังนั้นจึงสามารถทำให้ได้บางกรณีเท่านั้น

การเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าบาง ๆ (ประมาณ 100 อังสตรอม) ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง ทองผสมแพลทินัม และคาร์บอน การเคลือบด้วยทอง หรือทอง

ผสมแพลทินัมจะให้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน แต่จะทำให้ข้อมูลทางเคมีของเทคนิค EDXS บิดเบือนไปได้ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

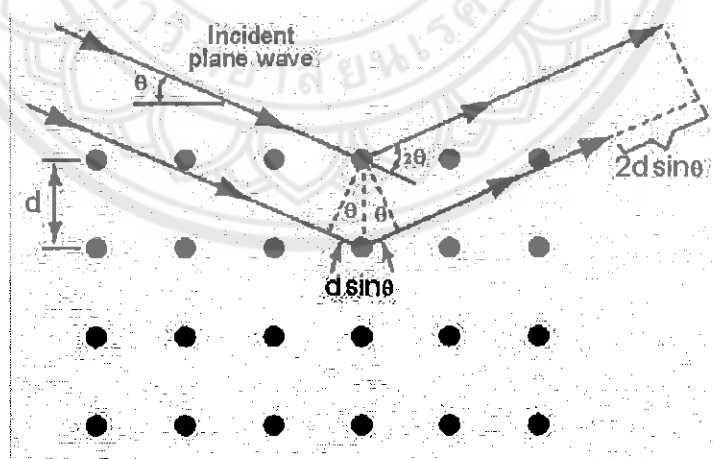
สำหรับตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจไม่ต้องทำการเคลือบได้ โดยเลือกให้ความต่างศักย์น้อยๆ (ต่ำกว่า 3 กิโลโวลต์) ซึ่งภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะไม่เกิดการสะสมประจุที่ผิว (Charging) เนื่องจากปริมาณกระแสเข้าให้เท่ากับกระแสออก หรือเสี่ยงไปใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบสุญญากาศต่ำแทน (บัญชา และศุภกาญจน์, 2554)

2.6 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบผลึกที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

2.6.1 หลักการ และวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึก คือ วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไป ขึ้นกับธรรมชาติของผลึก ในปี ค.ศ. 1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ เท่ากับมุมตกกระทบ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Bragg's Law

ที่มา: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/Picture_XRD2.htm

2.6.2 สมบัติเฉพาะของเครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกโทมิเตอร์

2.6.2.1 สามารถวิเคราะห์วัสดุว่ามีสารประกอบชนิดใดบ้าง

2.6.2.2 สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารผสมหลังทำปฏิกิริยา

2.6.2.3 สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบ

2.6.3 การเตรียมตัวอย่าง

2.6.3.1 การเตรียมตัวอย่างแบบมาตรฐาน กรณีที่มีตัวอย่างในปริมาณมาก

ก. นำแผ่นจับยึดชิ้นงานติดกับแผ่นแก้วด้านใดด้านหนึ่งด้วยเทปใส

ข. บดผงตัวอย่างให้มีความละเอียดมากที่สุดผ่านตะแกรง 45 ไมครอน หรือเท่ากับที่บดได้ โรยลงช่องหลุมใส่ชิ้นงานใช้แผ่นแก้วกดตัวอย่างเบาๆ พอประมาณ แล้วปาดตัวอย่างที่เกินทิ้ง จากนั้นนำฝาหลังปิดเข้ากับที่จับยึดชิ้นงาน

ค. แยกเทปใสที่ยึดแผ่นแก้วออก แล้วนำแผ่นจับยึดชิ้นงานเสียบเข้าแกนกับยึดตัวอย่างที่เครื่อง ระวังอย่าให้นิ้วโดนบริเวณที่มีตัวอย่าง

2.6.3.2 การเตรียมตัวอย่างที่มีปริมาณน้อย

ก. ทาจารบี (Super Grease) ลงบนแผ่นสไลด์บางๆ

ข. โรยผงตัวอย่างลงบนสไลด์ แล้วใช้นิ้วมือเคาะด้านข้างเพื่อให้ตัวอย่างกระจายทั่วบริเวณที่ทาจารบี

ค. ใช้แผ่นสไลด์ตัดแนวตัวอย่างให้เป็นเส้นตรง แล้วนำแผ่นตัวอย่างเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่างที่เครื่อง

2.6.3.3 การเตรียมตัวอย่างที่เป็นชิ้น

ก. ตัดตัวอย่างใหม่ขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร

ข. ใช้ด้านหน้าที่ยเรียบที่สุดเสียบเข้ากับแกนยึดตัวอย่างได้เลย

2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

การทดสอบความแข็ง เป็นการวัดความต้านทานต่อรอยกด รอยขีดขีด หรือการแปรรูปถาวร (Plastic Deformation) ของวัสดุ ซึ่งความแข็งของวัสดุขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างพันธะ มีวิธีการทดสอบหลายวิธีที่นิยมเช่น บริเนลล์ (Brinell Hardness Test) ร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) วิคเกอร์ (Vicker Hardness Test) และนูบ (Knoop Hardness Tester) เป็นต้น วิธีการทั้งหลายนี้นิยมใช้กันทั่วไปในการทดสอบความแข็งทางวิศวกรรม และแต่ละวิธีมีกฎพื้นฐานเดียวกัน คือ ความแข็งวัดจากรอยกดที่เกิดขึ้นด้วยการให้น้ำหนักกดลงบนหัวกดที่ผิวของวัสดุในช่วงเวลาจำกัด

2.7.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)

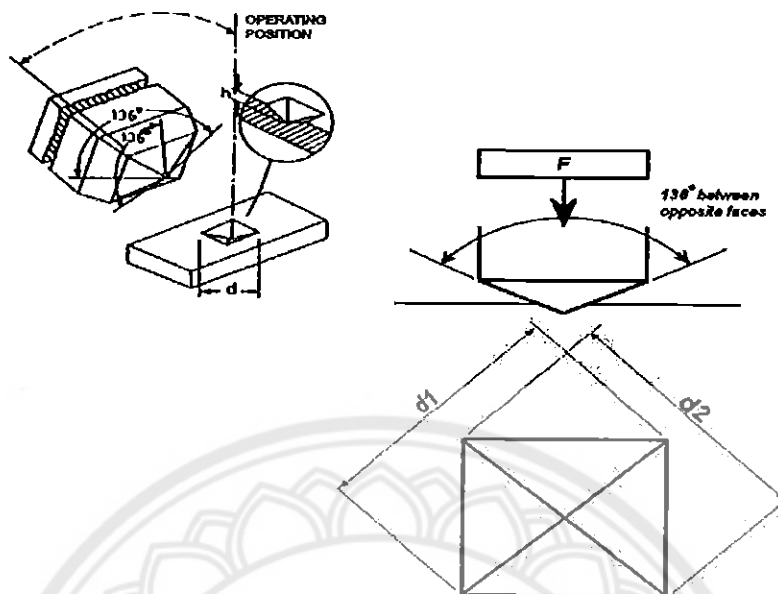
วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือลูกบอลคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภายใต้ภาระ 3,000 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุที่อ่อนสามารถลดภาระที่ 1,500 กิโลกรัมแรง หรือ 500 กิโลกรัมแรง เพื่อหลีกเลี่ยงรอยกดที่มากเกินไป ปกติจะคงภาระไว้ 10 –15 วินาที ในกรณีเหล็กหล่อ และเหล็กกล้า และในกรณีโลหะอื่น ๆ อย่างน้อย 30 วินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เหลืออยู่บนวัสดุทดสอบจะถูกวัดโดยกล้องขยายกำลังต่ำ ค่าความแข็งคำนวณจากการหารภาระที่ใช้ด้วยพื้นที่ผิวของรอยกด

2.7.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hard Test)

การทดสอบความแข็งแบบนี้นิยมใช้มากในงานอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีทดสอบที่ทำได้รวดเร็ว เนื่องจากสามารถอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงทันที จากเครื่องทดสอบไม่ต้องเสียเวลาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดเหมือนกับวิธีบริเนลล์ หรือวิกเกอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ทดสอบชิ้นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า และแข็งกว่าได้ การทดสอบความแข็งของร็อคเวลล์นี้ สามารถใช้ทดสอบความแข็งของโลหะตั้งแต่อ่อน จนกระทั่งแข็งมากได้ เพราะมีสเกลความแข็งร็อคเวลล์ให้เลือกใช้หลายสเกล แต่ละสเกลก็เหมาะสมสำหรับโลหะแต่ละชนิด โดยใช้หัวกด และขนาดแรงกดทดสอบต่างกัน

2.7.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Macrohardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบนี้นิยมใช้กันมาก เพราะเป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่มาตรฐานและสามารถกำหนดค่าความแข็งของวัสดุได้ถูกต้อง เหมาะสำหรับใช้วัดความแข็งของวัสดุหรือโลหะอ่อนจนกระทั่งแข็งมากได้ การทดสอบความแข็งวิกเกอร์นี้ใช้หัวกดเพชรปลายเป็นรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมุมยอด 136 องศา กดลงบนผิววัสดุที่เรียบ แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยใช้น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 1-120 กิโลกรัมแรง ค่าวิกเกอร์ที่ได้จะแทนด้วยสัญลักษณ์ HV มีหน่วยเป็นกิโลกรัมแรงต่อพื้นที่รอยกด การหาค่าความแข็งวัดเส้นทแยงมุมของรอยกดแล้วนำมาแทนสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.7 หัวกดเพชรปลายเป็นรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมุมยอด 136 องศา และรอยกด
ที่มา: วีระชัย (2550)

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136}{2}}{d^2}$$

(2.1)

F = แรงกด หน่วย กิโลกรัมแรง

d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้งสอง หน่วย มิลลิเมตร

HV = ค่าความแข็งวิกเกอร์

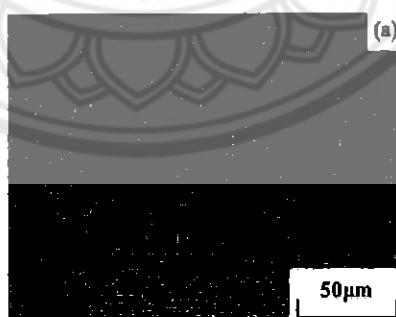
เมื่อหาค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุมได้ จึงคำนวณค่าความแข็งวิกเกอร์ได้จากสูตร แต่จะสะดวกมากขึ้นเมื่อใช้ตาราง การอ่านค่าความแข็งวิกเกอร์อ่านได้ดังนี้ 800 HV₁₀ หมายความว่า ความแข็งวิกเกอร์ 800 โดยใช้แรงกด 10 กิโลกรัมแรง การให้แรงกดที่แตกต่างกันจะให้ค่าความแข็งที่เท่ากันบนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งดีกว่าการเปลี่ยนสเกลด้วยวิธีทดสอบความแข็งแบบอื่น ข้อได้เปรียบของการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ คือ การอ่านค่าที่แม่นยำสูง และหัวกดแบบเดียวสามารถใช้ได้กับทุกประเภทของวัสดุ และวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งที่ผิว ทำให้เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์มีราคาแพงกว่าเครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์ และร็อคเวลล์

2.7.4 การทดสอบความแข็งแบบนูน (Knoop Hardness Test)

วิธีการทดสอบแบบนูนคล้ายกับแบบวิกเกอร์ และบางครั้งใช้เครื่องทดสอบแบบเดียวกันได้ แต่ต่างกันที่การใช้แรง หน่วยที่ใช้ และรูปร่างหัวกด แรงกระทำจะน้อยกว่าการทดสอบแบบวิกเกอร์ โดยแรงที่กระทำค่าน้อยกว่า 4 กิโลกรัมแรง ชิ้นงานบางมากอาจใช้แรงเพียง 25 กรัมแรงเท่านั้น การทดสอบแบบนูนเป็นการทดสอบรูปแบบที่ใหม่กว่าแบบวิกเกอร์

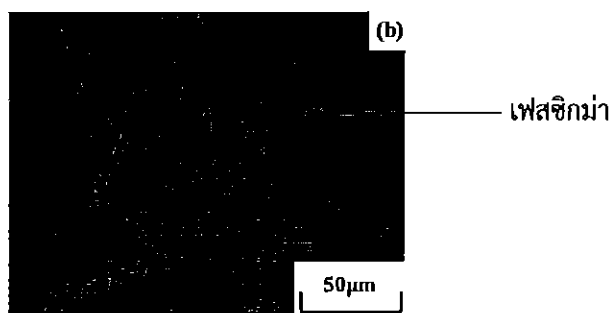
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Takayuki Yamagishi et. al. และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการเกิดการแปรของเฟสซิกม่าต่อพฤติกรรมความล้าของเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียมสูงเฟอร์ริติก โดยมีองค์ประกอบทางเคมี คือ คาร์บอนร้อยละ 0.002 ซิลิคอนร้อยละ 0.09 แมงกานีสร้อยละ 0.31 ฟอสฟอรัสน้อยกว่าร้อยละ 0.001 ซัลเฟอร์ร้อยละ 0.002 โครเมียมร้อยละ 30.66 โมลิบดีนัมร้อยละ 2.11 และไนโตรเจนร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก โดยในการทดลองได้ทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150, 300 และ 500 ชั่วโมง จากรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ไม่ผ่านการอบ จะเกิดอควิแอกเกรน (Equiaxed grain) โดยมีขนาดเกรนประมาณ 88 ไมครอน รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผ่านการอบเป็นเวลา 150 ชั่วโมง จะเริ่มเกิดการตกตะกอนของเฟสซิกม่าบริเวณขอบเกรน รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ผ่านการอบเป็นเวลา 300 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นว่าเฟสซิกม่ามีปริมาณสูงขึ้น ส่งผลต่อการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์แสดงในรูปที่ 2.8 ผลที่ได้คือความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียมสูงเฟอร์ริติกสูงขึ้นเมื่อเวลาในการอบสูงขึ้น และสังเกตจากเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่ผ่านการอบจะเห็นได้ว่าการตกตะกอนของเฟสซิกม่าที่ปริมาณสูงขึ้นตามระยะเวลาของการอบ

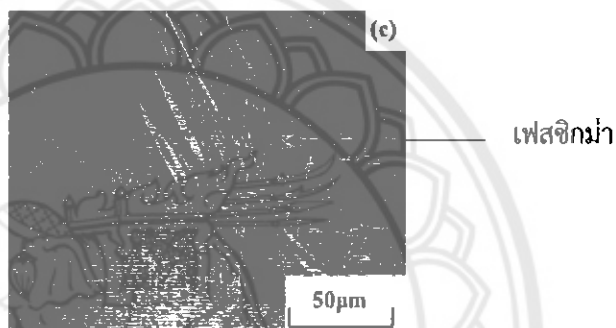


รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ผ่านการอบ

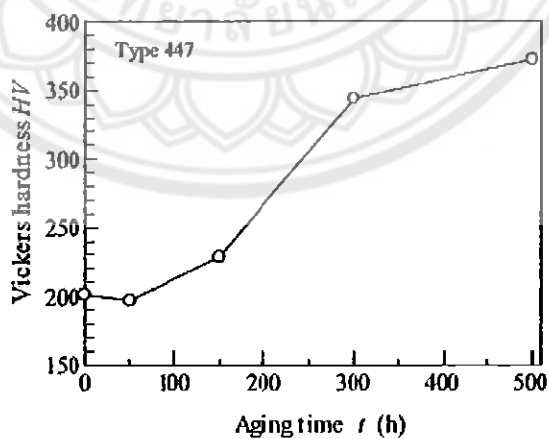
ที่มา: Takayuki (2010)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบเป็นเวลา 150 ชั่วโมง
ที่มา: Takayuki (2010)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบเป็นเวลา 300 ชั่วโมง
ที่มา: Takayuki (2010)



รูปที่ 2.11 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่เวลาการอบแตกต่างกัน

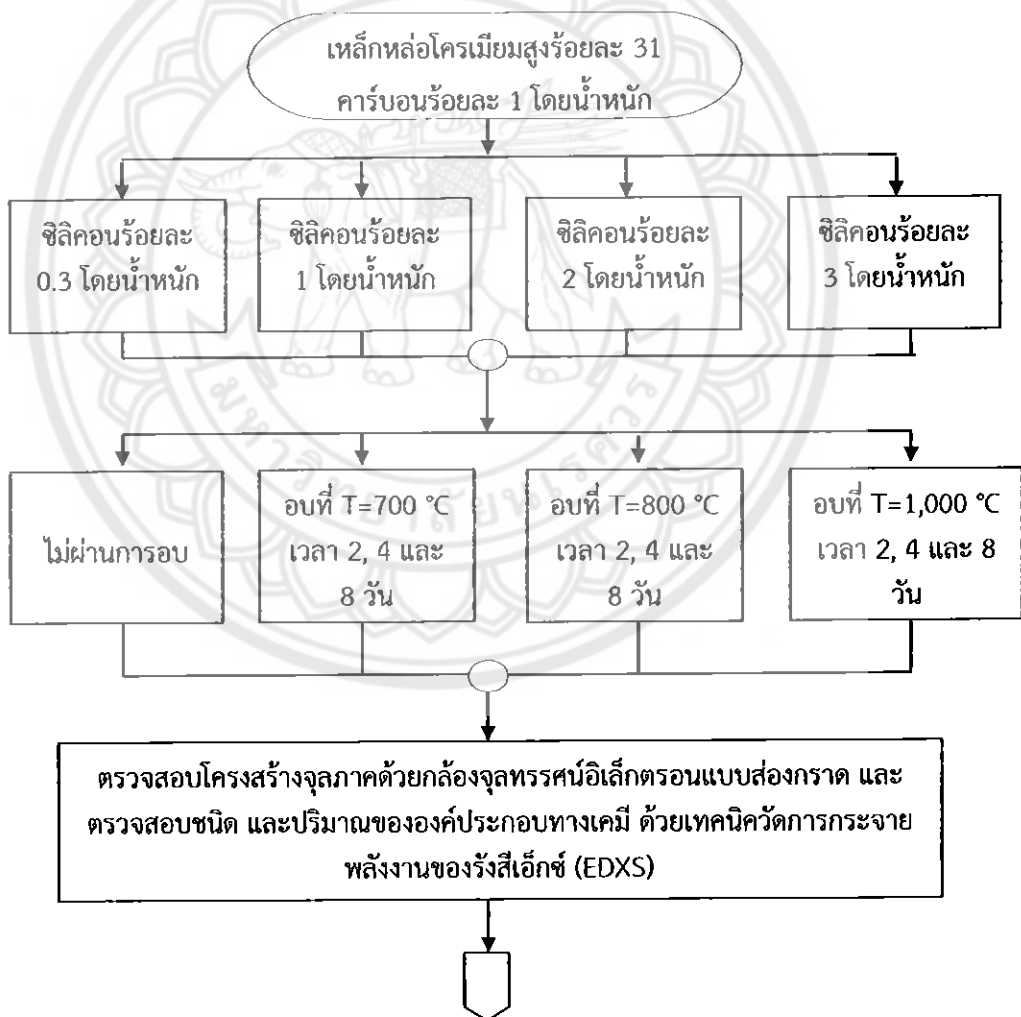
ที่มา: Takayuki (2010)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ

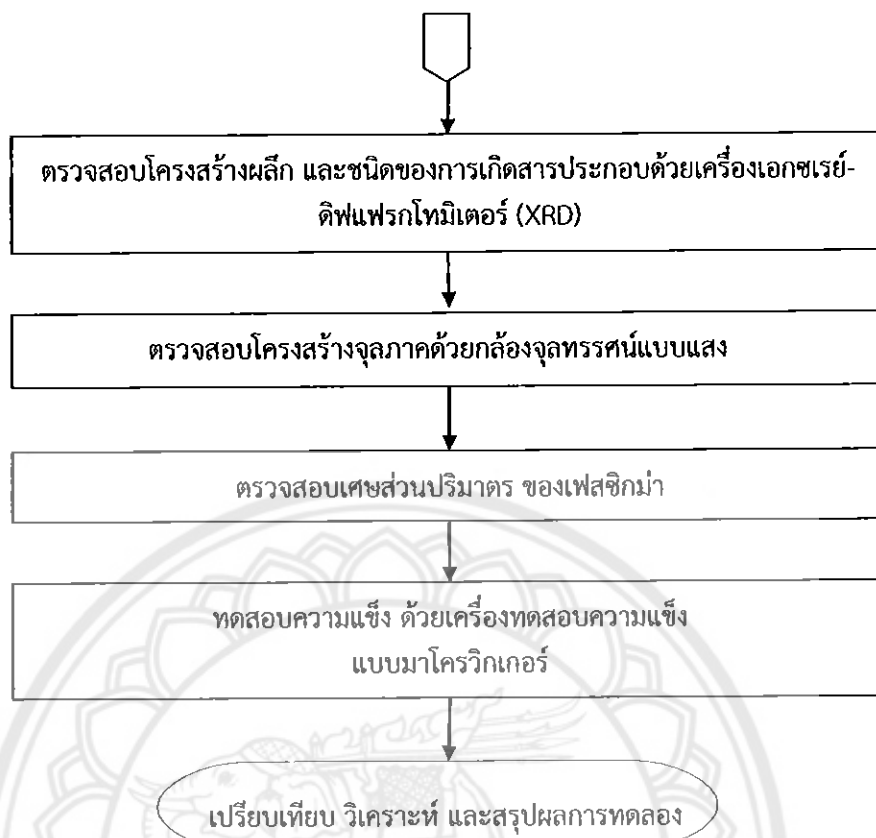
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินโครงการ ซึ่งจะอธิบายถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน วิธีการดำเนินงาน รวมไปถึงวัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในโครงการ จนกระทั่งการวิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ

ในการศึกษาปริมาณซิลิคอนที่มีผลต่อการเกิดเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริต ขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบหล่อทรายขึ้น โดยเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกมีส่วนผสมของโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมซิลิคอนเป็นร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่

3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่ใช้ในการทดลอง

ชิ้นงาน	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	Cr	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu	Fe
0.3%Si	31.59	1.184	0.354	0.252	0.014	0.0019	0.220	0.004	0.013	balance
1%Si	31.01	1.173	1.035	0.202	0.015	0.0013	0.215	0.005	0.014	balance
2%Si	31.94	1.140	2.175	0.265	0.015	0.0012	0.215	0.004	0.016	balance
3%Si	31.54	1.040	2.960	0.223	0.018	0.0052	0.215	0.004	0.017	balance

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เครื่องตัดชิ้นงาน
- ข. เตอบอบอุณหภูมิสูง
- ค. เครื่องขัดโลหะ
- ง. กระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 600 และ 1,000
- จ. ผ้าสักหลาด และผงขัดเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน
- ฉ. สารละลายมูรากามิ (Murakami) (น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร, โซเดียมไฮดรอกไซด์ 7 กรัม, โพแทสเซียม เพอร์ไซยาไนด์ 7 กรัม)

3.2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- ข. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์
- ค. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
- ง. โปรแกรม Image J ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่า
- จ. เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ศึกษา และรวบรวมข้อมูล

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบที่มีผลต่อการเกิดเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกหลังการใช้งานที่อุณหภูมิสูง รวบรวมเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.2 เตรียมชิ้นงานทดสอบพร้อมนำไปอบ

นำชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีส่วนผสมของโครเมียมร้อยละ 31 และคาร์บอนร้อยละ 1 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมของซิลิคอนเป็นร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มาตัดแล้วนำมาอบในเตอบอบอุณหภูมิสูง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบคือ อบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

3.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.3.1 นำชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังการอบมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 600 และ 1,000 ตามลำดับ

3.3.3.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายแล้วมาขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ

3.3.3.3 นำชิ้นงานหลังผ่านการขัดมันมากัดผิวหน้าด้วยสารละลายมูรغامิ ทำโดยการนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด

3.3.3.4 นำชิ้นงานหลังผ่านการกัดกรดแล้ว นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อดู ตำแหน่ง ลักษณะ และรูปร่าง ของโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ ยูเทคติกคาร์ไบด์ และเฟสซิกม่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และถ่ายภาพชิ้นงาน

3.3.3.5 ตรวจสอบชนิด และปริมาณขององค์ประกอบทางเคมี ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ณ ตำแหน่งโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ ยูเทคติกคาร์ไบด์ และเฟสซิกม่า

3.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างผลึก และชนิดของการเกิดสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์

นำชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังการอบที่ผ่านการขัดมันแล้ว มาตัดให้ได้ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงาน แล้วจึงนำไปตรวจสอบชนิดของสารประกอบ และโครงสร้างผลึก ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์

3.3.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

นำชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังการอบที่ผ่านการกัดกรดมูรغامิแล้ว มาตรวจสอบหาเฟสซิกม่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และทำการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า จำนวน 9 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.3.6 ตรวจสอบเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่า

นำภาพโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมาตรวจสอบหาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าด้วยโปรแกรม Image J

3.3.7 ทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความแข็ง

3.3.7.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดมันแล้ว มาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องมาโครวิกเกอร์ โดยวางบนฐานกดแล้วหมุนฐานขึ้นให้ชิ้นงานไปชนกับหัวกดเพชรโดยการทดสอบจะใช้แรงกด 30 กิโลกรัมแรง

3.3.7.2 ปล่อน้ำหนักแล้วจึงเริ่มจับเวลาหลังจากเข็มหยุดนิ่งเป็นเวลา 15 วินาที หลังจากนั้นหยุดการปล่อน้ำหนักทำอย่างนี้ไปจนครบ 10 จุดในแต่ละชิ้นงาน

3.3.7.3 เมื่อทดสอบจำนวนแล้ว นำชิ้นงานไปวัดรอยกด นำมาคำนวณค่าความแข็ง คำนวณค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงาน และพร้อมวาดกราฟ

3.3.8 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีส่วนผสมของโครเมียมร้อยละ 31 และคาร์บอนร้อยละ 1 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมของซิลิกอนเป็นร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อและชิ้นงานที่ผ่านการอบ มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาค และความแข็ง แล้วสรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และจัดทำรูปเล่มรายงาน

15945197

นร.

๗๒๗๑๗

2๕๕4

บทที่ 4

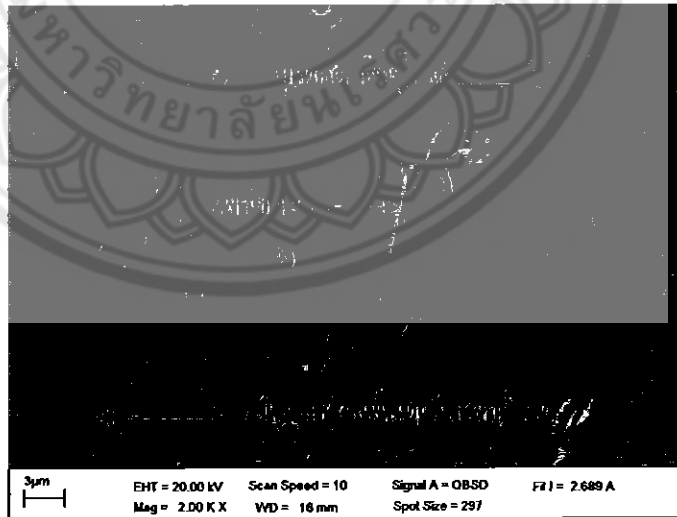
ผลการทดลอง และวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ของเหล็กหล่อโครเมียมสูง เฟอร์ริติกที่มีปริมาณโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ และหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อย่างเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน ในเรื่องของโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึก เศษส่วนปริมาตรของเฟส ซิกม่า และความแข็งของชิ้นงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกในสภาพหล่อ

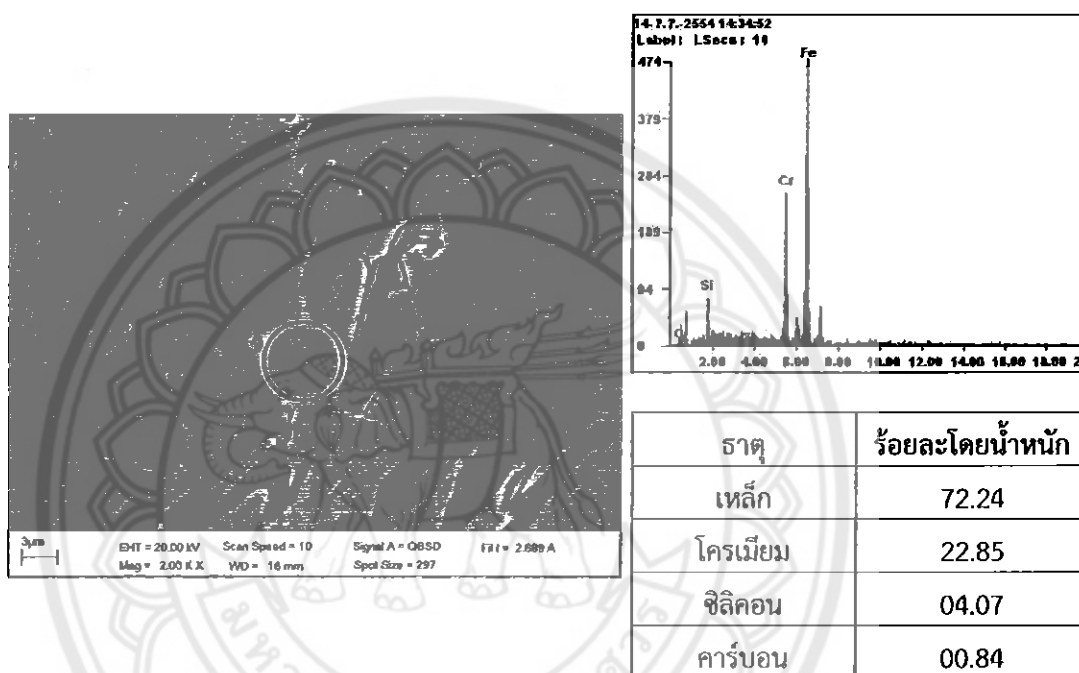
4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ พบว่าที่ตำแหน่งโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรต์มีลักษณะค่อนข้างเรียบ ยูเทคติกคาร์ไบด์มีลักษณะเป็นแผ่น กระจายตัวอยู่บนโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรต์ และเฟสซิกมามีลักษณะเป็นเส้นสีดำอยู่ที่ขอบยูเทคติกคาร์ไบด์ แสดงดังรูปที่ 4.1 และพบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ร้อยละ 0.3, 1 และ 2 ที่อยู่ในสภาพหล่อ มีประเภท และลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบเดียวกัน



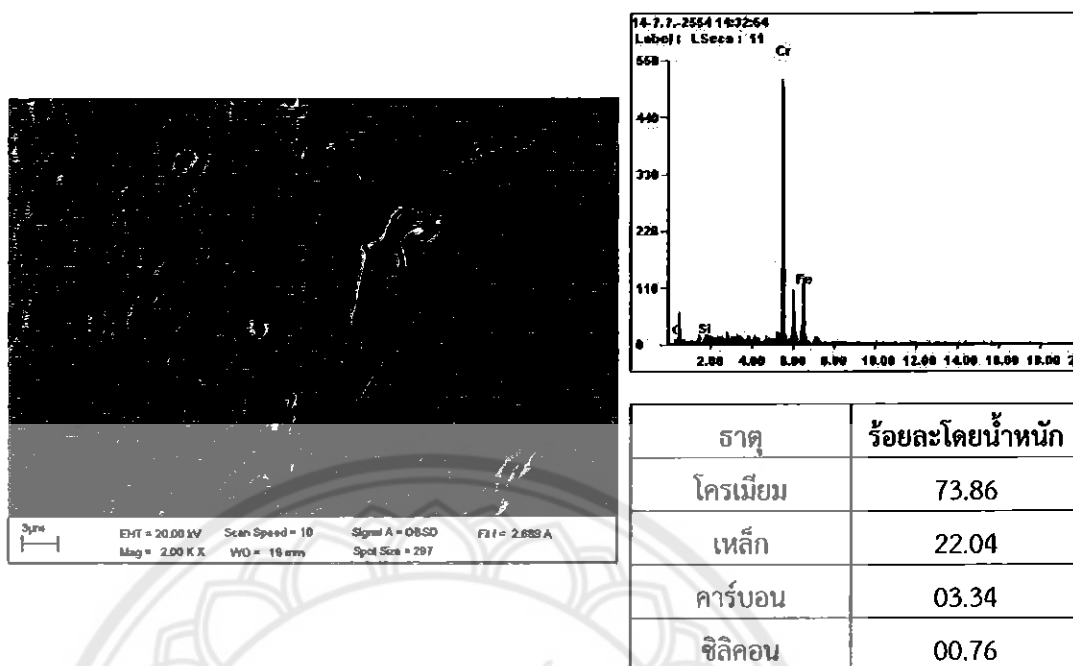
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDXS) ที่ตำแหน่งโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ พบว่าโครงสร้างพื้นที่ประกอบไปด้วยธาตุเหล็กในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ เหล็ก และพบธาตุโครเมียมละลายอยู่ในโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ นอกจากนี้ยังพบซิลิคอน และคาร์บอน ในปริมาณน้อย โดยแสดงตำแหน่ง และปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ดังรูปที่ 4.2



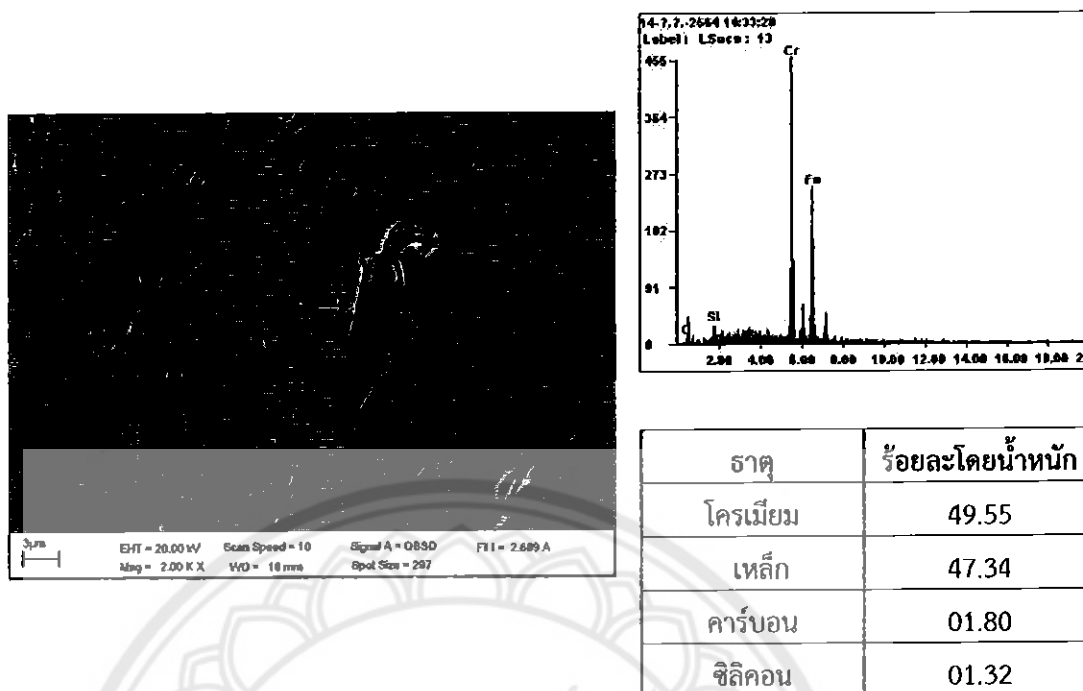
รูปที่ 4.2 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDXS) บริเวณโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

เมื่อศึกษาที่ตำแหน่งยูเทคติกคาร์ไบด์ พบว่ายูเทคติกคาร์ไบด์จะประกอบไปด้วยธาตุโครเมียมในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆ เนื่องจากยูเทคติกคาร์ไบด์มีสารประกอบหลัก คือ โครเมียม และพบธาตุเหล็กละลายอยู่ในยูเทคติกคาร์ไบด์ ส่วนธาตุคาร์บอนที่พบในบริเวณนี้เนื่องจากกระหว่างการแข็งตัวของเฟอร์ไรท์ มีผลทำให้เกิดการแยกตัวของส่วนผสมโดยการผลึกธาตุอื่นออกมารวมตัวกัน และธาตุโครเมียมกับคาร์บอนมักจะรวมตัวกันเกิดเป็นยูเทคติกคาร์ไบด์ ทำให้คาร์บอนปริมาณมากมาละลายอยู่ภายในยูเทคติกคาร์ไบด์ นอกจากนี้ยังพบธาตุซิลิคอนในปริมาณน้อย ซึ่งปริมาณธาตุต่างๆ ที่ตำแหน่งยูเทคติกคาร์ไบด์ แสดงตำแหน่ง และปริมาณขององค์ประกอบทางเคมี ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

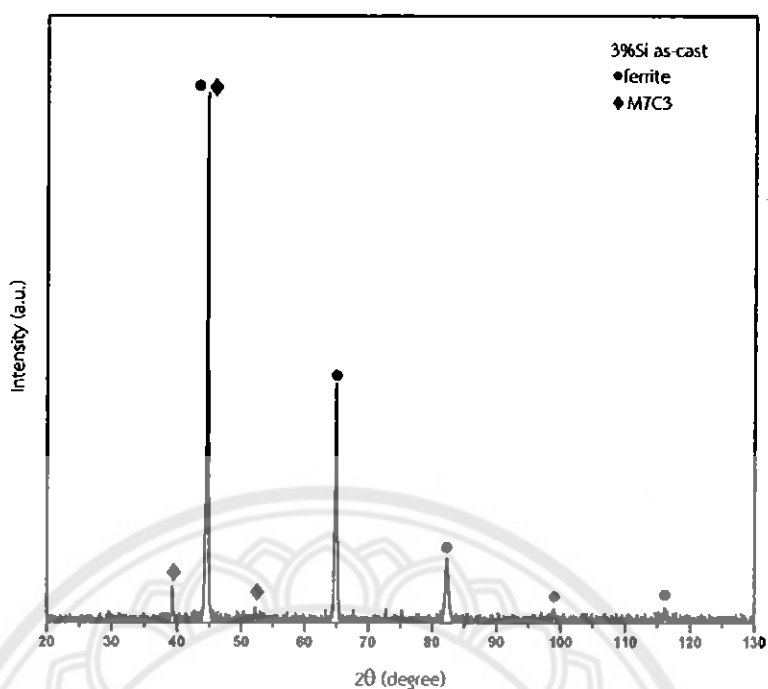
เมื่อศึกษาที่ตำแหน่งเฟสซิกม่า พบว่าเฟสซิกม่าจะประกอบไปด้วยธาตุโครเมียมในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆ และพบธาตุเหล็กละลายอยู่ในเฟสซิกม่า นอกจากนี้ยังพบซิลิคอน และคาร์บอน แต่พบในปริมาณน้อย โดยแสดงตำแหน่ง และปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของเฟสซิกม่าดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียม ร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

4.1.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึก

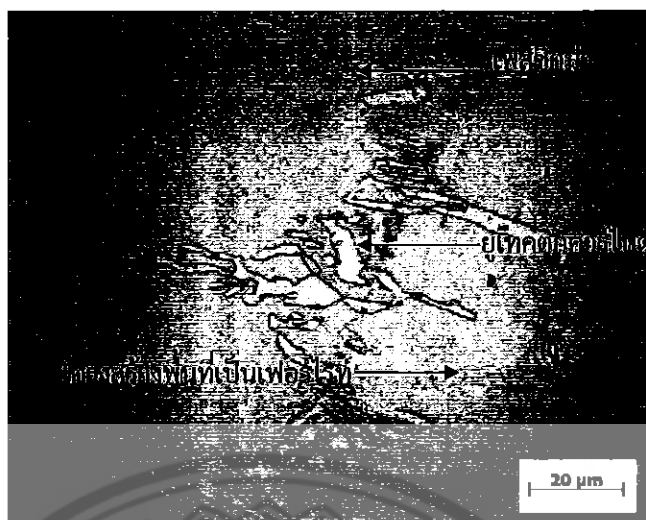
จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อยู่ในสภาพหล่อ พบว่าชิ้นงานปรากฏเฟสเฟอร์ไรท์ และพบยูเทคติกคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ แต่ไม่ปรากฏเฟสซิกม่าในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากมีการเกิดเฟสซิกม่าในปริมาณที่น้อย แสดงดังรูปที่ 4.5 และพบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ร้อยละ 0.3, 1 และ 2 ที่อยู่ในสภาพหล่อ ได้ผลไปในทิศทางเดียวกับชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



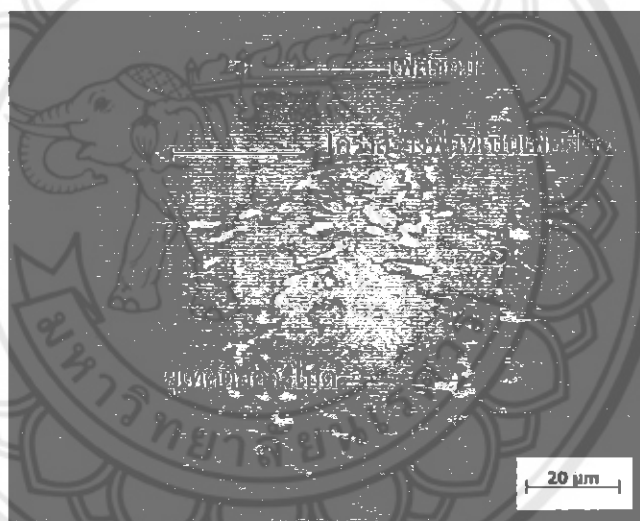
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

4.1.3 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อเมื่อมีการปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิคอน

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อพบว่าโครงสร้างประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ มียูเทคติกคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่บนโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ และมีเฟสซิกม่าเกิดขึ้นตามขอบยูเทคติกคาร์ไบด์เล็กน้อย โดยที่ปริมาณซิลิคอนในชิ้นงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้เฟสซิกมามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย (J.W BOYES, 1966) ในขณะที่โครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 4.6



ก)

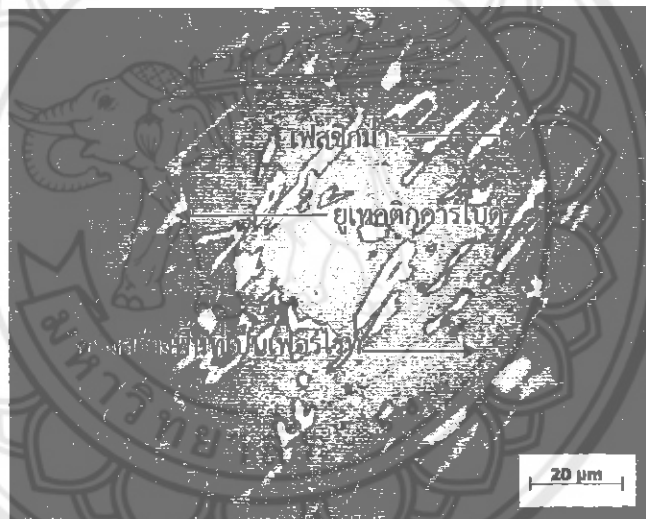


ข)

- รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ
- ก) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก
- ข) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



ค)



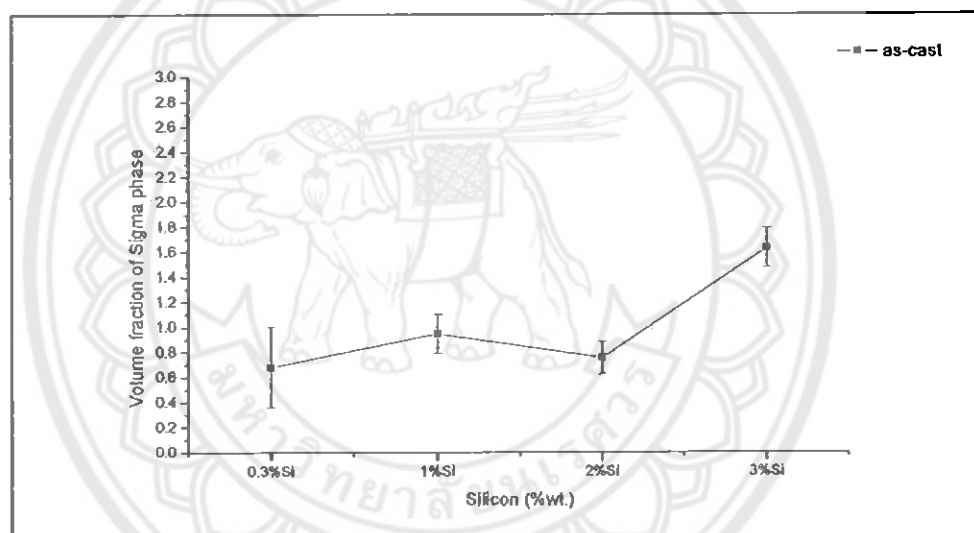
ง)

- รูปที่ 4.6 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ
- ค) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก
- ง) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

4.1.4 ผลการศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่า

เมื่อศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าจากรูปถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ พบว่ามีเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าเฉลี่ยร้อยละ 0.680, 0.948, 0.755 และ 1.632 โดยพื้นที่ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน แต่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าเฉลี่ยที่สูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.7

แต่เนื่องจากชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เกิดเฟสซิกม่ามากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จึงทำให้เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงกว่า ชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

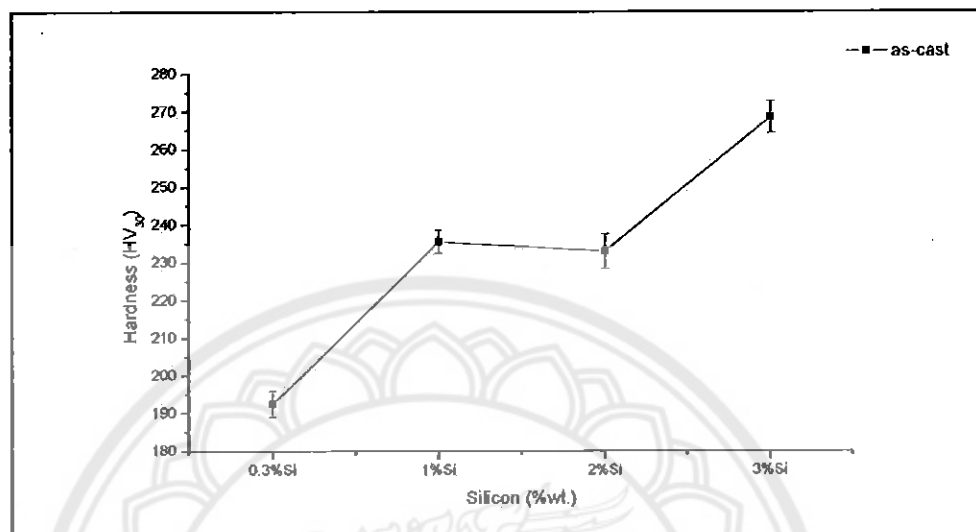


รูปที่ 4.7 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

4.1.5 ผลการวัดค่าความแข็ง

จากการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งเฉลี่ย 192.442, 235.536, 233.005 และ 268.521 HV₃₀ ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเฟสซิกม่ามากขึ้น จึงเป็นผลให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8

แต่ในกรณีชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เล็กน้อยเป็นเพราะชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีการเกิดเฟสซิกม่า มากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



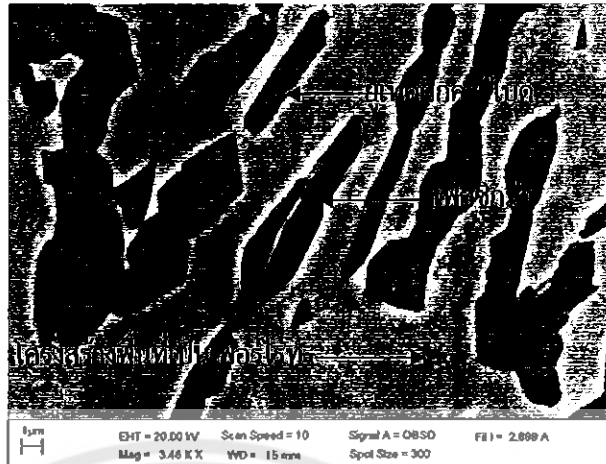
รูปที่ 4.8 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

4.2 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกหลังผ่านกระบวนการอบ

จากการศึกษาชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อย่างเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน มีรายละเอียดดังนี้

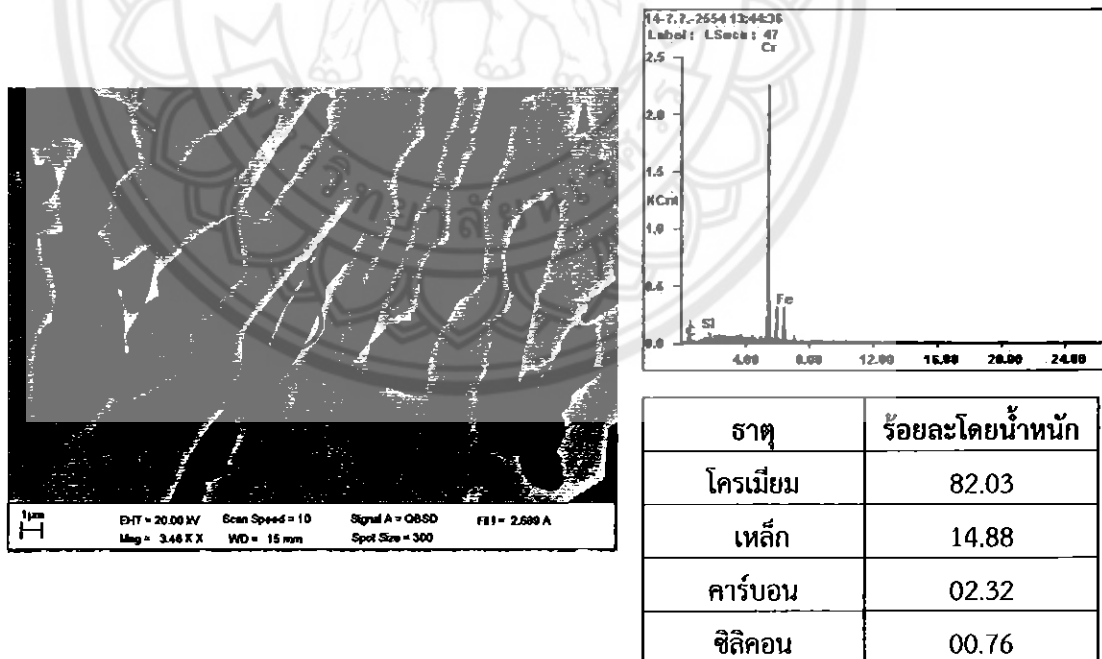
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายสูงของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน พบว่าที่ตำแหน่งโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ และยูเทคติกคาร์ไบด์มีลักษณะเช่นเดียวกับชิ้นงานในสภาพหล่อ และเฟสซิกม่ามีลักษณะเป็นแผ่นอยู่บนยูเทคติกคาร์ไบด์ แสดงดังรูปที่ 4.9 และพบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ร้อยละ 0.3, 1 และ 2 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการอบ มีประเภท และลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบเดียวกัน



รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน

เมื่อศึกษาที่ตำแหน่งเฟสซิกม่า พบว่าเฟสซิกม่าจะประกอบไปด้วยธาตุโครเมียมในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆ และพบธาตุเหล็กละลายอยู่ในเฟสซิกม่า นอกจากนี้ยังพบซิลิคอน และคาร์บอน แต่พบในปริมาณน้อย โดยแสดงตำแหน่ง และปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของเฟสซิกม่าดังรูปที่ 4.10

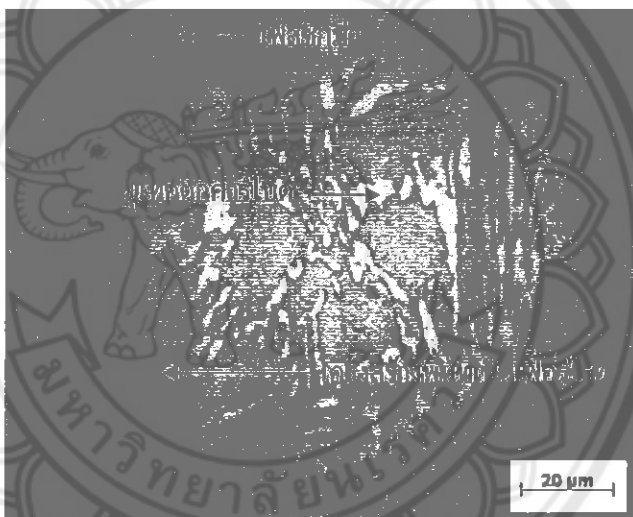


รูปที่ 4.10 การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDXS) บริเวณเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน

4.2.2 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกเมื่อมีการปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิคอน
จากการศึกษาชิ้นงานเมื่อมีการปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิคอน ณ อุณหภูมิในการอบ และ
ระยะเวลาในการอบเดียวกัน พบการเปลี่ยนแปลงโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

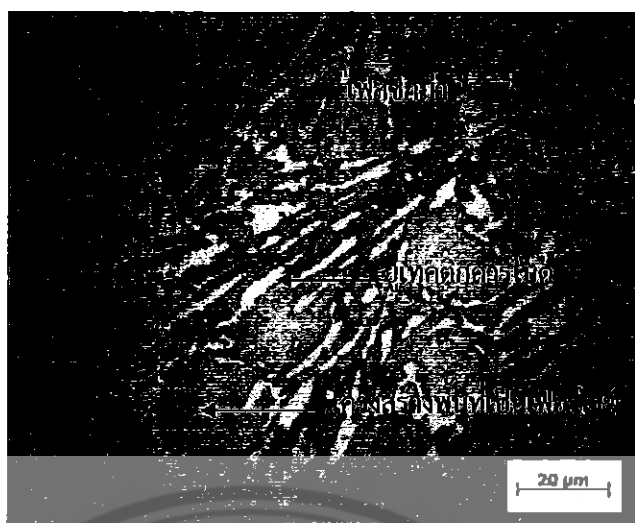
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่างกัน เมื่อ
ผ่านการอบที่อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบต่างๆ พบว่าเกิดเฟสซิคม่าที่ขอบเขตเกรนที่
กระจายตัวอยู่บนโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ เมื่อชิ้นงานมีปริมาณซิลิคอนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เฟส
ซิคม่ามีปริมาณมากขึ้น ในขณะที่โครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (J.W BOYES,
1966) ดังนั้นชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะเกิดเฟสซิคม่ามากกว่าชิ้นงานอื่น
ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ
800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 แสดงดังรูปที่ 4.11



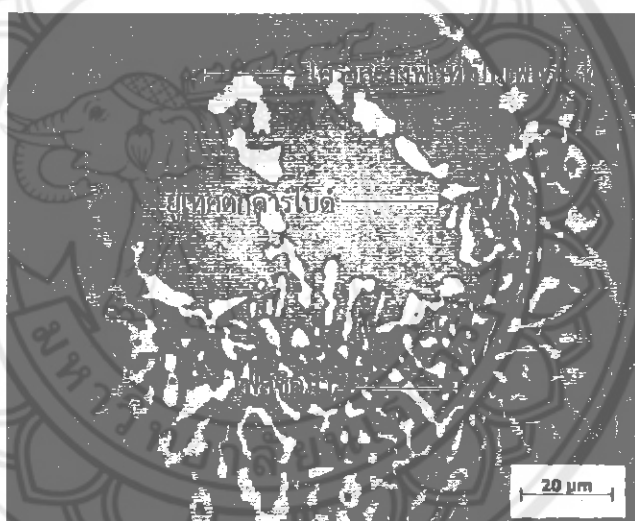
ก)

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ
0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็น
ระยะเวลา 8 วัน

ก) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก

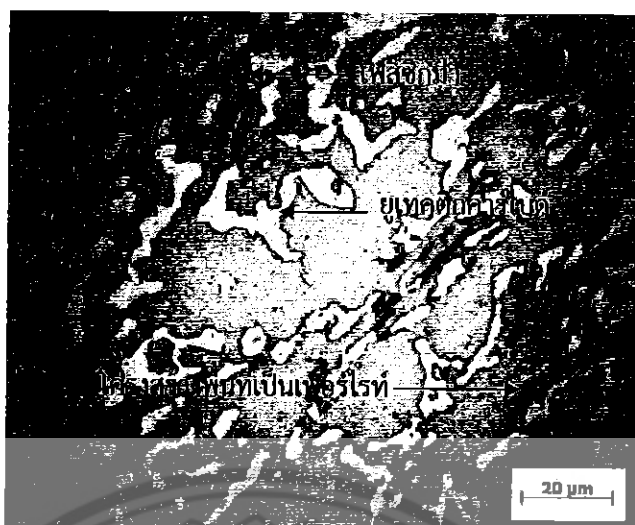


ข)



ค)

- รูปที่ 4.11 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน
- ข) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
- ค) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



ง)

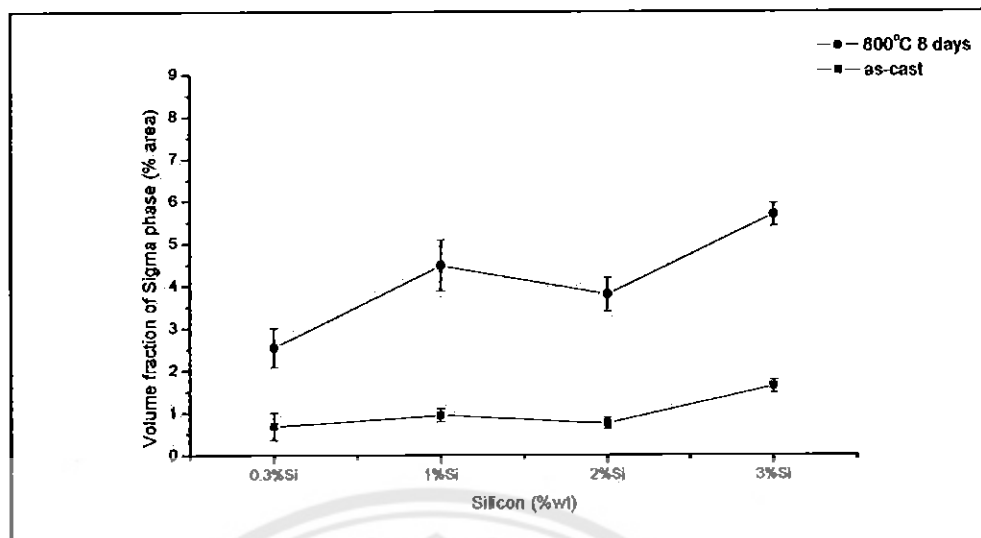
รูปที่ 4.11 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน

ง) ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

4.2.2.2 ผลการศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสฉีกมา

จากการศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสฉีกมาของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่างกันเมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบต่าง ๆ พบว่าค่าเศษส่วนปริมาตรของเฟสฉีกมาเฉลี่ยของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีเศษส่วนปริมาตรของเฟสฉีกมาเฉลี่ยที่สูงที่สุด ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน มีเศษส่วนปริมาตรของเฟสฉีกมาเฉลี่ยร้อยละ 2.549, 4.479, 3.797 และ 5.683 โดยพื้นที่ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ พบว่าชิ้นงานเมื่อผ่านการอบแล้วมีค่าเศษส่วนปริมาตรของเฟสฉีกมาเพิ่มขึ้นในทุกชิ้นงานที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิคอนแสดงดังรูปที่ 4.12

แต่ในกรณีที่ชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เกิดเฟสฉีกมา มากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จึงทำให้มีค่าเศษส่วนปริมาตรของเฟสฉีกมาเฉลี่ยสูงกว่า

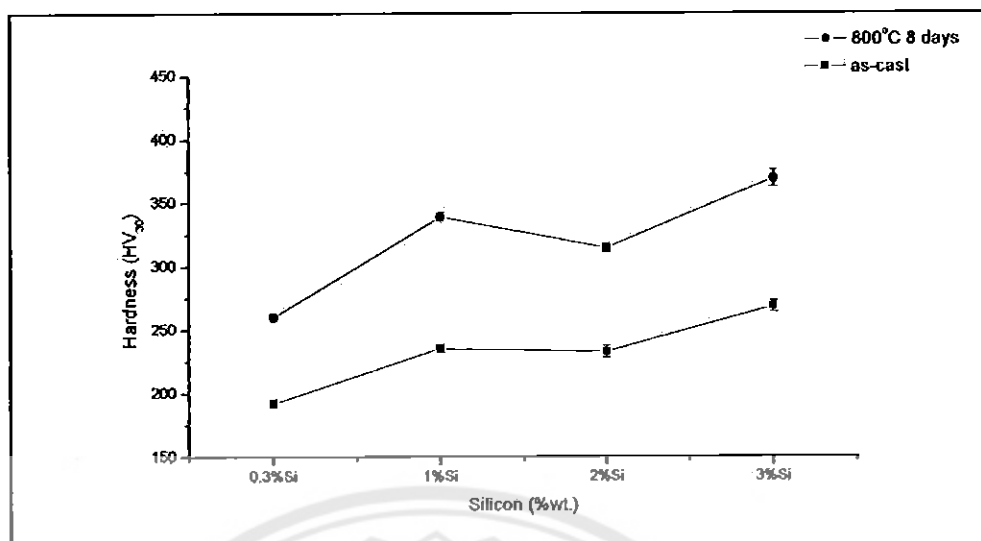


รูปที่ 4.12 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ และเมื่อผ่านการอบที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 วัน

4.2.2.3 ผลการวัดค่าความแข็ง

จากการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่างกันเมื่อผ่านการอบที่ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการอบต่างๆ พบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้น เมื่อปริมาณซิลิคอน เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณซิลิคอนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดเฟสซิกม่ามากขึ้น ส่งผลให้ความแข็ง ของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งที่สูงกว่า ชิ้นงานอื่น ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อ ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน มีค่าความแข็งเฉลี่ย 260.1, 338.9, 314.6 และ 369.3 HV_{30} ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อ พบว่า ชิ้นงานเมื่อผ่านการอบแล้วมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในทุกชิ้นงานที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิคอนแสดง ดังรูปที่ 4.13

แต่ในกรณีชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็ง เฉลี่ยมากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก นั่นเพราะชิ้นงานมีการเกิดเฟสซิกม่า มากกว่า

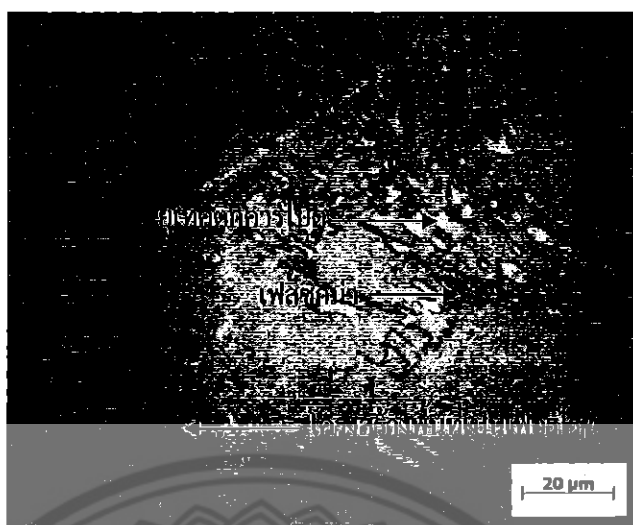


รูปที่ 4.13 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ และเมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 8 วัน

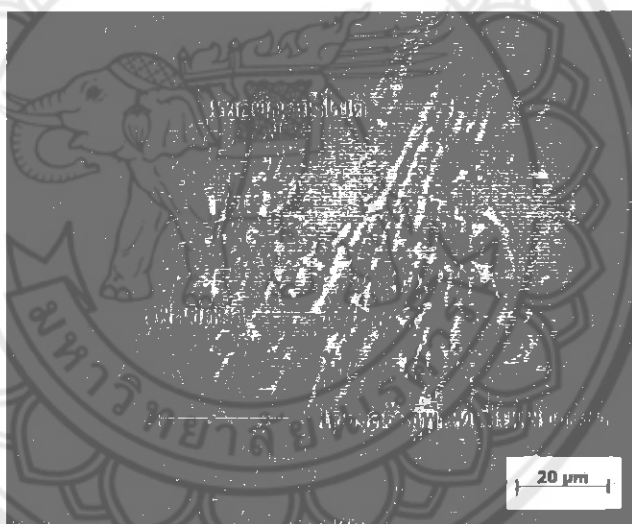
4.2.3 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ จากการศึกษาชิ้นงานที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ เมื่อปริมาณซิลิคอน และระยะเวลาในการอบเดียวกัน พบการเปลี่ยนแปลงโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.3.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่างๆ เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างกัน ที่ระยะเวลาในการอบต่างๆ พบว่าเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส มีการเกิดเฟสซิกม่ามากขึ้น ในขณะที่โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรท์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการแพร่ของอะตอมในของแข็ง ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราเร็วในการแพร่ของอะตอมเพิ่มขึ้นเช่นกัน (มัน, 2549) ดังนั้นเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดเฟสซิกม่ามากขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เฟสซิกม่ามีการเกิดขึ้นน้อยลง นั้นเป็นเพราะว่าอุณหภูมิของการเกิดเฟสซิกม่าจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ยังมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์บนโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ (J.W BOYES, 1966) แต่จะไม่ปรากฏในรูปที่ 4.14 ค) เนื่องจากกรดที่ใช้ในการกัดผิวชิ้นงานนั้นไม่สามารถทำให้มองเห็นตะกอนของคาร์ไบด์ได้ ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน แสดงดังรูปที่ 4.14



ก)

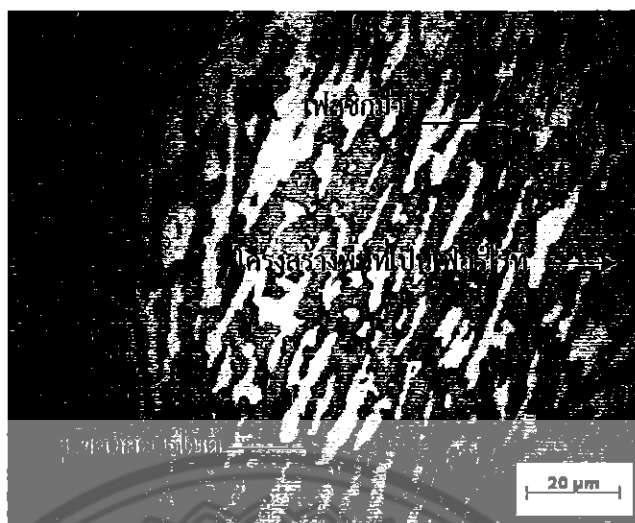


ข)

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อย่างเป็นระยะเวลา 2 วัน

ก) อบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ข) อบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

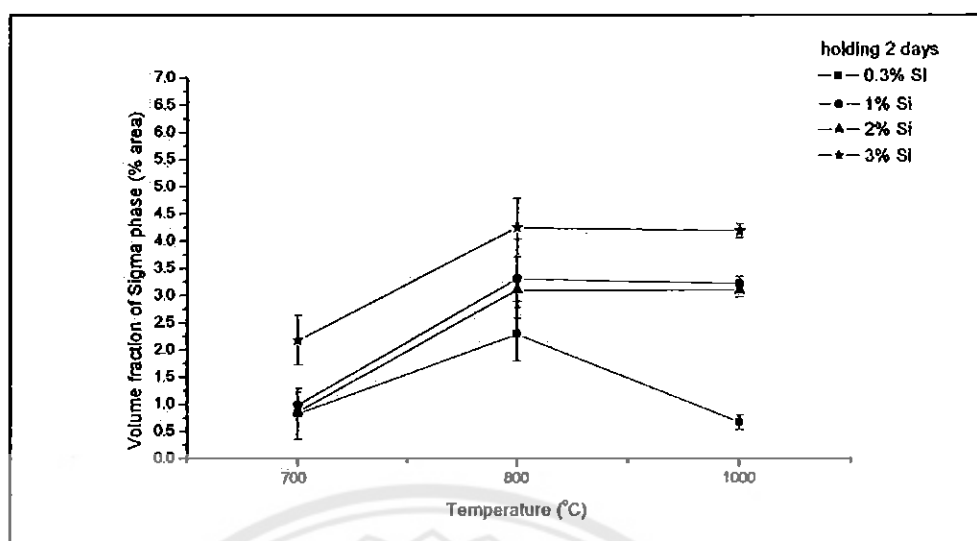


ค)

รูปที่ 4.14 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 ซิลิคอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน
ค.) อบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

4.2.3.2 ผลการศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่า

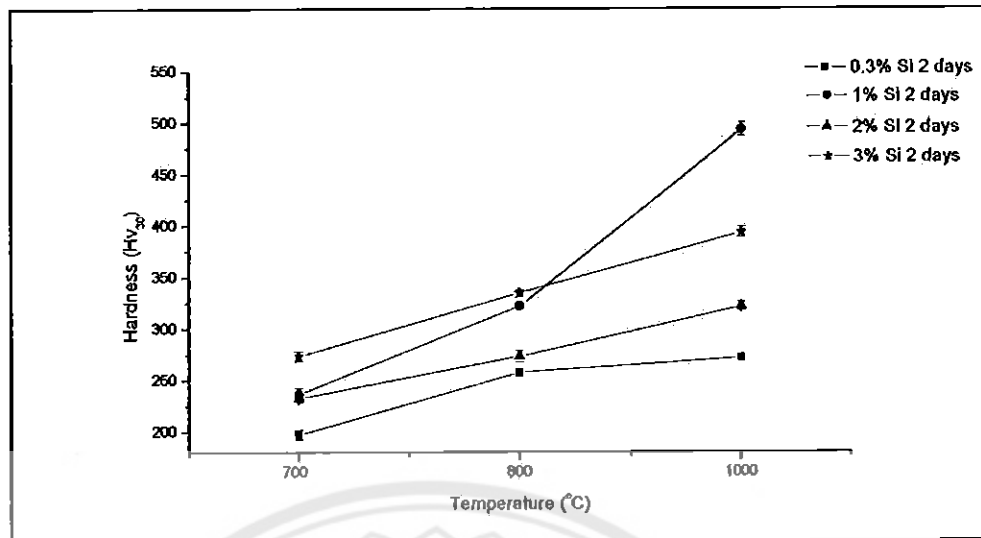
จากการศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่างๆ เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างกัน ที่ระยะเวลาในการอบต่างๆ พบว่าชิ้นงานเมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าเฉลี่ยมีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีซิลิคอนอยู่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน มีเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าเฉลี่ยร้อยละ 0.989, 3.305 และ 3.219 โดยพื้นที่ ตามลำดับ เมื่อปริมาณซิลิคอนเปลี่ยนแปลงเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน

4.2.3.3 ผลการวัดค่าความแข็ง

จากการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่างๆ เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างกัน ที่ระยะเวลาในการอบต่างๆ พบว่าเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด เนื่องมาจากเฟสซิกม่าที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีมากขึ้นเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส แต่เมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีการเกิดเฟสซิกม่าน้อยลง และมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์บนโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ จึงส่งผลให้ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีซิลิคอนอยู่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน มีค่าความแข็งเฉลี่ย 236.666, 321.967 และ 493.479 HV_{30} และเมื่อปริมาณซิลิคอนเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงานก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 16



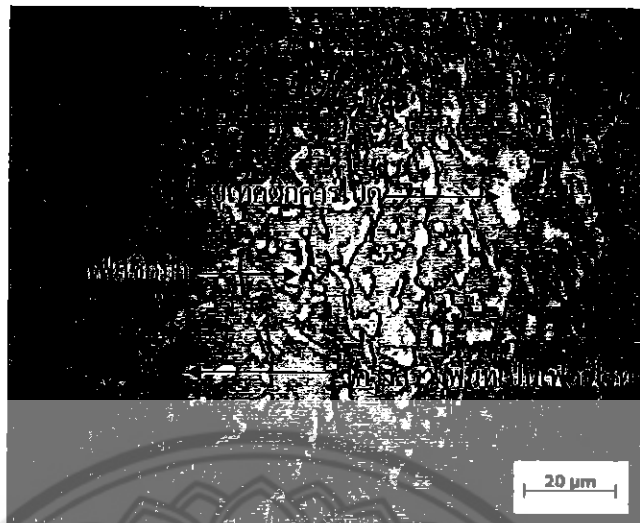
รูปที่ 4.16 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2 วัน

4.2.4 ผลการศึกษาเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกเมื่อมีการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการอบ

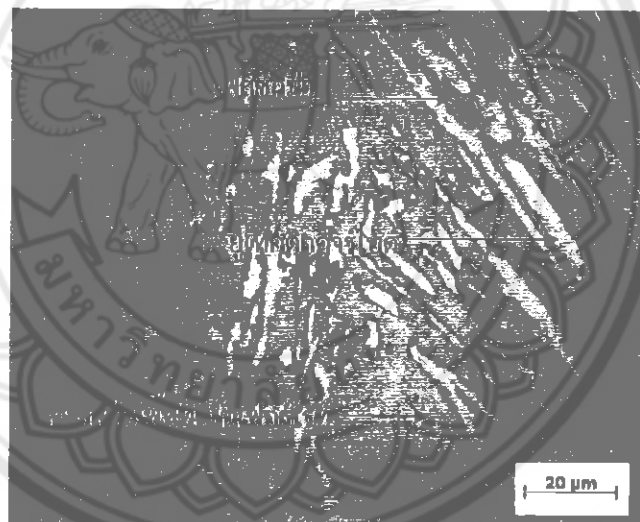
จากการศึกษาชิ้นงานที่มีการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการอบ เมื่อปริมาณซิลิคอน และ อุณหภูมิในการอบเดียวกัน พบการเปลี่ยนแปลงโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่าง ๆ เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ระยะเวลาในการอบต่างกัน พบว่ามีการเกิดเฟสซิกม่ามากขึ้น เมื่อชิ้นงานผ่านการอบเป็นระยะเวลานานขึ้น ในขณะที่โครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการแพร่ความเข้มข้นของอะตอม ณ บริเวณหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของอะตอมจะเพิ่มขึ้นตามเวลา (แมน, 2549) ดังนั้นเมื่อระยะเวลาในการอบนานขึ้นจึงทำให้เกิดเฟสซิกม่ามากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน แสดงดังรูปที่ 4.17



ก)

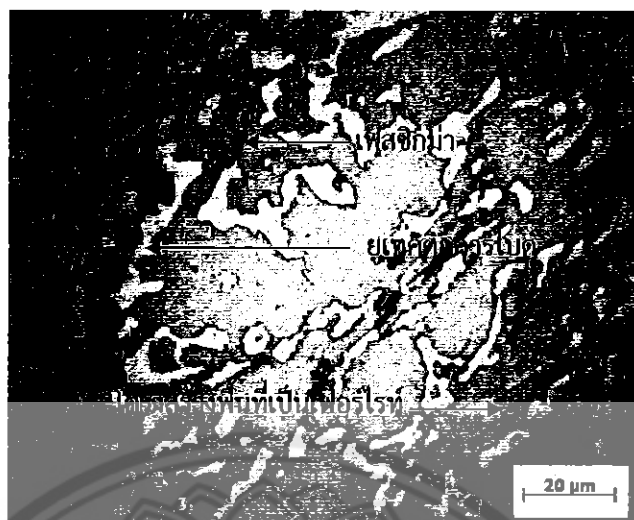


ข)

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิกอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

ก) อบเป็นระยะเวลา 2 วัน

ข) อบเป็นระยะเวลา 4 วัน



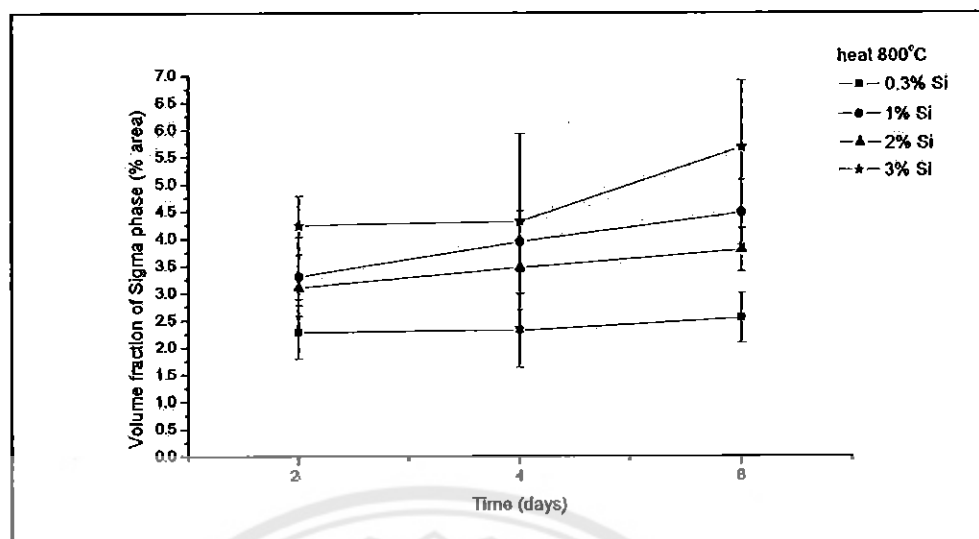
ค)

รูปที่ 4.17 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของเปลือกหอยคาร์บอนร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และ ซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

ค) อบเป็นระยะเวลา 8 วัน

4.2.4.2 ผลการศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิลิกา

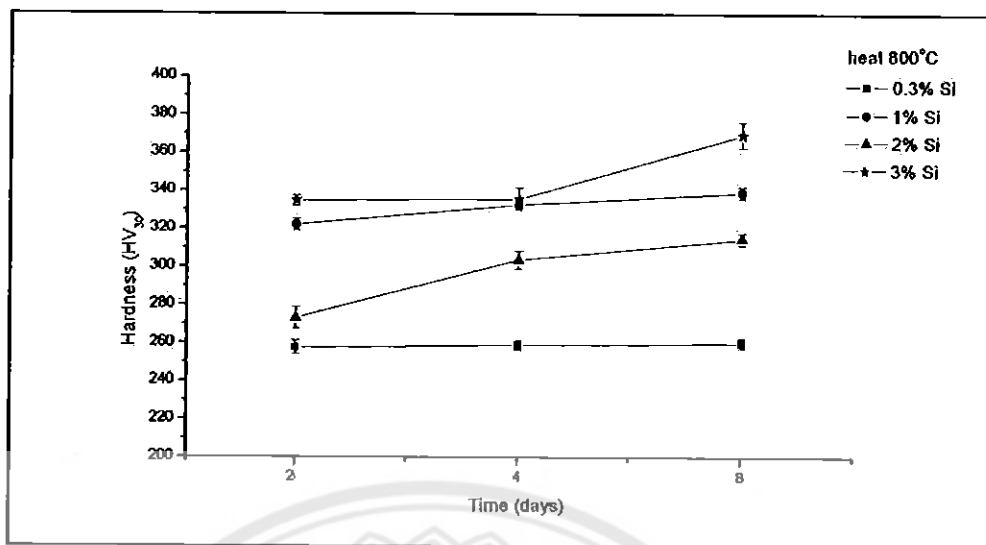
จากการศึกษาเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิลิกาของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่างๆ เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะเวลาในการอบต่างกัน พบว่าเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิลิกาเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการอบเพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 8 วัน มีเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิลิกาเฉลี่ยที่สูงที่สุด ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน มีเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิลิกาเฉลี่ยร้อยละ 4.243, 4.315 และ 5.683 โดยพื้นที่ ตามลำดับ เมื่อปริมาณซิลิคอนเปลี่ยนแปลงเศษส่วนปริมาตรของเฟสซิลิกามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกมาของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

4.2.4.3 ผลการวัดค่าความแข็ง

จากการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนต่าง ๆ เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะเวลาในการอบต่างกัน พบว่าเมื่อชิ้นงานผ่านการอบเป็นระยะเวลานานขึ้น ส่งผลให้มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อชิ้นงานผ่านการอบเป็นระยะเวลานานขึ้นทำให้มีการเกิดเฟสซิกมามากขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 8 วัน มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุด ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่มีซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน มีค่าความแข็งเฉลี่ย 334.66, 335.631 และ 369.277 HV₃₀ ตามลำดับ เมื่อปริมาณซิลิคอนเปลี่ยนไปความแข็งของชิ้นงานก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลของความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมร้อยละ 31 คาร์บอนร้อยละ 1 และซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน



บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข ปัญหา ของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ชิ้นงานในสภาพหล่อพบโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ ยูเทคติกคาร์ไบด์ และเฟสซิกม่า เมื่อชิ้นงานผ่านการอบ โครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อชิ้นงานมีปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นทำให้เฟสซิกม่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

5.1.2 ชิ้นงานที่ผ่านการอบ โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบ โครงสร้างจุลภาคไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงยกเว้นที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส โดยเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดเฟสซิกม่าเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้เฟสซิกม่าลดลง แต่มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ จึงทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

5.1.3 ชิ้นงานที่ผ่านการอบ โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการอบ โครงสร้างจุลภาคไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อชิ้นงานผ่านการอบที่ระยะเวลานานขึ้นทำให้เฟสซิกม่าเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ในการอบชิ้นงานเพื่อศึกษาเฟสซิกม่าสามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และเวลาในการอบได้หลากหลาย แต่ควรใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 600 – 900 องศาเซลเซียส

5.2.2 การทดสอบสมบัติทางกล สามารถทำการทดสอบเพิ่มได้โดยวิธีอื่น ๆ เช่น การทดสอบการคืบ และการทดสอบการสึกหรอ

5.2.3 สามารถปรับเปลี่ยนส่วนผสมของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่ใช้ในการทดลอง

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 จากการศึกษาชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานอื่น จึงควรทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง

5.3.2 การนำชิ้นงานออกจากเตาอบอุณหภูมิสูง อาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานควรใช้ความระมัดระวัง และอุปกรณ์ป้องกันความร้อนทุกครั้งปฏิบัติงาน

5.3.3 เมื่ออบชิ้นงานเสร็จจะใช้คีมหนีบถอดรองชิ้นงานออกมา ถาดรองชิ้นงานอาจแตกในขณะที่หนีบออกมาทำให้ชิ้นงานร่วงใส่ผู้ปฏิบัติงานได้ ดังนั้นควรตรวจเช็คสภาพถาดรองชิ้นงานก่อนใช้งานทุกครั้ง

5.3.4 กรดที่ใช้ในการกัดชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคเป็นกรดที่มีความเข้มข้นสูง และมีกลิ่นแรง ควรใส่ถุงมือยาง และที่ครอบจมูกทุกครั้งเมื่อปฏิบัติงานกัดกรด

5.3.5 ในการตัดชิ้นงานควรยึดจับชิ้นงานให้แน่นทุกครั้ง เนื่องจากเวลายึดจับชิ้นงานไม่แน่นจะทำให้ชิ้นงานเกิดการขยับตัวในขณะที่ตัด อาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้



เอกสารอ้างอิง

- บัญชา ธนบุญสมบัติ และศุภกาญจน์ คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประจุคู่
โลกระดับจุลภาค. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.
มนัส สติรจินดา. (2543). เหล็กหล่อ (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
รองศาสตราจารย์ แมน อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2544) วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ
วีระชัย ลามอ. (2550). ความแข็ง (Hardness). กรมวิทยาศาสตร์ บริการ.
กล้องจุลทรรศน์. สืบค้นเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ.2554 จาก เว็บไซต์ [http://flintstone-
flint.blogspot.com/2009/06/blog-post_21.html](http://flintstone-flint.blogspot.com/2009/06/blog-post_21.html)
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. สืบค้นเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ.2554 จาก เว็บไซต์
<http://www.sec.psu.ac.th/sem.html>
วิรุจน์ บัวงาม. เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
สืบค้นเมื่อวันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ.2554 จากเว็บไซต์ [http://learners.in.th/blog/
wirut/325228](http://learners.in.th/blog/wirut/325228)
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เทคนิคในการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัด. สืบค้นเมื่อวันที่ 18
กันยายน พ.ศ.2554 จากเว็บไซต์ [http://www.mtec.or.th/laboratory/
mech/index.php/knowledge/28-2009-04-20-04-02-05](http://www.mtec.or.th/laboratory/mech/index.php/knowledge/28-2009-04-20-04-02-05)
ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง. X-ray Diffractometer (XRD). สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม พ.ศ.2554
จากเว็บไซต์ http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm
สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 2 กล้องจุลทรรศน์. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ.2554
จากเว็บไซต์ <http://guru.sanook.com/search/กล้องจุลทรรศน์>
สยาม แก้วคำไสย์. (2553) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก. การวิเคราะห์ความเสียหาย และการกัด
กร่อนของโลหะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ.2554 จากเว็บไซต์
<http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/11/8-ferritic-stainless-steel.html>
สิวณัฐ บุญเพิ่ม และวิไลลักษณ์ รอดละม้าย. (2553). การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อ
โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางด้านความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เตรียมโดย
กระบวนการหล่อแบบตั้งเดิม, แบบซูปเปอร์ฮีตต้า และแบบรางเทหล่อเย็น. การศึกษา
ปริญญาโท วน.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก
อภิชาติ ชื่อนาม และอภิญา เวชการ. (2553). การศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีต่อ
โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ A390. การศึกษา
ปริญญาโท วน.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- J.W BOYES, PhD, AIM. (1966). High-chromium cast irons for use at elevated temperatures. Supplied by the British Library "The world's knowledge"
- Takayuki Yamagishia และคณะ. (2010). Effect of σ -phase embrittlement on fatigue behavior in high-chromium ferritic stainless steel.
- Hardness Test, Internet Available (May 2007). สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ.2554 จากเว็บไซต์ http://www.instron.co.th/wa/applications/test_types/hardness/rockwell.aspx
- Hardness Testing, Internet Available (May 2007). สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ.2554 จากเว็บไซต์ <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/>
- Material Hardness, Internet Available (May 2007). สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ.2554 จากเว็บไซต์ http://www.calce.umd.edu/general/Facilities/Hardness_ad_.htm

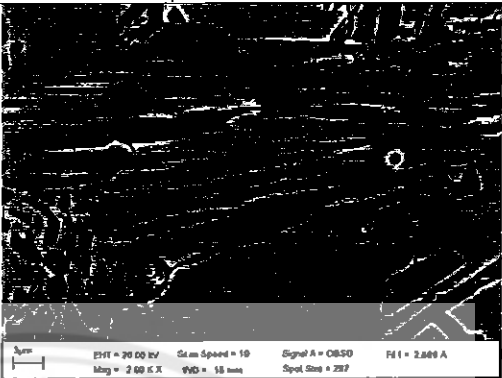
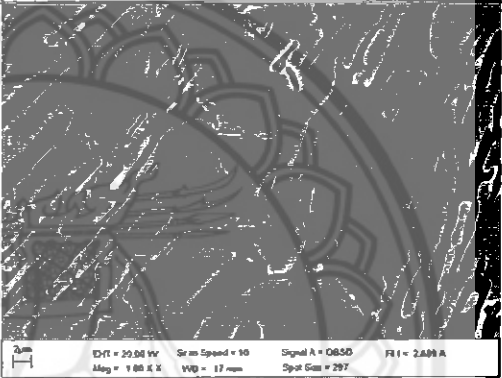
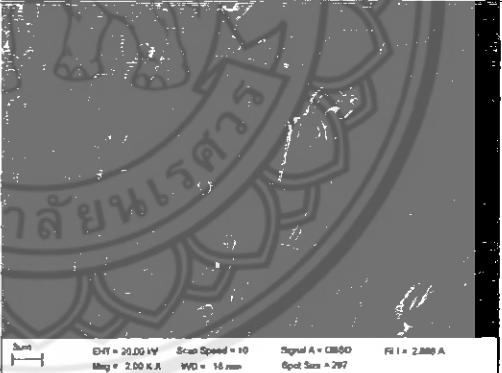




ภาคผนวก ก

โครงสร้างจุดภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังผ่าน
กระบวนการอบ ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
แบบส่องกราด

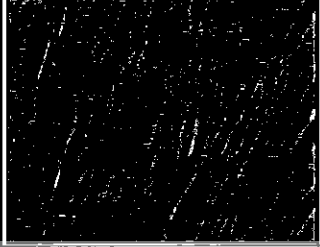
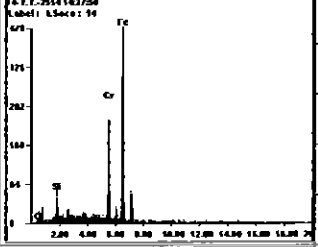
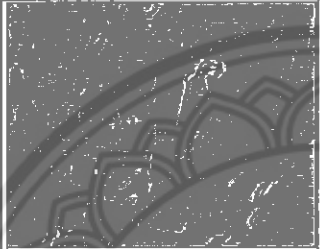
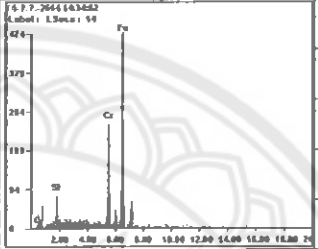
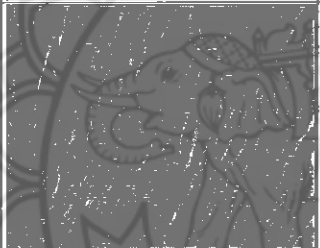
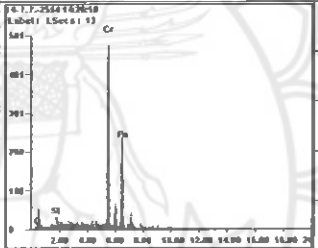
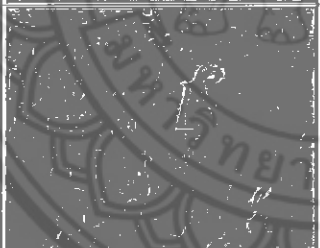
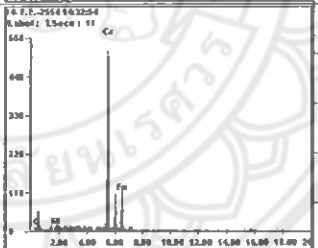
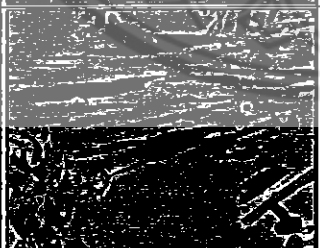
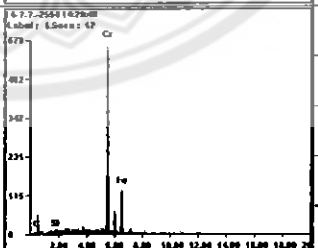
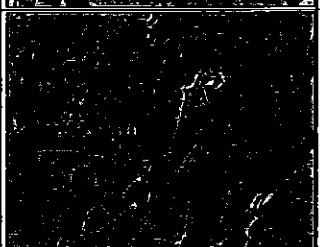
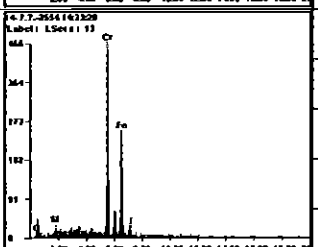
ตารางที่ ก.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกในสภาพหล่อ

ชิ้นงาน	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
<p>ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก</p>	
<p>ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก</p>	
<p>ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก</p>	

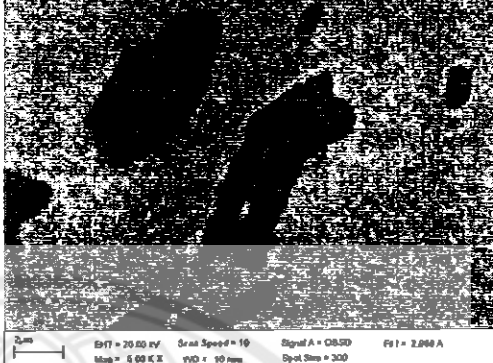
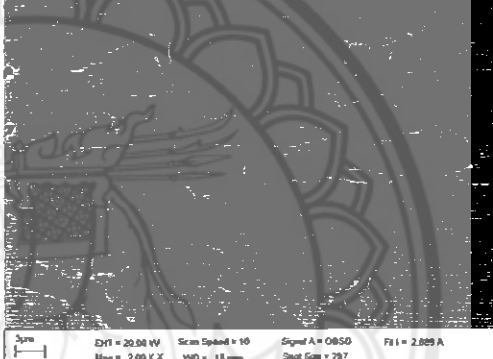
ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ธาตุ ที่บริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟอร์ไรท์ บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ และบริเวณเฟสชิกมาของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ตำแหน่ง	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ		
			ธาตุ	Wt%	At%
โครงสร้าง พื้นที่เป็น เฟอร์ไรท์			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	00.55	02.43
			ซิลิคอน	00.77	01.47
			โครเมียม	24.29	24.95
			เหล็ก	74.40	71.15
ยูเทคติกคาร์- ไบด์			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	00.86	03.77
			ซิลิคอน	01.08	02.02
			โครเมียม	25.03	25.35
			เหล็ก	73.03	68.86
เฟสชิกมา			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	03.24	12.84
			ซิลิคอน	00.30	00.50
			โครเมียม	70.89	64.87
			เหล็ก	25.58	21.79
เฟสชิกมา			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	01.70	07.05
			ซิลิคอน	00.54	00.95
			โครเมียม	72.11	69.11
			เหล็ก	25.65	22.89
เฟสชิกมา			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	02.35	09.62
			ซิลิคอน	00.26	00.46
			โครเมียม	64.71	61.16
			เหล็ก	32.68	28.76
เฟสชิกมา			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	01.11	04.70
			ซิลิคอน	00.72	01.31
			โครเมียม	66.79	65.39
			เหล็ก	31.38	28.60

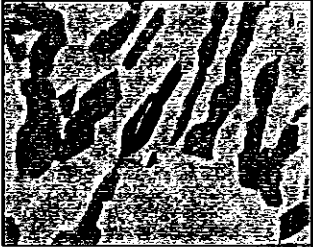
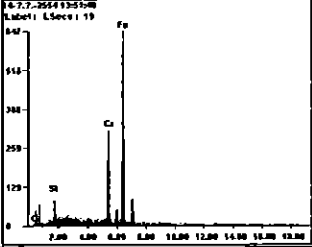
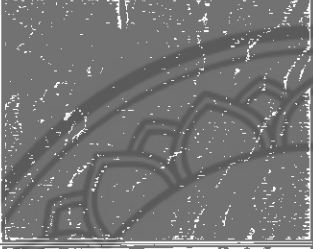
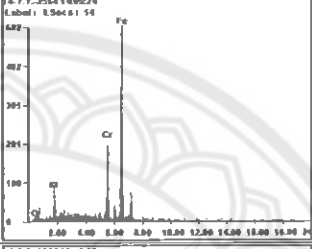

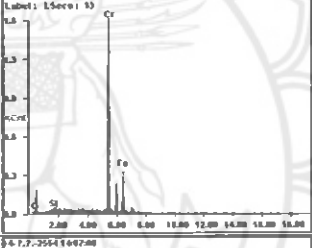

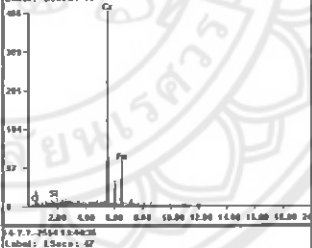
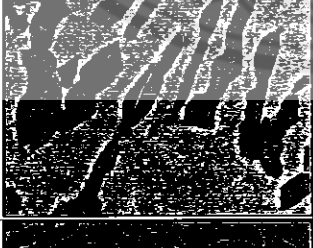
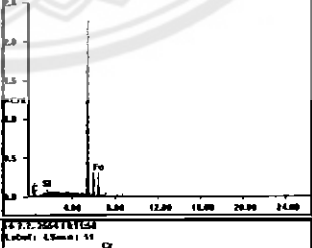

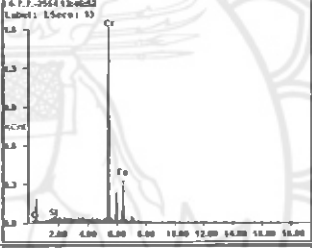

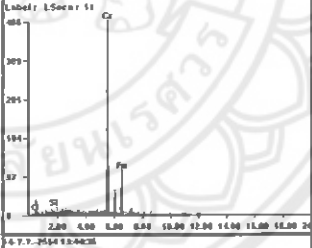
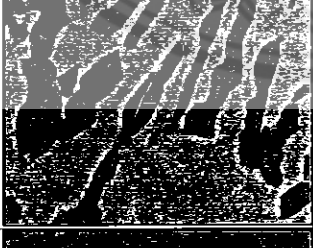
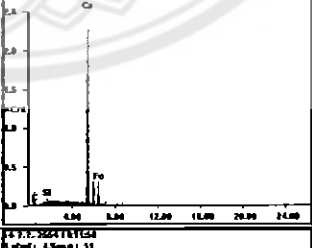

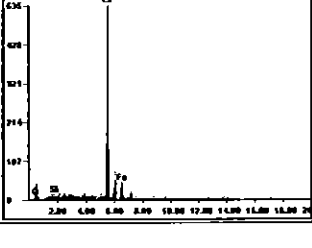


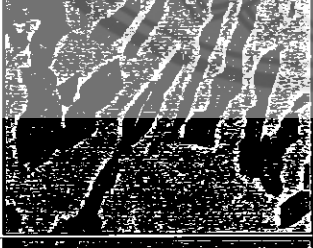
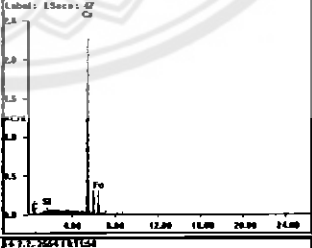

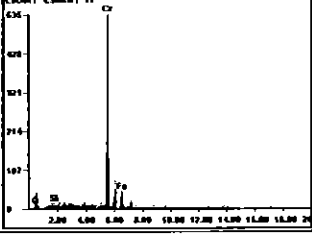




ตารางที่ ก.3 การวิเคราะห์หาธาตุ ที่บริเวณโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ และบริเวณเฟสซิกม่าของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ตำแหน่ง	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ		
			ธาตุ	Wt%	At%
โครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	00.54	02.35
			ซิลิคอน	03.82	07.07
			โครเมียม	22.97	22.95
	เหล็ก	72.67	67.62		
			ธาตุ	Wt%	At%
คาร์บอน			00.84	03.58	
ซิลิคอน			04.07	07.44	
โครเมียม			22.85	22.57	
เหล็ก	72.24	66.42			
ยูเทคติกคาร์ไบด์			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	03.80	14.80
			ซิลิคอน	01.36	02.27
			โครเมียม	56.05	50.43
	เหล็ก	38.79	32.50		
			ธาตุ	Wt%	At%
คาร์บอน			03.34	13.12	
ซิลิคอน			00.76	01.27	
โครเมียม			73.86	66.99	
เหล็ก	22.04	18.62			
เฟสซิกม่า			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	02.20	08.96
			ซิลิคอน	00.90	01.57
			โครเมียม	72.08	67.75
	เหล็ก	24.81	21.72		
			ธาตุ	Wt%	At%
คาร์บอน			01.80	07.50	
ซิลิคอน			01.32	02.35	
โครเมียม			49.55	47.71	
เหล็ก	47.34	42.44			

ตารางที่ ก.4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านกระบวนการอบ

ชิ้นงาน	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
<p>อบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน</p>	
<p>อบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน</p>	

ตารางที่ ก.5 การวิเคราะห์หาธาตุ ที่บริเวณโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอร์ไรท์ บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ และบริเวณเฟสซิกม่าของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน

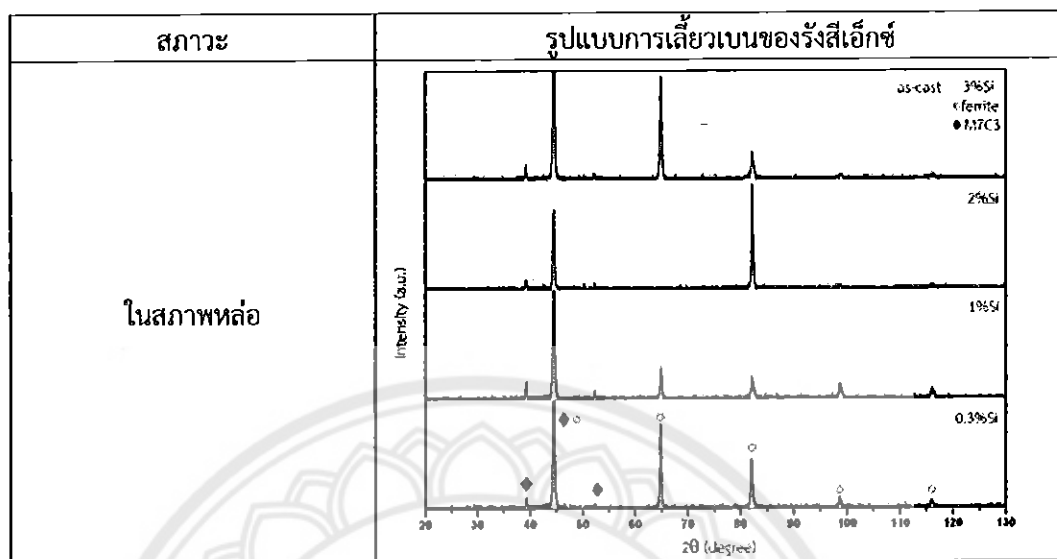
ตำแหน่ง	รูป	กราฟ	ปริมาณธาตุ		
			ธาตุ	Wt%	At%
โครงสร้าง พื้นที่เป็น เฟอร์ไรท์			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	00.63	02.74
			ซิลิคอน	03.97	07.33
			โครเมียม	19.49	19.44
			เหล็ก	75.90	70.49
			ธาตุ	Wt%	At%
		คาร์บอน	00.87	03.71	
		ซิลิคอน	04.22	07.72	
		โครเมียม	17.25	17.06	
		เหล็ก	77.67	71.51	
ยูเทคติกคาร์- ไบด์			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	02.47	10.01
			ซิลิคอน	00.51	00.89
			โครเมียม	72.24	67.54
			เหล็ก	24.78	21.57
			ธาตุ	Wt%	At%
		คาร์บอน	02.26	09.22	
		ซิลิคอน	00.65	01.13	
		โครเมียม	71.78	67.50	
		เหล็ก	25.30	22.15	
เฟสซิกม่า			ธาตุ	Wt%	At%
			คาร์บอน	02.32	09.36
			ซิลิคอน	00.76	01.32
			โครเมียม	82.03	76.41
			เหล็ก	14.88	12.90
			ธาตุ	Wt%	At%
		คาร์บอน	01.45	06.01	
		ซิลิคอน	00.85	01.51	
		โครเมียม	85.68	81.80	
		เหล็ก	12.01	10.68	



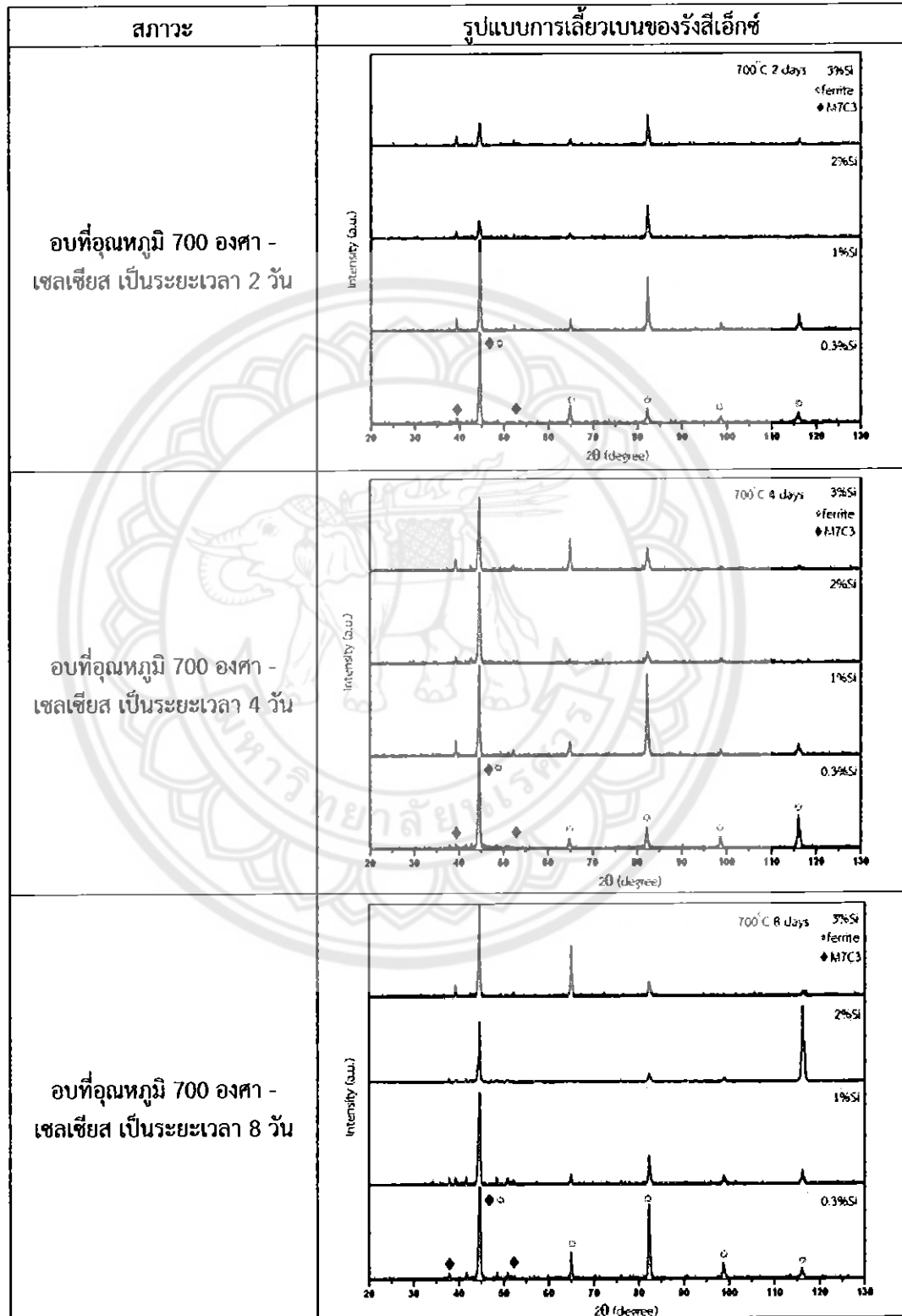
ภาคผนวก ข

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานในสภาพหล่อ และ
ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการอบ

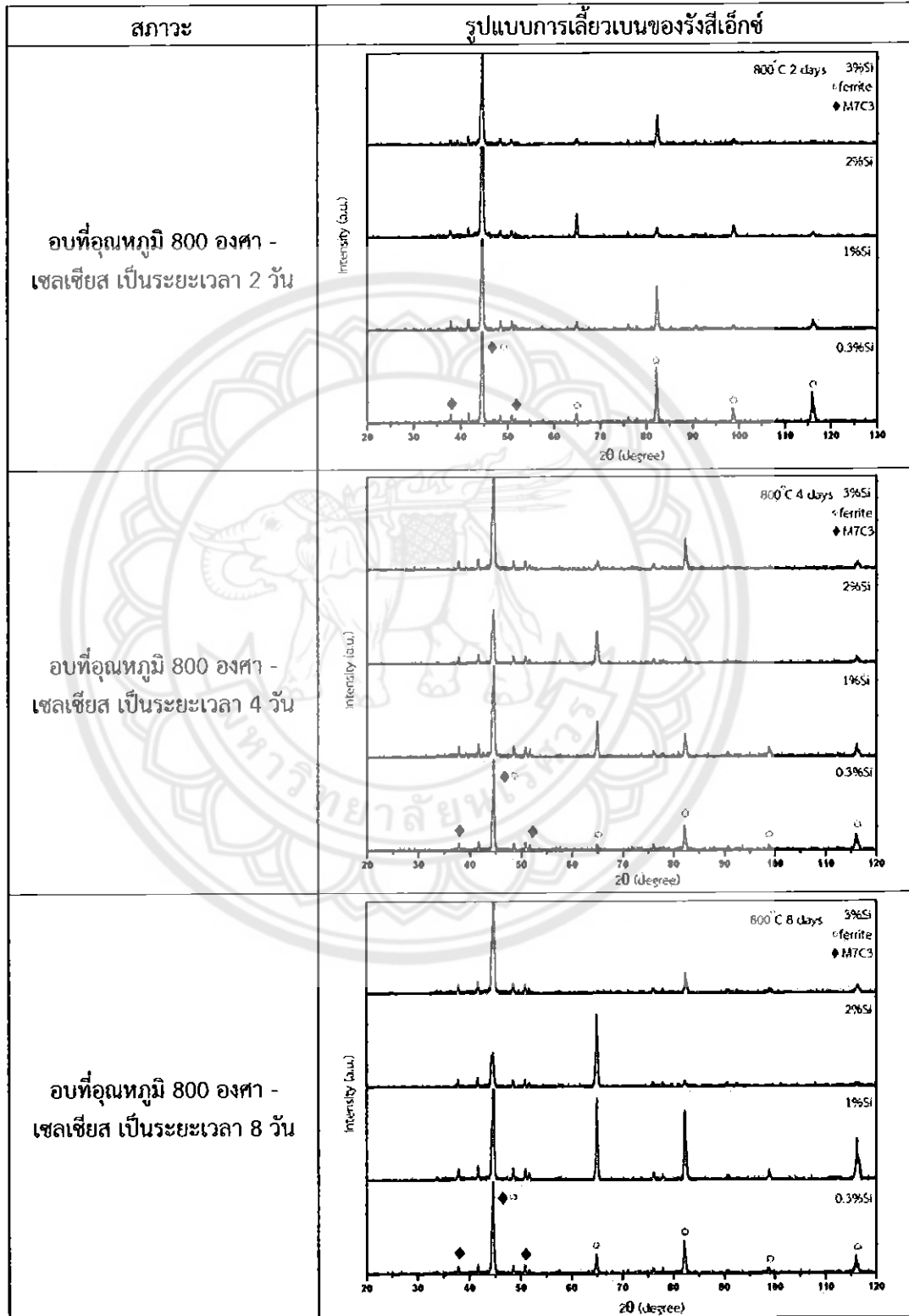
ตารางที่ ข.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ



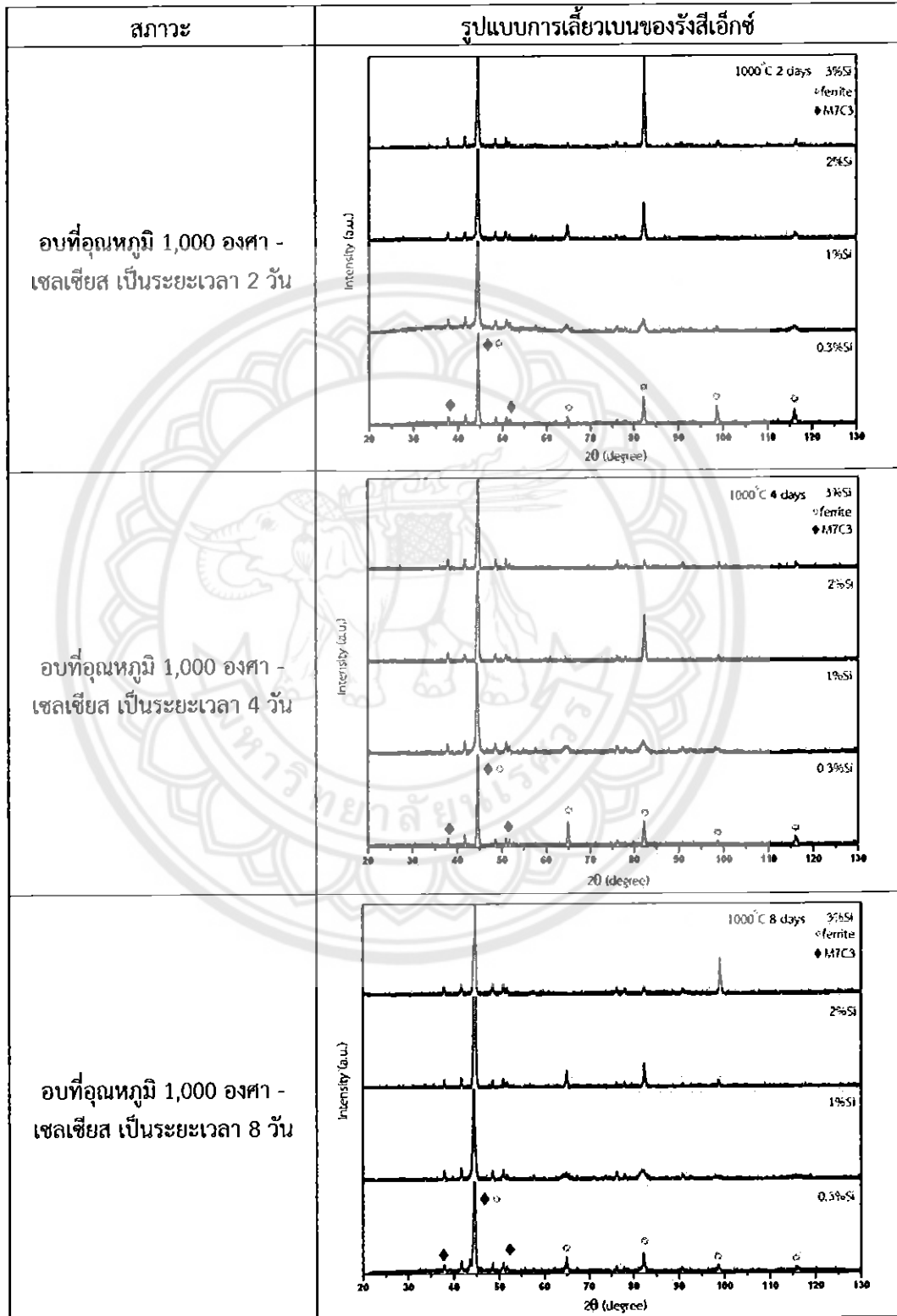
ตารางที่ ข.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน



ตารางที่ ข.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน



ตารางที่ ข.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

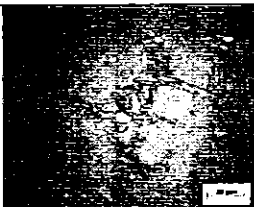
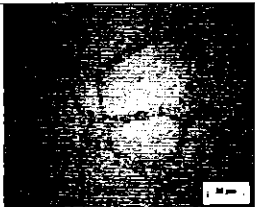


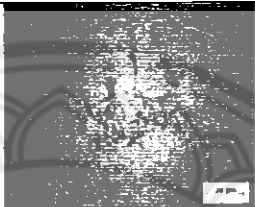
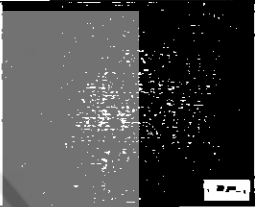
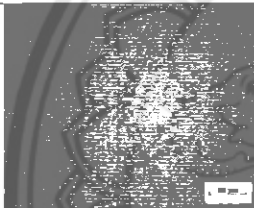
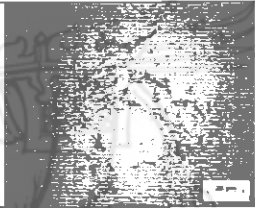
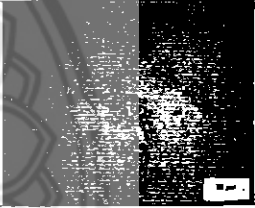
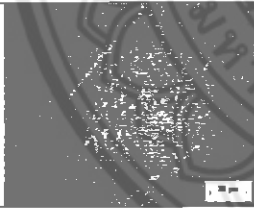
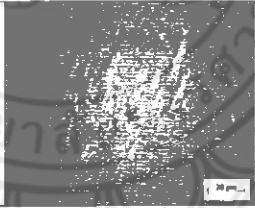
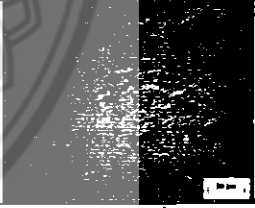
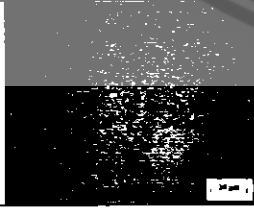
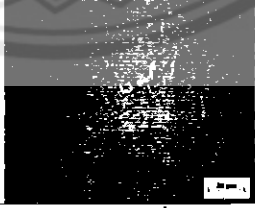
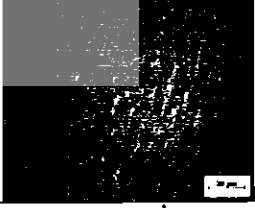
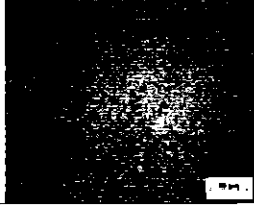
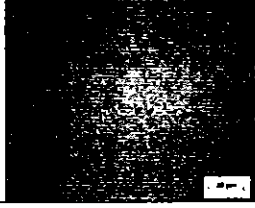





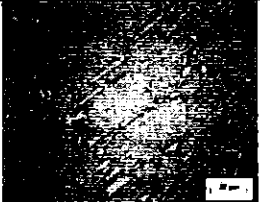
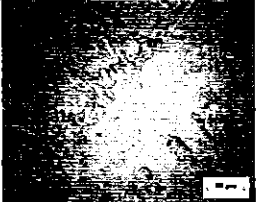
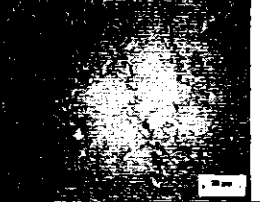
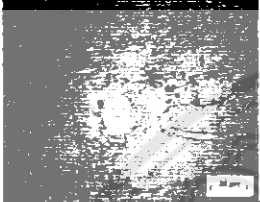
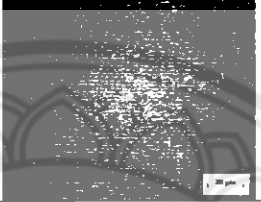
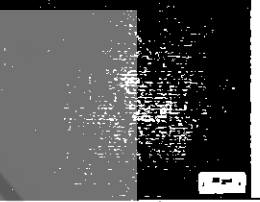
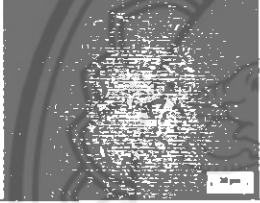
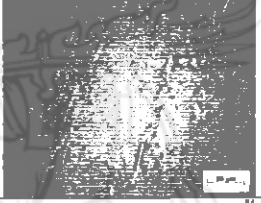
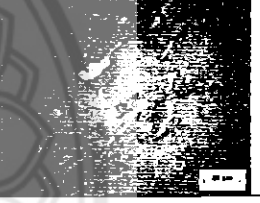
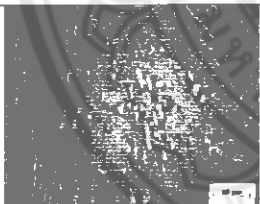
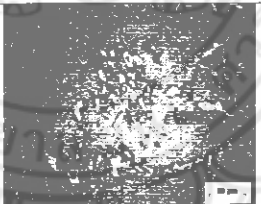
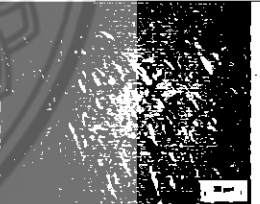
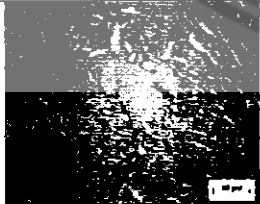
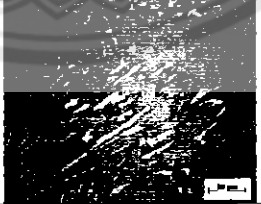
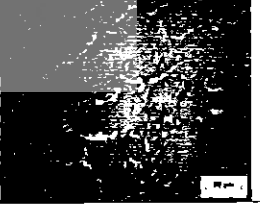
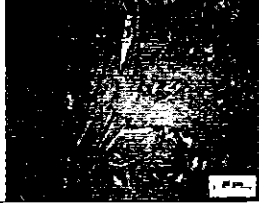
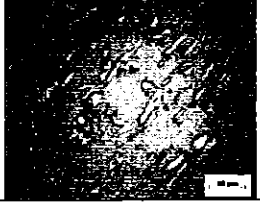

ภาคผนวก ค

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังผ่าน
กระบวนการอบ ที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

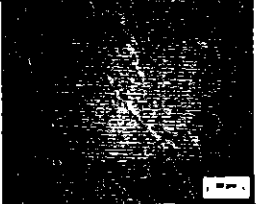
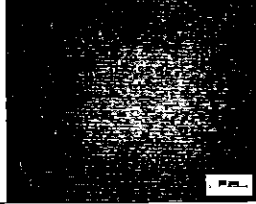
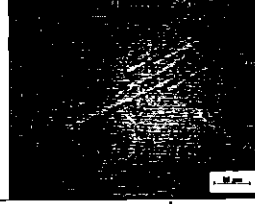
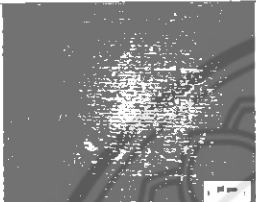
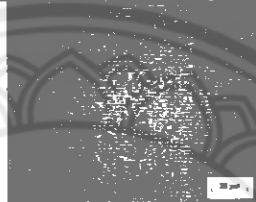
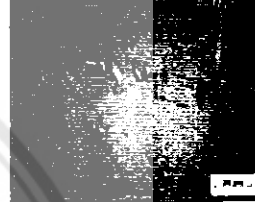
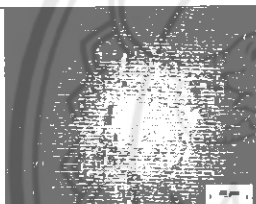
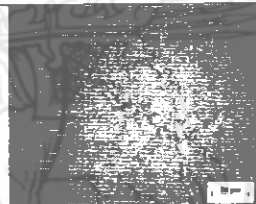
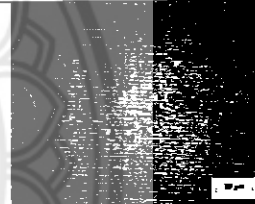
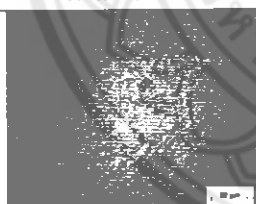
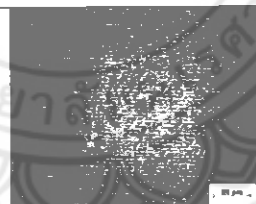
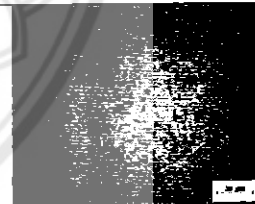
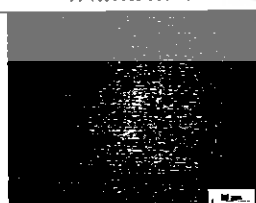
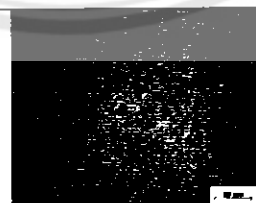
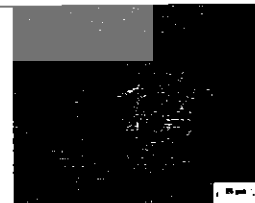

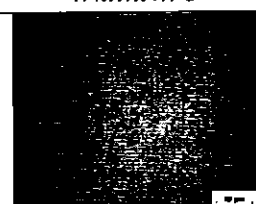

ตารางที่ ค.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักในสภาพหล่อที่กำลังขยาย 500 เท่า

ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		

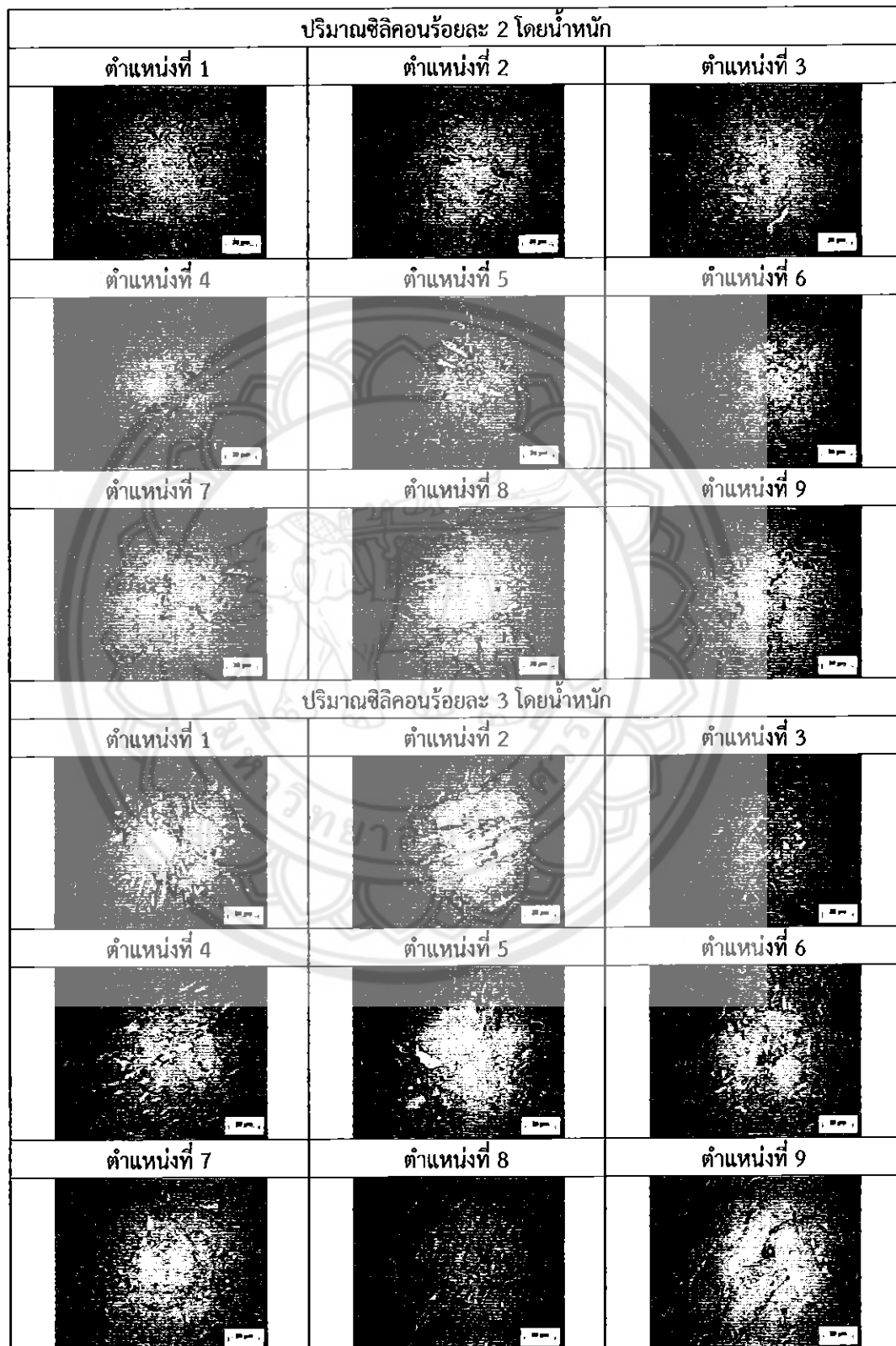
ตารางที่ ค.1 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักในสภาพหล่อ ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		

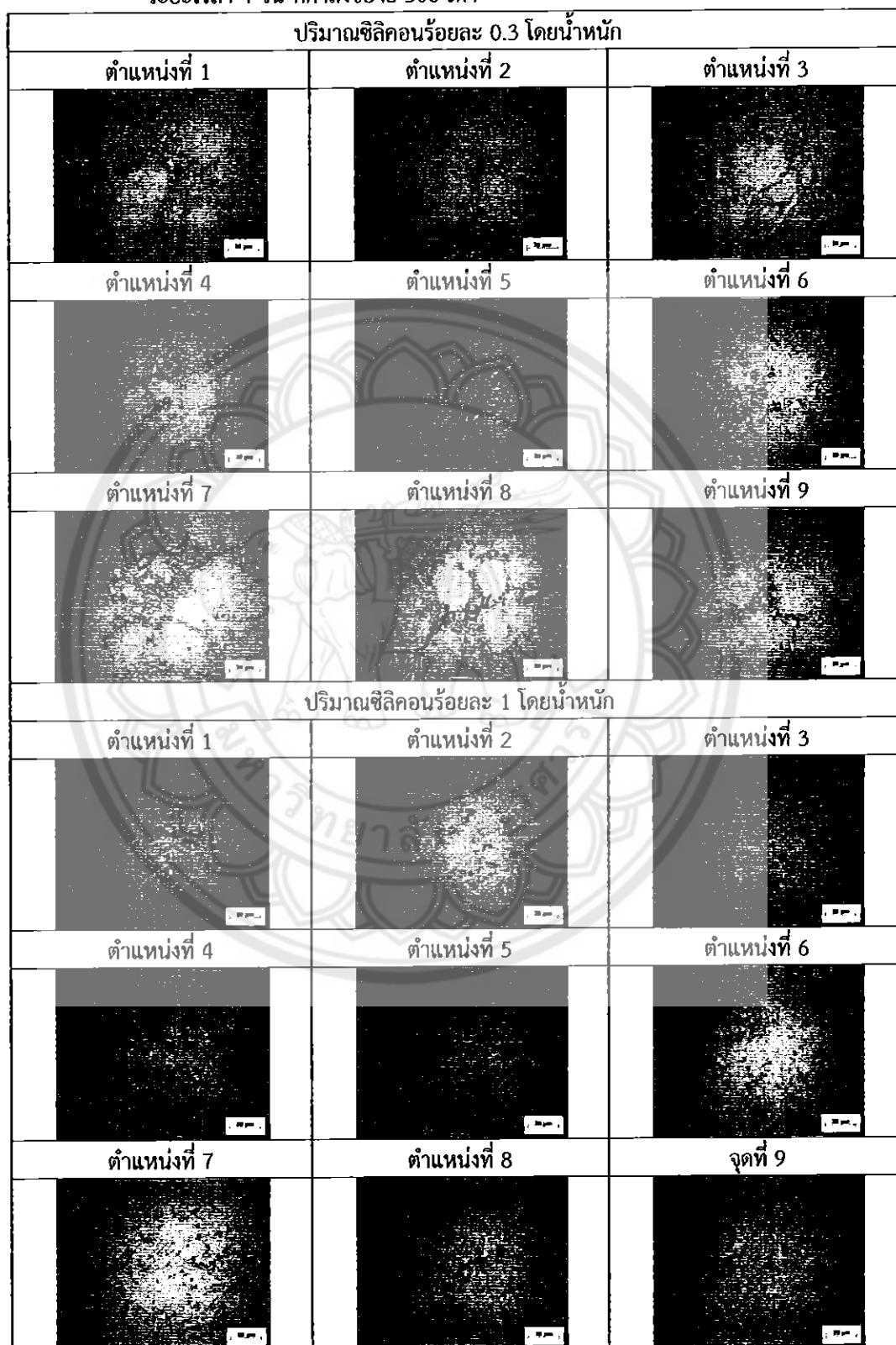
ตารางที่ ค.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		

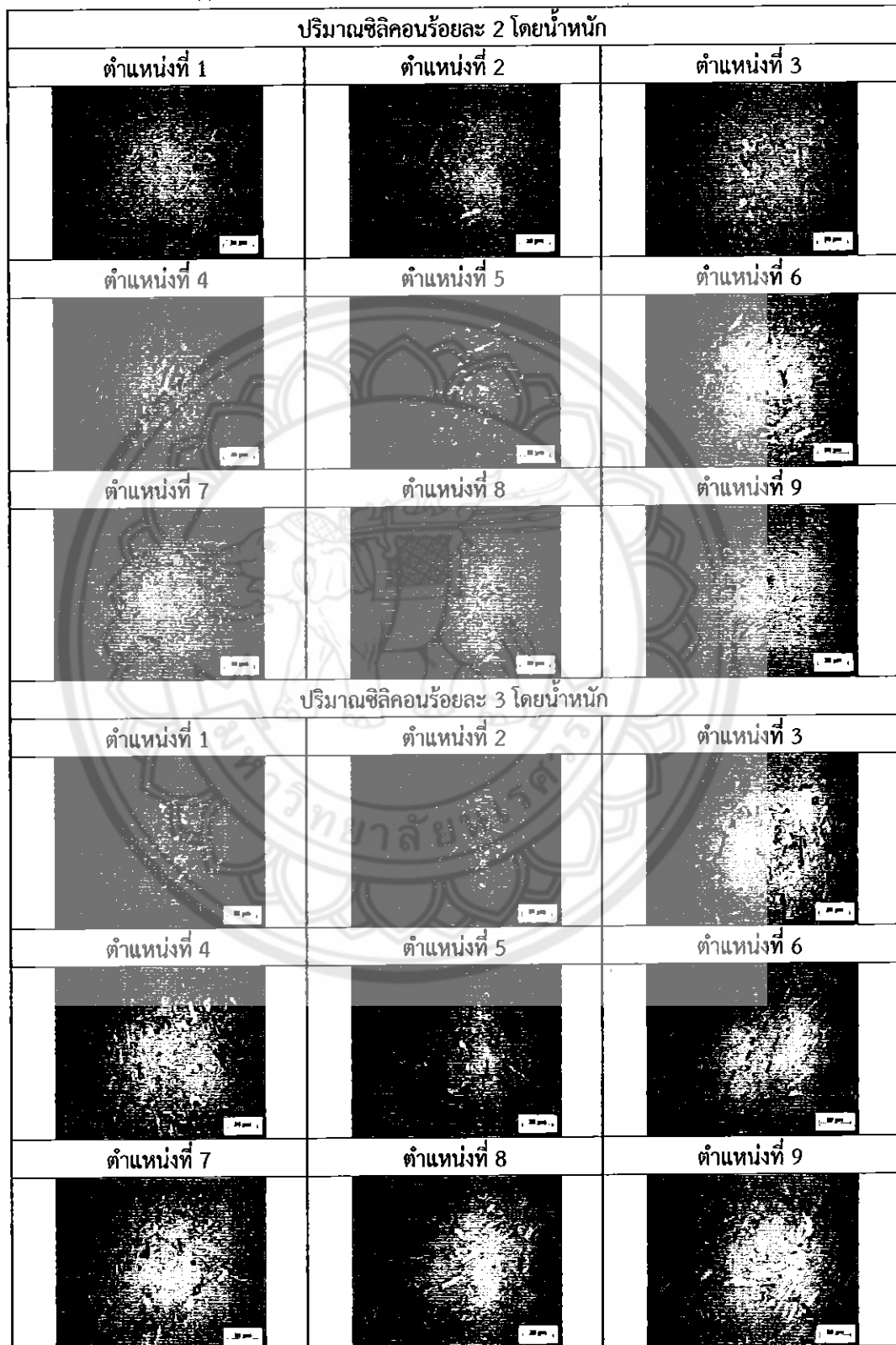
ตารางที่ ค.2 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



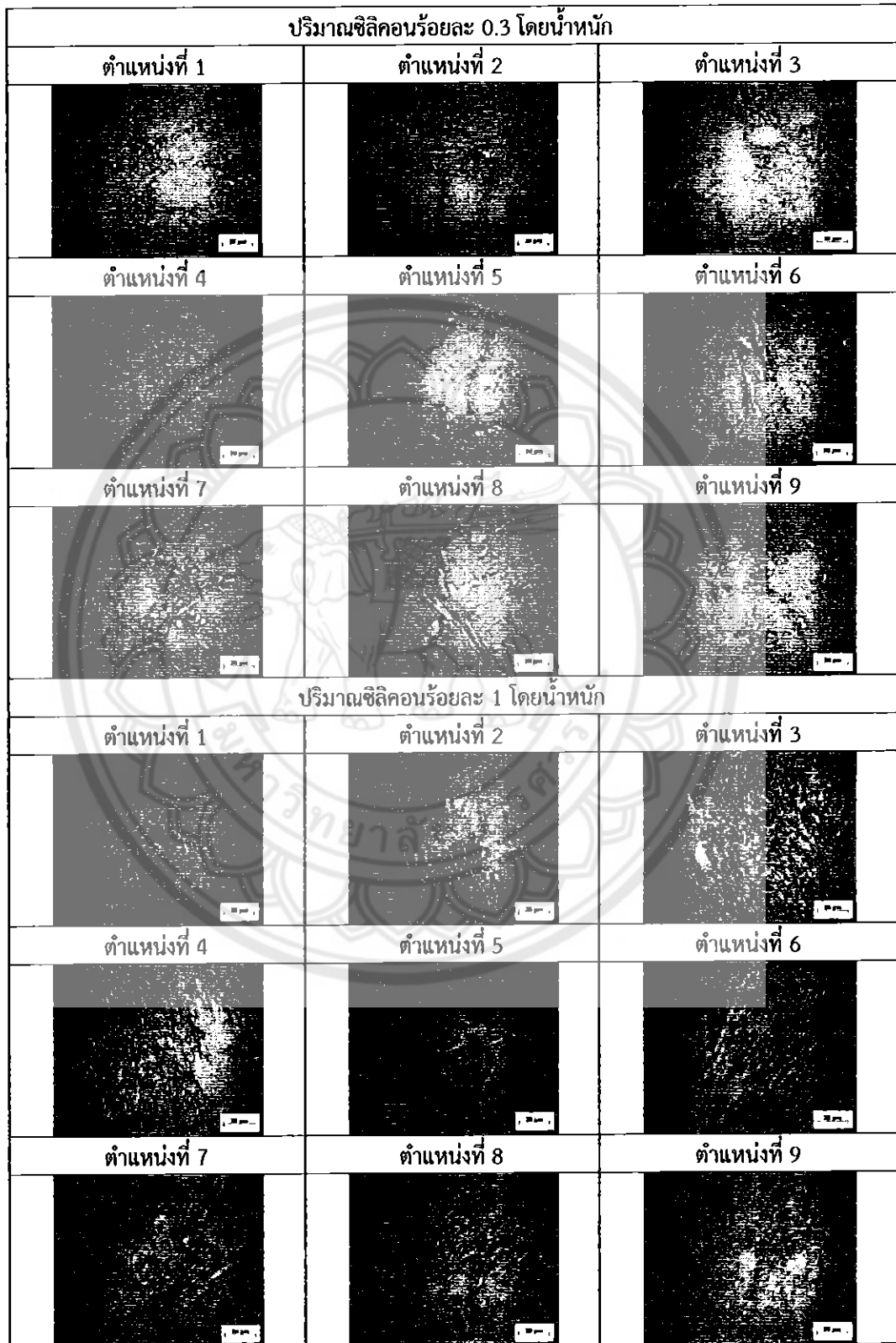
ตารางที่ ค.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



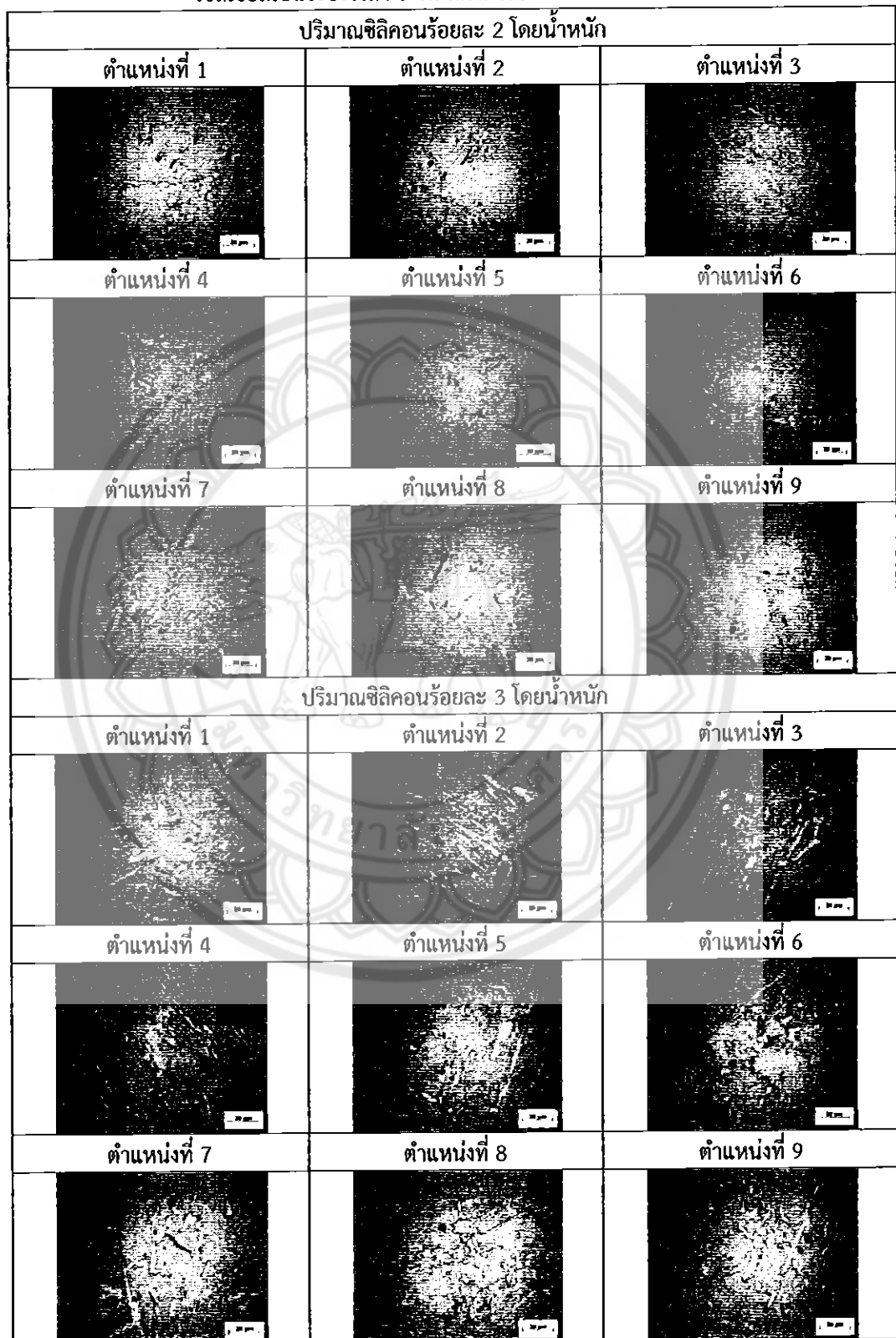
ตารางที่ ค.3 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศา - เซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



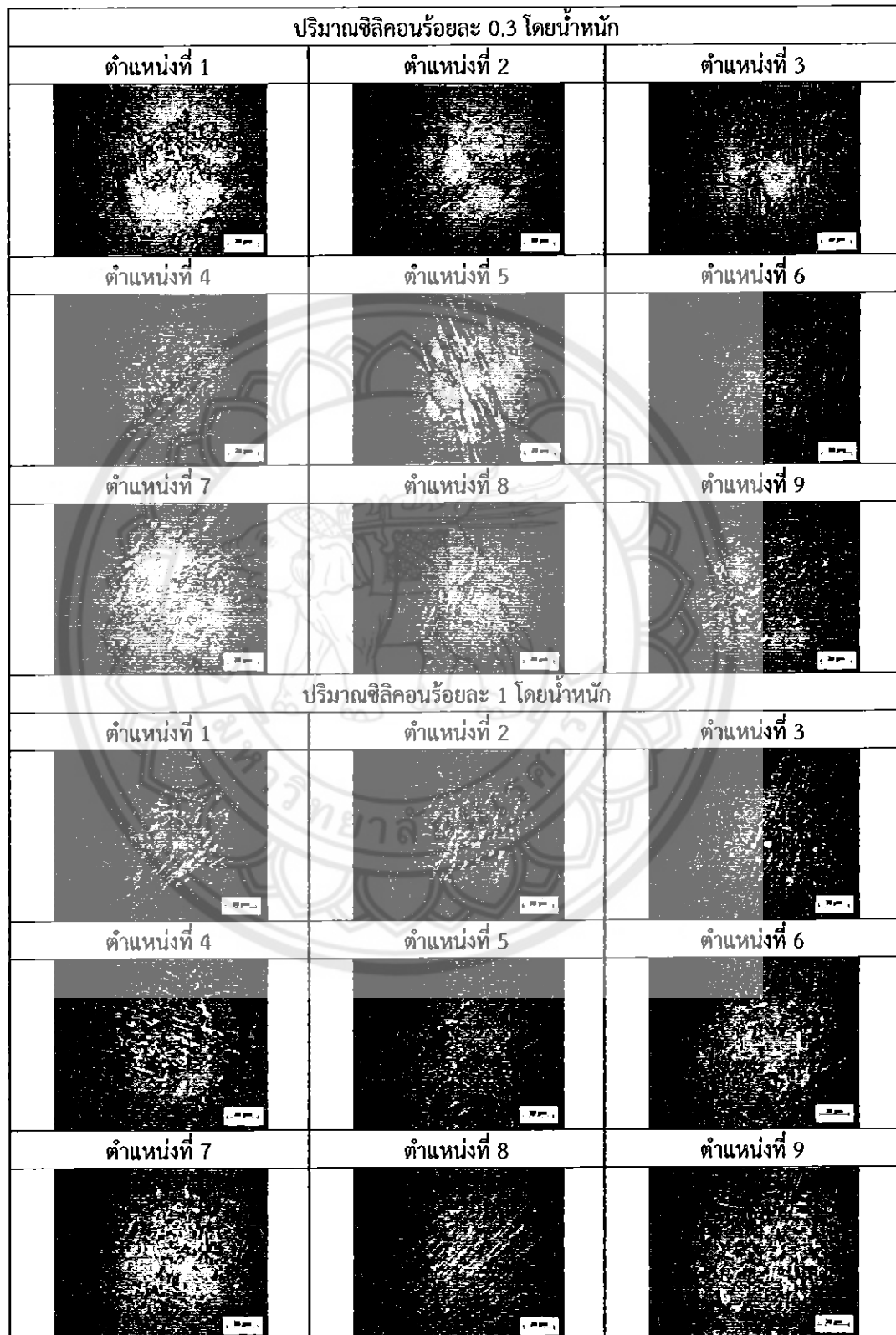
ตารางที่ ค.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 8 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



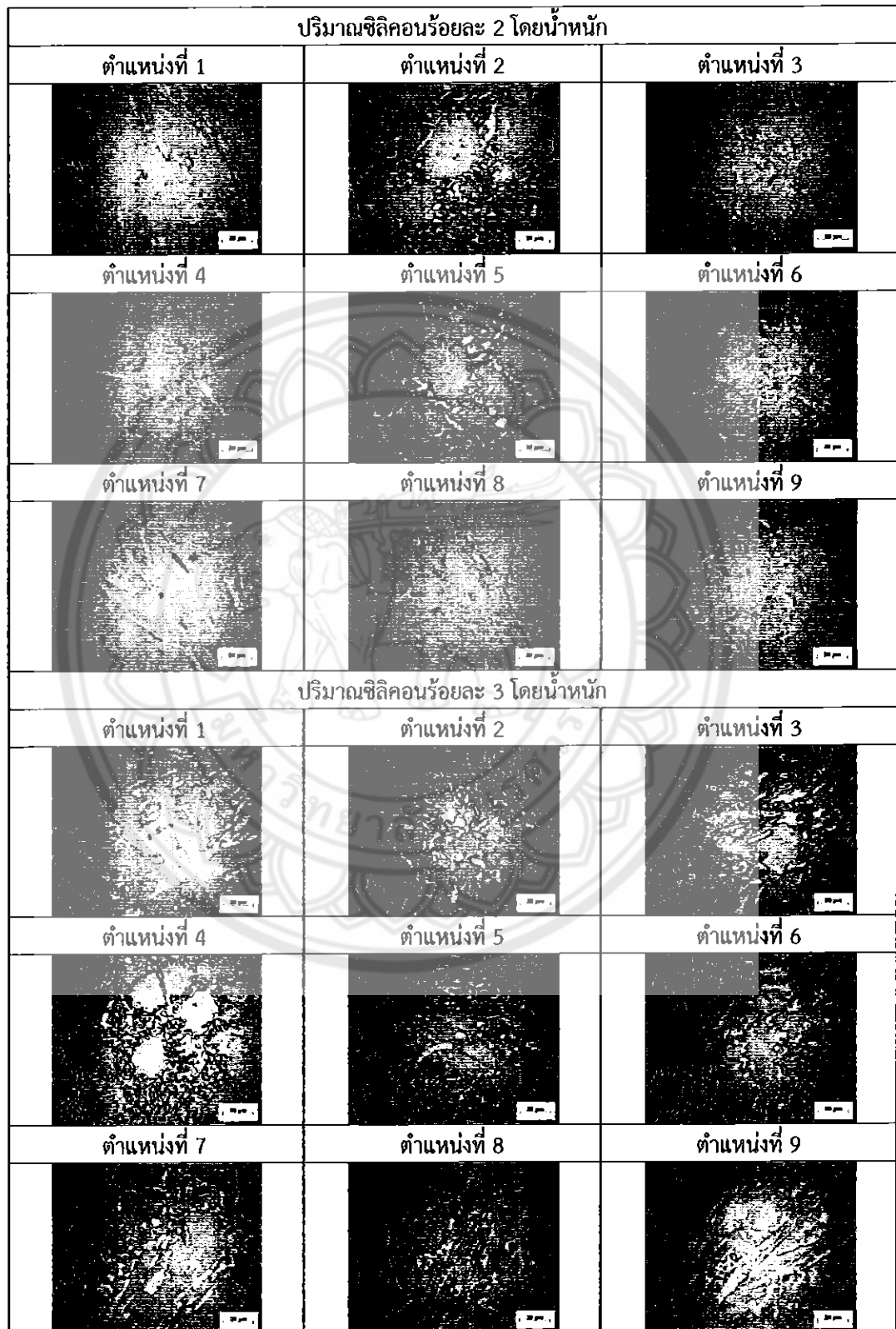
ตารางที่ ค.4 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศา - เซลเซียสเป็นระยะเวลา 8 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



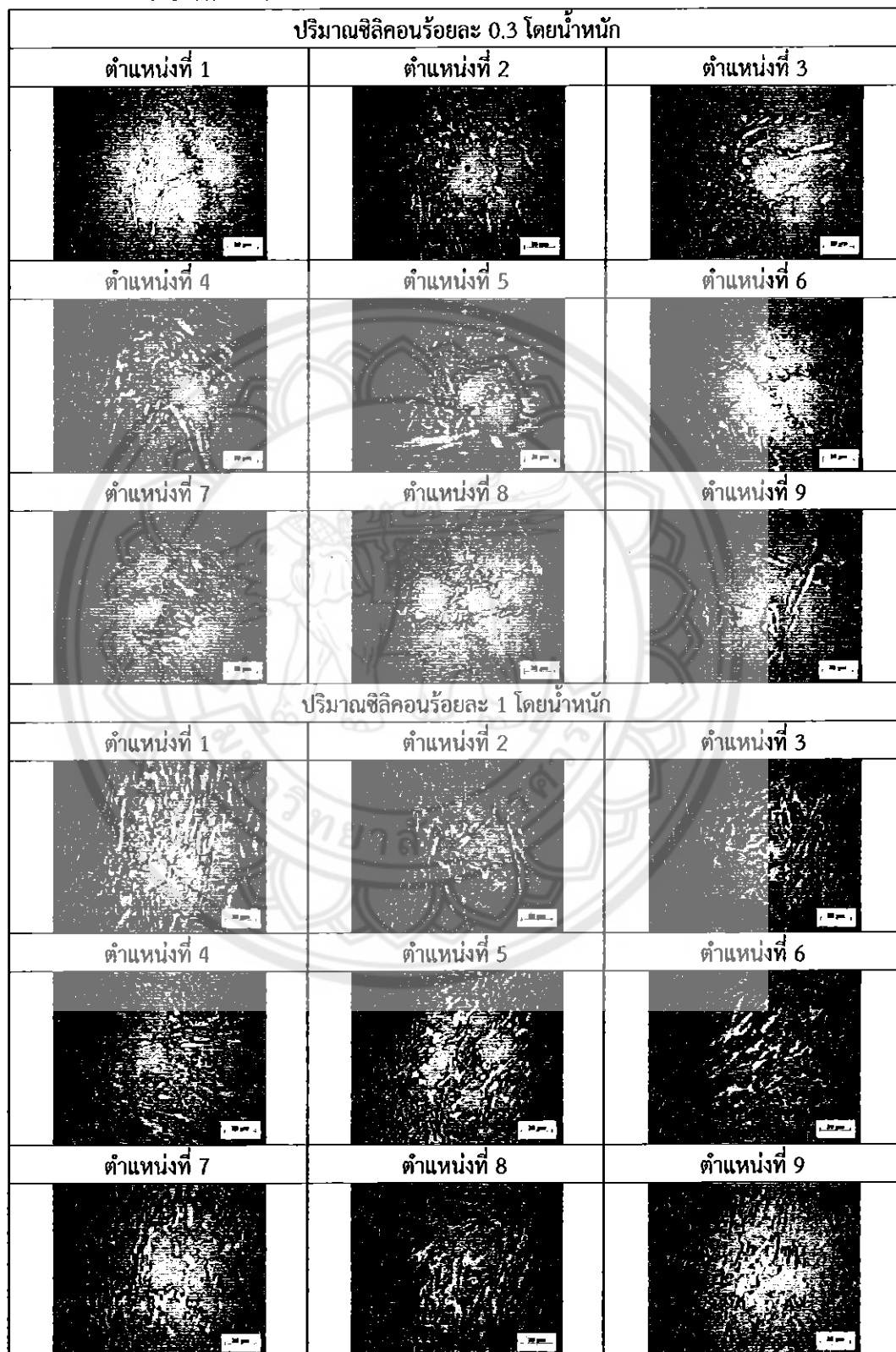
ตารางที่ ค.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาเวลา 2 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



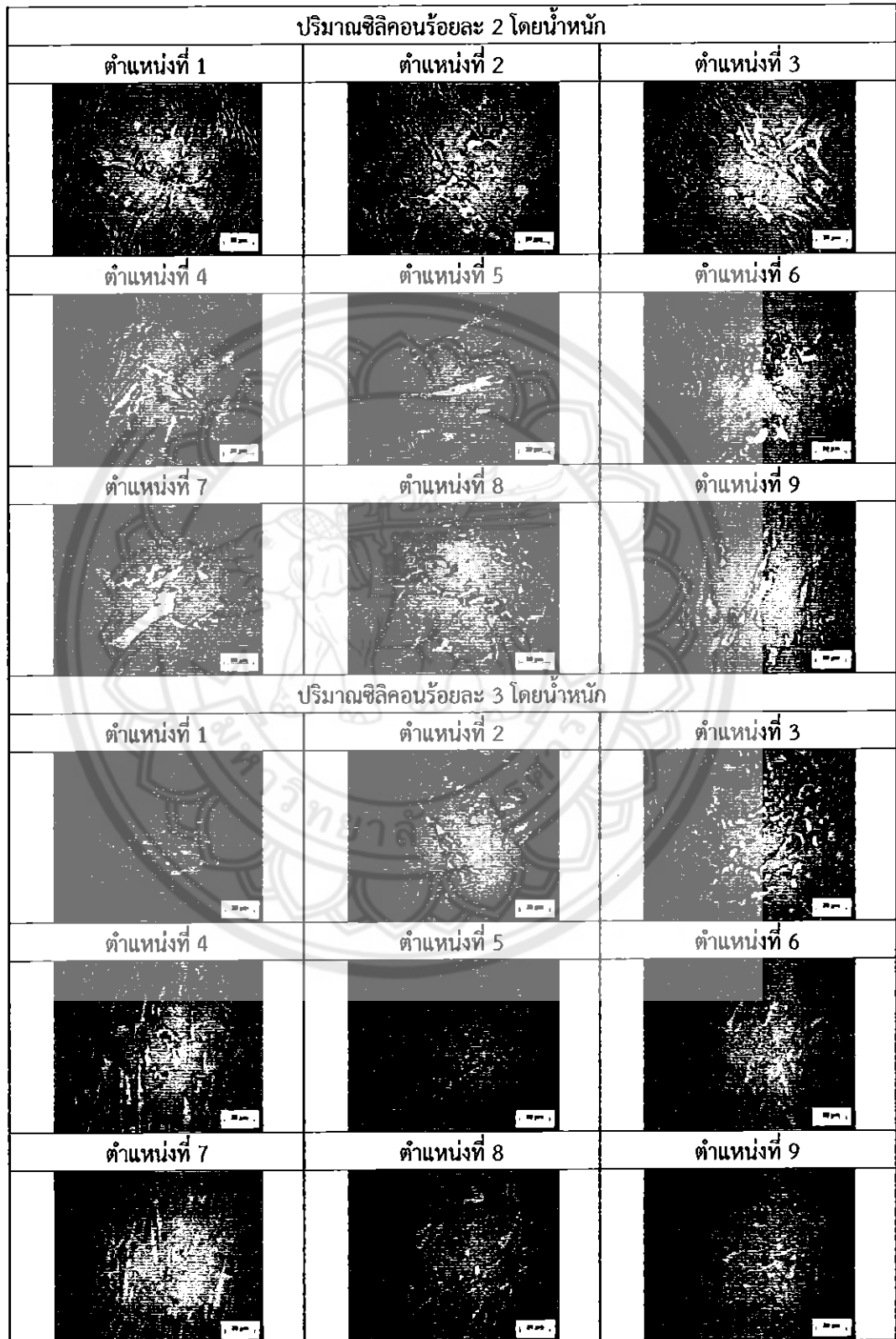
ตารางที่ ค.5 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



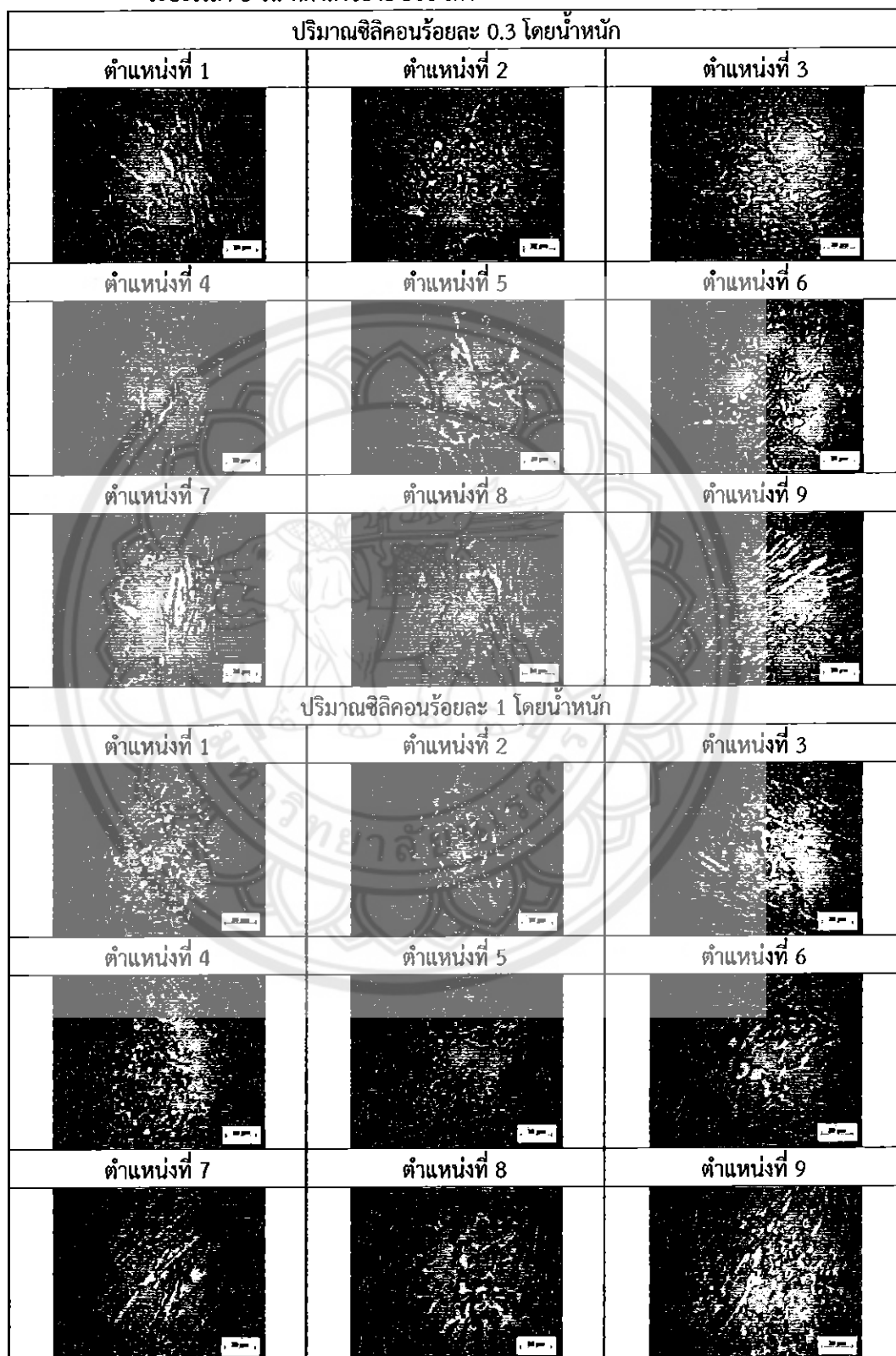
ตารางที่ ค.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า






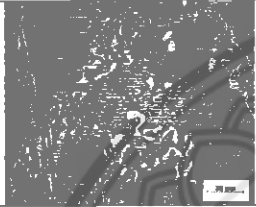

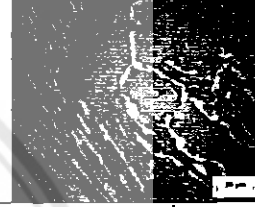
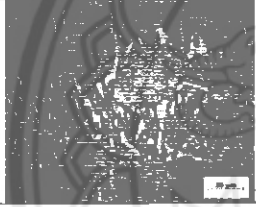
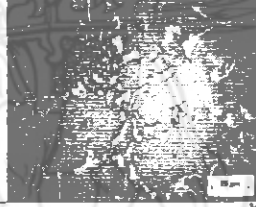
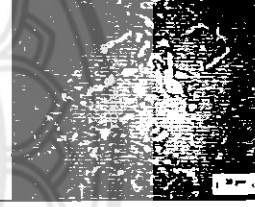
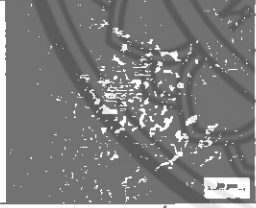
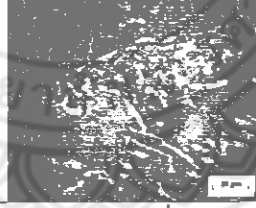
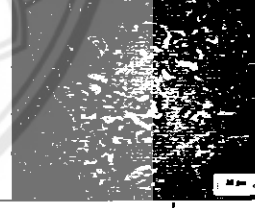
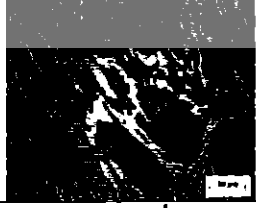
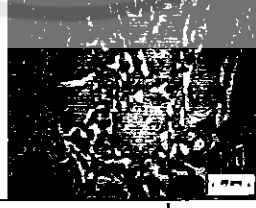



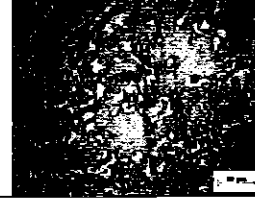
ตารางที่ ค.6 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



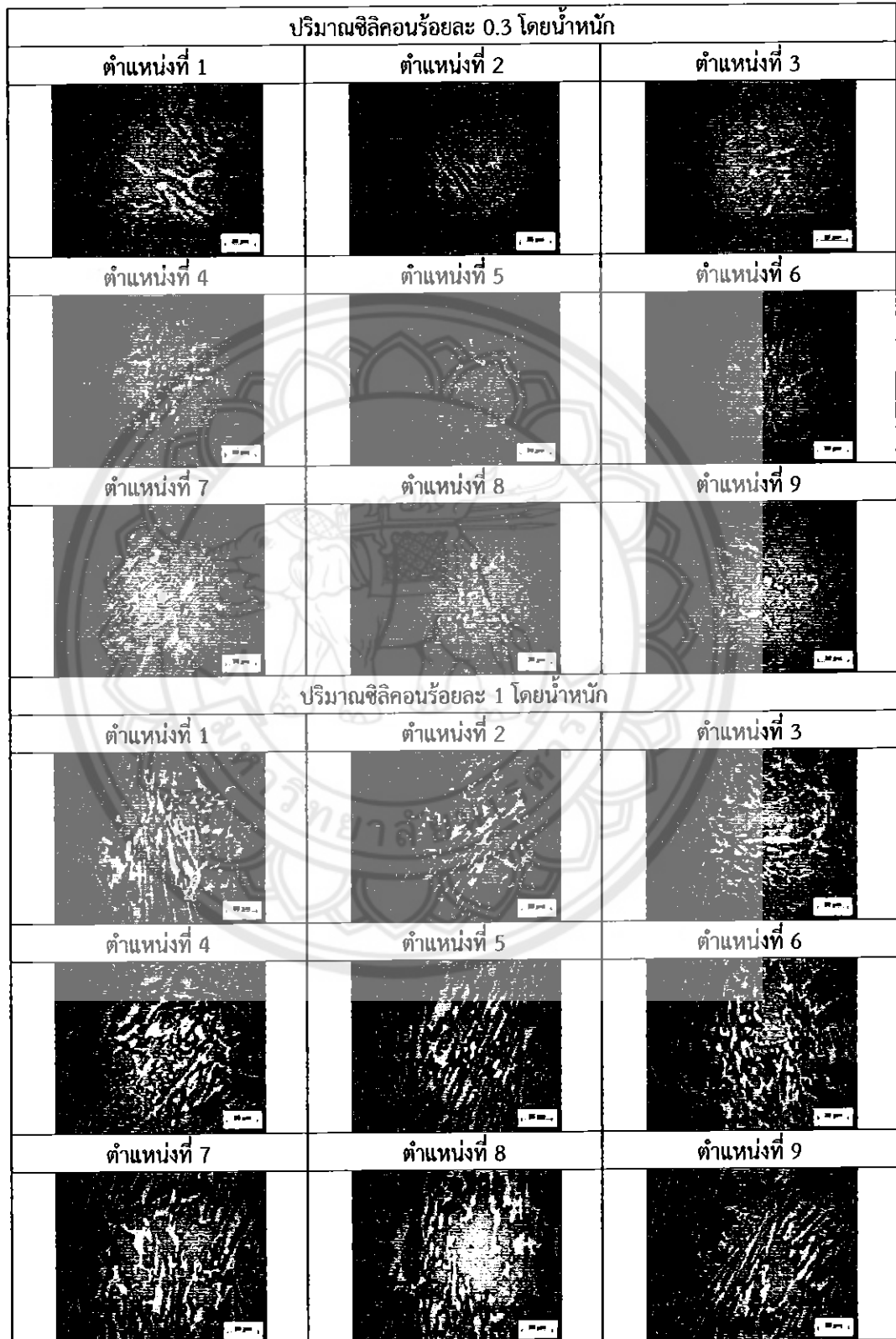
ตารางที่ ค.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 8 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



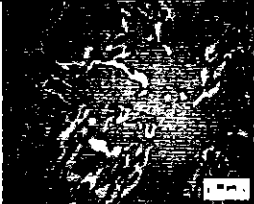



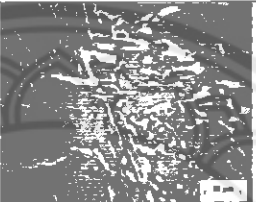
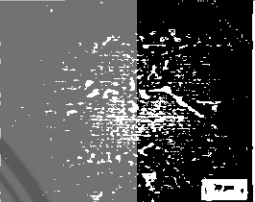
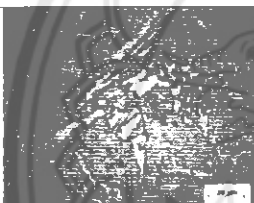

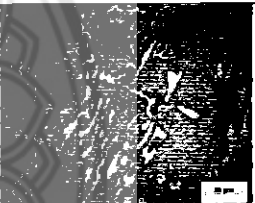
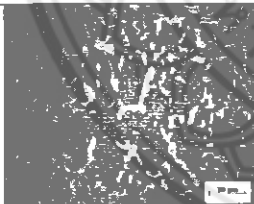
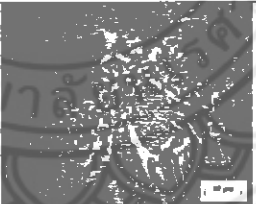
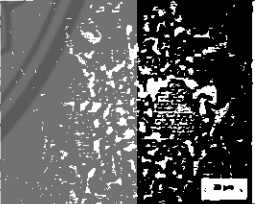
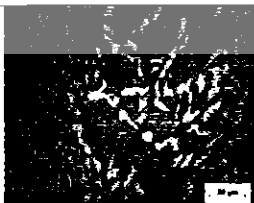
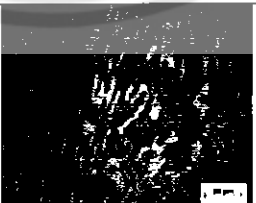


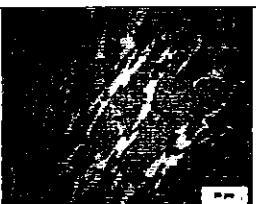
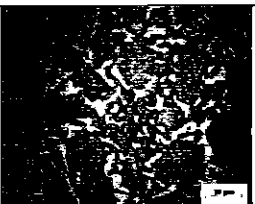
ตารางที่ ค.7 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศา - เซลเซียสเป็นระยะเวลา 8 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		

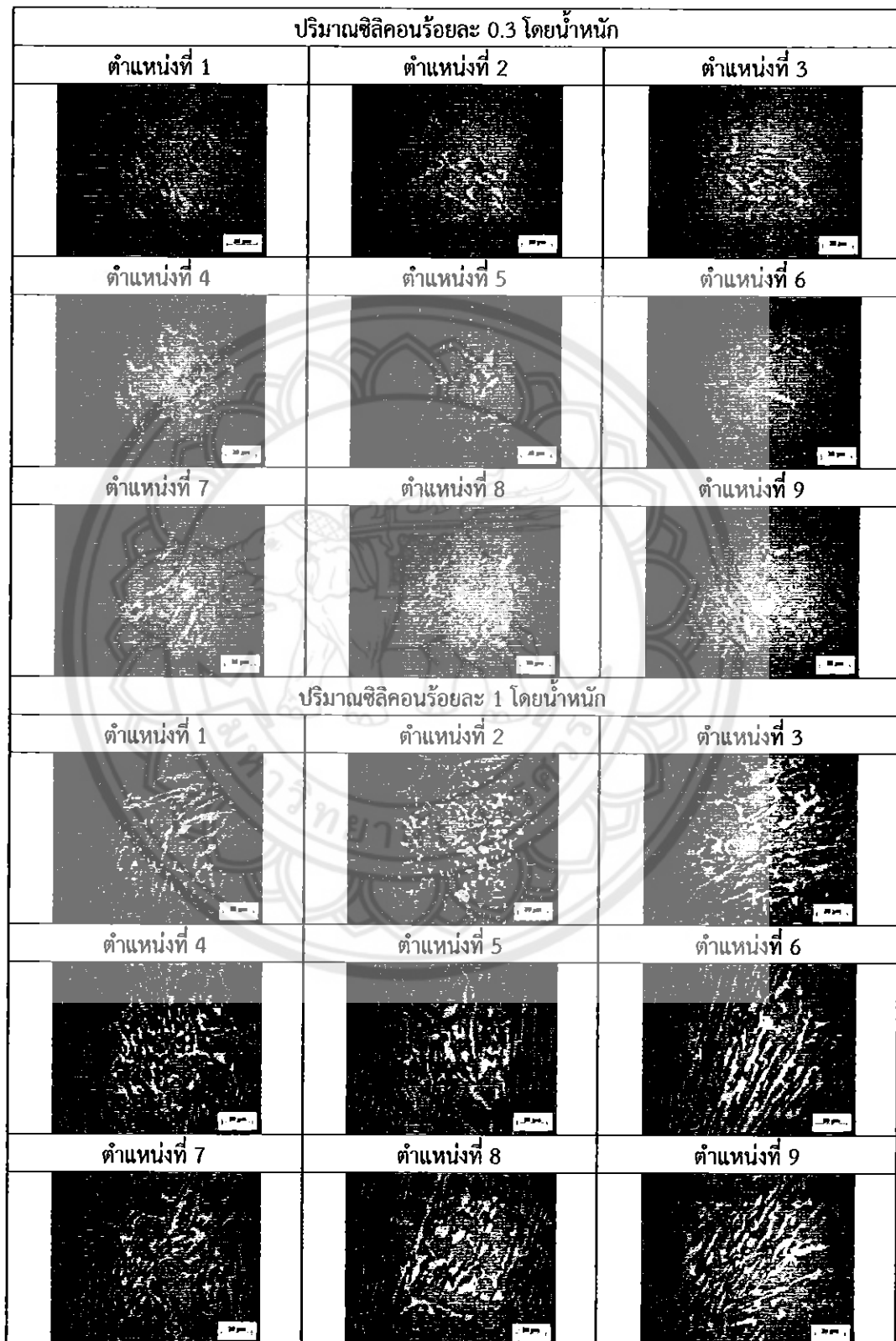
ตารางที่ ค.8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



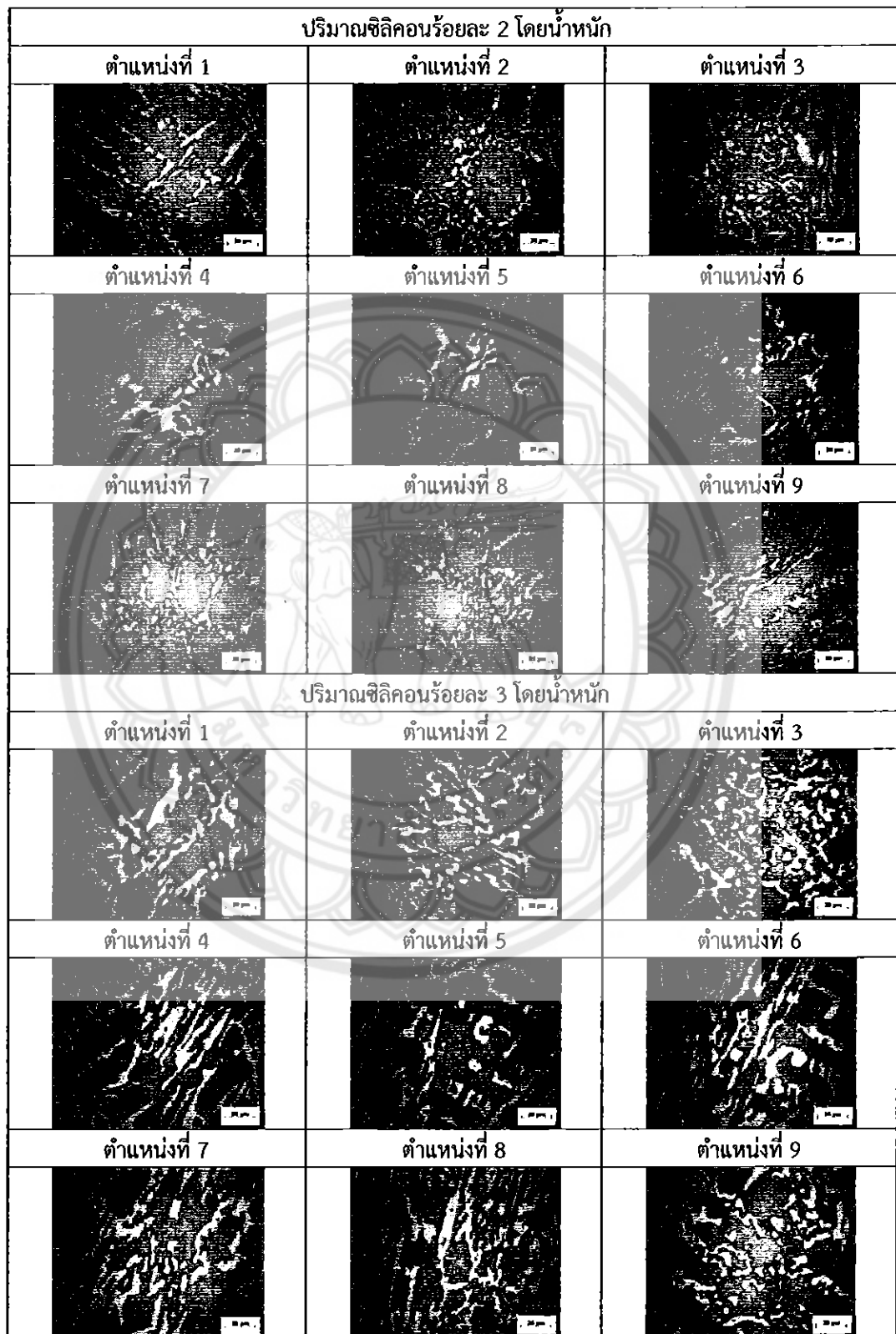
ตารางที่ ค.8 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 2 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		
ปริมาณซิลิคอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก		
ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
		
ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6
		
ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9
		

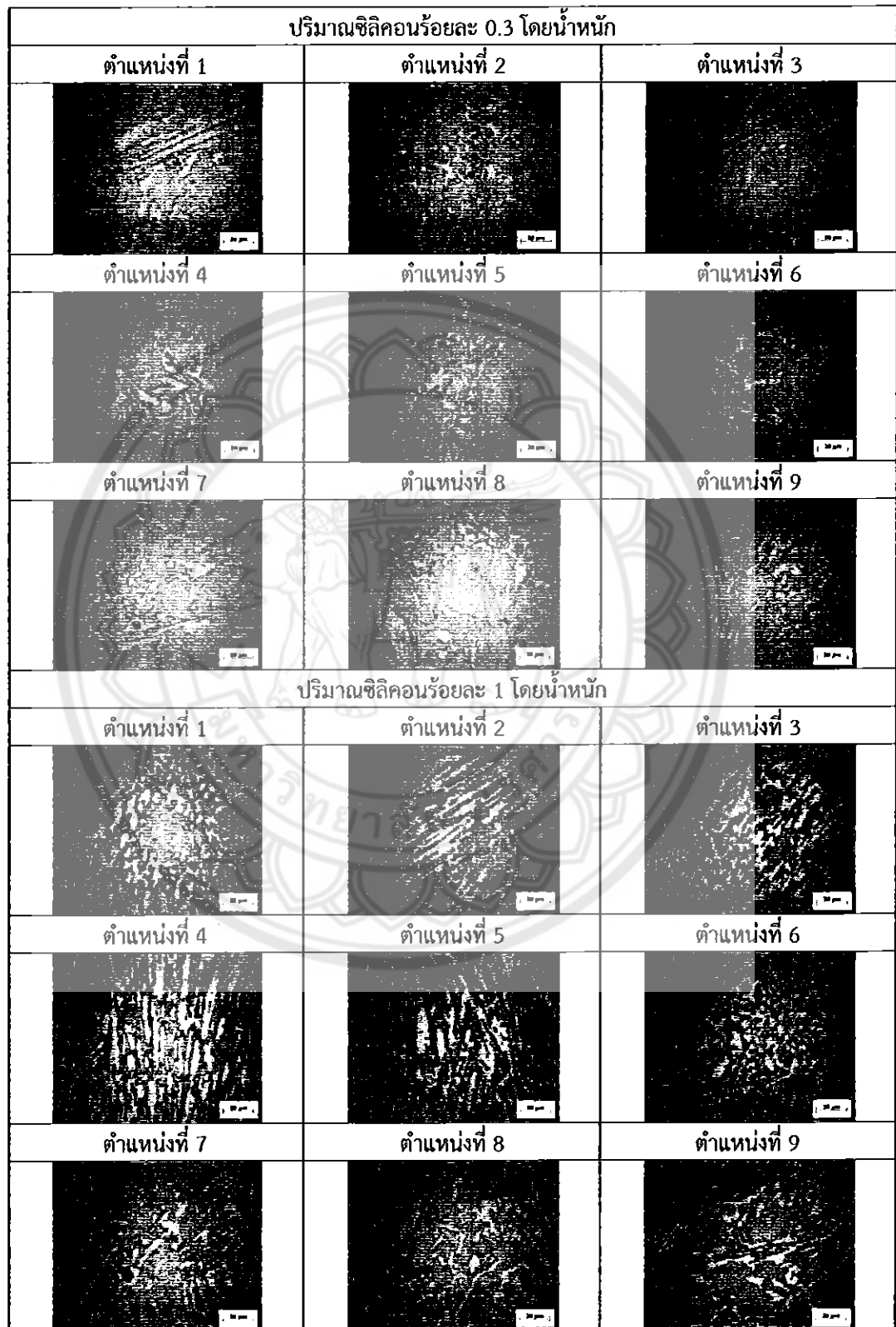
ตารางที่ ค.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



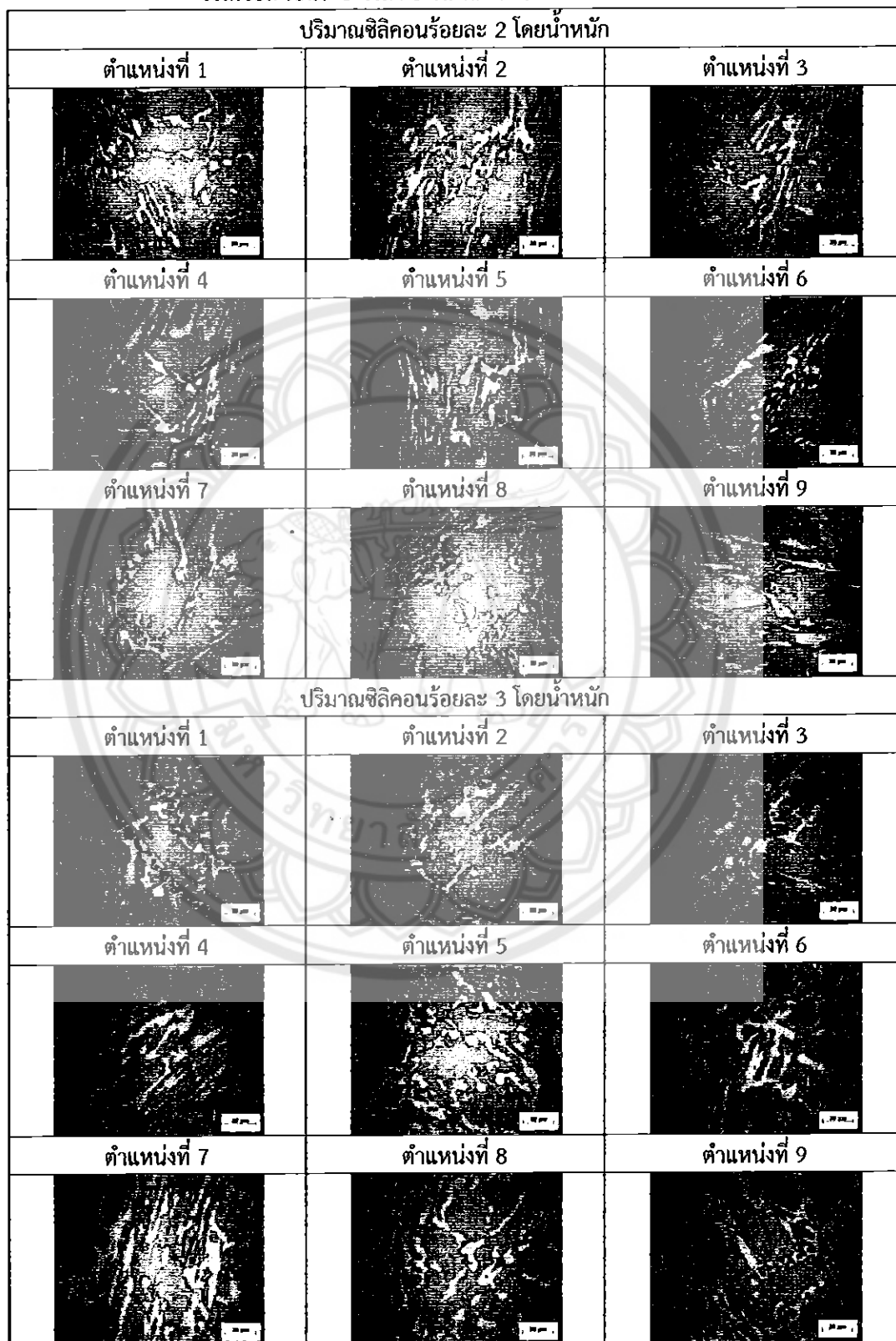
ตารางที่ ค.9 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเพอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า




ตารางที่ ค.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



ตารางที่ ค.10 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า





ภาคผนวก ง
เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงาน
หลังผ่านกระบวนการอบ ที่ได้จากรูปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ตารางที่ ง.1 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

ร้อยละของปริมาณซิลิคอน	เฟสซิกม่า (ร้อยละโดยพื้นที่)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.3	0.680	0.321
1	0.948	0.157
2	0.755	0.131
3	1.632	0.158

ตารางที่ ง.2 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

ระยะเวลาในการอบ (วัน)	ร้อยละของปริมาณซิลิคอน	เฟสซิกม่า (ร้อยละโดยพื้นที่)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	0.3	0.831	0.475
	1	0.989	0.226
	2	0.864	0.053
	3	2.176	0.458
4	0.3	1.190	0.352
	1	1.406	0.115
	2	1.260	0.195
	3	2.419	0.133
8	0.3	1.470	0.160
	1	2.884	0.921
	2	1.632	0.183
	3	3.198	0.422

ตารางที่ ง.3 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

ระยะเวลาในการอบ (วัน)	ร้อยละของปริมาณซิลิคอน	เฟสซิกม่า (ร้อยละโดยพื้นที่)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	0.3	2.287	0.487
	1	3.305	0.723
	2	3.102	0.210
	3	4.243	0.538
4	0.3	2.321	0.681
	1	3.948	0.560
	2	3.473	0.492
	3	4.315	0.676
8	0.3	2.549	0.457
	1	4.479	0.596
	2	3.797	0.400
	3	5.683	0.271

ตารางที่ ง.4 เศษส่วนปริมาตรของเฟสซิกม่าของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอน ร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 8 วัน

ระยะเวลาในการอบ (วัน)	ร้อยละของปริมาณซิลิคอน	เฟสซิกม่า (ร้อยละโดยพื้นที่)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	0.3	0.668	0.132
	1	3.219	0.131
	2	3.094	0.127
	3	4.182	0.130
4	0.3	0.519	0.116
	1	3.184	0.456
	2	3.000	0.537
	3	4.079	0.361
8	0.3	0.424	0.118
	1	2.833	0.484
	2	2.564	0.334
	3	3.606	0.543

ภาคผนวก จ
ความแข็งของชิ้นงานในสภาพหล่อ และชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการ
อบ ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์



ตารางที่ จ.1 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ในสภาพหล่อ

สภาพหล่อ					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	193.800	237.251	225.9106	271.922
	2	186.771	234.330	231.8322	260.773
	3	194.521	233.781	231.2069	270.876
	4	195.620	242.070	232.3742	269.229
	5	190.131	234.098	233.7521	261.147
	6	191.663	230.980	239.7171	273.047
	7	193.518	238.019	241.4633	269.657
	8	195.553	234.939	229.9077	267.951
	9	186.915	233.378	233.9541	270.696
	10	195.929	236.516	229.9358	269.908
เฉลี่ย		192.442	235.536	233.0054	268.521
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		3.463	3.076	4.623664	4.227

ตารางที่ จ.2 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน					
ความแข็ง(HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	196.639	224.520	233.349	267.668
	2	201.626	236.750	229.880	277.543
	3	194.018	237.221	230.556	278.628
	4	192.178	235.842	237.104	270.624
	5	187.971	228.815	237.930	276.910
	6	199.086	239.448	234.214	276.390
	7	202.716	240.437	229.767	263.823
	8	201.349	243.596	224.520	271.561
	9	197.196	242.222	233.291	274.142
	10	200.591	237.812	235.725	276.316
เฉลี่ย		197.337	236.666	232.634	273.360
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		4.749	5.891	4.041	4.836

ตารางที่ จ.3 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน					
ความแข็ง(HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	206.159	238.911	231.576	269.514
	2	203.721	228.536	245.478	268.624
	3	200.453	235.900	233.004	267.632
	4	191.364	233.925	229.374	267.103
	5	200.179	235.784	226.075	269.372
	6	212.962	235.579	233.493	260.230
	7	210.378	242.618	226.569	264.898
	8	200.110	240.919	225.938	278.515
	9	207.672	237.842	223.008	289.837
	10	208.763	232.460	230.217	266.927
เฉลี่ย		204.176	236.247	230.473	270.265
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		6.356	4.110	6.272	8.251

ตารางที่ จ.4 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	209.544	235.171	233.234	270.266
	2	210.822	238.049	232.832	266.751
	3	208.447	235.725	226.459	278.103
	4	215.671	245.292	231.094	263.374
	5	195.113	246.069	231.975	269.087
	6	206.686	235.900	237.074	271.128
	7	206.566	236.164	236.428	267.209
	8	209.421	236.164	237.635	269.479
	9	207.286	238.049	232.203	267.350
	10	207.648	239.687	231.065	271.561
เฉลี่ย		207.720	238.627	233.000	269.431
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		5.176	3.966	3.362	3.895

ตารางที่ จ.5 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	255.652	321.332	271.958	334.701
	2	257.076	324.846	273.557	336.636
	3	254.599	316.371	268.873	332.734
	4	255.092	319.850	280.665	336.537
	5	257.242	319.021	267.385	339.091
	6	260.773	324.516	282.802	335.196
	7	265.246	324.893	264.100	333.765
	8	253.749	320.035	272.538	331.562
	9	260.671	325.888	275.946	330.590
	10	256.445	322.918	273.448	335.791
เฉลี่ย	257.654	321.967	273.127	334.660	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.553	3.131	5.705	2.567	

ตารางที่ จ.6 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	260.637	332.098	310.463	328.803
	2	257.642	330.396	302.753	326.839
	3	257.042	331.172	299.591	337.986
	4	261.522	333.322	296.107	329.525
	5	262.172	334.553	303.776	339.596
	6	254.468	334.454	309.362	333.912
	7	260.637	334.701	303.733	342.390
	8	259.622	330.784	308.093	336.636
	9	256.379	334.553	299.424	344.186
	10	258.612	329.477	302.923	336.437
เฉลี่ย	258.873	332.551	303.623	335.631	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.477	2.005	4.611	5.830	

ตารางที่ จ.7 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	260.264	337.185	317.418	365.643
	2	255.883	337.385	316.917	361.449
	3	263.340	334.208	312.860	371.177
	4	258.444	341.472	310.374	373.496
	5	260.027	339.041	317.784	381.604
	6	259.622	336.786	315.465	374.254
	7	258.444	337.785	318.058	360.840
	8	258.310	342.543	315.511	367.626
	9	263.547	344.805	312.325	363.007
	10	263.064	338.086	309.318	373.671
เฉลี่ย		260.095	338.930	314.603	369.277
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		2.536	3.134	3.179	6.709

ตารางที่ จ.8 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	270.912	501.556	318.608	387.751
	2	276.057	492.350	319.574	392.978
	3	272.321	489.192	319.021	393.419
	4	272.829	503.464	328.947	399.146
	5	269.265	494.561	325.983	402.578
	6	273.813	489.804	321.518	391.849
	7	270.086	499.028	316.417	389.730
	8	272.829	495.806	325.983	388.739
	9	272.538	485.892	320.961	389.110
	10	271.056	483.139	318.562	399.340
เฉลี่ย		272.171	493.479	321.557	393.464
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.956	6.666	4.063	5.170

ตารางที่ จ.9 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วัน					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	276.724	537.750	317.418	389.917
	2	279.003	531.863	325.935	388.739
	3	288.765	528.808	318.654	386.032
	4	280.665	523.550	320.312	389.296
	5	273.630	530.677	319.574	389.544
	6	276.353	534.146	318.379	395.124
	7	291.355	539.262	325.603	400.049
	8	276.687	530.776	324.516	402.904
	9	281.578	529.988	326.601	402.904
	10	273.923	526.754	327.556	389.048
เฉลี่ย		279.868	531.358	322.455	393.356
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		5.982	4.746	3.927	6.382

ตารางที่ จ.10 ผลของค่าความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงเฟอร์ริติกที่มีปริมาณซิลิคอนร้อยละ 0.3, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน

ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วัน					
ความแข็ง (HV ₃₀)	จุดที่	0.3%Si	1%Si	2%Si	3%Si
	1	276.390	539.869	322.731	390.788
	2	275.134	531.369	335.196	396.968
	3	274.693	539.161	328.562	394.428
	4	296.807	530.973	325.840	402.904
	5	273.120	536.745	317.464	393.293
	6	290.076	530.973	326.744	382.809
	7	276.798	530.973	328.370	397.351
	8	277.096	533.549	327.173	392.853
	9	278.178	529.005	325.935	394.491
	10	291.878	533.152	317.966	394.301
เฉลี่ย		281.017	533.577	325.598	394.019
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		8.492	3.758	5.219	5.134