

ผลของโมลิบดีนัม และกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค
และสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

EFFECTS OF MOLYBDENUM AND HEAT TREATMENT
ON MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH CHROMIUM
CAST IRONS

นายศรัณย์ พลับเที่ยง รหัส 49364752
นางสาวอรทัย เทียนสีม่วง รหัส 49362437

ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 15905217
เลขเรียกหนังสือ..... ม/ร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๐/161 ๗

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของโมลิบดีนัม และกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค
และสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

ผู้ดำเนินโครงการ นายศรัณย์ พลับเที่ยง รหัส 49364752
 นางสาวอรทัย เทียนสีม่วง รหัส 49362437


ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่

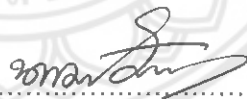
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ


ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ


ปีการศึกษา 2552

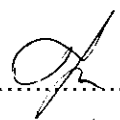
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่)


.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์นพวรรณ ไม้ทอง)


.....กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ผลของโมลิบดีนัม และกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูง		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายศรัณย์	พลับเที่ยง	รหัส 49364752
	นางสาวอรทัย	เทียนสีม่วง	รหัส 49362437
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ชูลีพรีย์ ป่าไร่		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2552		

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยนำเหล็กที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัมร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก โดยนำเหล็กหล่อสภาพหล่อทั้งสองไปอบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 8 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 350 ถึง 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ปริมาณธาตุศึกษาชนิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของเหล็กหล่อทั้งสอง ประกอบด้วยเดนไดรท์ของออสเทนไนต์-ปฐมภูมิล้อมรอบด้วยยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ หลังการอบตีสเตบิลไลเซชันประกอบด้วยคาร์ไบด์-ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในออสเทนไนต์ปฐมภูมิซึ่งเปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ระหว่างการเย็นตัวในอากาศ การอบเทมเปอร์หลังการอบตีสเตบิลไลเซชันทำให้ปริมาณเฟสมาเทนไซต์ และคาร์ไบด์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม จากการทดสอบความแข็งพบว่า การอบตีสเตบิลไลเซชันในเหล็กหล่อทั้งสองความแข็งเพิ่มขึ้นจากสภาพหล่อ เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในมาเทนไซต์ หลังการอบเทมเปอร์พบว่าในเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมความแข็งใกล้เคียงกับหลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน ส่วนเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัมความแข็งสูงกว่าการอบตีสเตบิลไลเซชันอาจเนื่องมาจากการตกตะกอนของโมลิบดีนัมคาร์ไบด์แต่เมื่ออบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส ความแข็งของเหล็กหล่อทั้งสองมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าในสภาพหล่ออาจเนื่องจากการเกิดโครงสร้างเฟอไรท์

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการในครั้งนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ อบรม ให้ความรู้ จากท่านอาจารย์ชูลีพรีย์ ป่าไร่ และอาจารย์อัมพร เวียงมูล ที่ช่วยชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาอุตสาหกรรมทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณครูช่าง อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของเครื่องชั่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์อัมพร เวียงมูล ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำงานทดลอง และงบประมาณต่างๆ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ที่อำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้สถานที่เรียน

ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดระยะเวลาที่ศึกษา และเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจในการทำรูปเล่มครั้งนี้

ผู้ดำเนินโครงการ
ศรัณย์ พลับเที่ยง
อรทัย เทียนสีม่วง

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	1
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 แผนการดำเนินโครงการ.....	2
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	3
2.1 เหล็กหล่อโครเมียมสูง.....	3
2.2 แผนภาพของระบบเหล็ก-โครเมียม-คาร์บอน.....	6
2.3 เหล็กหล่อโครเมียมสูงอสเทนนิติก.....	8
2.4 เหล็กหล่อโครเมียมสูงมาร์เทนซิติก.....	9
2.5 เหล็กหล่อผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม.....	10
2.6 กรรมวิธีทางความร้อนเหล็กหล่อโครเมียมสูง.....	11
2.7 การกระจายของคาร์ไบด์.....	12
2.8 การใช้งานของเหล็กหล่อโครเมียมสูง.....	13
2.9 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	17
3.1 วัตถุประสงค์ และส่วนผสมทางเคมี.....	17
3.2 กรรมวิธีทางความร้อน	17
3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	19
3.4 การศึกษาชนิดเฟส.....	20
3.5 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ.....	21
3.6 การทดสอบความแข็ง	21
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....	22
4.1 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อ.....	22
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งหลังกรรมวิธีทางความร้อน หลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน.....	31
4.3 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการอบเทมเปอร์ิ่ง	41
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผล.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา	60
5.3 ปัญหา และแนวทางการแก้ไข.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก ก.....	62
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ.....	2
2.1 ชนิดของโครเมียมคาร์ไบด์ และความแข็ง.....	4
2.2 ส่วนผสม และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียม (BS 4844).....	5
2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง (ASTM A532 87)	5
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.2 สภาวะการอบตีสเตบิลไลเซชันของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.3 สภาวะการอบเทมเปอริงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงชนิด A และ B	18
4.1 ปริมาณธาตุโครเมียม เหล็ก โมลิบดีนัม และคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในยูเทคติกคาร์ไบด์ และเดนไดรท์ ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม.....	28
4.2 ปริมาณธาตุโครเมียม เหล็ก โมลิบดีนัม และคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในยูเทคติกคาร์ไบด์ และเดนไดรท์ ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม.....	29
4.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบตีสเตบิลไลเซชันต่อการตกตะกอนของขนาด ของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงไม่เติมโมลิบดีนัม	36
4.4 ศึกษาผลของเวลาในการอบตีสเตบิลไลเซชันต่อการตกตะกอนของขนาด ของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงไม่เติมโมลิบดีนัม.....	36
ก.1 ผลของการอบตีสเตบิลไลเซชันต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม..	63
ก.2 ผลของการอบตีสเตบิลไลเซชันต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม.....	64
ก.3 ผลของการอบตีสเตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอริงต่อความแข็งของเหล็กหล่อ โครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม.....	65
ก.4 ผลของการอบตีสเตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอริงต่อความแข็งของเหล็กหล่อ โครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม.....	66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพของระบบเหล็ก-โครเมียม-คาร์บอนของ Thorpe และ Chicco แสดงส่วนผสมของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้งานโดยทั่วไปซึ่งมีโครงสร้างเป็นอสเทนไนต์.....	7
2.2 แผนภาพแสดงภาพฉายของพื้นผิวลิวคิตัส (Liquidus Surface) ของระบบเหล็ก-โครเมียม-คาร์บอนของ โดยกล้องสีเหลี่ยมแสดงส่วนผสมของเหล็กหล่อโครเมียมสูงแบบไฮโปยูเทคติกที่ใช้งานโดยทั่วไป.....	7
2.3 โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักที่ประกอบด้วย เคนไดรท์ปฐมภูมิยูเทคติกคาร์ไบด์ และยูเทคติก-อสเทนไนต์ที่เปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์.....	8
2.4 ตัวถังปั๊มแบบหอยโข่งสำหรับการขนถ่ายน้ำมันดิน ตัวปั๊มมีรัศมีภายใน 1 เมตร และมีน้ำหนัก 350 กิโลกรัม.....	14
2.5 ล้อลูกกลิ้งสำหรับใช้ในการบดหินในอุตสาหกรรมเหมืองแร่มีน้ำหนัก 4500 กิโลกรัม.....	15
3.1 กรรณวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูง.....	17
3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	19
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope).....	20
3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Philips รุ่น Expert	20
3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Galileo	21
4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อที่ประกอบด้วยเคนไดรท์ของอสเทนไนต์ปฐมภูมิ และยูเทคติกคาร์ไบด์-อสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม.....	23
4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อที่ประกอบด้วยเคนไดรท์ของอสเทนไนต์ปฐมภูมิ และยูเทคติกคาร์ไบด์-อสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม.....	24
4.3 ลักษณะของยูเทคติกคาร์ไบด์หลังการกัดกรดแบบลึก.....	25
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม.....	26
4.5 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ แบบจุด (Point Analysis) ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม.....	27
4.6 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ แบบจุด (Point Analysis) ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม.....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ แบบ Mapping แสดงการกระจายตัวของเหล็ก โมลิบดีนัม คาร์บอน ไครเมียม บริเวณยุคตึกคาร์ไบด์ และเดนไดรท์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัมในสภาพหล่อ โดยสีเหลืองแทนธาตุเหล็กสีเขียวแทนโมลิบดีนัม สีแดงแทนคาร์บอน สีน้ำเงินแทนโครเมียม 30
4.8	โครงสร้างจุลภาคหลังการอบตีสเตปโลเซชันของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมที่มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาเทนไซต์..... 32
4.9	ภาพถ่ายจากกล้องSEM แสดงลักษณะคาร์ไบด์ใน 3 มิติ หลังการกัดกรดแบบลึก..... 33
4.10	ผลของอุณหภูมิในการตีสเตปโลเซชันต่อการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ไม่เติมโมลิบดีนัม โดยอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมงเท่ากัน..... 34
4.11	ผลของเวลาในการอบตีสเตปโลเซชันต่อการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ไม่เติมโมลิบดีนัม เมื่ออบที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเท่ากัน..... 35
4.12	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อ และหลังการอบตีสเตปโลเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม..... 37
4.13	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อ และหลังการอบตีสเตปโลเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม..... 38
4.14	ผลของการอบตีสเตปโลเซชันต่อความแข็งแรงโดยที่ให้ (—) แทนเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และ (- - -) แทนเหล็กหล่อโครเมียมสูงเติมโมลิบดีนัม วงกลม แทนอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการอบเทมเปอร์ริง..... 40
4.15	โครงสร้างจุลภาคหลังการอบตีสเตปโลเซชัน และเทมเปอร์ริง..... 42
4.16	ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาเทนไซต์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตปโลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง..... 43
4.17	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และเทมเปอร์คาร์ไบด์ในยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตปโลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง..... 46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาแทนไซด์ เหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอร์িংเป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	49
4.19 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และเทมเปอร์คาร์ไบด์ในยูเทคติก คาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน และการอบ เทมเปอร์িং เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	52
4.20 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาแทนไซด์หลังการอบ ตีสเตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอร์িং เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส.....	55
4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม.....	57
4.22 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม.....	58
4.23 ผลของอุณหภูมิหลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอร์িংต่อความแข็งของเหล็กหล่อ โครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

จากปัญหาปื้มหอยโข่งของโรงถลุงสังกะสี จังหวัดตาก ที่มีการใช้เหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักในสภาพหล่อเป็นปื้มหอยโข่งขนถ่ายสินแร่ ซึ่งปื้มหอยโข่งที่ผลิตในประเทศไทยมีอายุการใช้งานสั้นเพียง 6 วันเท่านั้น เนื่องจากการเสียดสีของสินแร่มีความแข็งสูง และการกัดกร่อนของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการแยกแร่สังกะสี จึงมีแนวคิดปรับปรุง และยืดอายุการใช้งานของปื้มให้นานขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปวิธีการปรับปรุงเหล็กหล่อให้มีความแข็งเพิ่ม โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อน และการเติมธาตุ

ดังนั้นโครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมธาตุโมลิบดีนัม และกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากโครงการนี้จะได้รับความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย และอุตสาหกรรมทั่วไป ที่มีการใช้งานเหล็กหล่อโครเมียมสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาผลของการเติมโมลิบดีนัมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่เติมโมลิบดีนัมร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก และไม่เติมโมลิบดีนัม หลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง

1.3.2 ผลความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่เติมโมลิบดีนัมร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก และไม่เติมโมลิบดีนัม หลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 ผลของการเติมโมลิบดีนัมในเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักต่อโครงสร้างจุลภาคภายหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง

1.4.2 ผลของการเติมโมลิบดีนัมในเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักต่อความแข็งหลังผ่านการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 โมลิตินัมที่เติมมีปริมาณร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก

1.5.2 กรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้คือ การอบดีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง

1.5.3 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด

1.5.4 ศึกษาสมบัติโดยการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์

1.6 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

ลำดับ	การดำเนินงาน	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←→						
2	นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อในแบบหล่อทราย มาอบดีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง		←→					
3	เตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค				←→			
4	ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวมของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด					←→		
5	ทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์						←→	
6	วิจารณ์ผลการทดลอง						←→	
7	สรุปผลการทดลอง และเขียนรายงาน							←→

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 เหล็กหล่อโครเมียมสูง

เหล็กหล่อขาวผสมโครเมียมสูงเริ่มมีบทบาทการใช้งานที่สำคัญมากขึ้นในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมซีเมนต์ โดยเฉพาะลูกบดเพราะโครเมียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติทนการเสียดสีสูง ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น โดยทั่วไปในเหล็กหล่อโครเมียมสูงจะมีคาร์บอนระหว่าง ร้อยละ 2.0 ถึง 3.0 โดยน้ำหนัก และปริมาณของโครเมียมประมาณร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ในปัจจุบันมีโรงหล่อผลิตเหล็กหล่อโครเมียมสูงอยู่หลายเกรด แต่ที่นิยมผลิตมากที่สุดได้แก่เหล็กหล่อโครเมียมสูงชนิด 2828 คือเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 2.8 โดยน้ำหนัก และมีโครเมียมผสมอยู่ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก การผลิตเหล็กหล่อโครเมียมสูงได้ทำกันมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว โดยหลอมด้วยเตา Cupola แต่ทำการควบคุมด้านคุณภาพกระทำไม่ได้ดีที่ควร เพราะการหลอมด้วยเตา Cupola การควบคุมปริมาณคาร์บอนได้ยาก ทำให้เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีปริมาณคาร์บอนสูง เกิดการเปราะแตกหักง่ายขึ้น แต่ปัญหานี้ได้หมดไปหลังปี 2462 เมื่อบริษัท Niagara Work ได้ทดลองหลอมเหล็กหล่อโครเมียมสูงด้วยเตาไฟฟ้า ซึ่งสามารถผลิตเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนต่ำ และเพิ่มปริมาณของโครเมียมได้สูงถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ทำให้ปริมาณการใช้เหล็กหล่อโครเมียมสูงเพิ่มมากขึ้น จึงกลายเป็นคู่แข่งของเหล็กกล้า Hadfield โดยเฉพาะที่ใช้ทำลูกบดวัสดุแข็ง เช่น ซีเมนต์ และแร่ต่างๆ

จากรายงานของ K. Bungardt, R.S. Jackson และ W. Jellinghaus ปรากฏโครเมียมคาร์ไบด์อยู่ 4 ชนิด ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอน และโครเมียมที่รวมตัวกัน คือ $(Fe,Cr)_3C$, $(Fe,Cr)_7C_3$, $(Fe,Cr)_{23}C_6$ และ $(Fe,Cr)_3C_2$ ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของโครเมียมคาร์ไบด์ และความแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ทุกชนิดจะมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงกว่ามาร์เทนไซต์ คือ มีค่าความแข็งอยู่ประมาณ 1000 ถึง 1800 HV₅₀ ถึงแม้ว่าความแข็งของโครเมียมคาร์ไบด์จะสูงมากก็จริง แต่สมบัติด้านทนทานการสึกหรอของเหล็กหล่อจะมีมาก หรือน้อยจะขึ้นอยู่กับเดนไดรต์ เพราะถ้าเดนไดรต์ไม่มีความแข็งสูงพอที่จะต้านทานการสึกหรอ คาร์ไบด์ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยเดนไดรต์จะถูกทำให้หลุดไปได้ง่ายในขณะใช้งาน การสึกหรอของเหล็กหล่อจะอยู่ในอัตราสูง ดังนั้นการศึกษาเรื่องเหล็กหล่อโครเมียมสูงจึงต้องพิจารณา รวมไปถึงเดนไดรต์ รวมถึงกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้ได้เดนไดรต์ที่มีความแข็งสูง และทนทานการสึกหรอ (มนัส, 2527)

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโครเมียมคาร์ไบด์ และความแข็ง

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

ที่มา : มนัส (2527)

2.1.1 มาตรฐานเหล็กหล่อโครเมียมสูง

มาตรฐานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มักถูกอ้างอิงถึงมี 2 มาตรฐาน คือ British Standard (BS484) และ ASTM Standard A532 สำหรับ JIS ยังไม่ปรากฏว่ามีมาตรฐานเหล็กหล่อโครเมียมสูง มาตรฐานของเหล็กหล่อโครเมียมสูงของอังกฤษแบ่งออกเป็น 5 เกรด ดังตารางที่ 2.2 ส่วนมาตรฐานเหล็กหล่อโครเมียมสูงของอเมริกา ASTM แบ่งออกเป็น 6 เกรด ดังตารางที่ 2.3

เหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 14 ถึง 28 โดยน้ำหนัก สามารถใช้งานในรูปของ ออสเทนไนต์ หรือมาเทนไซด์จุดประสงค์การเติมโมลิบดีนัมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ หลังการหล่อ และเพิ่มความสามารถในกรรมวิธีทางความร้อน ส่วนซิลิกอนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล และลดการเกิดออกซิเดชัน แต่ปริมาณของซิลิกอนต้องไม่เกินร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก เนื่องจากจะทำให้เกิดโครงสร้างของเฟิร์ลไลต์ และลดความสามารถในการชุบแข็ง ส่วนเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 30 ถึง 35 โดยน้ำหนัก จะใช้ในงานที่ต้องการความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง เช่น ชิ้นส่วนของเตาเผา โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกลุ่มนี้ ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ และยูเทคติกคาร์ไบด์ (อัมพร, 2549)

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสม และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง (BS 4844)

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

ที่มา : อัมพร (2549)

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูง (ASTM A532-87)

Class	Type	Designation	Element (%wt)								
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu
I	A	Ni-Cr-HC	2.8-3.6	2.0	0.8	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0	0.3	0.15	-
	B	Ni-Cr-IC	2.4-3.0	2.0	0.8	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0	0.3	0.15	-
	C	Ni-Cr-GB	2.5-3.7	2.0	0.8	4.0	1.0-1.5	1.0	0.3	0.15	-
	D	Ni-HiCr	2.5-3.6	2.0	2.0	4.5-7.0	7.0-11.0	1.5	0.1	0.15	-
II	A	12%Cr	2.0-3.3	2.0	1.5	2.5	11.0-14.0	3.0	0.1	0.6	1.2
	B	15%Cr-Mo	2.0-3.3	2.0	1.5	2.5	14.0-18.0	3.0	0.1	0.6	1.2
	D	20%Cr-Mo	2.0-3.3	2.0	1-2.2	2.5	18.0-23.0	3.0	0.1	0.6	1.2
III	A	25%Cr	2.3-3.3	2.0	1.5	2.5	23.0-30	3.0	0.1	0.6	1.2

ที่มา : อัมพร (2549)

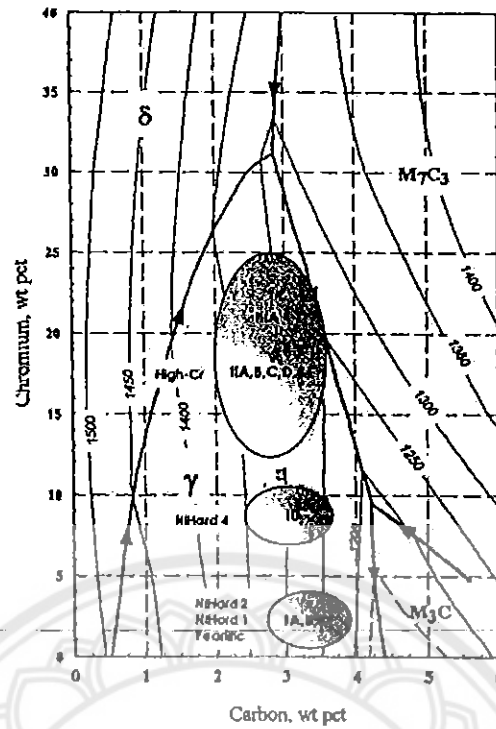
2.2 แผนภาพของระบบเหล็ก-โครเมียม-คาร์บอน

จากรูปที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงตามมาตรฐาน ASTM A532 (ตารางที่ 2.3) ในเฟสไดอะแกรมของ Thorpe and Chicco สำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูง IA, B and C ที่อยู่ส่วนล่างของรูปที่ 2.1 จะเกิดโครงสร้างยูเทคติกของออสเทนไนต์ และคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_3C$ ในขณะที่เหล็กหล่อ ID, IIA, B, C, D, E และ IIIA จะเกิดโครงสร้างยูเทคติกของออสเทนไนต์ และคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_7C_3$ ส่วนของเหล็กหล่อเกรด ID ที่มีปริมาณโครเมียมสูงกว่าเกรด IA-C จะเกิดยูเทคติกของคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_7C_3$ ซึ่งบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_3C$ ในระหว่างการเย็นตัว ทำให้เกิดโครงสร้างของคาร์ไบด์ดูเพล็กซ์ซึ่งจะมีขนาดเล็กกว่าคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_3C$ ในเกรด IA-C ทำให้เหล็กหล่อเกรด ID มีความเหนียวสูงกว่า เมื่อปริมาณคาร์บอนในเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของปฏิกิริยายูเทคติกเพิ่มขึ้น

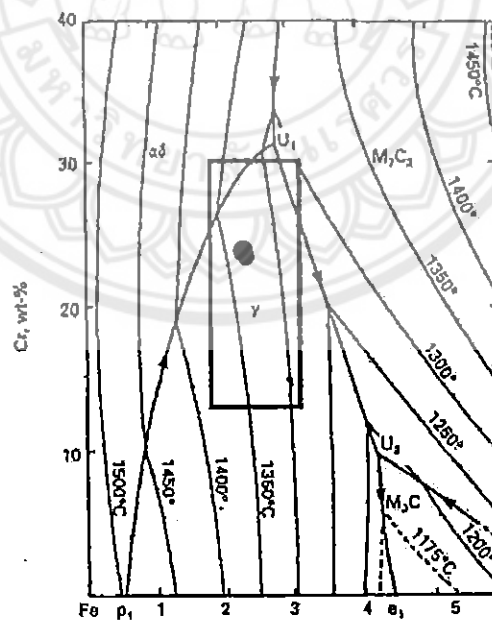
เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ได้รับการใช้งานส่วนใหญ่เป็นแบบไฮโปยูเทคติก ที่มีส่วนผสมอยู่ในช่วงเฟสของออสเทนไนต์ คือ โครเมียมร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนร้อยละ 2 ถึง 3.5 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 2.2 เหล็กหล่อกลุ่มนี้เมื่อแข็งตัวจากน้ำโลหะจะเกิดเป็นเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิตามด้วยยูเทคติกของออสเทนไนต์ และยูเทคติกคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_7C_3$ จากรูปที่ 2.2 การแข็งตัวของเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมโครเมียมร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนัก เริ่มจากเกิดเป็นเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ในขณะที่เดียวกันโครเมียม และคาร์บอนจะถูกผลักออก ทำให้น้ำโลหะมีปริมาณโครเมียมและคาร์บอนสูงขึ้น และเคลื่อนที่เข้าสู่จุดยูเทคติก (U_1-U_2) จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงปฏิกิริยายูเทคติก ($L \rightarrow \gamma + (Fe,Cr)_7C_3$) จะเกิดโครงสร้างของยูเทคติก คือยูเทคติกออสเทนไนต์ และยูเทคติกคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_7C_3$ ระหว่างแขนของเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ การแข็งตัวของโลหะจะสมบูรณ์ก่อนจะถึงจุด U_2

เหล็กที่ส่วนผสมในช่วงคาร์บอนร้อยละ 2 ถึง 2.5 โดยน้ำหนัก และมีโครเมียมมากกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะเกิดเฟสเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิ ซึ่งมักใช้ในงานที่ต้องการความต้านทานต่อความร้อน แต่เหล็กหล่อกลุ่มนี้จะอ่อนเกินไปทำให้สามารถทนต่อการสึกหรอไม่ได้นักทั้งนี้เนื่องจากเฟอร์ไรต์มีเสถียรภาพตลอดช่วงอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง และเหล็กหล่อกลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งโดยกรรมวิธีทางความร้อนได้

โดยทั่วไปแล้วเราจะหลีกเลี่ยงเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมในช่วงที่เป็นไฮเปอร์ยูเทคติก ซึ่งทำให้เกิดเฟสคาร์ไบด์ปฐมภูมิ เนื่องจากคาร์ไบด์ปฐมภูมินั้นเป็นเฟสที่ขนาดใหญ่ และทำให้ชิ้นงานหล่อเปราะ การแข็งตัวของเหล็กหล่อนี้เริ่มจากการเกิดเป็นคาร์ไบด์ $(Fe,Cr)_7C_3$ ปฐมภูมิ ทำให้น้ำโลหะมีปริมาณโครเมียม และคาร์บอนลดลง และเคลื่อนที่เข้าสู่ปฏิกิริยายูเทคติก (U_1-U_2) (อัมพร, 2549)



รูปที่ 2.1 แผนภาพ ของระบบเหล็ก-โครเมียม-คาร์บอนของ Thorpe และ Chicco แสดงส่วนผสมของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้งานโดยทั่วไปซึ่งมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์
ที่มา : ปรกาศทิพย์ และอัมพร (2550)



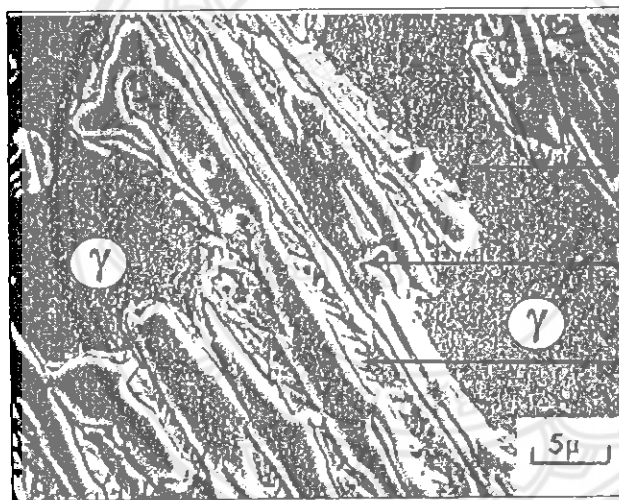
● แทนตำแหน่งเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก คาร์บอนร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงภาพฉายของพื้นผิวลิกวิดัส (Liquidus Surface) ของระบบเหล็ก-โครเมียม-คาร์บอนของ โดยกลองสีเหลี่ยมแสดงส่วนผสมของเหล็กหล่อโครเมียมสูงแบบไฮโปยูเทคติกที่ใช้งานโดยทั่วไป

ที่มา : Chicco and Thorpe (2536)

2.3 เหล็กหล่อโครเมียมสูงอสเทนนิติก

เหล็กหล่อที่มีปริมาณโครเมียมประมาณร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนร้อยละ 2 ถึง 3.5 โดยน้ำหนัก จะถูกนำไปใช้สำหรับผลิตเป็นชิ้นส่วนที่มีสมบัติเฉพาะสำหรับใช้งานในงานลักษณะต่างๆ เช่น กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับแร่ การผลิตปูนซีเมนต์ และระบบปั๊มของไหลประเภทของเหลวเนื้อผสมชนิดอนุภาคหนืด เป็นต้น เนื่องจากสภาพความต้านทานการสึกหรอ และความเหนียวของเหล็กประเภทนี้จะแปรไปตามคุณสมบัติในการทำงาน โดยขึ้นอยู่กับชนิด และสัดส่วนของคาร์ไบด์ในเนื้อเหล็ก รวมทั้งประเภทการใช้งาน และการมีเดนไดรท์ที่มีสมบัติเหมาะสมโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของเหล็กหล่อกลุ่มนี้ ประกอบด้วยเดนไดรท์ (โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน) ของออสเทนไนต์ โดยระหว่างแกนเดนไดรท์ (Interdendritic Dendrite) จะประกอบด้วยโครงสร้างของยูเทคติก (Eutectic Structure) ซึ่งประกอบด้วย ยูเทคติกคาร์ไบด์ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็กโครเมียม และคาร์บอน คือ M_7C_3 และยูเทคติกออสเทนไนต์ที่มักจะเปลี่ยนเป็นมาเทนไซต์ระหว่างการเย็นตัวในแบบหล่อ ดังรูปที่ 2.3 (ประกายทิพย์ และอัมพร, 2550)



เดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ

ยูเทคติกคาร์ไบด์ M_7C_3

ยูเทคติกออสเทนไนต์ที่

เปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์

รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย เดนไดรท์ปฐมภูมิ ยูเทคติกคาร์ไบด์ และยูเทคติกออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์

ที่มา : Pearce (2542)

สำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงนั้น เฟสออสเทนไนต์ที่เกิดจากการแข็งตัวของน้ำโลหะอาจจะตกค้างระหว่างการเย็นตัวในแบบ หรืออาจจะเปลี่ยนไปเป็นมาเทนไซด์ (บางส่วน หรือทั้งหมด) หรือกลายเป็นเฟอร์ไรท์ และคาร์ไบด์ที่เล็กละเอียด (แบบทุติยภูมิ หรือเฟิร์ลลิติก) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ ได้แก่ ส่วนผสมทางเคมี และอัตราการเย็นตัวเฉพาะแห่งของชิ้นงาน

โครงสร้างจุลภาคที่มีเดนไดรท์เป็นอสเทนไนต์ทั้งหมดจะเกิดภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

- การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (เช่น ในบริเวณชิ้นงานหนาไม่มาก)
- อัตราส่วนระหว่างโครเมียม/คาร์บอนมีค่าสูง
- มีธาตุ निकิล โมลิบดีนัม หรือทองแดง
- มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ในระหว่างการเย็นตัวของชิ้นงานน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- ไม่มีการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์ และคาร์ไบด์ หรือเฟิร์ลไลต์
- อุณหภูมิของการเกิดเฟสมาเทนไซต์ (Martensite Start Temperature, M_s) ของเฟส

อสเทนไนต์ต่ำกว่าอุณหภูมิโดยรอบ

ในการใช้งานบางอย่าง เหล็กหล่อโครงสร้างอสเทนไนติกในสภาพหล่ออาจใช้ได้ ทั้งนี้เนื่องจากเฟสอสเทนไนต์สามารถเพิ่มความแข็งเมื่อได้รับแรงกระทำ (Work Harden) โดยมีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 900 HV₃₀ ซึ่งทำให้ผิวชิ้นงานที่ทนต่อการสึกหรอเกิดใหม่ทดแทนได้

2.4 เหล็กหล่อโครเมียมสูงมาร์เทนซิติก

เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสเทนไนต์มีข้อจำกัด คือ มีความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อทำให้มีโครงสร้างที่แข็งขึ้น โดยกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจากอสเทนไนต์ที่อ่อนไปเป็นมาเทนไซต์ที่แข็ง

กรรมวิธีทางความร้อนเหล็กหล่อโครเมียมสูง เริ่มจากการเผาเหล็กหล่อโครเมียมสูงภายหลังการเย็นตัวในแบบหล่อที่อุณหภูมิระหว่าง 950 ถึง 1100 องศาเซลเซียส เพื่อให้โครเมียม และคาร์บอนที่ละลายอยู่ในอสเทนไนต์ (ในสภาพหล่อ) ซึ่งละลายอยู่ในลักษณะเกินจุดอิ่มตัวที่ ออสเทนไนต์จะยอมให้ละลายอยู่ได้ การเผาในขั้นนี้จะเรียกว่า ดิสเตบิไลเซชัน (Destabilisation) ทำให้คาร์บอน และโครเมียมแยกตัวออกมารวมตัวกันเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Secondary Carbide) ซึ่งเป็นการลดปริมาณคาร์บอนในอสเทนไนต์ ทำให้ความสามารถในการชุบแข็งของอสเทนไนต์เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ออสเทนไนต์จะเปลี่ยนไปเป็นเฟิร์ลไลต์ได้ยากขึ้น หรือโอกาสที่จะได้มาร์เทนไซต์จะสูงขึ้น หลังการทำดิสเตบิไลเซชันในเวลาพอสมควรแล้ว (1 ชั่วโมง ต่อความหนา 20 ถึง 25 มิลลิเมตร) แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลงอย่างรวดเร็วโดยการใส่ลมเป่าด้านล่างที่มีขนาดเล็ก และรูปร่างซับซ้อน แต่ถ้าเป็นชิ้นงานที่มีความหนามากๆ จะใช้การชุบน้ำมัน (Oil Quenched) ซึ่งจะทำได้โครงสร้างมาเทนไซต์และอสเทนไนต์บางส่วนที่ตกค้าง (อัมพร, 2549)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาเทนซิติก จะมีคาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะลดความต้านทานแรงกระทำ ความแข็งที่อุณหภูมิสูง และความต้านทานการกัดกร่อน ในขณะที่ออสเทนไนต์เหลือตกค้างจะลดความต้านทานแรงดึง ความแข็ง และความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ แต่บางครั้งพบว่าสามารถส่งผลกระทบต่อความต้านทานการสึกหรอ ด้านทานการล้าตัว และเพิ่มความเหนียวระหว่างการใช้งาน ทั้งนี้อาจมีการเติมไนโอเบียม ซิลิกอน ทังสเตน หรือวาเนเดียม

เพื่อปรับปรุงสมบัติที่ได้หลังการอบคลายความเค้น และอาจเติมนิกเกิลในปริมาณเล็กน้อยเพื่อความแข็งแรง (สยาม, 2554)

2.5 เหล็กหล่อผสมโครเมียม-โมลิบดีนัม

การผสมโมลิบดีนัมในเหล็กหล่อโครเมียม จะส่งผลด้านเพิ่มความต้านทานการสึกหรอของเหล็กได้ เพราะโมลิบดีนัมเมื่อรวมกับคาร์บอนจะได้คาร์ไบด์จะมีความแข็งสูงประมาณ 1000 HV₅₀ และเป็น การเพิ่มคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) ให้กับเหล็ก โดยมีบทบาทที่จะป้องกันไม่ให้ออสเทนไนต์เปลี่ยนไปเป็นเฟอไรต์ในขณะเหล็กเย็นตัวในแบบทราย หรือในขณะทำการกรรมวิธีทางความร้อน การผสมโมลิบดีนัมนอกจากจะเพิ่มความต้านทานการ สึกหรอแล้ว ยังมีผลในส่วนที่เกี่ยวกับความเหนียวของเหล็กจะดีขึ้น โดยเฉพาะกับงานหล่อที่มีความหนามากๆ ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบดแร่ มักจะทนต่อการกระแทกสูง จึงนิยมใช้เหล็กหล่อผสมทั้งโครเมียม และโมลิบดีนัม ถึงแม้ว่าเหล็กจะมีราคาแพงกว่าเหล็กผสมโครเมียมเพียงอย่างเดียวก็ตาม ดังที่ปรากฏในมาตรฐานเหล็กผสมโครเมียม ASTM A 532 ชั้นคุณภาพ 15 Cr-Mo ดังตารางที่ 2.3 จะผสมโมลิบดีนัมร้อยละ 1 ถึง 3 โดยน้ำหนัก โดยลดปริมาณโครเมียมลงเหลือร้อยละ 14 ถึง 18 โดยน้ำหนัก และในชั้นคุณภาพโครเมียมร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก จะผสมโมลิบดีนัมประมาณไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก เหล็กหล่อโครเมียมโมลิบดีนัมบางชนิดที่ใช้กับงานหล่อที่มีความหนามากๆ จะผสมนิกเกิล และทองแดง ประมาณไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลงไปเพื่อความมุ่งหมายในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มขึ้น ดังเช่นเหล็กหล่อผสมโครเมียม และโมลิบดีนัมที่มีตามมาตรฐาน BS 4844 ดังตารางที่ 2.2 ส่วนผสม และความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียม BS 4844 เหล็กหล่อผสมโครเมียม และโมลิบดีนัมสามารถนำไปใช้งานได้ในสภาพหล่อ เพราะโครงสร้างที่ได้จะเป็นออสเทนไนต์ แต่เนื่องจากชิ้นงานภายหลังการเย็นตัวในแบบทรายจะมีความเครียดเหลือค้างอยู่บ้าง จึงสมควรนำไปอบคลายความเครียดที่อุณหภูมิ 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส เพื่อปรับปรุงความเหนียว โดยไม่ทำให้ความแข็งลดลง

หมายเหตุ : ธาตุผสมที่มีบทบาทในเหล็กหล่อโครเมียมในฐานะที่เป็นธาตุผสมร่วมได้แก่ซิลิกอน และแมงกานีส ซิลิกอนมีผลทำให้เดนไดรต์มีแนวโน้มเป็นเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะทำให้เหล็กมีความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอต่ำลง แต่ถ้าผสมซิลิกอนในเหล็กหล่อโครเมียมไม่เกินร้อยละ 1.4 โดยน้ำหนัก จะมีผลทางด้านลดความต้านทานการสึกหรอน้อย แต่ถ้าเกินกว่าร้อยละ 1.4 โดยน้ำหนัก จะมีผลไปลดความต้านทานการสึกหรอ และความแข็งแรงมาก แมงกานีสมีผลทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์สูงขึ้น โดยแมงกานีสสามารถรวมกับคาร์บอนร่วมกับโครเมียมในรูป (Fe,Cr)₇C₃ แต่จะมีผลทำให้คาร์ไบด์เปราะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงโดยส่วนรวมลดลง และอีกประการหนึ่งแมงกานีสเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้สูงขึ้น ทำให้ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพสูงจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซด์ได้ช้า แต่เมื่อถูกแรงกระแทกในขณะที่ใช้งาน ทำให้ความต้านทานการสึกหรอของเหล็กลดลง (มนัส, 2527)

2.6 กรรมวิธีทางความร้อนเหล็กหล่อโครเมียมสูง

สาเหตุที่ต้องใช้กรรมวิธีทางความร้อนกับเหล็กหล่อ โดยทั่วไปมีดังนี้

- เพื่อเป็นการคลายความเค้นภายใน
- เพื่อทำให้โครงสร้างอสเทนไนต์ และเป็นการทำให้เหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือชุบแข็ง ทำให้เหล็กแข็งขึ้น ในสภาพที่มีปริมาณธาตุผสมอยู่ต่ำ
- ทำให้โครงสร้างอสเทนไนต์ในเหล็กโครเมียมสูงเกิดความไม่เสถียร เพื่อช่วยให้เกิดการชุบแข็งในบรรยากาศ (Air-Hardening) ได้
- เพื่อเป็นการอบคืนตัว หรือการอบเทมเปอร์ริง (Tempering) โครงสร้างมาร์เทนไซต์
- เป็นการอบเพื่อแก้ปัญหาความไม่เหมาะสม และสมำเสมอของสมบัติในการหล่อ
- ทำให้เหล็กมีความแข็งลดลง เพื่อให้การกัดกลึง หรืองานปรับแต่งทำได้ง่ายขึ้น
- ปรับปรุงความเหนียว โดยการอบที่อุณหภูมิสูง
- เปลี่ยนสภาพของอสเทนไนต์ที่ตกค้าง

หลังจากงานหล่อผ่านการชุบมาแล้วย่อมจะมีความเครียดเหลือค้าง ควรจะต้องทำกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อคลายความเครียดเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงาน การอบคลายความเครียดจะอบชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลาระหว่าง 4 ถึง 8 ชั่วโมง ในกรณีที่ชิ้นงานต้องรับแรงกระแทกสูงควรใช้อุณหภูมิอบคลายความเครียดสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส ภายหลังจากชิ้นงานผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้ว ควรจะเพิ่มความแข็ง ขึ้นจากสภาพหล่อ 500 HV₁₀ เป็น 800 HV₁₀

ในกรณีที่ต้องกลึง หรือกัดเจาะชิ้นงานหล่อภายหลังการเย็นตัวในแบบทราย ซึ่งมีความแข็งสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานอ่อนลงโดยการอบอ่อน (Annealing Heat Treatment) สำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงสามารถทำการอบอ่อนได้ โดยการอบที่อุณหภูมิ 950 ถึง 1010 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นลงช้าๆ ในเตาจนถึงอุณหภูมิประมาณ 760 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เหล็กอยู่อุณหภูมินานประมาณ 10 ถึง 50 ชั่วโมง จะทำให้คาร์บอนแยกตัวมารวมกับโครเมียมเป็นคาร์ไบด์ ให้เหลือคาร์บอนละลายในอสเทนไนต์น้อยที่สุดเพื่ออสเทนไนต์จะได้เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ในช่วงการเย็นตัวสุดท้าย ซึ่งโครงสร้างที่ได้จะเป็นเฟอร์ไรต์โดยมีคาร์ไบด์กระจายอยู่ทั่วไป ทำให้สามารถกลึง หรือไสได้สะดวก

ชิ้นงานหล่ออาจได้รับการอบอ่อนการอบตีสเตปิลเซชัน เพื่อให้ชิ้นงานมีส่วนผสมที่สมำเสมอ ซึ่งทำได้โดยการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 740 ถึง 780 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ถึง 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา (Furnace Cooling) จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส การอบอ่อนจะทำให้ได้เดนไดรท์ที่อ่อน (ความแข็งประมาณ 350 ถึง 400 HV₃₀) เนื่องจากเดนไดรท์ประกอบด้วยเฟิร์ลลิติกคาร์ไบด์ และเฟอร์ไรท์ ชิ้นงานในลักษณะนี้จะกัดแต่งได้ง่าย และมีความเค้นตกค้างต่ำ

โครงสร้างที่ได้รับการเพิ่มความแข็งมักจะมีเฟสออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite) ซึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการใช้งาน ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก เพื่อที่จะลดข้อเสียข้อนี้ เราสามารถลดปริมาณเฟสออสเทนไนต์ตกค้างโดยการอบเทมเปอร์ริงใต้วิกฤติ (Sub-Critical Tempering) ซึ่งเป็นกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูงอีกวิธีหนึ่ง เพื่อปรับปรุงสมบัติ ด้านทานการสึกหรอโดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน และไม่เสี่ยงต่อการแตกร้าวมากนัก แต่ผลที่ได้จะไม่สูงเท่ากับกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยหลักการจะใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส อบชิ้นงานหล่อภายหลังจากที่เย็นตัวในแบบ ททรายแล้ว ซึ่งจะทำให้ออสเทนไนต์เหลือค้างบางส่วนที่เกิดจากการเย็นตัวในแบบทรายเปลี่ยนเป็น มาเทนไซด์ และเมื่อปล่อยให้เหล็กเย็นตัวลงมาจนถึงอุณหภูมิห้องจะทำให้เหล็กมีความแข็งสูงขึ้น เล็กน้อย ภายหลังกการอบเทมเปอร์ริง หรืออบคืนไฟจะให้ความแข็งประมาณ 709 HV₃₀ และเหล็กจะมีความเหนียวสูงขึ้น การอบเทมเปอร์ริงจะได้ผลดีเฉพาะกับเหล็กหล่อโครเมียม-โมลิบดีนัม ซึ่งนิยมใช้ มากในอุตสาหกรรมทำลูกรีดเหล็กขนาดใหญ่ และจะทำหลังจากการอบเพิ่มความแข็ง

2.7 การกระจายของคาร์ไบด์

คาร์ไบด์เป็นเฟสที่มีความแข็ง และเปราะ การกระจายของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนจึงเป็นผลต่อ ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นปริมาณ และการกระจายของคาร์ไบด์จึงมีความสำคัญมาก ในกลุ่ม ชูเปอร์อัลลอยโดยทั่วไปจะมีคาร์บอนประมาณร้อยละ 0.02 - 0.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้เกิด คาร์ไบด์ทั้งบริเวณขอบเกรน และในเกรน ถ้าไม่มีคาร์ไบด์เกาะที่ขอบเกรน อาจเกิดการร่วมตัวของ ช่องว่าง (Voids) ขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง เป็นเหตุให้เกิดการเลื่อนของขอบเกรนทำให้ความแข็งแรง ลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีคาร์ไบด์ต่อเนื่องตลอดขอบเกรนจะทำให้เกิดการแตกหัก ซึ่งเป็นจากการ เลื่อนของขอบเกรนถูกขัดขวางจนเกิดความเค้นสูงเกินไป นำไปสู่การแตกหักก่อนเวลาอันควร ถ้ามี คาร์ไบด์เชื่อมกันอย่างไม่ต่อเนื่องตามขอบเกรน จะขัดขวางการแตกที่ขอบเกรนได้ดี คาร์ไบด์มีหลาย ชนิดมีส่วนผสมดังนี้

- | | |
|--------------------------------|---|
| MC | ซึ่ง M ได้แก่ ไทเทเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ทั้งสแตน พบว่าคาร์ไบด์เหล่านี้มีความ เสถียรภาพ และเกิดในช่วงแรกของการแข็งตัว |
| M ₂₃ C ₆ | ซึ่ง M ได้แก่ โครเมียม อาจแทนที่ด้วยเหล็ก ทั้งสแตน โมลิบดีนัม ปริมาณเล็กน้อย M ₂₃ C ₆ มักเกิดระหว่างการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ หรือการใช้งานที่ 760 ถึง 980 องศาเซลเซียส บางกรณีอาจเกิดจากการสลายตัวของ MC ก็ได้ มัก เกิดที่ขอบเกรน |

M₅C คล้าย M₂₃C₆ มักเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า คือที่อุณหภูมิ 815 ถึง 980 องศาเซลเซียส จะเกิดได้เมื่อมีปริมาณของทั้งสแตน และโมลิบดีนัมมากเช่น M – 252 และ Rene' 41 มีปริมาณของโมลิบดีนัม และทั้งสแตนมากกว่าร้อยละ 6 ถึง 8 โดยน้ำหนัก จะเกิดคาร์ไบด์ M₆C รวมกับคาร์ไบด์ M₂₃C₆ ที่ขอบเกรน Cr₇C₃ ไม่ค่อยเสถียรมัก เปลี่ยนไปเป็น M₂₃C₆

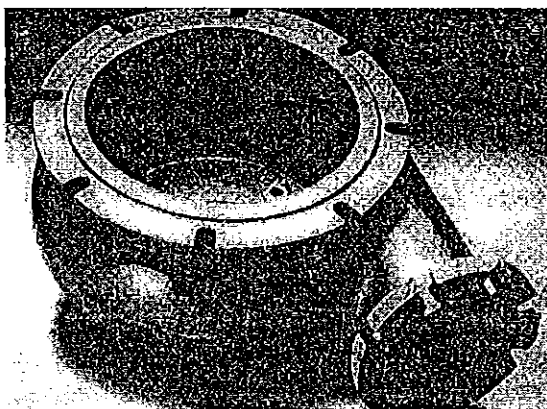
2.8 การใช้งานของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

เหล็กหล่อโครเมียมสูง มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive) เช่น ในกระบวนการบดหินแร่ การบดหินเป็นผง การผลิตซีเมนต์ และการบ่มของเหลวชั้น ชั้นส่วน หรือผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็กหล่อกลุ่มนี้ มีหลายขนาดตั้งแต่ลูกบอลขนาดเล็กๆ ไปจนถึงชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ เช่น รางลูกกลิ้งสำหรับบดเป็นผง และชิ้นส่วนของลูกกลิ้ง ในการใช้งานหลายประเภทของเหล็กหล่อกลุ่มนี้จะต้องมีความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดถู และความต้านทานต่อการแตกหักสูงเพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานแตกร้าวเมื่อได้รับแรงกระแทก ในบางกรณีเหล็กหล่อจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอ และการกัดกร่อนร่วมกัน ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา นั้น เหล็กหล่อโครเมียมสูงมีแนวโน้มที่จะแทนที่เหล็ก Ni-Hard ซึ่งเป็นเหล็กหล่อนิกเกิล และโครเมียมแบบมาร์เทนซิติก เนื่องจากเหล็กหล่อโครเมียมสูงสามารถทนต่อการแตกหัก การสึกหรอ รวมทั้งการกัดกร่อนได้ดีกว่า และในหลายกรณีเหล็กหล่อโครเมียมสูงได้รับการเลือกใช้งานแทนที่เหล็กกล้าทนต่อการสึกหรอ (Wear Resistant Steels) (อัมพร, 2549)

2.8.1 ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูง

2.8.1.1 ตัวถังปั๊มแบบหอยโข่ง (Centrifugal Pump Casing)

ชิ้นส่วนนี้มักได้รับการระบุให้ผลิตโดยถูกต้องแล้วใช้เหล็กหล่อโครเมียมสูง ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน BS 4844:1986 Grade 3E ทั้งในสภาพชิ้นงานหล่อ หรือชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแม้ว่าตัวถังปั๊มแบบหอยโข่งจะมีลักษณะรูปร่างที่ค่อนข้างซับซ้อนก็ตาม แต่ความหนาของบริเวณต่างๆ ส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 50 มิลลิเมตร ทำให้กรรมวิธีทางความร้อนทำได้ไม่ยากนักเนื่องจากชิ้นงานหนาไม่มาก อีกทั้งลักษณะรูปร่างของชิ้นงานยังทำให้อากาศไหลเวียนได้อย่างสะดวกในระหว่างการชุบโดยใช้ลมแฟนเป่า



รูปที่ 2.4 ตัวถังปั๊มแบบหอยโข่งสำหรับการขนถ่ายน้ำมันดิบ ตัวปั๊มมีรัศมีภายใน 1 เมตร และมีน้ำหนัก 350 กิโลกรัม

2.8.1.2 ล้อลูกกลิ้ง (Roller Tyres)

ล้อลูกกลิ้งเป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการบดถ่ายหิน หรือปูนในโม้แบบแกนแนวตั้ง ชีงงานนี้อาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้ตั้งแต่ 1 ถึง 4 เมตร สูง 0.75 ถึง 1.25 เมตร และหนาได้ ถึง 0.35 เมตร ลูกกลิ้งมักจะทำจากเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 2 ถึง 2.5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน BS 4844 เกรด 3C ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาแล้ว และใน ทำนองเดียวกับตัวถังของปั๊ม (Pump Casting) ระดับความยากของกรรมวิธีทางความร้อนอย่างมี ประสิทธิภาพ จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของชีงงานอัตราการเพิ่มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจะควบคุมตามขนาด ของชีงงาน ถ้าชีงงานที่มีขนาดใหญ่จะต้องการระยะเวลาในการทิ้งไว้ในเตาก่อนถึงอุณหภูมิ ดีสตีบไลเซชัน การปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจะต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอเพื่อลดความแตกต่างของ อุณหภูมิระหว่างบริเวณต่างๆ ภายในเนื้อชีงงานต่อจากการพ่นเป่าด้วยอากาศ ในขณะที่ความร้อน ส่วนสุดท้ายที่หลงเหลืออยู่กำลังจะหมดไปนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยง “อากาศเย็น (Draughts)” เนื่องจากชีงงานหลอมมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวสูงสุดช่วงนี้ การอบเทมเปอร์ริง จะทำหลังจากชีงงานหลอมมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิโดยรอบเท่ากันทั่วทุกส่วน และเช่นเดียวกับเหล็กผสม ทุกชนิด อุณหภูมิในการอบเทมเปอร์ริงที่เหมาะสมที่สุดจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี และค่าความแข็ง สุดท้ายที่ต้องการ



รูปที่ 2.5 ล้อลูกกลิ้งสำหรับใช้ในการบดหินในอุตสาหกรรมเหมืองแร่มีน้ำหนัก 4500 กิโลกรัม

2.8.1.3 แท่งสำหรับกระแทก (Impact Bars)

แท่งประเภทนี้มักจะมีขนาดยาว 1 เมตร x กว้าง 0.5 เมตร x หนา 0.1 เมตร และชิ้นงานอาจจะมีส่วนช่อง (Slot) ตามแนวยาว หรือตามแนวขวางในตำแหน่งต่างๆ ชิ้นงานนี้ทำหน้าที่เป็นส่วนที่ต้องทนต่อการสึกหรอในอุปกรณ์บดกระแทกแบบหมุน (Rotary Impact Crushers) และมักจะทำจากเหล็กหล่อตามมาตรฐาน BS 4844 เกรด 3E ที่มีส่วนผสม คือโครเมียม ร้อยละ 22 ถึง 28 โดยน้ำหนัก และคาร์บอนร้อยละ 2.8 ถึง 3.5 โดยน้ำหนัก แม้ว่าชิ้นส่วนนี้จะมีรูปร่างง่าย และไม่ซับซ้อนมากนัก แต่ก็จำเป็นต้องได้รับการควบคุมคุณภาพของกรรมวิธีทางความร้อนอย่างระมัดระวัง แม้ว่าอัตราเพิ่มอุณหภูมิ หรือระยะเวลาที่แช่ชิ้นงานไว้ จะเหมือนไม่เป็นปัญหามากนัก แต่เราก็จำเป็นต้องสนใจเกี่ยวกับการจัดวางชิ้นงานในเตาอบ และการลดอุณหภูมิด้วยอากาศ เช่น ทิ้งวางแท่งสำหรับกระแทกนี้ซ้อนๆ กันเหมือนการเรียงอิฐ แต่ต้องจัดเรียงกันโดยทิ้งที่ว่างเอาไว้พอสมควร (อย่างต่ำ 0.1 เมตร) เพื่อให้มั่นใจว่าชิ้นงานได้รับการเพิ่มอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ และได้รับการชุบมาที่อุณหภูมิห้อง

2.9 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากบทความวิจัยของ อัมพร (2549) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีส่วนผสมโครเมียมร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก คาร์บอนร้อยละ 2.3 โดยน้ำหนัก ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชิ้นงานสภาพหล่อได้ทำการอบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ถึง 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ชิ้นงานในสภาพหล่อ และหลังกรรมวิธีทางความร้อนได้ทำการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อนั้น ประกอบด้วยเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งประกอบด้วย ยูเทคติกคาร์ไบด์ที่มีปริมาณโครเมียมสูง และหลังจากการอบตีสเตบิลไลเซชันโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ซึ่งเปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ระหว่างการเย็นตัวในอากาศ ผลจากการทดสอบพบว่าหลังการอบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงให้ความแข็งสูงสุด ซึ่งความแข็งโดยรวม และความแข็งจุลภาคมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาเทนไซด์

จากบทความวิจัยของ ประกายทิพย์ และอัมพร (2550) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่มีส่วนผสมโครเมียมร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก คาร์บอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนัก ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และแบบส่องผ่านชิ้นงานสภาพหล่อได้ทำการอบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำมาอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้เย็นตัวในอากาศ ชิ้นงานในสภาพหล่อ และหลังกรรมวิธีทางความร้อนได้ทำการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อนั้น ประกอบด้วยเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติก ซึ่งประกอบด้วยยูเทคติกคาร์ไบด์ที่มีปริมาณโครเมียมสูง ยูเทคติกคาร์ไบด์ที่มีปริมาณโมลิบดีนัมสูง และหลังจากการอบตีสเตบิลไลเซชันโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์-ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในเดนไดรท์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ซึ่งเปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ระหว่างการเย็นตัวในอากาศ จากการวิเคราะห์แบบรูปการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนยืนยันได้ว่ายูเทคติกคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์ทุติยภูมิเป็นชนิด M_7C_3 สำหรับเดนไดรท์หลังการอบตีสเตบิลไลเซชันเป็นมาเทนไซด์ ผลจากการทดสอบพบว่าหลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน ความแข็งโดยรวม และความแข็งจุลภาคมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาเทนไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบเทมเปอร์หลังการอบตีสเตบิลไลเซชันทำให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการลดลงของเฟสออสเทนไนต์ตกค้าง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงาน

3.1 วัตถุดิบ และส่วนผสมทางเคมี

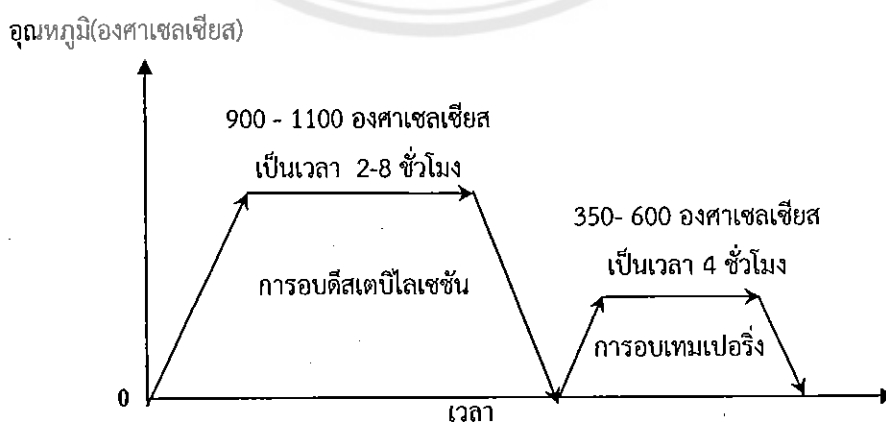
เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลองมี 2 ส่วนผสม คือ เหล็กหล่อโครเมียมสูงชนิดไม่เติมโมลิบดีนัม และเหล็กหล่อโครเมียมสูงชนิดเติมโมลิบดีนัม ดังตารางที่ 3.1 เหล็กหล่อโครเมียมสูงได้จากการหลอมเหล็กพิกที่มีซิลิกอน และธาตุต่างๆในปริมาณต่ำ หลอมด้วยเตาไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ จากนั้นนำมาเทในแบบหล่อทรายรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ใช้ในการทดลอง

เหล็กหล่อโครเมียมสูง	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	Cr	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Mo	Fe
ไม่เติมโมลิบดีนัม	25.56	2.440	0.735	0.911	0.029	0.041	0.120	0.080	0.012	70.072
เติมโมลิบดีนัม	25.44	2.430	0.706	0.595	0.042	0.048	0.120	0.090	0.724	69.085

3.2 กรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อนในการทดลองนี้มี 2 วิธี ดังรูปที่ 3.1 คือการอบตีสเตปิลเซชัน หลังการอบตีสเตปิลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง โดยมีจุดประสงค์ และขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 กรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

3.2.1 ศึกษาผลของการอบตีสเตปิลเซชันต่อโครงสร้างและความแข็ง

ในการทดลองได้นำชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงในสภาพหล่อที่ผ่านการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 8 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง รายละเอียด ดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะการอบตีสเตปิลเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
900	2
	4
	8
1000	2
	4
	8
1100	2
	4
	8

ตารางที่ 3.3 สภาวะการอบตีสเตปิลเซชัน และเทมเปอร์ริงของเหล็กหล่อโครเมียมสูง

การอบตีสเตปิลเซชัน	การอบเทมเปอร์ริง
เลือกสภาวะที่มีความแข็งสูงสุด และใกล้เคียงกัน	350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
	400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
	450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
	500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
	550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
	600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.2.2 ศึกษาผลของการอบเทมเปอร์ริงหลังการอบดิสเตปีไลเซชันต่อโครงสร้าง และความแข็งแรง

โดยนำเหล็กในสภาพหล่อจำนวน 7 ชิ้นไปอบดิสเตปีไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้น มาอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 350, 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.3

3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูง ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light Microscopy, LM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีดังต่อไปนี้

3.3.1 นำชิ้นงานขัดด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 180, 320, 600, และ 1000 ตามลำดับ

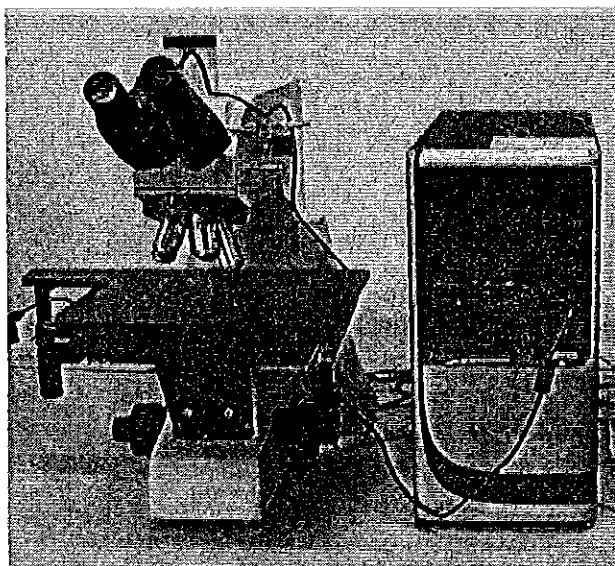
3.3.2 นำชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายมาขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 6 ไมครอน

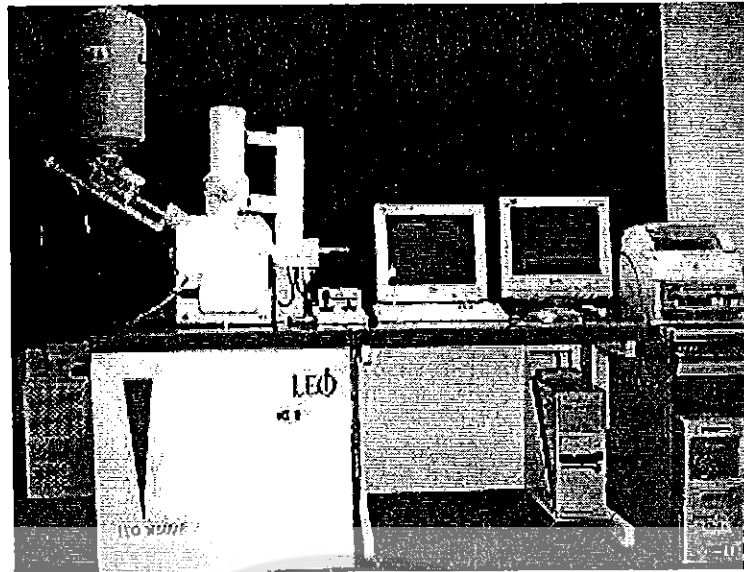
3.3.3 นำชิ้นงานมาแล้วทำการกัดกรด ซึ่งกรดที่ใช้มี 3 ชนิดคือ

3.3.3.1 กรด 10 กรัม ของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 50 มิลลิลิตร ของ HCl + ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวม และแยกชนิดของเดนไดรท์

3.3.3.2 กรด 10 มิลลิลิตร ของ HCl + 100 มิลลิลิตร ของ เมทานอล เป็นเวลา 27 ชั่วโมง เรียกว่า กัดลึก (Deep Etching) ซึ่งจะกัดเอาส่วนของเดนไดรท์ออกเหลือเฉพาะคาร์ไบด์ ทำให้เห็นลักษณะคาร์ไบด์ใน 3 มิติ

3.3.3.3 กรด 4 กรัม ของ KMnO_4 + 4 กรัม ของ NaOH + H_2O ซึ่งจะกัดเฉพาะคาร์ไบด์ออกเหลือเดนไดรท์ ทำให้เห็นลักษณะคาร์ไบด์ทุติยภูมิ





รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

3.4 การศึกษาชนิดเฟส

ชนิดเฟส และโครงสร้างผลึกของเหล็กหล่อโครเมียมสูง ศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometry, XRD) โดยกำหนดมุมอยู่ในช่วง 30 ถึง 130 องศา ยี่ห้อ Philips รุ่น Expert โดยใช้ $\text{Cu K}\alpha$ มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานคือ นำเหล็กในสภาพหล่อ และเหล็กที่ผ่านการอบตีสเตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ิ้งไปขัดด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 180, 320, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ จากนั้นนำไปตัดให้มีความสูงไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Philips รุ่น Expert

3.5 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีสเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ เพื่อดูการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในเดนไดรต์ และยูเทคติกคาร์ไบด์ได้จากการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersion X-Ray Spectroscopy, EDXS) ที่ต่อกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งโดยรวมของเหล็กหล่อโครเมียมสูงก่อน และหลังกรรมวิธีทางความร้อน โดยใช้แบบวิกเกอร์ (Vickers Macrohardness Testing) โดยการนำชิ้นงานที่เตรียมสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่ยังไม่ได้กัดกรดมาทำการทดสอบ โดยใช้น้ำหนัก 30 กิโลกรัม เป็นเวลา 15 วินาที หัวกดเป็นแบบเพชร และทำการทดสอบชิ้นงานละ 10 จุดแบบสุ่มแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Galileo

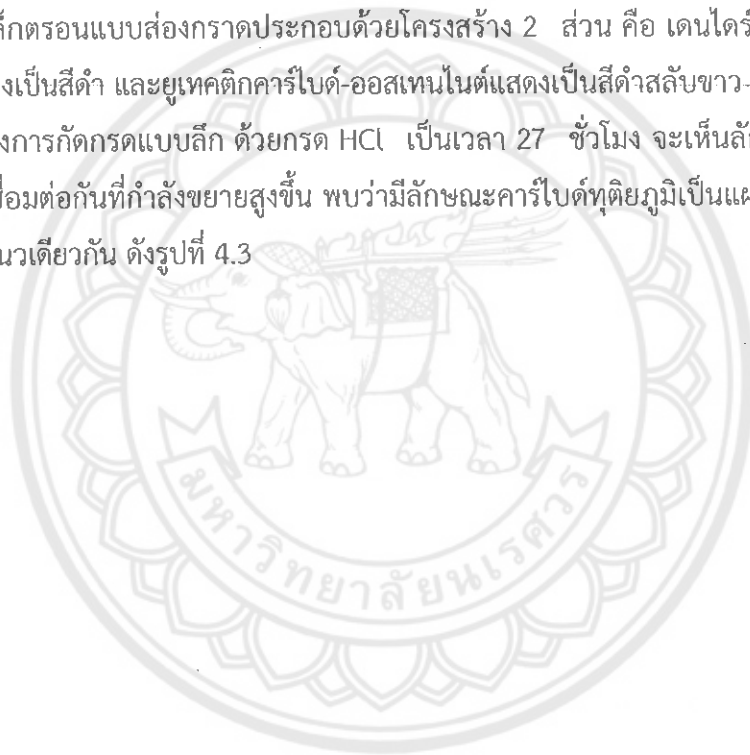
บทที่ 4

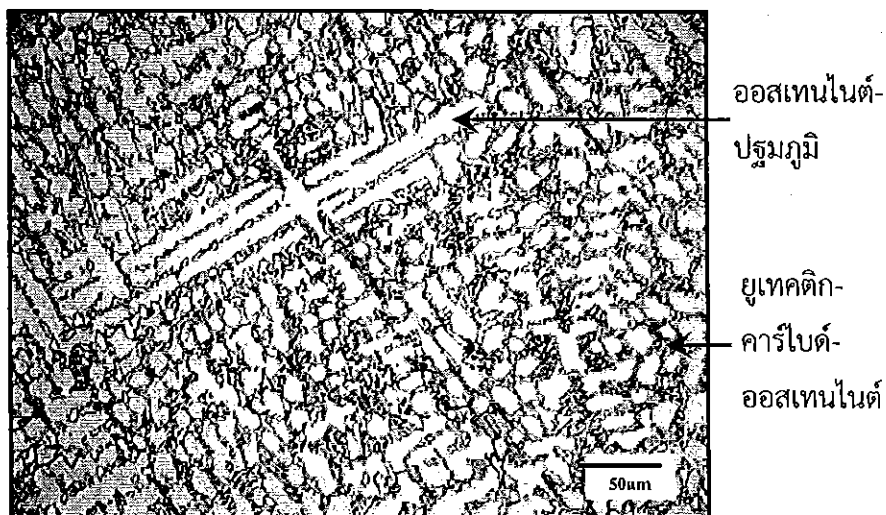
ผลการทดลอง และวิเคราะห์

4.1 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อ

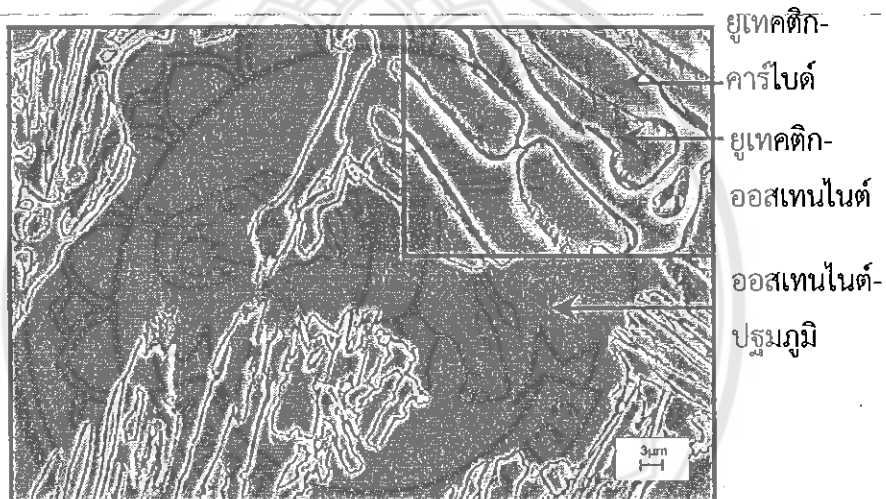
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อ

จากการศึกษาโครงสร้างในสภาพหล่อด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แสงประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วน คือ เคนไคร์ของออสเทนไนต์ปฐมภูมิแสดงเป็นสีขาว และยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์แสดงเป็นสีขาวสลับดำ ดังรูปที่ 4.1 ก) และ 4.2 ก) เมื่อศึกษาโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วน คือ เคนไคร์ของออสเทนไนต์-ปฐมภูมิแสดงเป็นสีดำ และยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์แสดงเป็นสีดำสลับขาว-ดังรูปที่ 4.1-ข) และ 4.2 ข) หลังการกัดกรดแบบลึก ด้วยกรด HCl เป็นเวลา 27 ชั่วโมง จะเห็นลักษณะของยูเทคติกคาร์ไบด์ที่เชื่อมต่อกันที่กำลังขยายสูงขึ้น พบว่ามีลักษณะคาร์ไบด์หุติยภูมิเป็นแผ่นเป็นแท่งยาว และเรียงตัวในแนวเดียวกัน ดังรูปที่ 4.3





ก)



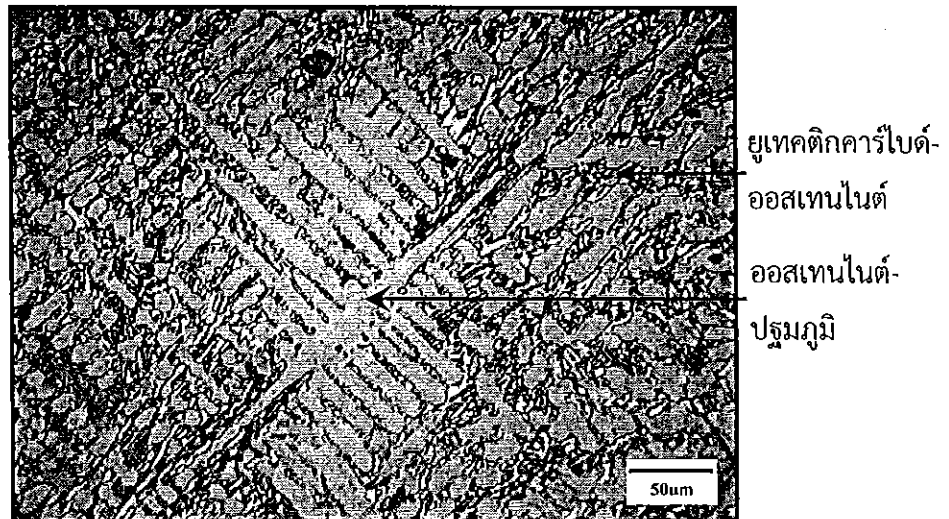
ข)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อที่ประกอบด้วยเดนไดรท์ของออสเทนไนต์-ปฐมภูมิ และยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม

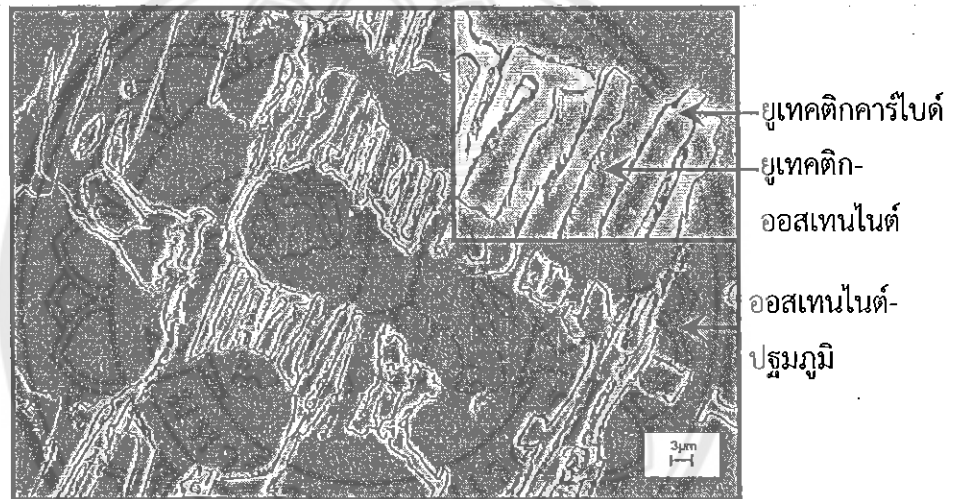
ก) ภาพถ่ายจากกล้อง LM

ข) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM

(กรด 10 กรัม ของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 50 มิลลิลิตร ของ HCl + ไนน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร)



ก)



ข)

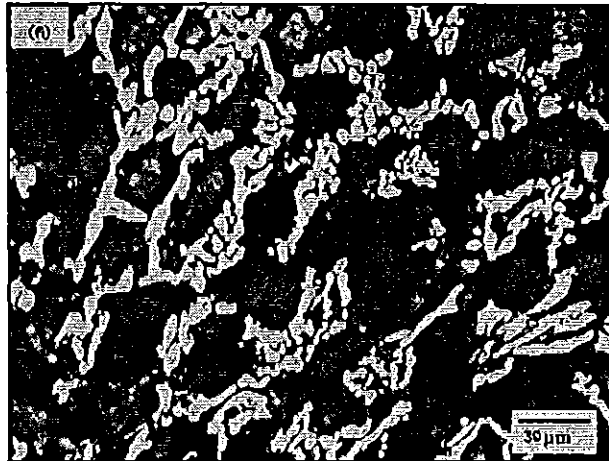
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อที่ประกอบด้วยเดนไดรท์ของออสเทนไนต์-

ปฐมภูมิ และยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม

ก) ภาพถ่ายจากกล้อง LM

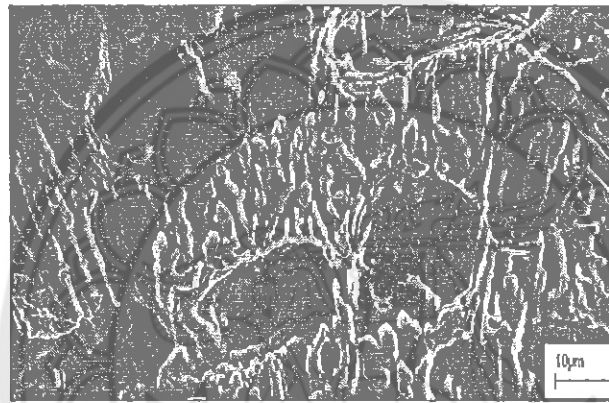
ข) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM

(กรด 10 กรัม ของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 50 มิลลิลิตร ของ HCl + ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร)



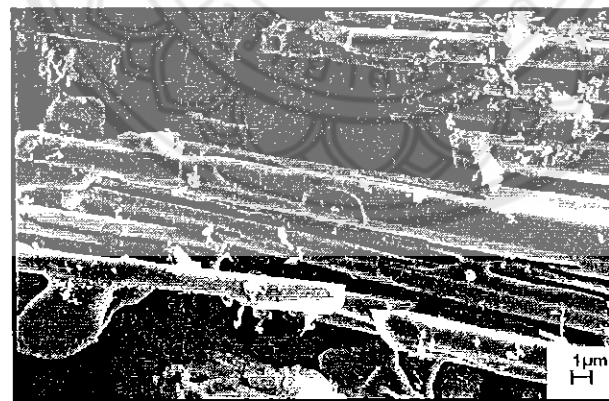
ยูเทคติกคาร์ไบด์

ก)



ยูเทคติกคาร์ไบด์

ข)



ยูเทคติกคาร์ไบด์

ค)

รูปที่ 4.3 ลักษณะของยูเทคติกคาร์ไบด์หลังการกัดกรดแบบลึก

ก) ภาพถ่ายจากกล้อง LM

ข) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า

ค) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 10000 เท่า

(กรด 10 มิลลิลิตร ของ HCl + 100 มิลลิลิตร ของ เมทานอล)

159052-17

ร/ร.

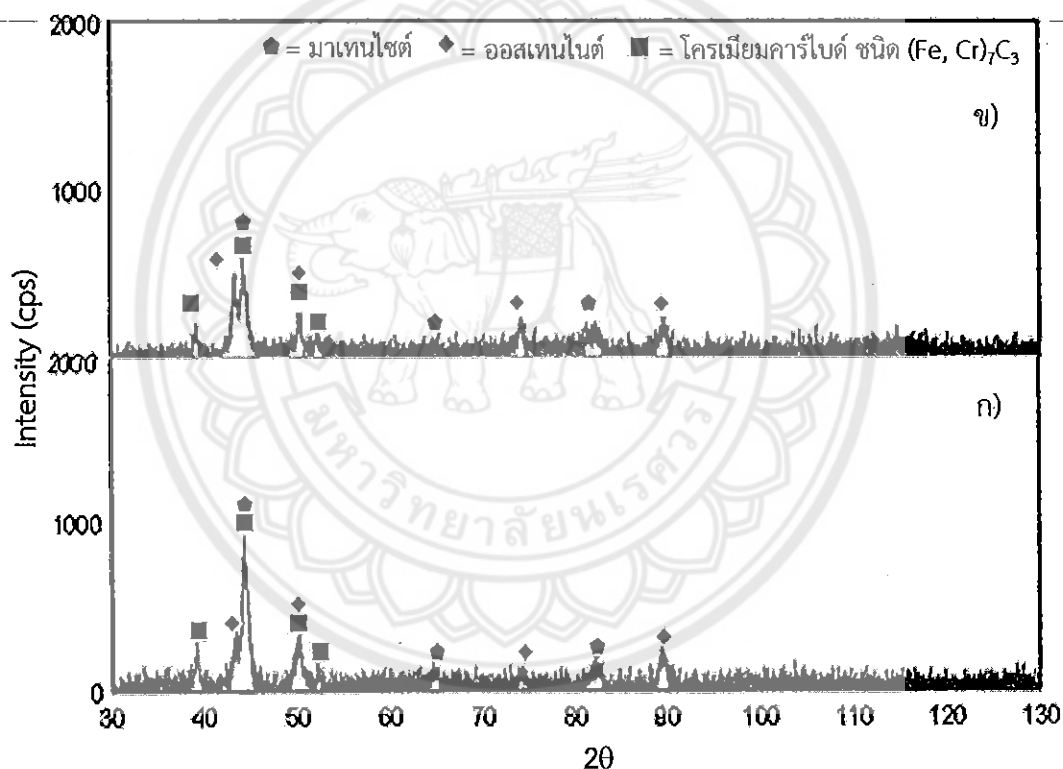
ด/บ/ค/

2552

จากนั้น เพื่อทำการวิเคราะห์ชนิดของเฟสในชิ้นงานในสภาพหล่อที่ยังไม่ได้กัดกรดของชิ้นงานทั้งสองชนิดจึงทำการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง (X-ray diffractometer, XRD) รุ่น X'Pert ของบริษัท Philips

4.1.2 การศึกษาชนิดเฟสด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากรูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าในสภาพหล่อของเหล็กทั้งสองประกอบด้วยเฟส ออสเทนไนต์ โครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ และมาเทนไซต์ โดยใช้เปรียบเทียบกับ Joint Committee Powder Diffraction Standards (JCPDS) ของออสเทนไนต์ หมายเลข 023-0298 โครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ หมายเลข 005-0720 และมาเทนไซต์ หมายเลข 044-1290



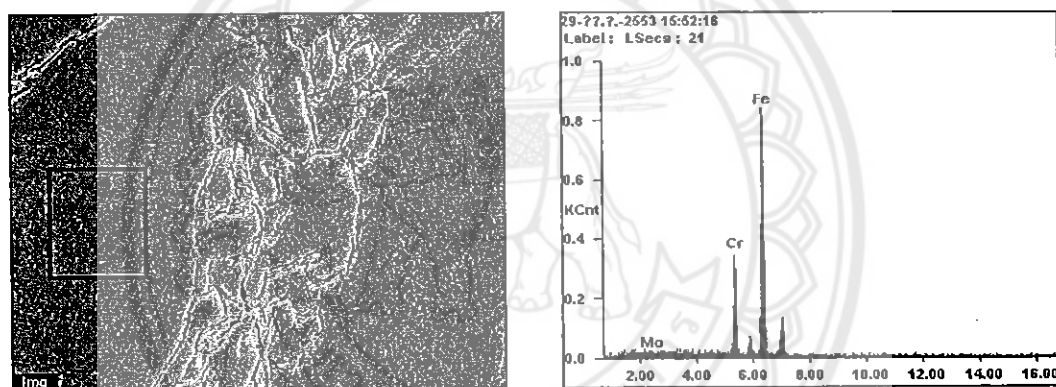
JCPDS
 00-023-0298 Austenite-(Fe,C)
 00-005-0720 Chromium Iron Carbide-(Fe,Cr)₇C₃
 01-078-1500 Chromium Iron Carbide-(Fe_{11.30}Cr_{1.11})₇C₃
 00-003-0400 Iron Carbide-(Fe,C)
 00-006-0696 Ferrite-(Fe)
 00-044-1290 Martensite-(Fe_{1.93}C_{0.51})

- รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม
- ก) เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัมในสภาพหล่อ
- ข) เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัมในสภาพหล่อ

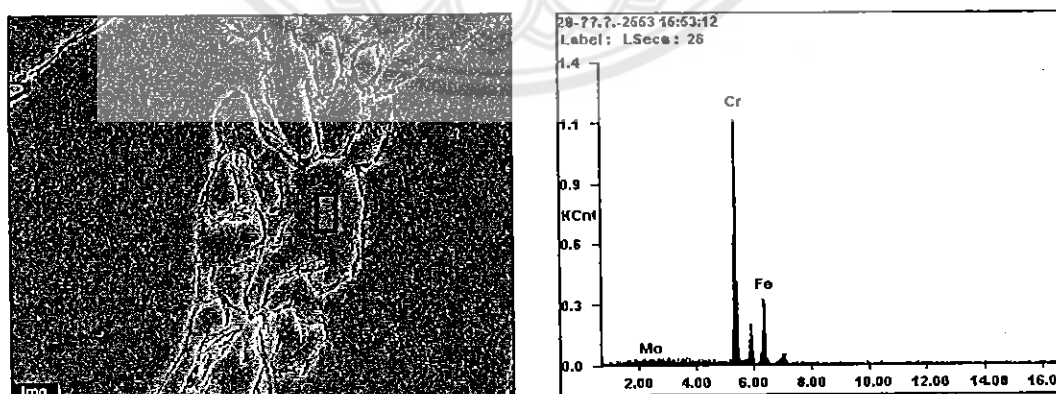
จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยด้วยสเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบจุด (Point Analysis) เพื่อศึกษาว่าธาตุโมลิบดีนัมที่เติมลงไปอยู่ส่วนไหนของชิ้นงาน ตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุโมลิบดีนัม ภายในชิ้นงาน

4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในบริเวณเดนไดรท์ และยูเทคติกคาร์ไบด์ด้วยสเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบจุด (Point Analysis) ในเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัมในสภาพหล่อ พบว่าธาตุเหล็กจะละลายอยู่มากในบริเวณเดนไดรท์ ส่วนโครเมียม และคาร์บอนจะละลายในยูเทคติกคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณธาตุ โครเมียม เหล็ก โมลิบดีนัม และคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในยูเทคติกคาร์ไบด์ และเดนไดรท์ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม



ก) บริเวณเดนไดรท์



ข) บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์

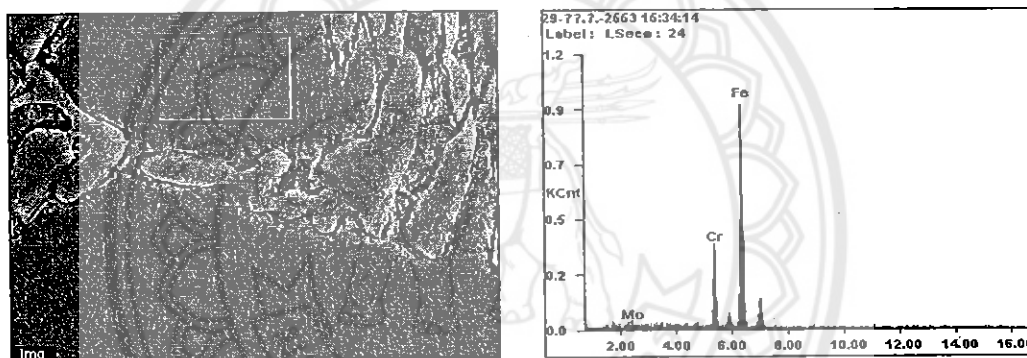
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์แบบจุด (Point Analysis) ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุโครเมียม เหล็ก โมลิบดีนัม และคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

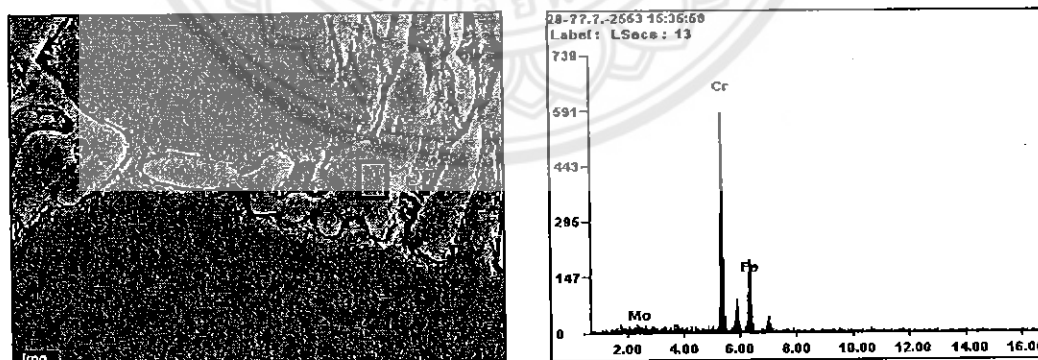
ในยูเทคติกคาร์ไบด์ และเดนไดรต์ ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม

เหล็กหล่อ	เดนไดรต์				ยูเทคติกคาร์ไบด์			
	Fe	Cr	Mo	C	Fe	Cr	Mo	C
โครเมียมสูง 25 ร้อยละโดยน้ำหนัก	80.94	17.67	0.00	1.39	30.20	65.43	0.31	4.06

สำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่เติมโมลิบดีนัมในสภาพหล่อ พบว่า ธาตุเหล็กจะละลายอยู่มากในบริเวณเดนไดรต์ ส่วนโครเมียม และคาร์บอนจะละลายมากในยูเทคติกคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณธาตุโครเมียม คาร์บอน เหล็ก และโมลิบดีนัม (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ในยูเทคติกคาร์ไบด์ และเดนไดรต์ ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายกับเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม ส่วนโมลิบดีนัมที่เติมพบว่าละลายอยู่ในทั้งบริเวณเดนไดรต์ และยูเทคติกคาร์ไบด์



ก) บริเวณเดนไดรต์



ข) บริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์

รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ แบบจุด (Point Analysis)

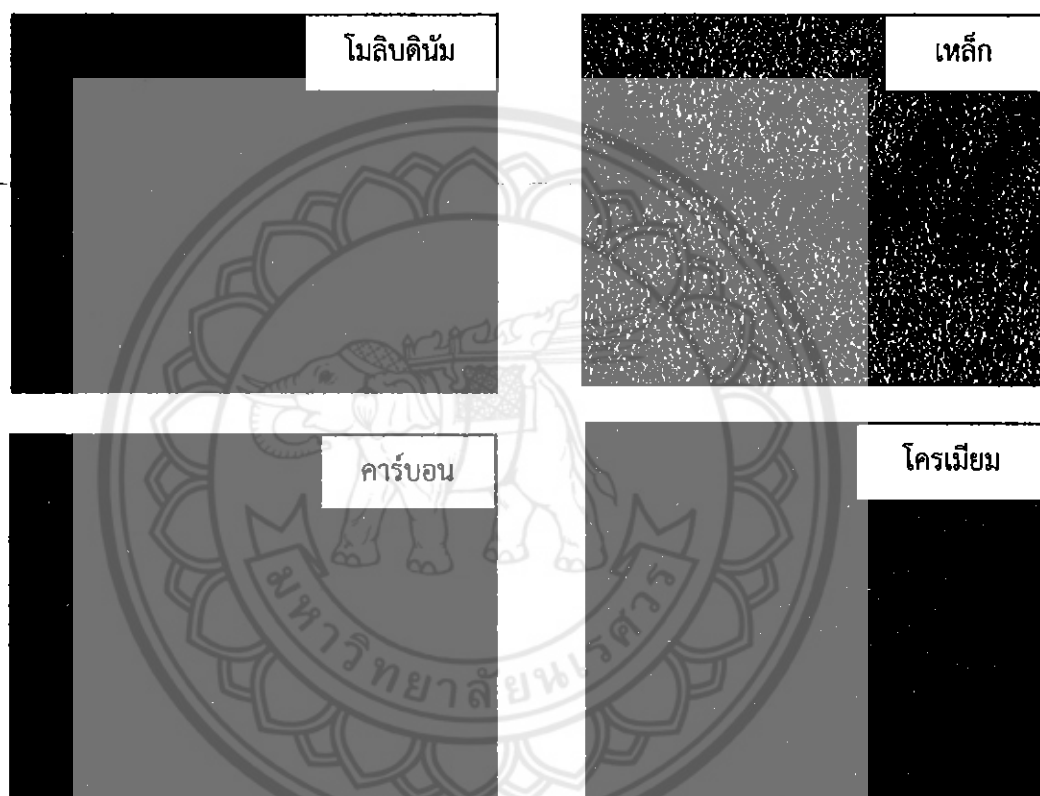
ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุโครเมียม เหล็ก โมลิบดีนัม และคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ในยูเทคติกคาร์ไบด์ และเดนไดรต์ ในสภาพหล่อของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม

เหล็กหล่อ	เดนไดรต์				ยูเทคติกคาร์ไบด์			
	Fe	Cr	Mo	C	Fe	Cr	Mo	C
โครเมียมสูง 25 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่เติมโมลิบดีนัม	79.49	17.76	0.89	1.85	32.45	62.71	0.77	4.08

จากการวิเคราะห์แบบจุด (Point Analysis) ดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าโมลิบดีนัมที่ตรวจพบมีอยู่ทั้งสองส่วนคือเดนไดรต์ และยูเทคติกคาร์ไบด์ เพื่อยืนยันผลดังกล่าวจึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersion X-ray spectroscopy, EDXS) ที่ต่อกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบ Mapping

ซึ่งได้ผลแสดง ดังรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า การกระจายตัวของธาตุเหล็กจะกระจายตัวหนาแน่นบริเวณเดนไดรต์ โครเมียมจะกระจายตัวหนาแน่นบริเวณยูเทคติกคาร์ไบด์ ส่วนคาร์บอน และโมลิบดีนัมกระจายตัวอยู่ทั่วไปในบริเวณของเดนไดรต์ และยูเทคติกคาร์ไบด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี แบบจุด (Point Analysis)



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ แบบ Mapping แสดงการกระจายตัวของเหล็ก โมลิบดีนัม คาร์บอน โครเมียม บริเวณเขตติค-คาร์ไบต์และเดนไดรท์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัมในสภาพหล่อ โดยสีเหลืองแทนธาตุเหล็กสีเขียวแทนโมลิบดีนัม สีแดงแทนคาร์บอน สีน้ำเงินแทนโครเมียม

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งหลังกรรมวิธีทางความร้อน หลังการอบตีสเตปิลเซชัน

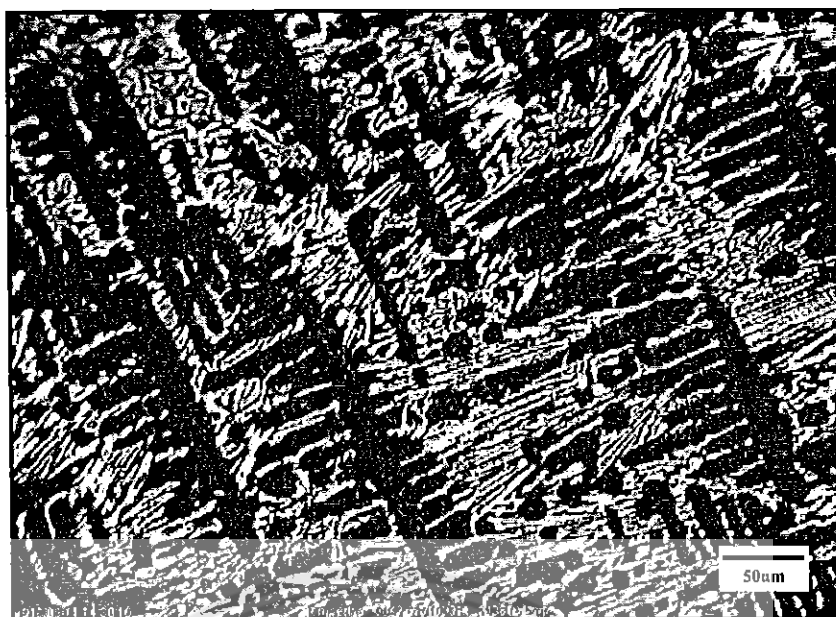
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบตีสเตปิลเซชัน

โครงสร้างจุลภาคหลังการอบตีสเตปิลเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม ประกอบด้วยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในเดนไดรท์ทออสเทนไนต์ปฐมภูมิ ที่เปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ขณะเย็นตัวในอากาศ ดังรูปที่ 4.8 ก) และ 4.8 ข) เมื่อศึกษาลักษณะของคาร์ไบด์ทุติยภูมิพบว่า มีลักษณะเป็นแท่งยาว และสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ดังรูปที่ 4.9

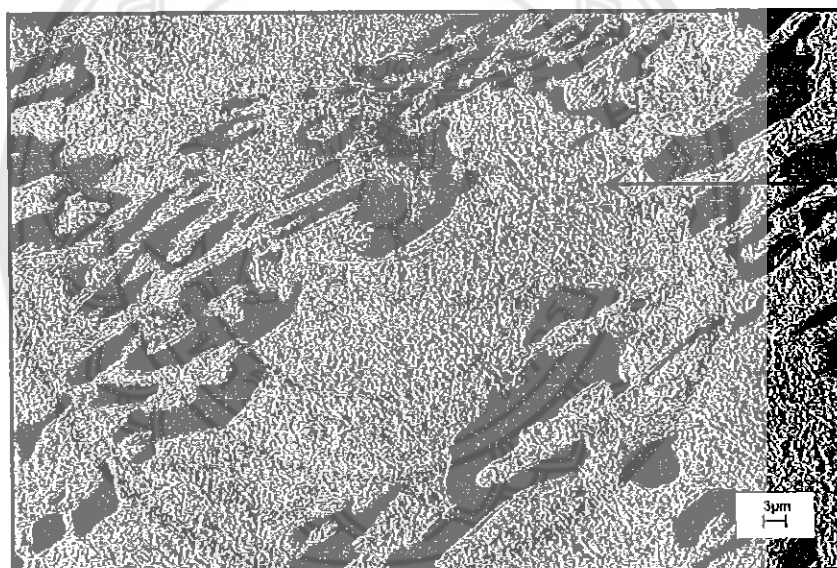
ผลของอุณหภูมิ และเวลาต่อขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิโดยการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะสังเกตได้จากรูปที่ 4.10 พบว่าการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดเล็ก และมีปริมาณมาก เมื่ออบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นคาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีปริมาณน้อยลง เมื่อศึกษาขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิหลังการอบตีสเตปิลเซชัน พบว่าการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส คาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.2830 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส คาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.5858 ไมครอน และที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส คาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.9917 ไมครอน ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิในการอบตีสเตปิลเซชันต่อการตกตะกอนของขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม เมื่ออบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดใหญ่ขึ้น

สำหรับผลของเวลาในการอบตีสเตปิลเซชันต่อขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ โดยการอบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 8 ชั่วโมง จะเห็นได้จากรูปที่ 4.11 พบว่าการอบตีสเตปิลเซชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดเล็ก และมีปริมาณมาก เมื่ออบตีสเตปิลเซชันเป็นเวลานานคาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีปริมาณน้อยลง เมื่อศึกษาขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิหลังการอบตีสเตปิลเซชัน พบว่าการอบตีสเตปิลเซชันเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดเท่ากับ 0.3690 ไมครอน การอบตีสเตปิลเซชันเป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดเท่ากับ 0.5858 ไมครอน และการอบตีสเตปิลเซชันเป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดเท่ากับ 0.8833 ไมครอน ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงผลของเวลาในการอบตีสเตปิลเซชันต่อการตกตะกอนของขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม เมื่ออบตีสเตปิลเซชันเป็นเวลานานขึ้นทำให้คาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดใหญ่ขึ้น

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ อัมพร (2549) ได้กล่าวว่าเมื่ออบตีสเตปิลเซชันที่อุณหภูมิต่ำ หรือเวลาน้อยเกินไป คาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดเล็ก เนื่องจากระยะเวลาในการแพร่ของธาตุที่เกิดเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิไม่เพียงพอ เช่นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมง แต่ในขณะที่อุณหภูมิสูง หรือเวลานานเกินไป เช่นที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่เวลา 8 ชั่วโมง คาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดใหญ่ และมีปริมาณน้อยซึ่งอาจเป็นผลจากคอร์สเซนนิ่ง (Coarsening Effect) ที่อนุภาคขนาดเล็กจะรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่



ก)



คาร์บอน-
ทุติยภูมิที่
ตกตะกอน
ในเดนไดรท์
ของมาเทนไซด์

ข)

รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบดีสเทพิไลเซชันของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมที่มี
การตกตะกอนของคาร์บอนทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาเทนไซด์

ก) ภาพถ่ายจากกล้อง LM

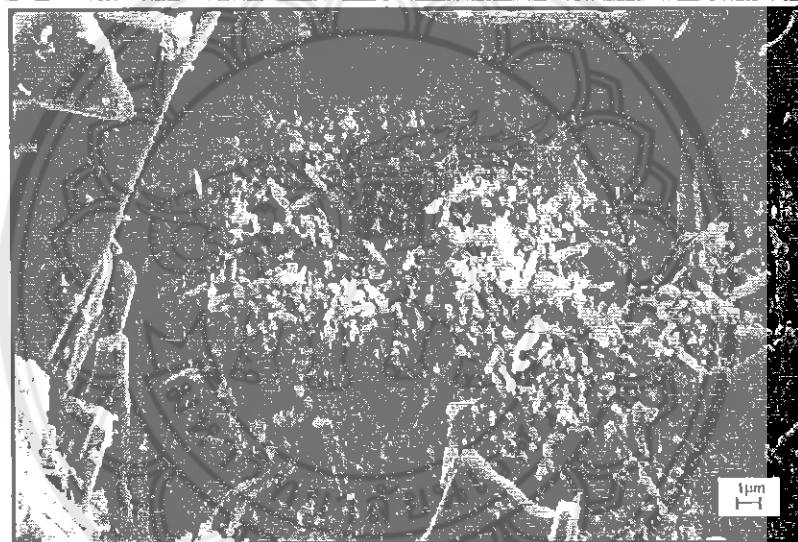
ข) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM

(กรด 10 กรัม ของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ + 50 มิลลิลิตร ของ HCl + ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร)



คาร์ไบด์-
หุติยภูมิ

ก)



ยูเทคติก-
คาร์ไบด์-
ออสเทนไนต์

ข)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงลักษณะคาร์ไบด์ใน 3 มิติ หลังการกัดกรดแบบลึก

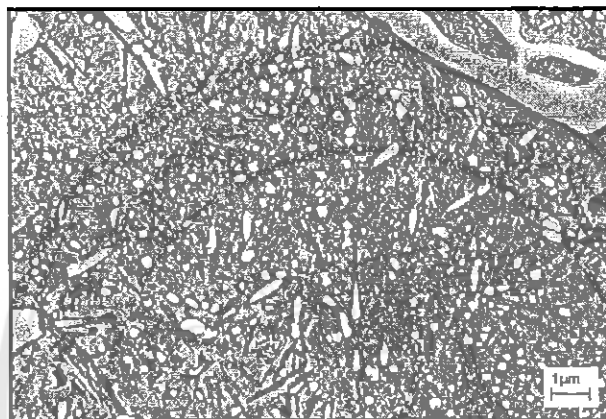
ก) เหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม

ข) เหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม

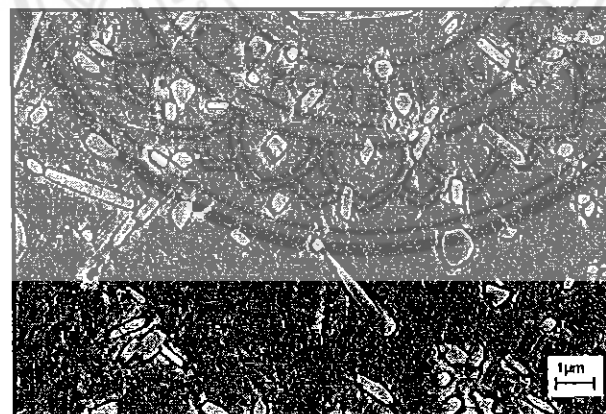
(กรด 10 มิลลิลิตร ของ HCl+ 100 มิลลิลิตร ของ เมทานอล)



ก)



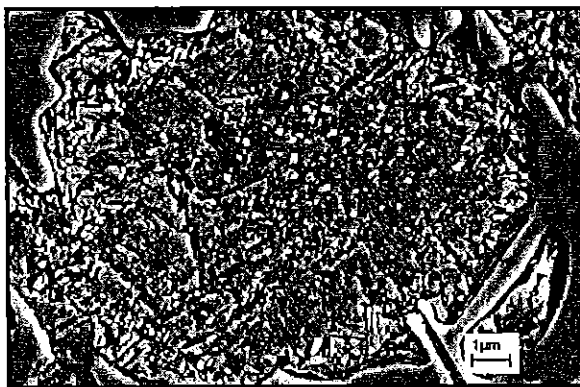
ข)



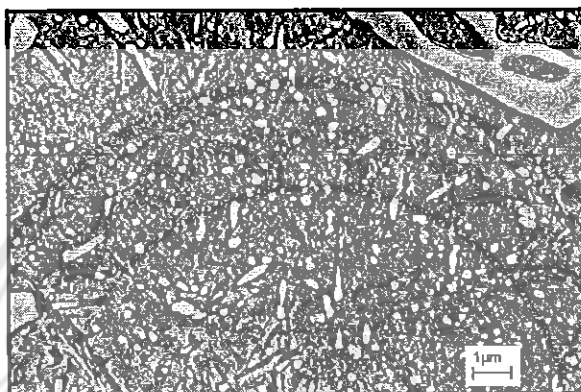
ค)

รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในการดัดเบิ้ลไฮเซชันต่อการตกตะกอนของคาร์บอนทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่ไม่เติมโมลิบดีนัม โดยอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมงเท่ากัน

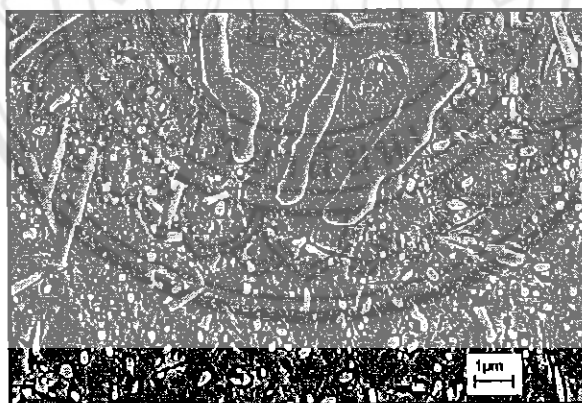
- ก) อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส
- ข) อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส
- ค) อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.11 ผลของเวลาในการอบดิสเตปป์ไลเซชันต่อการตกตะกอนของคาร์โบได์ทุติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ไม่เติมโมลิบดีนัม เมื่ออบที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เท่ากัน

ก) 2 ชั่วโมง

ข) 4 ชั่วโมง

ค) 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบดีสเทปีไลเซชันต่อการตกตะกอนของขนาดของคาร์ไบด์ทุตติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงไม่เต็มโมลิบดีนัม

สภาวะการอบดีสเทปีไลเซชัน		ขนาดคาร์ไบด์ทุตติยภูมิเฉลี่ย (ไมครอน)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	
900	4	0.2830
1000	4	0.5858
1100	4	0.9917

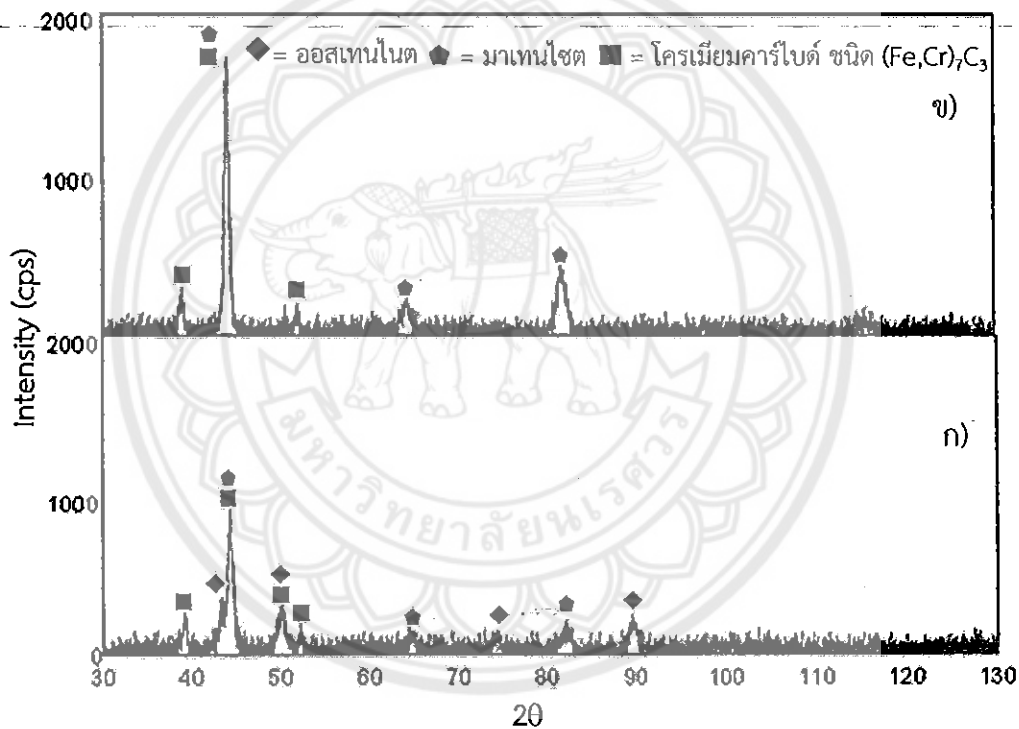
ตารางที่ 4.4 ศึกษาผลของเวลาในการอบดีสเทปีไลเซชันต่อการตกตะกอนของขนาดของคาร์ไบด์ทุตติยภูมิของเหล็กหล่อโครเมียมสูงไม่เต็มโมลิบดีนัม

สภาวะการอบดีสเทปีไลเซชัน		ขนาดคาร์ไบด์ทุตติยภูมิเฉลี่ย (ไมครอน)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	
1000	2	0.3690
	4	0.5858
	8	0.8833

จากนั้น เพื่อทำการวิเคราะห์ชนิดของเฟสในชิ้นงานที่ยังไม่ได้گذกรดของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เต็มโมลิบดีนัม และเต็มโมลิบดีนัมทั้งในสภาพหล่อ และหลังการอบดีสเทปีไลเซชัน จึงทำการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น X'Pert ของบริษัท Philips

4.2.2 การศึกษาชนิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานในสภาพหล่อ และหลังการอบดิสเทปิลเซชัน

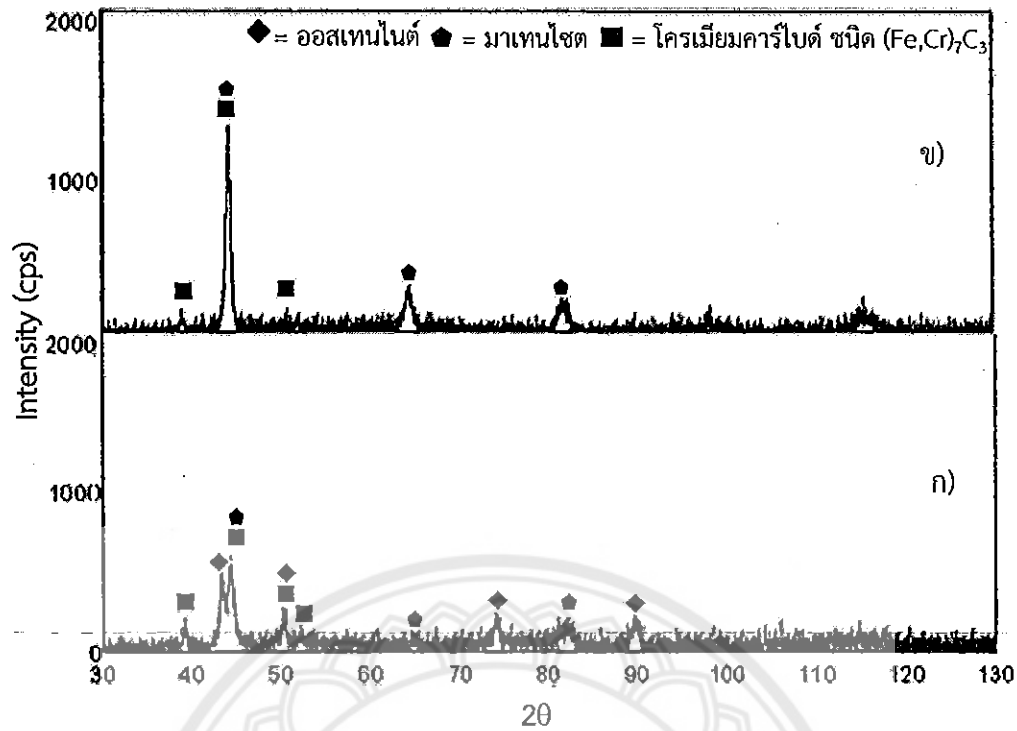
จากรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม ตามลำดับ พบว่าในสภาพหล่อของเหล็กหล่อโครเมียมสูงทั้งสองประกอบด้วย เฟสออสเทนไนต์ เฟสยูเทคติกคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ และเฟสมาเทนไซด์ หลังจากการอบดิสเทปิลเซชันไม่พบเฟสออสเทนไนต์ และพบว่าเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ และเฟสมาเทนไซด์มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นกว่าในสภาพหล่อ โดยใช้เปรียบเทียบกับ Joint Committee Powder Diffraction Standards (JCPDS) ของออสเทนไนต์ หมายเลข 023-0298 โครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ หมายเลข 005-0720 และมาเทนไซด์ หมายเลข 044-1290



JCPDS
 00-023-0298 Austenite-(Fe,C)
 00-005-0720 Chromium Iron Carbide-(Fe,Cr)₇C₃
 01-078-1500 Chromium Iron Carbide-(Fe_{21.16}Cr_{1.84})₇C₃
 00-003-0400 Iron Carbide-(Fe,C)
 00-006-0696 Ferrite-(Fe)
 00-044-1290 Martensite-(Fe_{1.94}C_{0.55})

รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อ และหลังการอบดิสเทปิลเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม โดยกำหนดให้
 ก) ในสภาพหล่อ

ข) อบดิสเทปิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง



ICPDS
 00-023-0298 Austenite-(Fe,C)
 00-005-0720 Chromium Iron Carbide-(Fe,Cr)₇C₃
 01-078-1500 Chromium Iron Carbide-(Fe_{21.54},Cr_{1.44})C₄
 00-003-0400 Iron Carbide-(Fe,C)
 00-006-0696 Ferrite-(Fe)
 00-044-1290 Martensite-(Fe_{1.93}C_{1.53})

รูปที่ 4.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในสภาพหล่อ และหลังการอบ
 ตีสเตบิลไลเซชันของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม โดยกำหนดให้
 ก) ในสภาพหล่อ
 ข) อบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเวลา 4 ชั่วโมง

สรุปเฟสที่พบหลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน คือ เฟสมาร์เทนไซต์ เฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด
 $(Fe,Cr)_7C_3$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเฟสทั้งสองมีปริมาณเพิ่มขึ้น และไม่พบเฟสออสเทนไนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ
 ชิ้นงานในสภาพหล่อ ดังแสดงในรูป 4.13 ก)

4.2.3 ผลของการอบตีสตีไบไลเซชันต่อความแข็ง

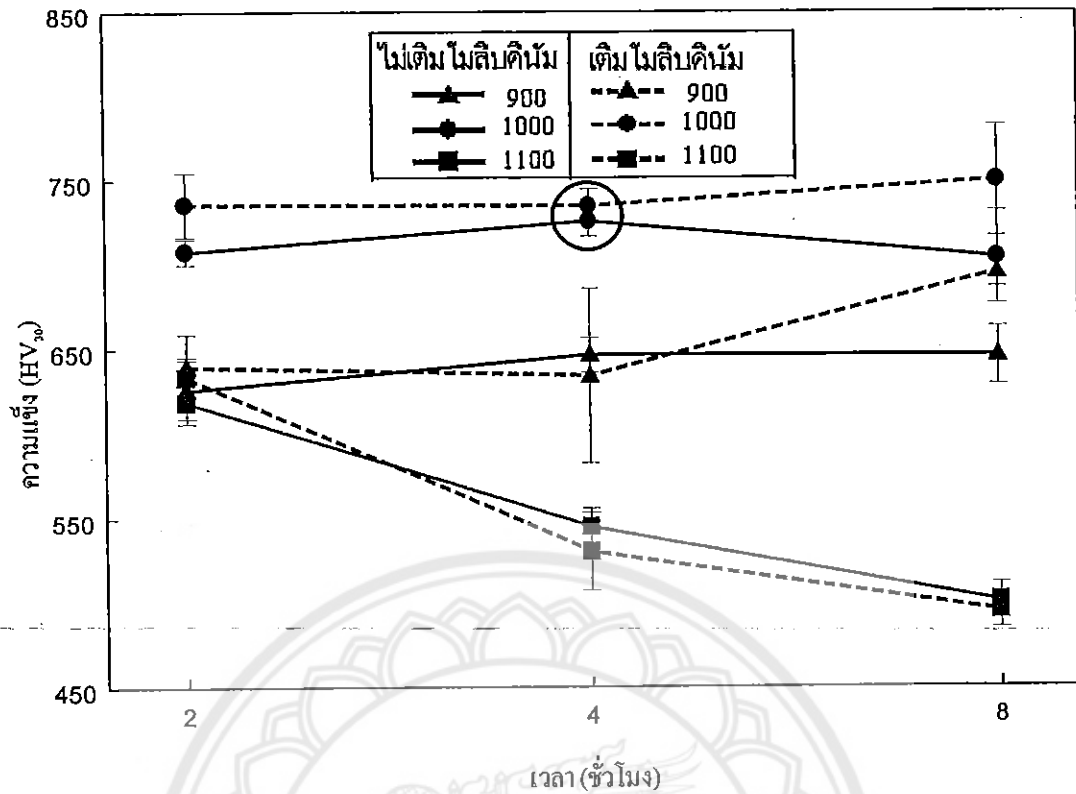
เมื่อศึกษาผลของการอบตีสตีไบไลเซชันต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม โดยการวัดความแข็งมหภาคแบบวิกเกอร์ จากการทดลองพบว่า ในสภาพหล่อเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 462 HV₃₀ ส่วนเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัมมีความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 472 HV₃₀

หลังการอบตีสตีไบไลเซชันที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 8 ชั่วโมง พบว่าการอบตีสตีไบไลเซชันความแข็งจะเพิ่มขึ้นจากสภาพหล่อทุกสภาวะ ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงผลของการอบตีสตีไบไลเซชันต่อความแข็ง โดยเหล็กหล่อที่ไม่เติม โมลิบดีนัมหลังการอบตีสตีไบไลเซชันที่อุณหภูมิ 900 และ 1100 องศาเซลเซียส มีความแข็งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เพราะหลังการอบตีสตีไบไลเซชันทำให้ปริมาณออสเทนไนต์ตกค้างในเดนไดรท์เปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ และคาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ และเวลาส่งผลต่อขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่เกิดขึ้น และสอดคล้องกับรูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงหลังการอบตีสตีไบไลเซชัน จะเห็นได้ว่าหลังการอบตีสตีไบไลเซชัน ปริมาณเฟสออสเทนไนต์ที่ตกค้างลดลง ส่วนเฟสมาเทนไซด์ และโครเมียมคาร์ไบด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น

ทั้งนี้เหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมหลังการอบตีสตีไบไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อัมพร (2549) ซึ่งได้ทดลองอบตีสตีไบไลเซชันกับชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิ 900, 1025 และ 1100 องศาเซลเซียส แล้วพบว่าชิ้นงานที่ให้ความแข็งสูงสุดคือชิ้นงานที่ผ่านการอบตีสตีไบไลเซชันที่อุณหภูมิ 1025 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบตีสตีไบไลเซชันในงานครั้งนี้คือ ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

สำหรับเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัมหลังการอบตีสตีไบไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิที่ให้ความแข็งสูงสุด ดังรูป 4.14 โดยการอบตีสตีไบไลเซชันเป็นเวลานานขึ้นความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pearce (2542) และ Wiengmoon (2548) ได้กล่าวว่าการอบที่อุณหภูมิสูง หรือต่ำกว่าจุดที่ดีที่สุดจะให้ความแข็งลดลง โดยที่อุณหภูมิต่ำคาร์บอนจะละลายในออสเทนไนต์ได้น้อย และเมื่อเย็นตัวในอากาศจะได้มาเทนไซด์ที่มีคาร์บอนต่ำ ส่งผลให้ความแข็งลดลง ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปคาร์บอนจะละลายในออสเทนไนต์ได้มากขึ้นทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนเป็นมาเทนไซด์ (Ms temperature) ลดลง ส่งผลให้ปริมาณออสเทนไนต์ตกค้างสูงขึ้น และความแข็งลดลง นอกจากนี้งานวิจัยของ Pearce (2542) ยังพบว่าเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัมความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลานานขึ้น

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกสภาวะการอบตีสตีไบไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงหลังการอบเทมเปอร์ิ่งต่อไป เนื่องจากเหล็กหล่อโครเมียมสูงทั้งสองชนิดมีค่าความแข็งสูงสุด และมีค่าใกล้เคียงกัน ที่สภาวะดังกล่าว ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลของการอบดีสเทปีไลเซชันต่อความแข็งโดยที่ให้ (—) แทนเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโม่ลิบคีนัม และ (---) แทนเหล็กหล่อโครเมียมสูงเติมโม่ลิบคีนัม วงกลม แทนอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการอบเทมเปอร์ริง

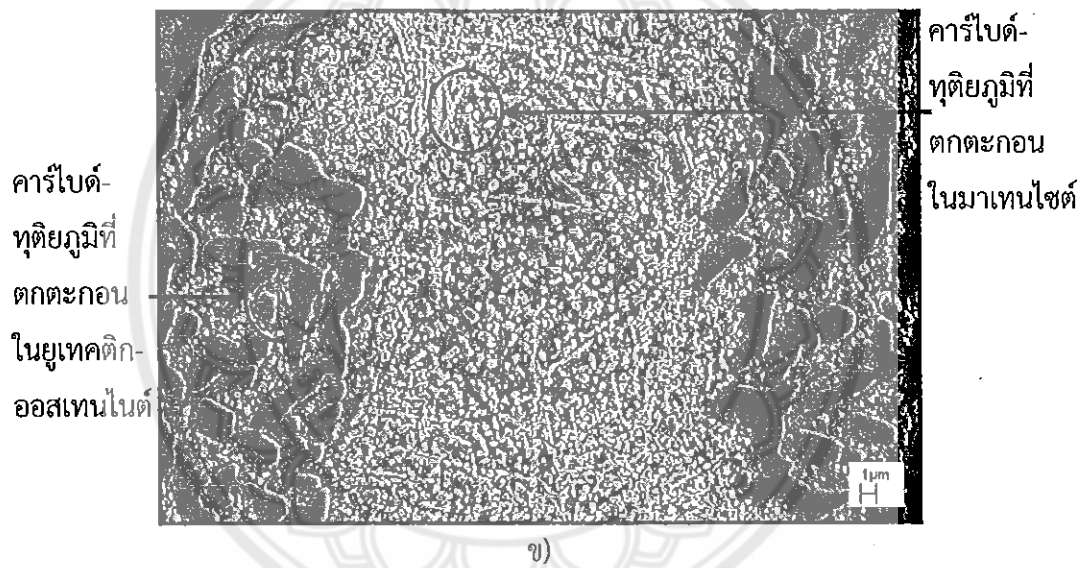
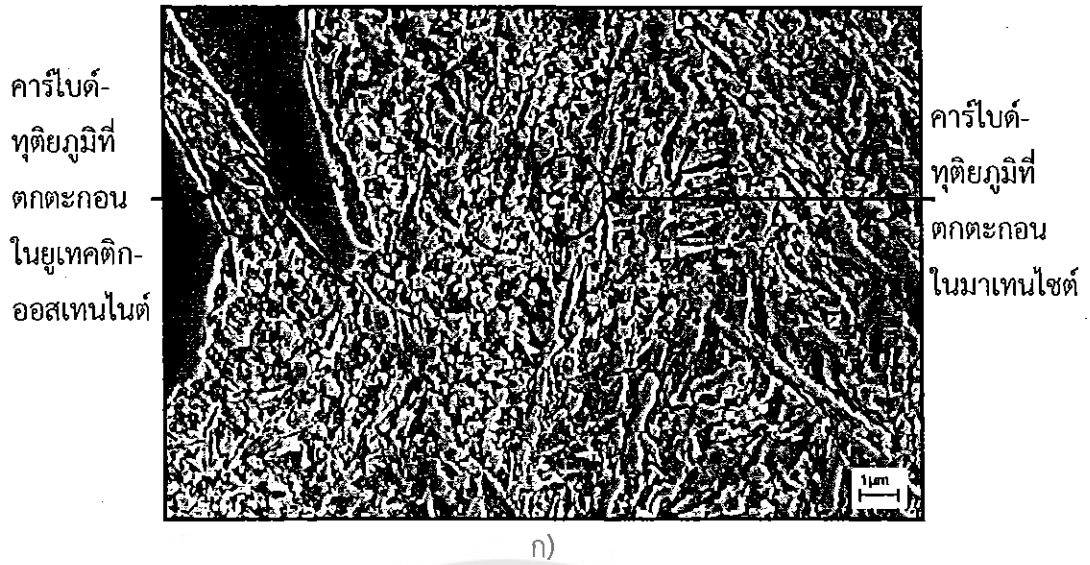
4.3 ผลของกรรมวิธีทางความร้อนหลังการอบเทมเปอร์ริง

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบตีสเตบิลเซชัน และเทมเปอร์ริง

เมื่อนำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัมหลังอบตีสเตบิลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มาเปรียบเทียบกับชิ้นงานหลังอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.15 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบเทมเปอร์ริงมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และเทมเปอร์คาร์ไบด์ตกตะกอนในเทมเปอร์มาเทนไซด์ โดยมีปริมาณคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในเดนไดรท์ และยูเทคติกออสเทนไนต์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังการอบตีสเตบิลเซชันเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 4.15 ก) โดยคาร์ไบด์ทุติยภูมิเหล่านี้บางส่วนเกิดขึ้นในระหว่างการอบตีสเตบิลเซชัน และโตในขณะอบเทมเปอร์ริง และบางส่วนเกิดขึ้นระหว่างการอบเทมเปอร์ริง ซึ่งมักเรียกว่า เทมเปอร์คาร์ไบด์ นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าหลังการอบเทมเปอร์ริงโครงสร้างของมาเทนไซด์ที่มีลักษณะแหลมคล้ายขนนกจะหายไป เนื่องจากการแพร่ของคาร์บอนในระหว่างการอบเทมเปอร์ริงส่งผลให้มาเทนไซด์โค้งมนมากขึ้น หรือที่เรียกว่า เทมเปอร์มาเทนไซด์ ดังรูปที่ 4.15 ก) และ ข) (อัมพร, 2549)

เมื่อนำภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่เติมโมลิบดีนัม จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ผ่านการอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 350 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มาเปรียบเทียบกับ พบว่าเมื่อเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิสูงขึ้นคาร์ไบด์ทุติยภูมิจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดเล็กมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 4.16 จ) และ ฉ) นอกจากนี้ยังพบว่าการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในยูเทคติกออสเทนไนต์มีปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.17

สำหรับเหล็กหล่อโครเมียมสูง (ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก) ที่เติมโมลิบดีนัม พบว่ามีคาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนทั้งในเดนไดรท์ และยูเทคติกออสเทนไนต์ ดังรูปที่ 4.18 และเกิดการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ดังรูปที่ 4.18 จ) และ ฉ) เมื่ออบเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียสตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในยูเทคติกออสเทนไนต์มีการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกันกับที่พบในเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม เมื่อนำเหล็กทั้งสองชนิดหลังการอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ไปกัดกรด ซึ่งประกอบด้วย 4 กรัม ของ KMnO_4 + 4 กรัม ของ $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$ ที่กัดเฉพาะส่วนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิออก พบว่าคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนอยู่ในเดนไดรท์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม และแท่งยาว ดังรูปที่ 4.20 นอกจากนี้ยังพบคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่มีขนาดเล็กๆ ในรูป 4.20 ซึ่งคาร์ไบด์คาร์ไบด์เหล่านี้อาจเป็นโมลิบดีนัมคาร์ไบด์ซึ่งจะต้องมีการศึกษาต่อไป

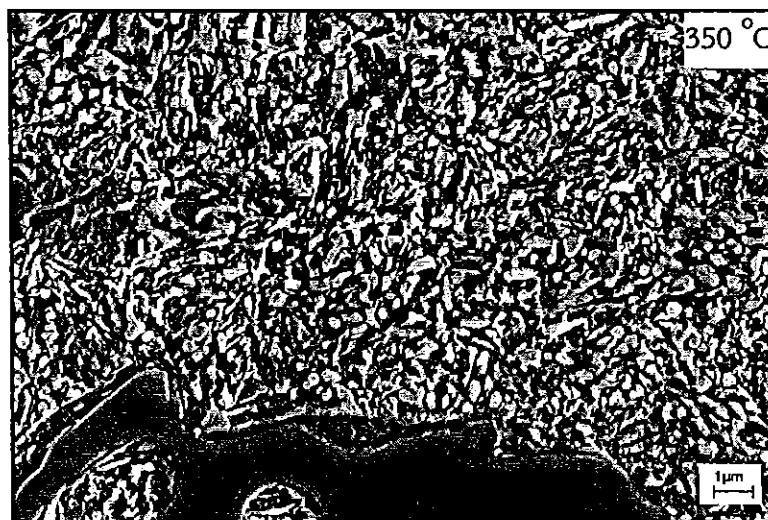


รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน และเทมเปอร์ิ่ง

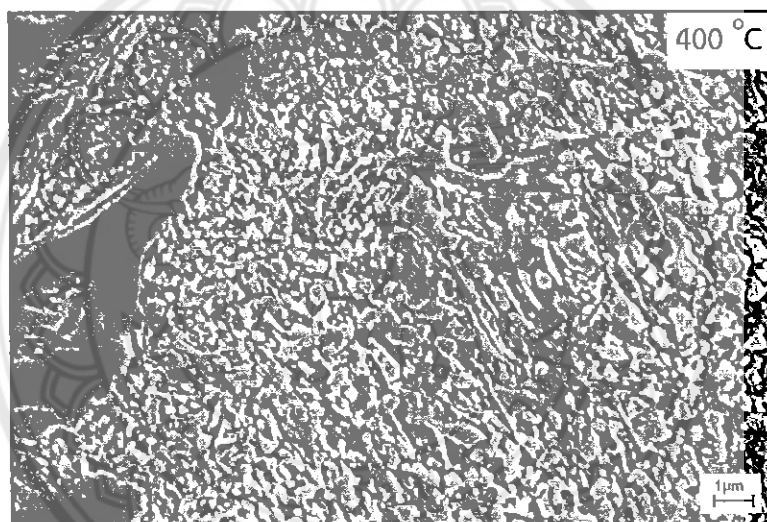
ก) อบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ข) อบตีสเตบิลไลเซชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

และอบเทมเปอร์ิ่งที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



ก)

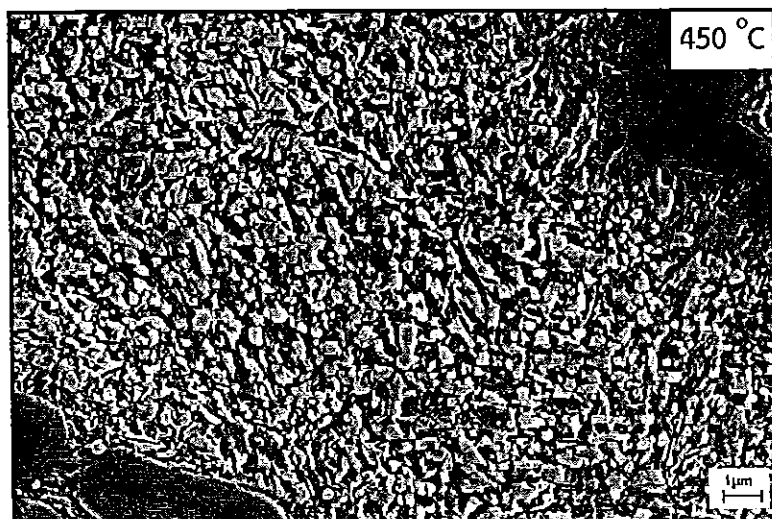


ข)

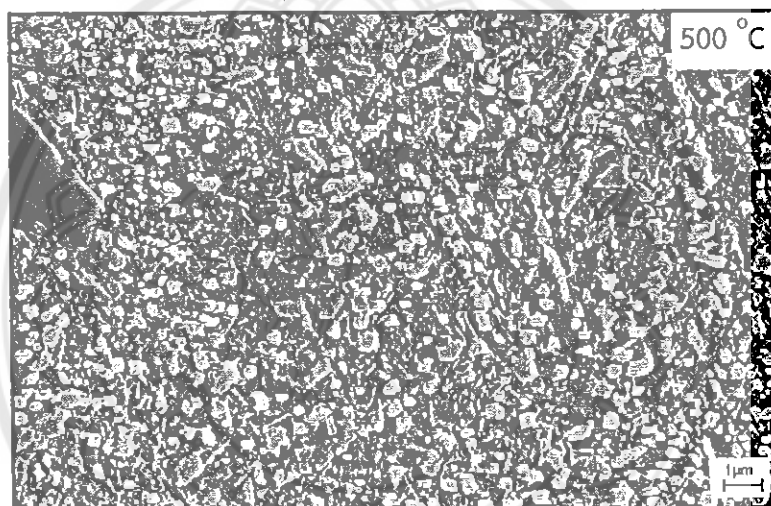
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาเทนไซด์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอริงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ก) อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

ข) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



ค)



ง)

รูปที่ 4.16 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์โบไดอิมในเดนไดรท์ของมาเทนไซด์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

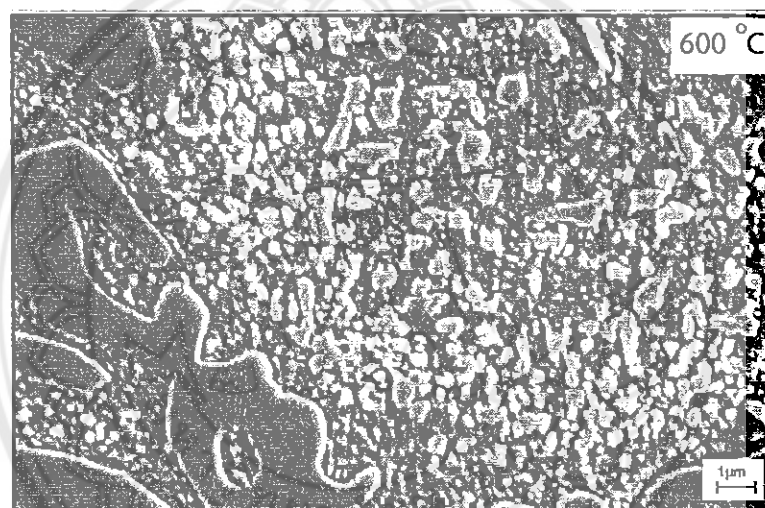
ค) อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

ง) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



คาร์ไบด์-
ทุติยภูมิ
เกิดการ
เชื่อมต่อกัน

จ)

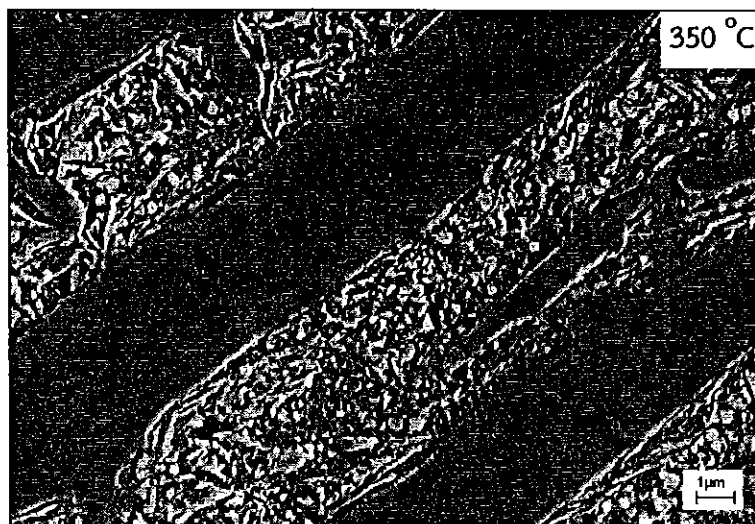


ฉ)

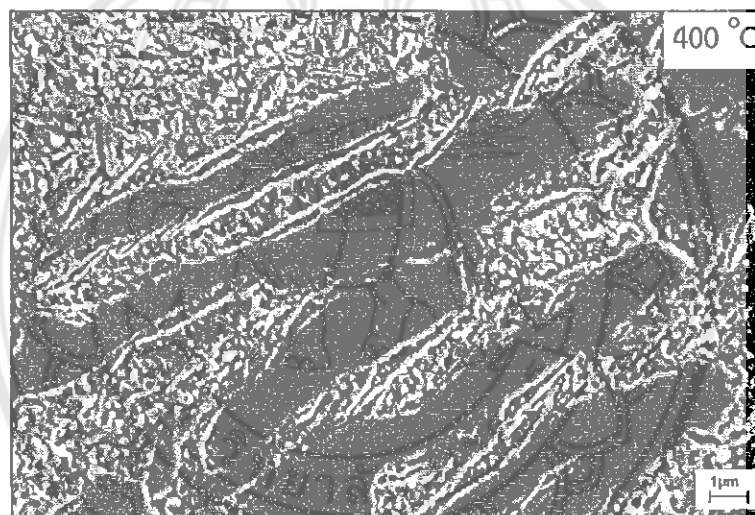
รูปที่ 4.16 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรทของมาเทนไฮด์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบดิสเทบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จ) อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

ฉ) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



ก)

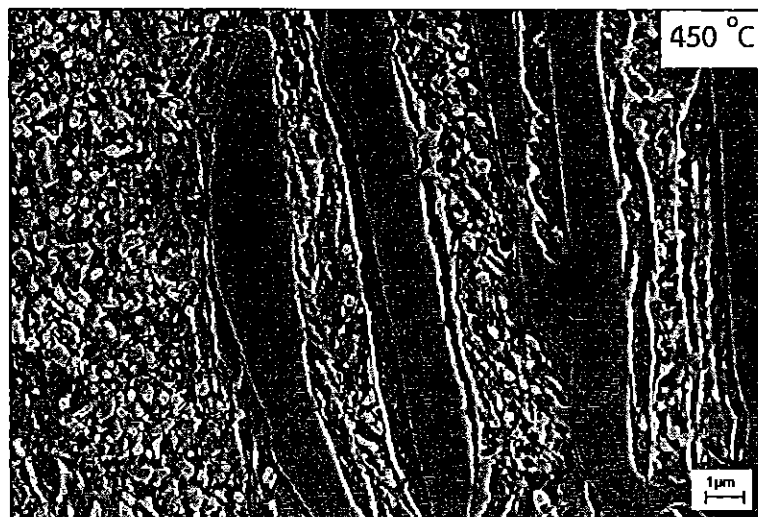


ข)

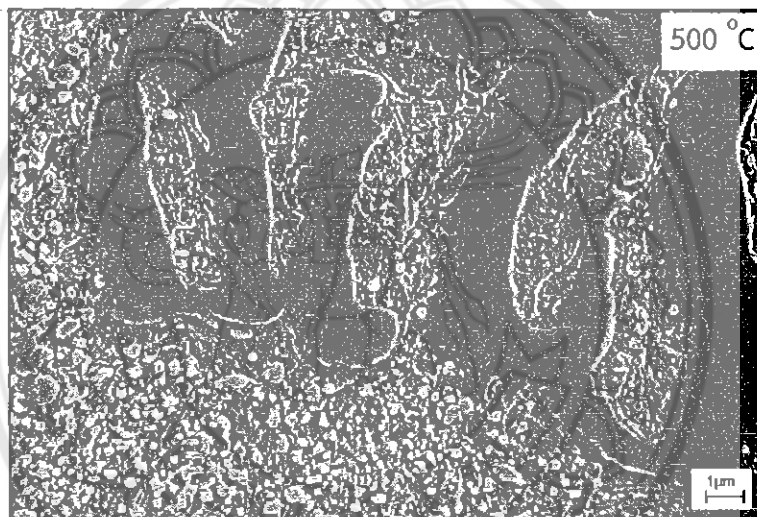
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และเทมเปอร์คาร์ไบด์ ในยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบ ดีสเทบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ก) อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

ข) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



ค)



ง)

รูปที่ 4.17 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และเทมเปอร์-คาร์ไบด์ในยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตปป์ไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

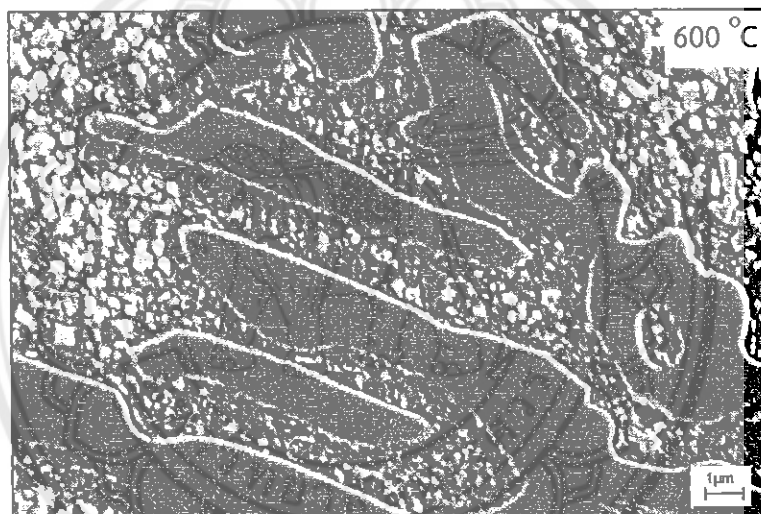
ค) อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

ง) อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส



คาร์ไบด์-
พอลิอิมิด

จ)

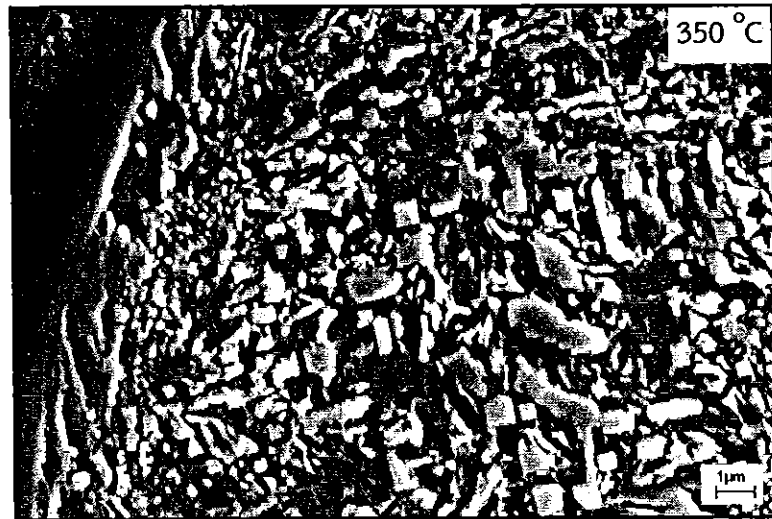


ฉ)

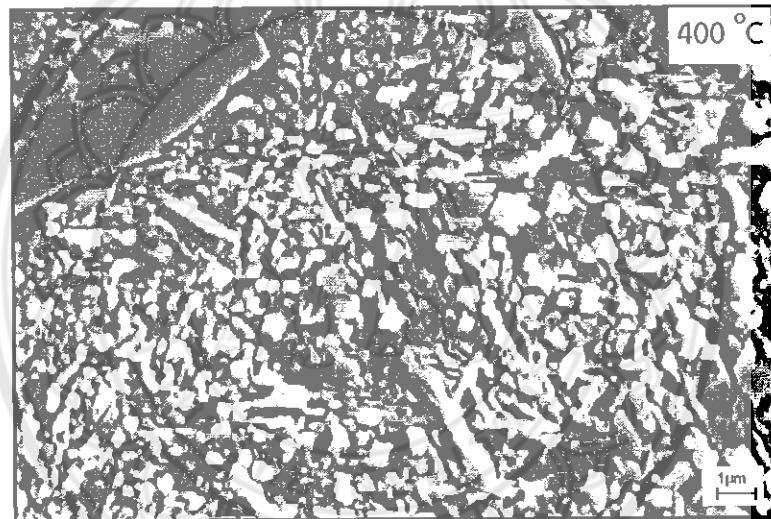
รูปที่ 4.17 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์พอลิอิมิด และเทมเปอร์คาร์ไบด์ใน
ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบ
ดิสเตปป์ไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จ) อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

ฉ) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



ก)

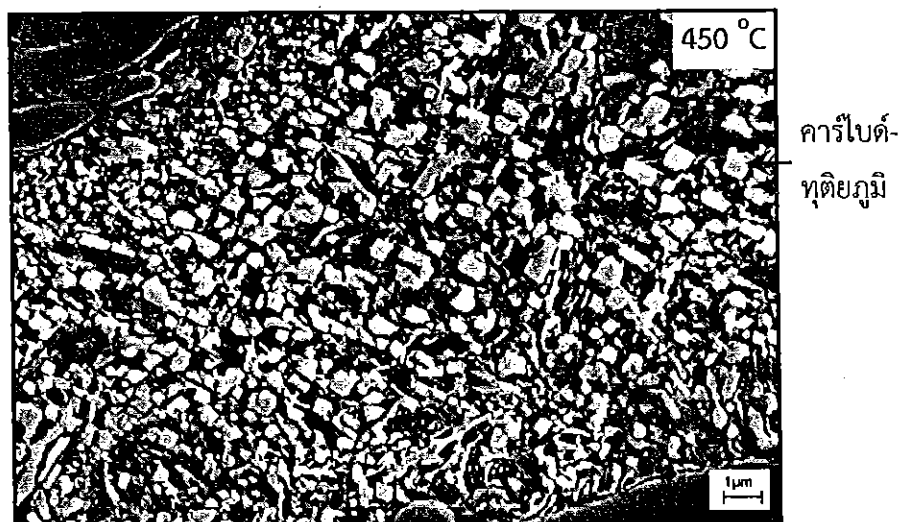


ข)

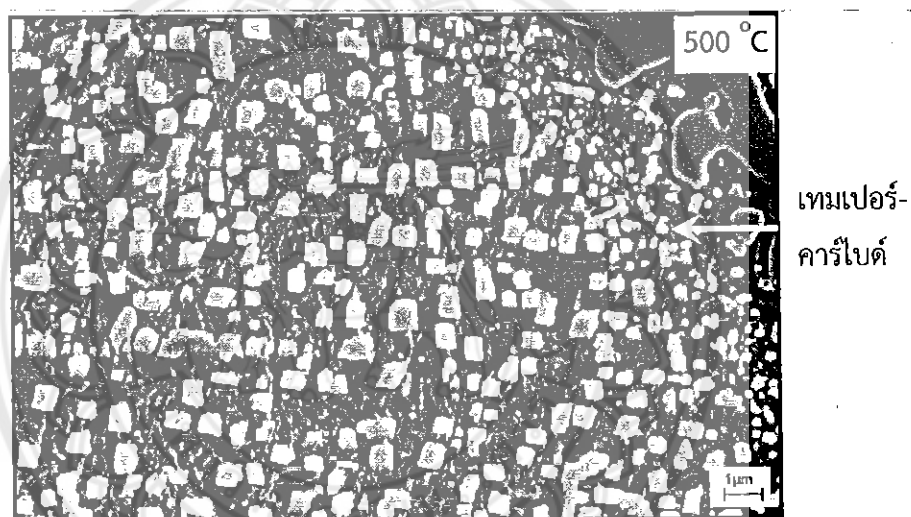
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาเทนไซต์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ก) อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

ข) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



ค)



ง)

รูปที่ 4.18 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาแทนไซด์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบดิสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ิ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

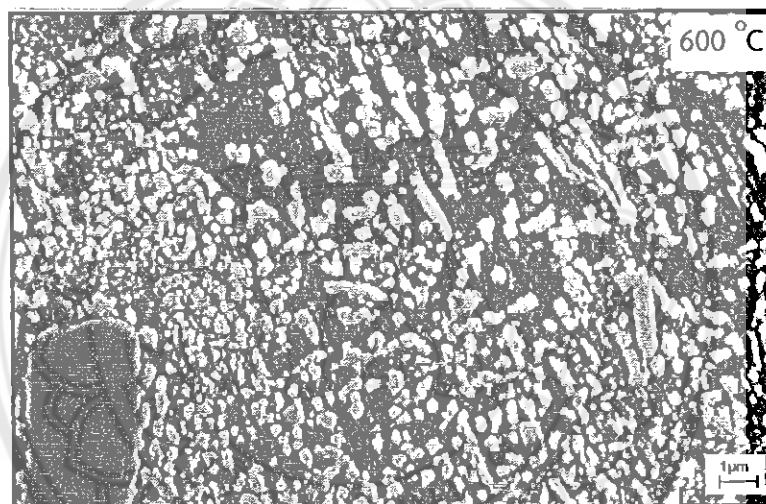
ค) อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

ง) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



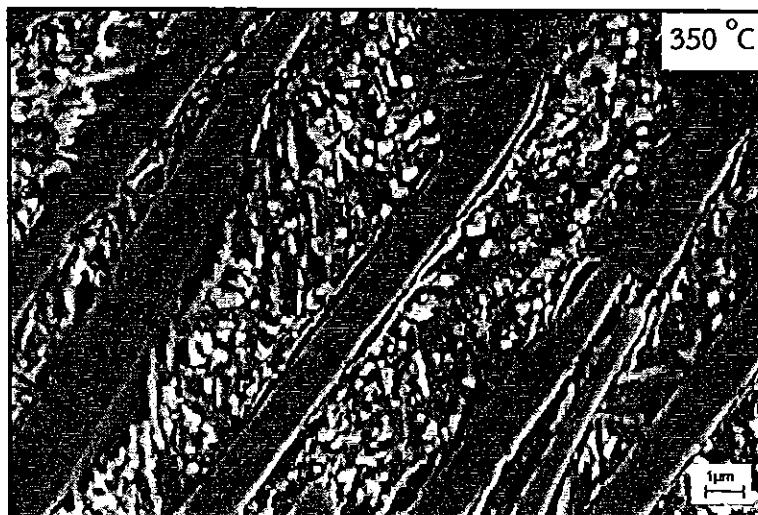
คาร์โบไคด-
ทุติยภูมิ
เชื่อมต่อกัน

จ)

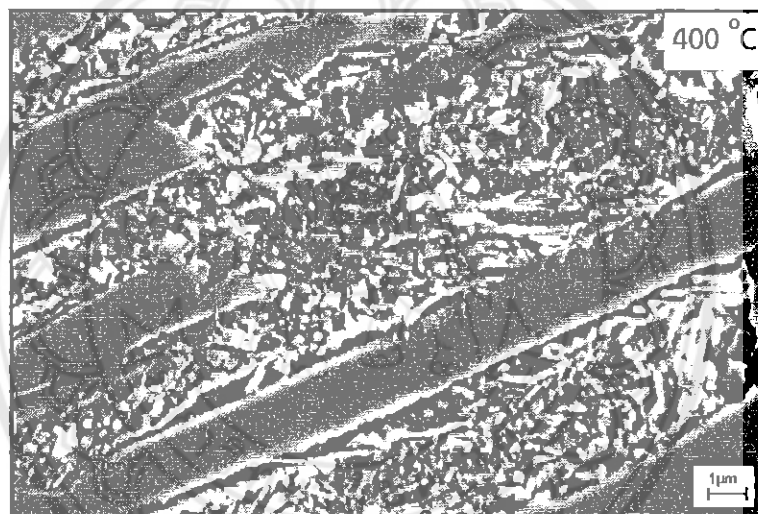


ฉ)

- รูปที่ 4.18 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์โบไคดทุติยภูมิในเดนไดรท์ของมาแทนไซด์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ิ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- จ) อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
 - ฉ) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



ก)



ข)

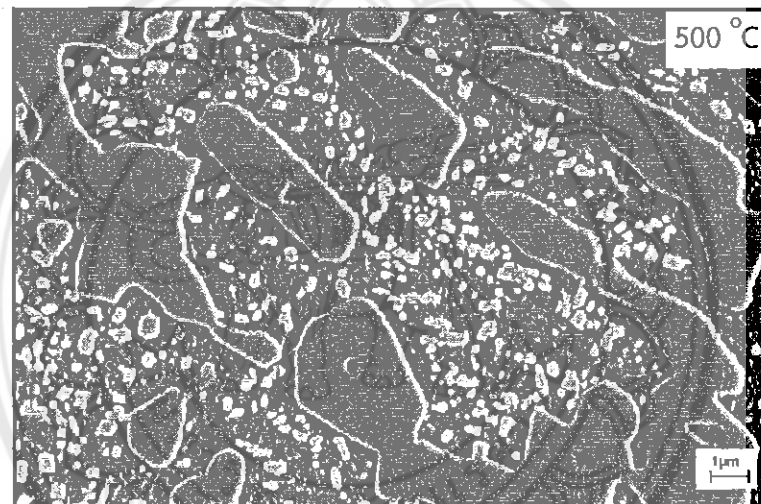
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์หุติยภูมิ และเทมเปอร์คาร์ไบด์ในยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ก) อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

ข) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

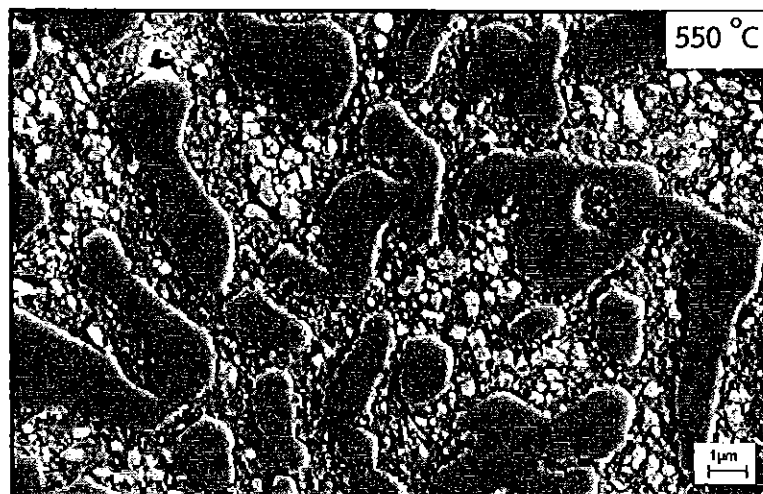


ค)

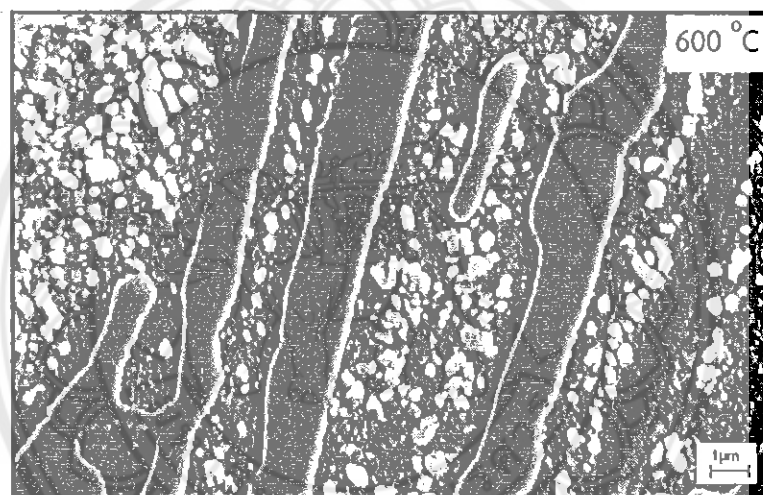


ง)

รูปที่ 4.19 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และเทมเปอร์คาร์ไบด์ใน
 ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบ
 ดิสเตบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 ค) อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส
 ง) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



จ)

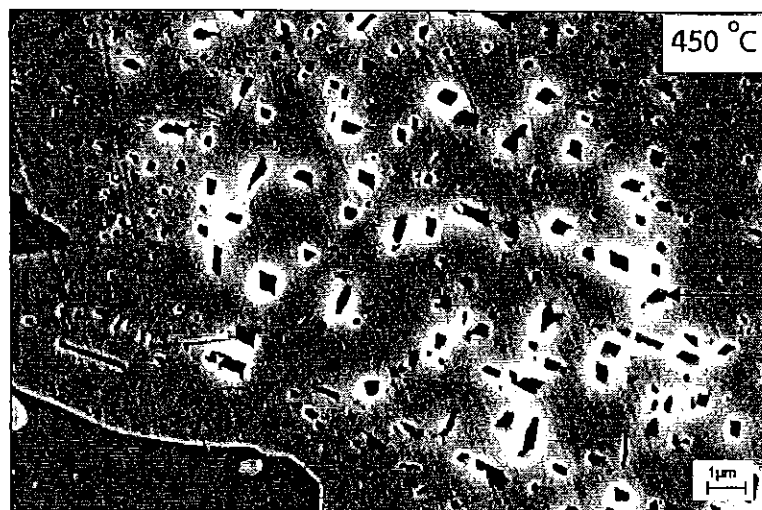


ข)

รูปที่ 4.19 (ต่อ) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และเทมเปอร์คาร์ไบด์ในยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ของเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัม หลังการอบตีสแตบิลไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

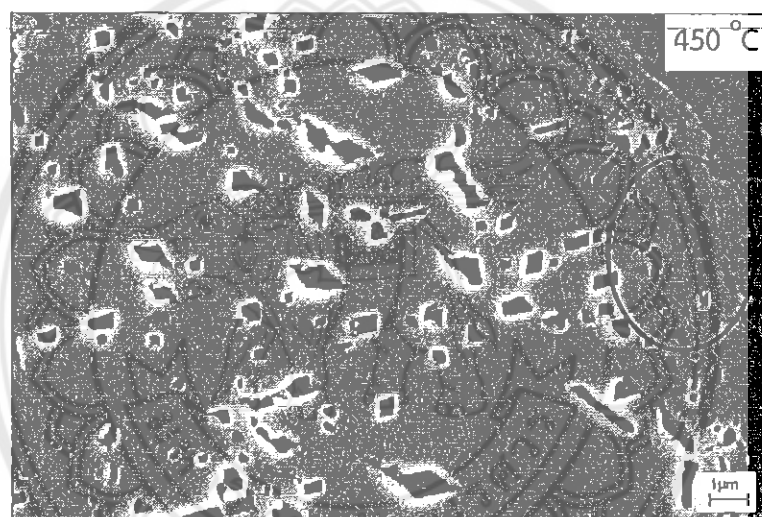
จ) อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

ข) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



คาร์ไบด์-
ทุติยภูมิ

ก)



เทมเปอร์-
คาร์ไบด์
ขนาดเล็ก

ข)

รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเดนไดรทของมาแทนไซด์หลังการอบดิสเตปิลไฮเซชัน และการอบเทมเปอร์ริง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

ก) เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม

ข) เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม

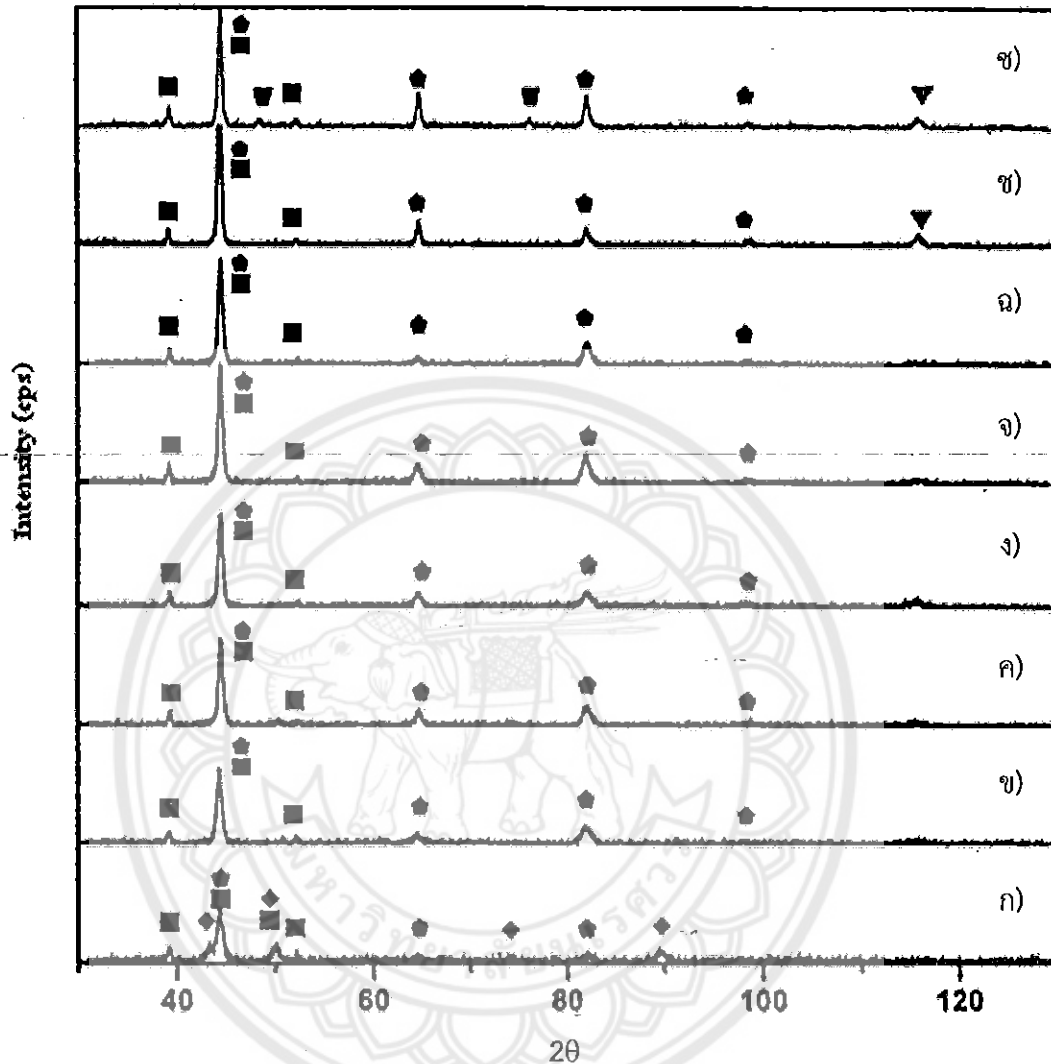
(กรด 4 กรัม ของ KMnO_4 + 4 กรัม ของ $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$)

จากนั้น เพื่อทำการวิเคราะห์ชนิดของเฟสในชิ้นงานที่ยังไม่ได้กัดกรดของชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัมทั้งในสภาพหล่อ และหลังการอบดิสเตปิลไฮเซชัน และหลังการอบเทมเปอร์ริง จึงทำการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานด้วยเครื่อง (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น X'Pert ของบริษัท Philips

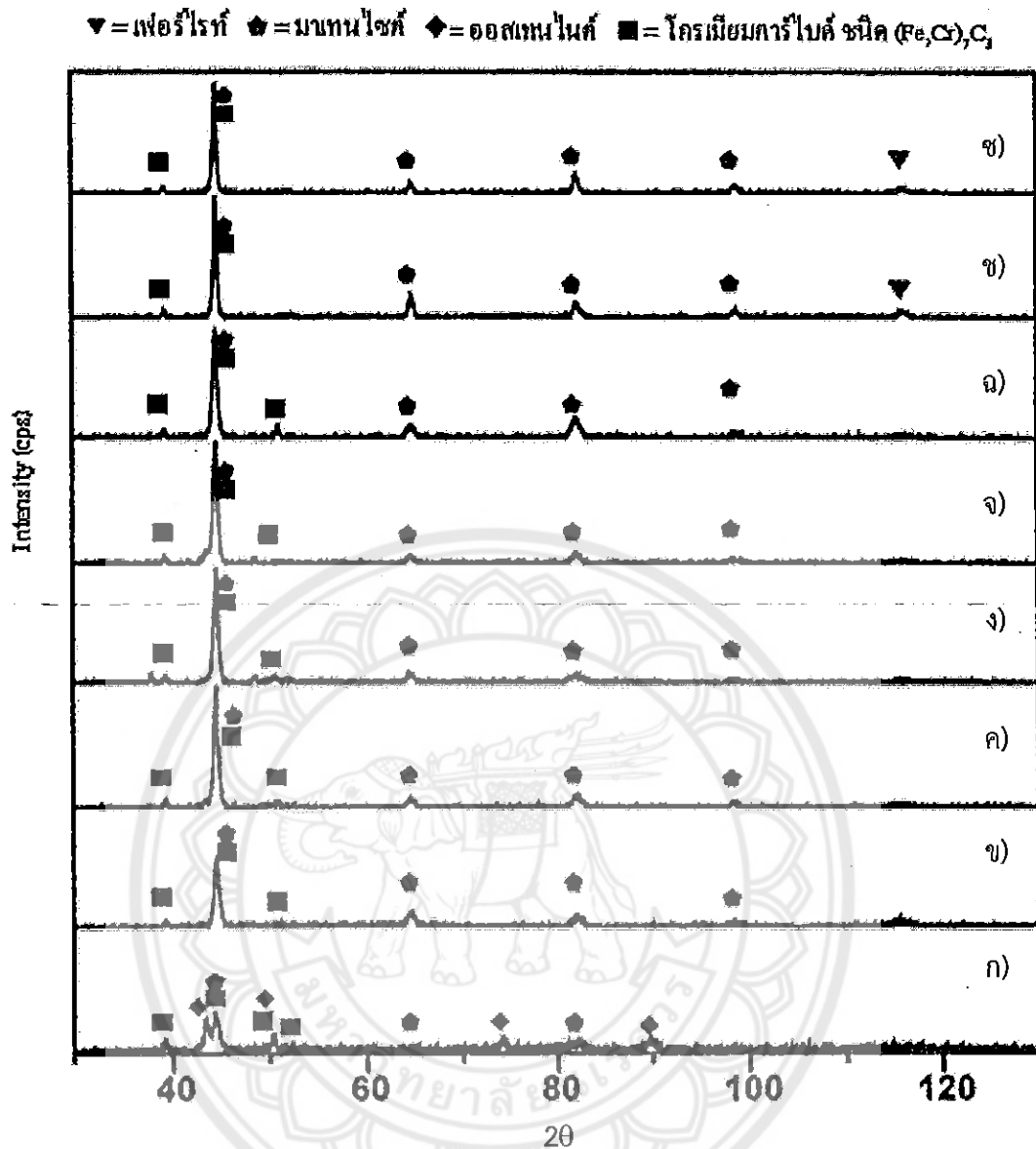
4.3.2 การศึกษาชนิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานอบเทมเปอริง

จากรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัมที่ผ่านการอบเทมเปอริง พบว่าเหล็กหล่อโครเมียมสูงทั้งสองชนิดที่ประกอบด้วย เฟสมาเทนไซต์ เฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 และยังพบว่าเฟสมาเทนไซต์มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าหลังการอบคัสเตบิลไลเซชัน เมื่ออบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 350 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าเฟสมาเทนไซต์ และเฟสออสเทนไนต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม เกิดเฟสเฟอร์ไรท์ และเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_{23}C_6$ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์ตกค้างเป็นเฟอร์ไรท์ และโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_{23}C_6$ ส่วนเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม หลังจากอบเทมเปอริงที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส พบเฟสเฟอร์ไรท์ ส่วนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ไม่พบเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_{23}C_6$ ดังรูปที่ 4.22 โดยใช้เปรียบเทียบกับ Joint Committee Powder Diffraction Standards (JCPDS) ของออสเทนไนต์ หมายเลข 023-0298 โครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ หมายเลข 005-0720 โครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_{23}C_6$ หมายเลข 078-1500 เฟอร์ไรท์ หมายเลข 006-0696 และมาเทนไซต์ หมายเลข 044-1290 อย่างไรก็ตามการที่ไม่พบเฟสของออสเทนไนต์ตกค้างในผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงาน อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องทดสอบ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ไม่สามารถวัดปริมาณเฟสที่มีปริมาณต่ำๆ ได้

▼ = เฟอไรต์ ● = มนทไนต์ ◆ = ออสเทนไนต์ ■ = โครเมียมคาร์ไบด์ ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$
 ▣ = โครเมียมคาร์ไบด์ ชนิด $(Fe,Cr)_6C_2$



รูปที่ 4.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมโดยกำหนดให้
 ก) สภาพหล่อ
 ข) ดิสเตบิลไลเซชัน 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 ค) เหมเปอริ่ง 350 องศาเซลเซียส
 ง) เหมเปอริ่ง 400 องศาเซลเซียส
 จ) เหมเปอริ่ง 450 องศาเซลเซียส
 ฉ) เหมเปอริ่ง 500 องศาเซลเซียส
 ช) เหมเปอริ่ง 550 องศาเซลเซียส
 ซ) เหมเปอริ่ง 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.22 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมโดยกำหนดให้

ก) สภาพหล่อ

ข) ดิสเตบิลไลเซชัน 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ค) เเทมเปอร์ริง 350 องศาเซลเซียส

ง) เเทมเปอร์ริง 400 องศาเซลเซียส

จ) เเทมเปอร์ริง 450 องศาเซลเซียส

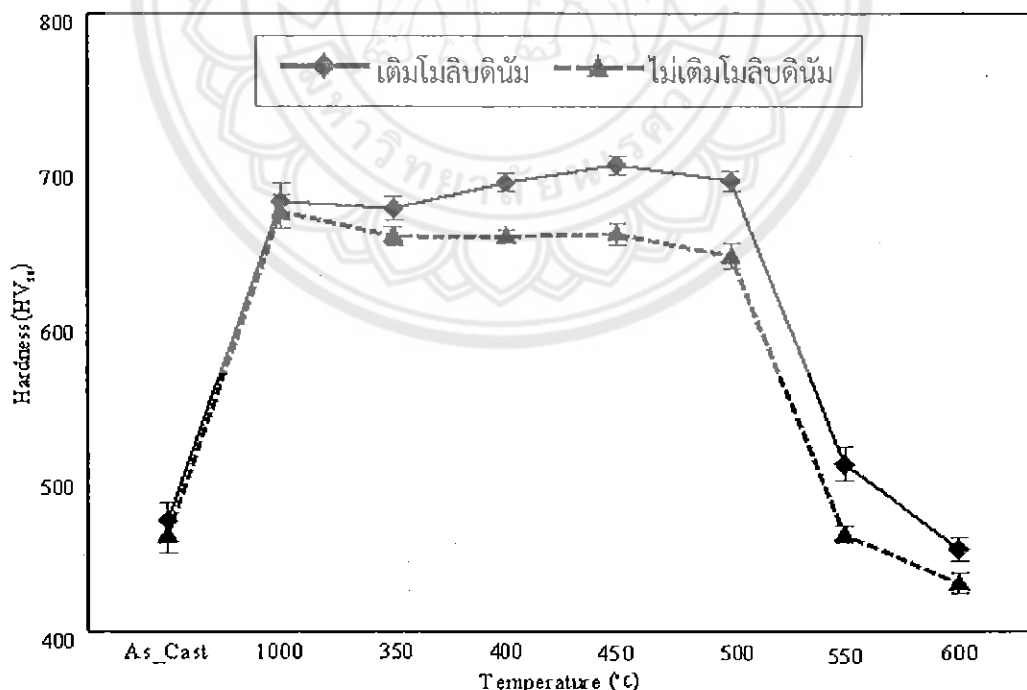
ฉ) เเทมเปอร์ริง 500 องศาเซลเซียส

ช) เเทมเปอร์ริง 550 องศาเซลเซียส

ช) เเทมเปอร์ริง 600 องศาเซลเซียส

4.3.3 ผลของการอบเทมเปอร์ริงต่อความแข็ง

เมื่อทำการทดสอบความแข็งชิ้นงานเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และที่เติมโมลิบดีนัม และนำค่าที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความแข็งจะได้ ดังรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าหลังการอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียสในเหล็กหล่อที่ไม่เติมโมลิบดีนัมมีความแข็งใกล้เคียงกับชิ้นงานหลังการอบตีสตีลไซเลน ส่วนในเหล็กหล่อที่เติมโมลิบดีนัมความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้น จากรายงานของ Pearce (2542) ได้อธิบายว่าในระหว่างเทมเปอร์ริงอนุภาคของโมลิบดีนัมคาร์ไบด์จะตกตะกอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคหลังการอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 350 ถึง 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.18 และจะเห็นได้ว่าบริเวณเดนไดรท์ที่อุณหภูมิ 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดเล็ก และมีปริมาณมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส มีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดใหญ่ และมีปริมาณน้อยลง นอกจากนี้จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งพบเฟสเฟอร์ไรท์ และคาร์ไบด์ชนิด $(Fe_2Cr)_{23}C_6$ ในชิ้นงานที่ผ่านการอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส ทั้งคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่มีขนาดใหญ่ ปริมาตรลดลง และเฟสเฟอร์ไรท์ที่พบ เป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังอบเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส มีความแข็งลดลง



รูปที่ 4.23 ผลของอุณหภูมิหลังการอบตีสตีลไซเลน และการอบเทมเปอร์ริงต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัม โครงสร้างในสภาพหล่อประกอบด้วย ยูเทคติกคาร์ไบด์-ออสเทนไนต์ และเดนไดรท์ที่มีโครงสร้างพื้นเป็นออสเทนไนต์ปฐมภูมิ หลังการอบตีสเตปโลเซชันโครงสร้างประกอบด้วย ยูเทคติกคาร์ไบด์ และเดนไดรท์ที่มีโครงสร้างพื้นเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในมาเทนไซต์ และพบว่าหลังการอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 550 ถึง 600 องศาเซลเซียส เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรท์

5.1.2 เหล็กหล่อโครเมียมสูงที่ไม่เติมโมลิบดีนัม และเติมโมลิบดีนัมในสภาพหล่อมีความแข็งแรงเฉลี่ยเท่ากับ 465 HV_{30} และ 475 HV_{30} หลังการอบตีสเตปโลเซชันมีความแข็งแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่าสภาพหล่อ และพบว่าหลังอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 550 ถึง 600 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงลดลงใกล้เคียงกับในสภาพหล่อ

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของเหล็กหล่อโครเมียมสูงนั้นมีหลายปัจจัย คือ ลักษณะ กระจายตัว ชนิด และบริเวณของคาร์ไบด์ทั้งยูเทคติกคาร์ไบด์ และคาร์ไบด์ทุติยภูมิ รวมทั้งโครงสร้างของเดนไดรท์ ดังนั้น ควรทำการวิเคราะห์ชนิด และปริมาณของคาร์ไบด์ ยูเทคติก คาร์ไบด์ทุติยภูมิ เเทมเปอร์คาร์ไบด์ และโมลิบดีนัมคาร์ไบด์

5.2.2 ควรมีการศึกษาชนิดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และคาร์ไบด์ขนาดเล็กที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

5.3 ปัญหา และแนวทางการแก้ไข

เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์มีจำนวนไม่เพียงพอ จึงทำให้ใช้เวลามากขึ้น แก้ปัญหาโดยการวางแผนการทำงาน เช่น ควรจองเครื่องไว้ล่วงหน้าโดยคำนวณเวลาในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้วิเคราะห์ให้ทันวันที่จองเครื่อง และควรจองจำนวนวันเผื่อไว้ เพราะว่าการทดสอบอาจจะมีการขัดข้องต้องแก้ไข

เอกสารอ้างอิง

- ประกายทิพย์ กิติคุณ และอัมพร เวียงมูล. 2550. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ
โครเมียมสูง. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- มนัส สติรจินดา. 2527. เหล็กหล่อ. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- สยาม แก้วคำไสย์. 2554. การวิเคราะห์ความเสียหายและการกัดกร่อนของโลหะ เรื่องเหล็กกล้า
ไร้สนิม ตอนที่ 15 สืบค้นเมื่อ 11 พฤษภาคม 2554.
http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2011_02_01_archive.html.
- อัมพร เวียงมูล. 2549. อิทธิพลของการอบชุบทางความร้อนและการเติมธาตุต่อโครงสร้างจุลภาค
และสมบัติของเหล็กหล่อโครเมียมสูง. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- Chicco, B., and Thorpe, W.R., 1993. On the solidification of pure C-Cr-Fe alloys. Cast
metals, 5, 203-211.
- Pearce, J.T.H., 1999. High Chromium iron to resist ware. Proceeding of the Sixth
Asian Foundry Congress, Jan 23-26, Calcutta India, 120-134
- Thorpe, W.R. and Chicco, B., 1985. The Fe-rich conner of the metasable C-Cr-Fe
liquidus surface. Metall. Trrans. A, 16A, 1541-1549.
- Wiengmoon, A., 2005. Microstructures of carbides in high chromium cast irons.
Ph.D. Thesis. Chiang Mai University, Thailand.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลตาราง

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ ก.1 ผลของการอบดิสเตปป์ไลเซชันต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง
ที่ไม่เติมโมลิบดีนัม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	หลังการอบดิสเตปป์ไลเซชัน								
	900			1000			1100		
เวลา (ชั่วโมง)	2	4	8	2	4	8	2	4	8
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 1	614	639	664	701	729	687	671	528	500
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 2	610	653	630	705	720	677	610	533	495
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 3	604	652	659	715	728	672	614	552	497
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 4	615	645	664	712	720	729	627	563	522
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 5	657	657	657	706	722	755	608	547	505
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 6	639	653	664	718	733	720	626	536	489
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 7	661	641	628	698	732	703	611	543	495
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 8	625	645	624	699	732	715	637	540	515
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 9	624	657	642	702	735	712	615	558	489
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 10	613	642	631	717	705	670	624	552	502
เฉลี่ย	626	648	646	707	726	704	624	545	501

ตารางที่ ก.2 ผลของการอบด้สเดบิไลเซชันต่อความแข็งของเหล็กหล่อโครเมียมสูง
ที่เติมโมลิบดีนัม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	หลังการอบด้สเดบิไลเซชัน								
	900			1000			1100		
เวลา (ชั่วโมง)	2	4	8	2	4	8	2	4	8
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 1	664	676	701	720	729	769	624	536	499
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 2	657	684	691	769	728	771	631	467	502
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 3	614	564	699	751	720	779	642	540	515
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 4	662	679	700	746	750	778	635	543	499
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 5	649	588	699	720	742	700	617	532	481
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 6	639	592	680	737	732	695	632	538	492
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 7	628	567	691	720	732	778	628	538	494
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 8	635	635	699	724	751	731	639	544	482
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 9	642	676	684	712	733	769	656	525	488
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 10	608	683	707	755	729	728	631	541	499
เฉลี่ย	640	634	695	735	735	750	634	530	495

ตารางที่ ก.3 ผลของการอบด้สเดบิไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริงต่อความแข็ง
ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาพหล่อ	ด้สเดบิไลเซชัน	หลังการอบด้สเดบิไลเซชันและเทมเปอร์ริง					
			350	400	450	500	550	600
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 1	467	673	650	653	669	639	461	424
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 2	471	661	663	663	657	654	466	432
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 3	474	664	657	656	668	633	468	430
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 4	462	672	656	657	661	649	456	438
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 5	446	667	654	654	652	652	464	426
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 6	455	663	656	654	650	644	466	428
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 7	460	694	661	652	659	635	461	421
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 8	469	664	664	663	653	639	469	440
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 9	477	686	654	656	655	633	452	437
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 10	443	679	646	651	650	652	464	436
เฉลี่ย	462	672	656	656	657	643	463	431

ตารางที่ ก.4 ผลของการอบดีสเทปีไลเซชัน และการอบเทมเปอร์ริงต่อความแข็ง
ของเหล็กหล่อโครเมียมสูงที่เติมโมลิบดีนัม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาพหล่อ	ดีสเทปีไลเซชัน	หลังการอบดีสเทปีไลเซชันและเทมเปอร์ริง					
			350	400	450	500	550	600
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 1	467	678	798	681	692	691	515	463
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 2	461	685	679	700	708	702	518	455
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 3	471	699	684	694	701	688	514	464
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 4	477	681	665	686	705	691	500	456
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 5	475	663	677	687	692	693	518	446
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 6	477	682	661	699	699	703	507	448
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 7	487	675	682	693	706	681	512	462
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 8	457	663	668	690	705	686	504	450
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 9	459	667	672	689	709	695	483	445
ค่าความแข็ง (HV ₃₀) จุดที่ 10	490	694	686	687	706	689	516	584
เฉลี่ย	472	679	687	691	702	692	509	467

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายศรัณย์ พลับเที่ยง
ภูมิลำเนา 11/3 หมู่ 5 ต.ท่าโพธิ์ อ. เมือง จ.พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา
- จบระดับมัธยมศึกษา
จากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
E-mail: runner2up@hotmail.com



ชื่อ นางสาวอรรทัย เทียนสีม่วง
ภูมิลำเนา 82 หมู่ 9 ต.ท่าสัก อ.พิชัย จ.อุตรดิตถ์
ประวัติการศึกษา
- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนกาญจนา
ภิเษกวิทยาลัย เพชรบูรณ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
E-mail: orrathai01371@hotmail.com