

โครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทังสเตียมที่ตกตะกอนในสภาพหล่อและสภาพอบชุบ
ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%



นายณัฐศิษฐ์ ทวีพรเกษมสุข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2587-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE CRYSTAL STRUCTURE DEVELOPMENT OF PRECIPITATED SECONDARY CARBIDE
IN AS-CAST AND HEAT-TREATED Fe-30.8Ni-26.6Cr ALLOY



Mr. Nattasit Thaweepornkhasemsukh

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2006

ISBN 974-14-2587-2

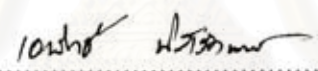
Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์	โครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในสภาพหล่อและสภาพอบชุบของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%
โดย	นายณัฐศิษฐ์ ทวีพรเกษมสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ทิเรก ลาวัณย์ศิริ)

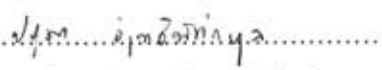
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสาร์ตันพร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์)


..... กรรมการ
(ดร. ปัญญวัชร ังยาว)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปฐม วิสุทธิพิทักษกุล)

ณัฐศิษฐ์ ทวีพรเกษมสุข : โครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในสภาพหล่อ และสภาพอบชุบของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% (THE CRYSTAL STRUCTURE DEVELOPMENT OF PRECIPITATED SECONDARY CARBIDE IN AS-CAST AND HEAT-TREATED Fe-30.8Ni-26.6Cr ALLOY.) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์, 115 หน้า, ISBN 974-14-2587-2

งานวิจัยนี้ศึกษาพื้นฐานและโครงสร้างผลึกคาร์ไบด์ทุติยภูมิในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่ติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy โครงสร้างจุลภาคของสภาพหล่อเป็นแบบเดนไดรต์ประกอบด้วยโครงสร้างเนื้อพื้นออสเทนไนต์ (γ) และคาร์ไบด์ปฐมภูมิ 2 ชนิด คือ โครเมียมคาร์ไบด์และไนโอเบียมคาร์ไบด์ตกตะกอนตามขอบเกรน ภายหลังจากที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1,000 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 ชั่วโมง พบตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก และสารประกอบซิลิไซด์ (เฟส G) ในเนื้อพื้นใกล้กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ซึ่งเป็นคาร์ไบด์ชนิดเดียวกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน และคำนวณพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของเนื้อพื้นออสเทนไนต์ คาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทุติยภูมิ คาร์ไบด์รูปเข็ม-ทรงกระบอก และสารประกอบซิลิไซด์ พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็น Face Center Cubic ผลการศึกษายืนยันกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิเป็นไปตามสมการของ Johnson-Mehl และ Avrami การตกตะกอนช่วงแรกมีค่า n อยู่ในช่วง 1.0 - 1.5 เป็นกลไกการเพิ่มปริมาตรอนุภาคหรือการโตแบบสามมิติ สอดคล้องกับการตรวจพบตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม และการตกตะกอนช่วงที่สองมีค่า n อยู่ในช่วง 0.5 - 1.0 เป็นกลไกการโตแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก สอดคล้องกับการตรวจพบตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....ณัฐศิษฐ์.....ทวีพรเกษมสุข.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....กอบ บุญ หล่อทองคำ.....
 ปีการศึกษา.....2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....ชัญชนา ธนชยานนท์.....

4670679321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Fe-Cr-Ni ALLOY/ SECONDARY CARBIDES / CRYSTAL STRUCTURE

NATTASIT THAWEEPORNKHAEMSUKH: THE CRYSTAL STRUCTURE DEVELOPMENT OF PRECIPITATED SECONDARY CARBIDE IN AS-CAST AND HEAT-TREATED Fe-30.8Ni-26.6Cr ALLOY. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.DR. GOBBOON LOTHONGKUM, THESIS CO-ADVISOR: DR. CHANCHANA THANACHAYANON, 115 pp. ISBN 974-14-2587-2

The morphology and crystal structure of the secondary carbides precipitated in as-cast Fe-30.8Ni-26.6Cr alloy were characterized by the scanning electron microscopy (SEM) equipped with energy-dispersive spectroscopy (EDS) and the transmission electron microscopy (TEM) equipped with EDS. The as-cast microstructures consisted of austenite dendrite matrix and two types of primary carbides; chromium carbide and niobium carbide, which precipitated at the austenite grain boundary. After aging at 900 °C and 1,000 °C for 24, 200, 400, 600, 800 and 1,000 hours, the cube secondary carbide, the needlelike-cylinder secondary carbide and the G-phase precipitated in the austenite matrix. The cube and needlelike-cylinder secondary carbides were found near the primary carbide. The chemical analysis by EDS and lattice parameter analysis by TEM illustrated that the cube and needlelike-cylinder secondary carbide are chromium carbide, $M_{23}C_6$, which is the same as primary carbide. According to electron diffraction pattern and lattice parameter calculation, the crystal structures of austenite, primary carbide, cube secondary carbide, needle-cylinder secondary carbide and G-phase are Face Center Cubic. The results confirmed that the mechanism of secondary carbide precipitation described by Johnson-Mehl and Avrami. The first stage of precipitation having $n = 1.0 - 1.5$ is the growth of particle applicable initial volume which agrees with the presence of the cube secondary carbide. The second state of precipitation having $n = 0.5 - 1.0$ is the thickening of long cylindrical needles or very large plates which agrees with the presence of the needlelike-cylinder secondary carbide.

Department...Metallurgical Engineering.....Student's Signature Nattasit Thaweeponkhaemsukh
 Field of Study...Metallurgical Engineering...Advisor's Signature Gobboon Lothongkum
 Academic Year 2006.....Co advisor's Signature Chanachana Thanachayanon

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ และ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและ
ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, ดร. ปัญญาวัชร วังยาว
และ อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ
และข้อคิดเห็นเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรินทร์ ไชยเรืองศรี ภาควิชาเคมี
อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับคำแนะนำต่างๆ รวมทั้งความรู้
เกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ขอขอบพระคุณ ดร. ปัญญาวัชร วังยาว สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาการใช้เตา และคำปรึกษาต่างๆ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ
รวมทั้งช่วยแนะแนวทางในการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ สำหรับการวิจัยในครั้งนี้
ขอขอบคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน จนงานวิจัยนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปด้วยดี

ทำนุผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในด้าน
ต่างๆด้วยดี ตลอดจนสำเร็จการศึกษาและขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ
ให้แก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 บริบทหรศน์วรรณกรรม	3
2.1 โลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม	3
2.2 การเลี้ยวเบนของคลื่นโดยโครงสร้างผลึก	8
2.3 การวิเคราะห์ลักษณะการแตกหัก	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
3 วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1 วัสดุดิบและสารเคมี	27
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	27
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	28
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	31
4.1 ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ	31
4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ	31
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	34
4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบชุบที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ	38

4.5	ความแข็งของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังการอบความร้อน	66
4.6	สมบัติความต้านแรงดึงของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อน	69
5	สรุปผลการทดลอง	75
	รายการอ้างอิง	76
	ภาคผนวก	79
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	115



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission spectroscopy	4
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมหล่อทนความร้อนตามมาตรฐาน ACI	4
ตารางที่ 2.3 ความหมายของค่า n ตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami	17
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสม HP-Nb และ HP-NbTi	24
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission spectroscopy	31
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ ด้วยเทคนิค EDS	33
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ	36
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS	43
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS	43
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	45
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS	59
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS	59
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	62
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อน	69

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ	3
รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม	5
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้าง M_7C_3 , $M_{23}C_6$ และมาร์เทนไซต์ (α') ของเหล็กหล่อโครเมียม 30%	7
รูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของคลื่นตามกฎของแบรกก์ แสดงมุมที่ตกกระทบกับระนาบผลึก	8
รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แบบ θ - 2θ	9
รูปที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิคอนที่ระนาบแกนโซน (110)	10
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการกำหนดวิธีการวิเคราะห์ผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กทรอนิกส์	10
รูปที่ 2.9 ผิวของรอยแตกหักของเหล็กกล้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกวาด	13
รูปที่ 2.10 กลไกการแตกหักแบบหลุมบ่อด้วยการโตของช่องว่าง	14
รูปที่ 2.11 กลไกการแตกหักจากความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อพื้นที่กับเฟสทุติยภูมิ	14
รูปที่ 2.12 กลไกการแตกหักจากการแยกตัวระหว่างระนาบรอยแตก	15
รูปที่ 2.13 ลักษณะการแตกหักด้วยกลไกการแตกหักแบบผสม	16
รูปที่ 2.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อขาว 26.6%โครเมียม	18
รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ	19
รูปที่ 2.16 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของคาร์ไบด์ชนิด MC และ $M_{23}C_6$	19
รูปที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กทรอนิกส์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องผ่านของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ	20
รูปที่ 2.18 คาร์ไบด์ชนิด MC ตกตะกอนในเนื้อพื้นออกสเทนไนท์โลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ	20
รูปที่ 2.19 คาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ตกตะกอนในเนื้อพื้นออกสเทนไนท์โลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ	21
รูปที่ 2.20 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ที่อุณหภูมิ 760 °ซ เวลา 4 ปี	22
รูปที่ 2.21 โลหะผสม 20Cr32Ni1Nb หลังการใช้งานที่อุณหภูมิ 760 °ซ เวลา 4 ปี	23
รูปที่ 2.22 โครงสร้างจุลภาคของ MC, $M_{23}C_6$ และเฟส G ที่ตกตะกอนตามขอบเกรน	23

รูปที่ 2.23	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม HP-NbTi หลังการอบความร้อนประกอบด้วยเฟสของโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิ (P-Cr), โครเมียมคาร์ไบด์ทุติยภูมิ(S-Cr) และเฟส G	25
รูปที่ 2.24	โครงสร้างจุลภาคบริเวณเฟส G และมีไทเทเนียมคาร์ไบด์ตกตะกอนภายในเฟส G	25
รูปที่ 3.1	มิติของตัวอย่างการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E 8M	30
รูปที่ 3.2	ชิ้นงานตัวอย่างการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M	30
รูปที่ 4.1	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	31
รูปที่ 4.2	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	32
รูปที่ 4.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%	34
รูปที่ 4.4	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังการอบที่ 900 °ซ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	38
รูปที่ 4.5	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังการอบที่ 1000 °ซ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	39
รูปที่ 4.6	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังการอบความร้อน จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	40
รูปที่ 4.7	โครงสร้างจุลภาคของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังการอบความร้อนที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง และ 1000 ชั่วโมง	41
รูปที่ 4.8	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่อุณหภูมิ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง	42
รูปที่ 4.9	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่อุณหภูมิ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง	42
รูปที่ 4.10	โครงสร้างจุลภาคของคาร์ไบด์ปฐมภูมิของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	45
รูปที่ 4.11	โครงสร้างจุลภาคของตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	46

รูปที่ 4.12	โครงสร้างจุลภาคของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 ^o ซ เวลา 24 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	49
รูปที่ 4.13	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 900 ^o ซ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า	52
รูปที่ 4.14	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 ^o ซ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า	53
รูปที่ 4.15	โครงสร้างจุลภาคแบบดาร์คฟิลด์ (Dark Field) ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	55
รูปที่ 4.16	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังการอบที่ 900 ^o ซ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	57
รูปที่ 4.17	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังการอบที่ 1000 ^o ซ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	58
รูปที่ 4.18	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 ^o ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	60
รูปที่ 4.19	โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 ^o ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	61
รูปที่ 4.20	คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมในเนื้อพื้นออกสเตนไนท์ของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 ^o ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	63
รูปที่ 4.21	เฟส G (สารประกอบซิลิไซด์) ของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 ^o ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	64
รูปที่ 4.22	ความแข็งแบบ HRB ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อน	66
รูปที่ 4.23	ความแข็งของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อน	67
รูปที่ 4.24	ความแข็งบริเวณเนื้อพื้นกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อน	67

รูปที่ 4.25 ความเค้นแรงดึงสูงสุดของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1000 °ซ	70
รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1000 °ซ	71
รูปที่ 4.27 ตัวอย่างหลังการทดสอบแรงดึงของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ ตามมาตรฐาน ASTM E 8M	71
รูปที่ 4.28 ตัวอย่างหลังทดสอบแรงดึงระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ	71
รูปที่ 4.29 ความแปรผันของผลการทดสอบความแข็งแรงด้วยแรงดึงกับจำนวนในการทดสอบของ วัสดุเปราะและวัสดุเหนียว	72
รูปที่ 4.30 ลักษณะการแตกหักของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1000 °ซ	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้นำท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% เป็นเตาปฏิกรณ์ในกระบวนการสลายไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ เช่น เอธิลีน เมทานอล เป็นต้น สารตั้งต้นคือ ไฮโดรคาร์บอน ไอน้ำ และอากาศผสมเข้ากันเกิดปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 850-1150 °C ที่สภาวะนี้ทำให้โครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมดังกล่าวเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิวติยุมิขนาดเล็กละเอียดในเนื้อพื้น จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การโตและการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิวติยุมิตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami [1] ทำให้ทราบกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิวติยุมิ ปัจจุบันมีการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึกและส่วนผสมทางเคมีของคาร์ไบด์ทิวติยุมิน้อยมาก ในที่นี้จะใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน เพื่อยืนยันและสนับสนุนกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิวติยุมิตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทิวติยุมิที่ตกตะกอนในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม

1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบความร้อนต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของคาร์ไบด์ทิวติยุมิด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope)

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทิตานียม ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Diffraction Pattern)

1.3.3 ศึกษาส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกลของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียมในสภาพหล่อและหลังอบความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบโครงสร้างจุลภาค ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทิตานียมที่ตกตะกอนในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม

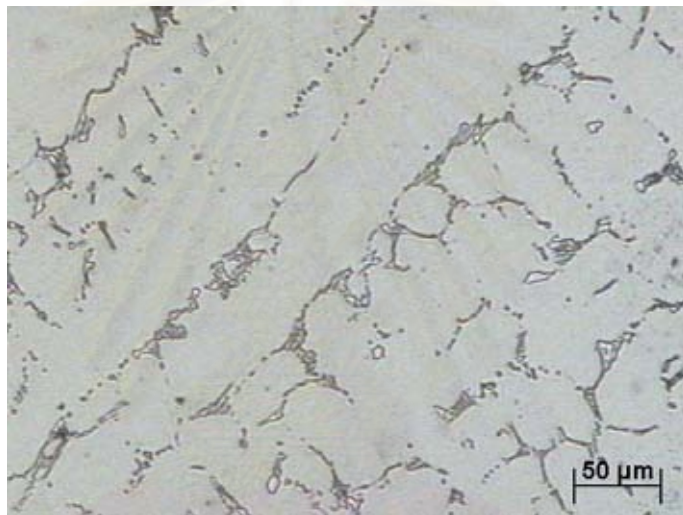
1.4.2 สามารถอธิบายและยืนยันข้อมูลทางทฤษฎีของ Johnson-Mehl และ Avrami ได้

1.4.3 ทราบผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบความร้อนต่อสมบัติเชิงกลของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม

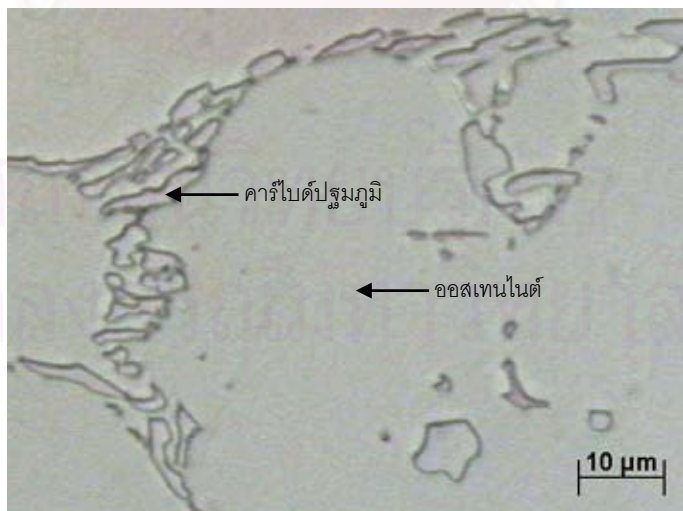
บทที่ 2 ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 ท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

ท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ถูกขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อเหวี่ยงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ใช้เป็นเตาปฏิกรณ์ในงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพื่อสลายไฮโดรคาร์บอน รูปที่ 2.1 (ก)-(ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%



(ก) กำลังขยาย 50 เท่า



(ข) กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% พบว่ามีปริมาณของเหล็ก 38.2% นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% โดยมีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับโลหะผสมหล่อทนความร้อนตามมาตรฐานเกรด HP ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แต่ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมชนิดนี้ไม่จัดอยู่ในกลุ่มมาตรฐาน เนื่องจากการผสมธาตุอื่น ๆ เป็นปริมาณมากในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% เช่น แมงกานีส ไนโอเบียม และไทเทเนียม เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% วิเคราะห์

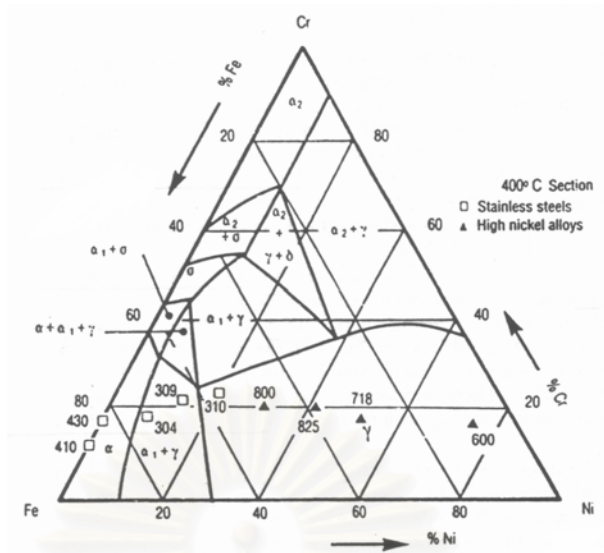
ด้วยเครื่อง Emission spectroscopy (ร้อยละโดยน้ำหนัก) [1]

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Cu	%Co	%Al	%Nb	%Ti	%V	%Pb	%W	%Fe
0.30	1.43	1.40	26.6	30.8	0.050	0.17	0.003	0.68	0.054	0.049	0.005	0.25	38.2

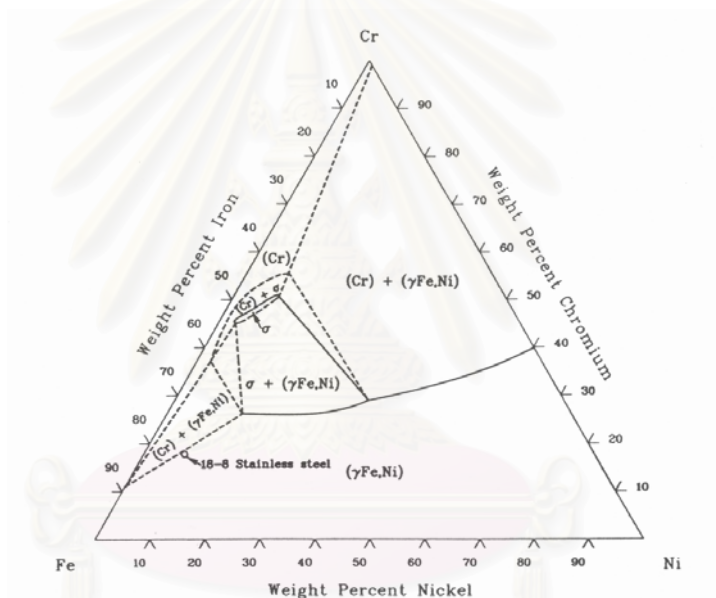
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมหล่อทนความร้อนตามมาตรฐาน ACI [2]

ACI designation	UNS number	ASTM specification (a)	Composition (b), %			
			C	Cr	Ni	Si (Max)
HA	...	A217	0.20 max	8-10	...	1.00
HC	J92605	A297, A608	0.50 max	26-30	4 max	2.00
HD	J93005	A297, A608	0.50 max	26-30	4-7	2.00
HE	J93403	A297, A608	0.20-0.50	26-30	8-11	2.00
HF	J92603	A297, A608	0.20-0.40	19-23	9-2	2.00
HH	J93503	A297, A608, A447	0.20-0.50	24-28	11-14	2.00
HI	J94003	A297, A567, A608	0.20-0.50	26-30	14-18	2.00
HK	J94224	A297, A351, A567A, A608	0.20-0.60	24-38	18-22	2.00
HK-30	J94203	A351	0.25-0.35	23.0-27.0	19.0-22.0	1.75
HK-40	J94204	A351	0.35-0.45	23.0-27.0	19.0-22.0	1.75
HL	N08604	A297, A608	0.20-0.60	28-32	18-22	2.00
HN	J94213	A297, A608	0.20-0.50	19-23	23-27	2.00
HP	N08705	A297	0.35-0.75	24-28	33-37	2.00
HP-50WZ(c)	0.45-0.55	24-28	33-37	2.00
HT	N08605	A297, A351, A567, A608	0.35-0.75	13-17	33-37	2.50
HT-30	N08603	A351	0.25-0.35	13.0-17.0	33.0-37.0	2.50
HU	N08005	A297, A608	0.35-0.75	17-21	37-41	2.50
HW	N08006	A297, A608	0.35-0.37	10-14	58-62	2.50
HX	N06050	A297, A608	0.35-0.75	15-19	64-68	2.50

(a) ASTM designations are the same as ACI designation. (b) Rem Fe in all compositions. Manganese content : 0.35 to 0.65% for HA, 1% for HC, 1.5% for HD, and 2% for the other alloys. Phosphorus and sulfur content : 0.04%(max)for all but HP-50WZ. Molybdenum(max), (c) Also contains 4to6%W, 0.1%to 1.0%Zr, and 0.035%S(max)and P(max)



(ก) อุณหภูมิ 400 °ซ [3]



(ข) อุณหภูมิ 900 °ซ [4]

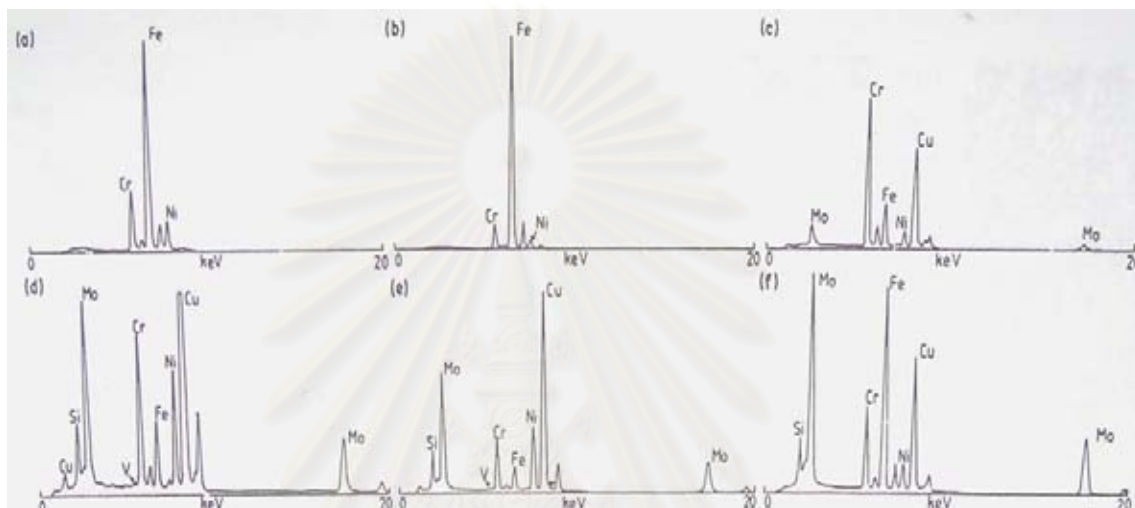
รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม พบว่า ส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุเหล็ก 38.2% ธาตุนิกเกิล 30.8% ธาตุโครเมียม 26.6% เมื่อนำส่วนผสมทางเคมีนี้มาเปรียบเทียบกับแผนภูมิสมดุลของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม ในรูปที่ 2.2 (ก)-(ข) ปรากฏว่าอยู่ในบริเวณของออสเทนไนต์ ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก)-(ข) คือมีโครงสร้างเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เหมาะสมกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและมีความทนทานต่อความร้อนได้ดีและมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงเพียงพอกับการใช้งาน การเกิดตะกอนคาร์ไบด์ของธาตุโครเมียม ธาตุไนโอเบียม ธาตุไทเทเนียม และธาตุทังสแตน ทำให้เกิดสารประกอบคาร์ไบด์ เช่น MC, $M_{23}C_6$,

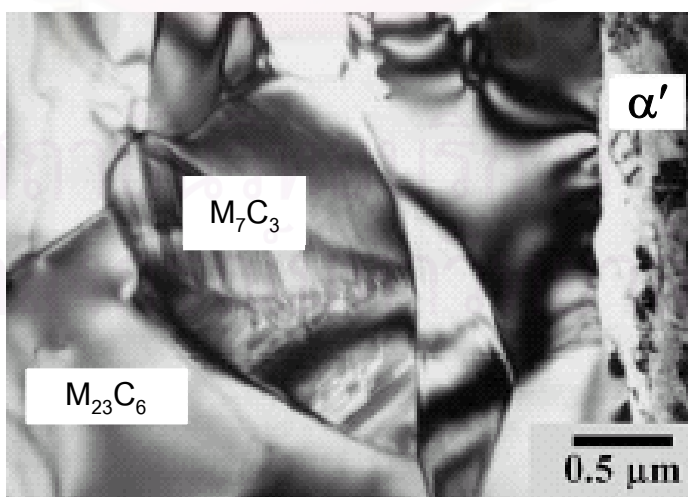
M_6C หรือ M_7C_3 ตกตะกอนในเนื้อพื้นและบริเวณขอบเกรน ซึ่งการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเนื้อพื้นทำให้ความแข็งแรงของเนื้อพื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมินขนาดเล็กทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) และเพิ่มสนามความเค้นภายในบริเวณระนาบเลื่อนไถล [3,5] ธาตุโครเมียมสามารถเพิ่มความทนการกัดกร่อนและป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงจากเกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่บริเวณผิวของโลหะผสมและสนับสนุนการเกิดสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ หรือ M_7C_3 ตกตะกอนในเนื้อพื้นและตามขอบเกรนทำให้เพิ่มความแข็งแรงจากการตกตะกอน (Precipitation Strengthening) และเพิ่มความแข็งแรงบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary Strengthening) [6,9,11] เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงตะกอนของคาร์ไบด์ชนิด $Cr_{23}C_6$ สามารถถูกแทนที่ด้วยเหล็ก นิกเกิล ทังสเทน หรือโมลิบดีนัมในตำแหน่งของโครเมียมเกิดเป็น $(Cr,Fe,Ni,Mo,W)_{23}C_6$ [6,12] ส่วนคาร์ไบด์ชนิด MC เกิดจากสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุไนโอเบียม ธาตุไทเทเนียม หรือธาตุทังสเทน ซึ่งคาร์ไบด์ชนิดดังกล่าวนี้เป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง ดังนั้นเมื่อเกิดตกตะกอนตามขอบเกรนจึงทำหน้าที่ป้องกันการไต่ของเกรนและช่วยยับยั้งการเลื่อนของเกรนเมื่อใช้งานอุณหภูมิสูง ทำให้ลดอัตราการคืบหรือเพิ่มความเค้นคืบ สำหรับคาร์ไบด์ชนิด M_6C มีลักษณะคล้ายกับ $M_{23}C_6$ แต่มีความเสถียรมากกว่า $M_{23}C_6$ และสามารถควบคุมขนาดเกรนได้ถ้าตกตะกอนที่ขอบเกรน โดยธาตุที่ทำให้เกิดสารประกอบคาร์ไบด์ชนิด M_6C คือธาตุโมลิบดีนัมและธาตุทังสเทน [7] ส่วนธาตุอะลูมิเนียม ธาตุทองแดง ธาตุทังสเทน และธาตุโคบอลต์ สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อพื้นจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) [8] เนื่องจากขนาดอะตอมตัวทำละลายและตัวถูกละลายมีขนาดแตกต่างกัน ทำให้ผลึกเกิดการบิดจนเสียรูปร่างและเพิ่มพลังงานการจัดเรียงลำดับระนาบผิดพลาดสูงขึ้น (Stacking Fault Energy) [3,6,9] ธาตุอะลูมิเนียมสามารถเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันจากการสร้างชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และธาตุนิกเกิล ธาตุไทเทเนียม ธาตุไนโอเบียม และธาตุซิลิคอนจะสนับสนุนการเกิดเฟส G หรือสารประกอบซิลิไซด์ของนิกเกิล ไทเทเนียม และซิลิคอน [10] ซึ่งเฟส G เป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) มีระบบโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์ซับซ้อน (Complex Cubic) เฟส G นี้สามารถเพิ่มความต้านทานการออกซิเดชันให้กับวัสดุได้สูงขึ้น [11]

การตกตะกอนของสารประกอบคาร์ไบด์และสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds) ในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ พบว่าส่วนใหญ่เป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ และ MC และสารประกอบเชิงโลหะ เช่น σ , χ และ เฟส Laves ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเทคนิค EDS [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของคาร์ไบด์ของเหล็กหล่อโครเมียม 30% ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การศึกษานี้พบว่าปฏิกิริยายูเทคติกเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 และ $M_{23}C_6$ และพบว่าบริเวณ M_7C_3 มีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนสูงกว่าบริเวณ $M_{23}C_6$ [13] ผลการศึกษาตามที่ได้กล่าวมานี้สามารถใช้เป็นความรู้พื้นฐานสำหรับการศึกษาสัณฐานและส่วนผสมเคมีของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ต่อไป



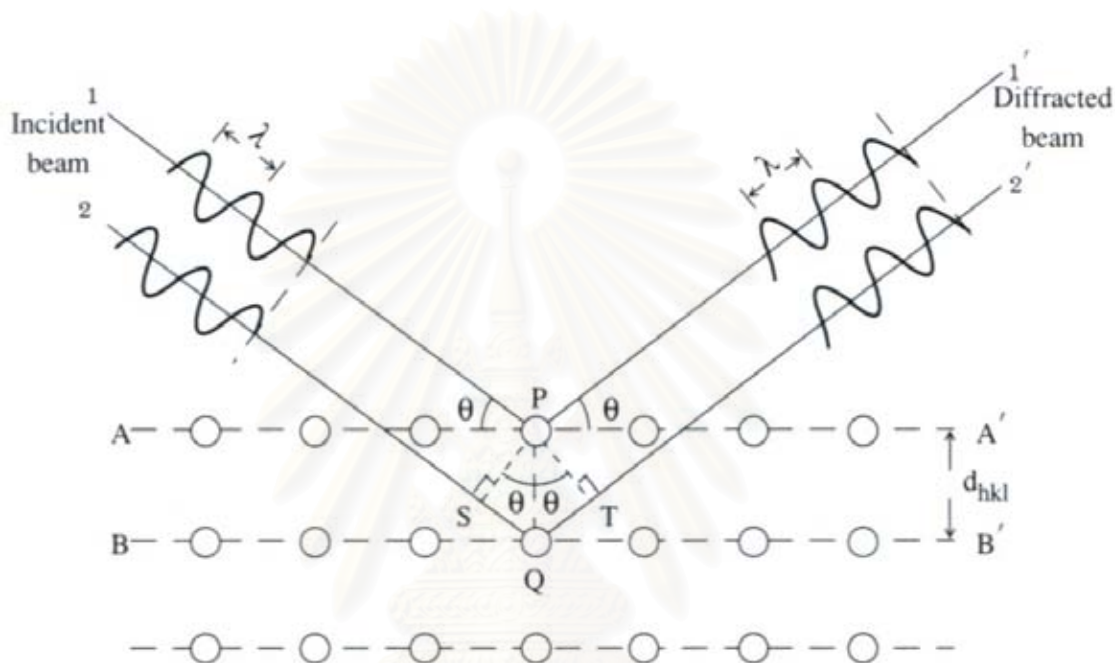
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS (a) ออสเทนไนต์ (b) เฟอไรต์ (c) $M_{23}C_6$ (d) M_7C_3 (e) M_6C (f) เฟส Laves [12]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาค M_7C_3 , $M_{23}C_6$ และมาร์เทนไซต์ (α') ของเหล็กหล่อโครเมียม 30% หลังอบความร้อนที่อุณหภูมิสูง [13]

2.2 การเลี้ยวเบนของคลื่นโดยโครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นระนาบสมมาตร และมีรูปแบบแน่นอนซ้ำ ๆ กัน เมื่อคลื่นตกกระทบกับอะตอมเกิดการสะท้อนของคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่ามุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) จากการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อผ่านโครงสร้างผลึกสามารถใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุได้ทั้งผลึกเดี่ยว วัสดุหลายผลึก และสารอสัณฐาน [8]



รูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของคลื่นตามกฎของแบรกก์ แสดงมุมที่ตกกระทบกับระนาบผลึก [8]

สมการกฎของแบรกก์ คือ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n \lambda \quad (2.1)$$

ความสัมพันธ์ของรูปที่ 2.5 กับสมการกฎของแบรกก์ จะได้

$$\Delta = SQ + QT = 2d \sin \theta \quad (2.2)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่น

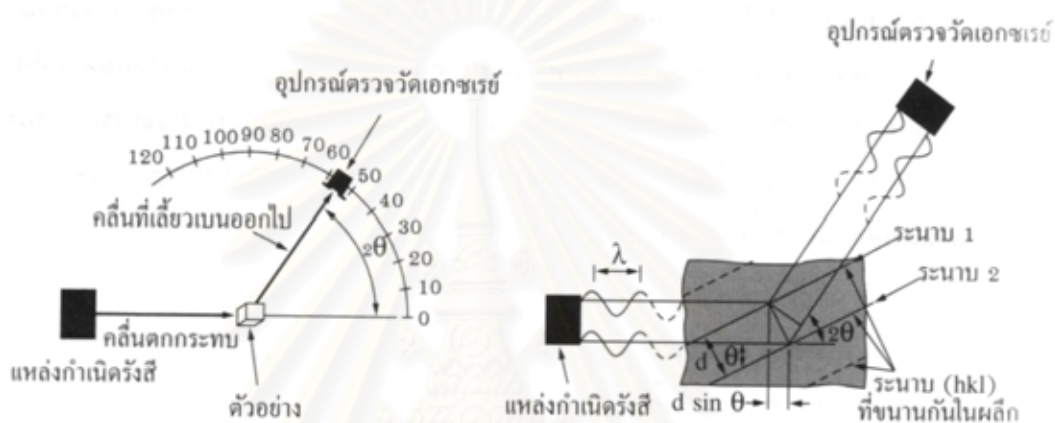
n คือ ลำดับของการสะท้อน

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างอะตอม

และ θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อน (วัดจากแนวระนาบที่พิจารณา)

2.2.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์หลังจากตกกระทบตัวอย่างอย่างสามารภใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างได้ รูปที่ 2.6 แสดงวิธีการเลี้ยวเบนแบบ θ - 2θ โดยที่เทคนิคนี้จะหมุนตัวอย่างเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์ (X-ray detector) จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ [14] จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถตรวจสอบระบบผลึก คำนวณระนาบที่ตำแหน่งยอดกราฟ และคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter, a) ได้



รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แบบ θ - 2θ [14]

การคำนวณและวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [14] สามารถทำได้โดยการกำหนดตำแหน่งของอะตอมในระบบผลึกหนึ่งหน่วย (Unit Cell) ในระบบสามมิติแกน X, Y และ Z และกำหนดทิศทางของผลึก (Crystal Direction) ด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์หรือดัชนีทิศทาง (h, k, l) การกำหนดค่า h k และ l เป็นค่าส่วนกลับของระยะตามแนวแกนในระบบผลึกตัดกับแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

$$\text{สำหรับระบบลูกบาศก์} : d_{hkl} = a / [h^2 + k^2 + l^2]^{1/2} \quad (2.3)$$

แทนค่า d_{hkl} ลงในสมการที่ 2.1 (กฎของแบรกก์)

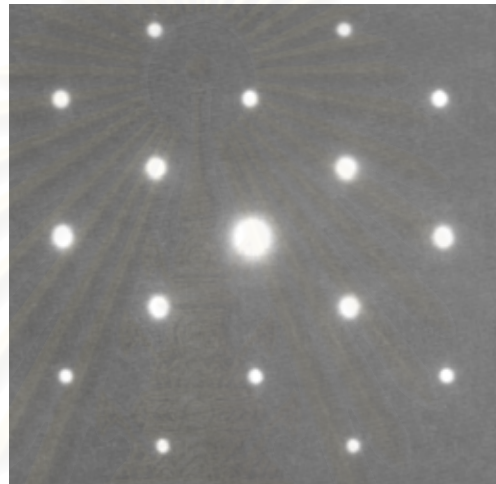
$$2 [a / [h^2 + k^2 + l^2]^{1/2}] \sin \theta = n\lambda \quad (2.4)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$h^2 + k^2 + l^2 = \sin^2 \theta [2a/n\lambda]^2 \quad (2.5)$$

2.2.2 การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน

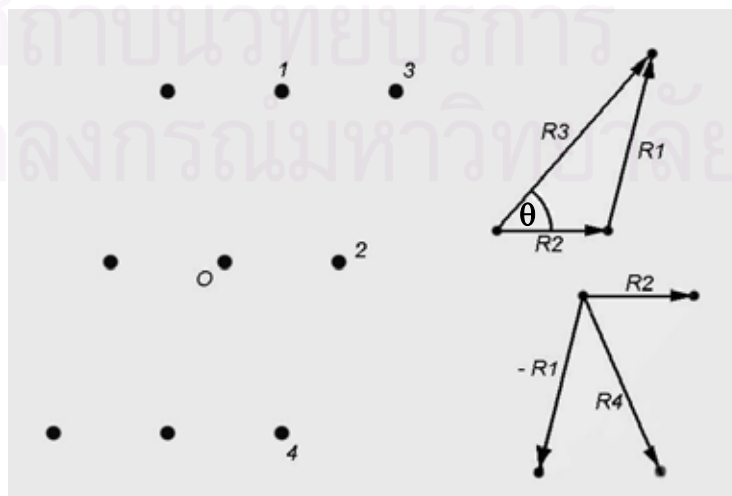
การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนมีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับการเลี้ยวของรังสีเอ็กซ์ ตามกฎของแบรกก์ อิเล็กตรอนจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นมุมเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากระนาบเดียวกันจะรวมกันเป็นจุดในรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron Diffraction Pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จึงสามารถทราบระบบผลึกของวัสดุและทราบระนาบของชั้นงานที่ตั้งฉากกับลำอิเล็กตรอนหรือแกนโซน (Zone Axis) ได้ [15] จากรูปแบบการเลี้ยวเบนสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter, a) และทราบรายละเอียดต่าง ๆ ในการจัดเรียงตัวของอะตอมได้



รูปที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของซิลิคอนที่ระนาบแกนโซน (110) [17]

การคำนวณระนาบผลึกและแกนโซนจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน [16] สามารถทำได้ดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งในแต่ละจุดของรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน เพื่อระบุให้ทราบทิศทางและตำแหน่งของจุด (เวกเตอร์) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการกำหนดวิธีการวิเคราะห์ผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน

2. วัดระยะระหว่างจุดศูนย์กลางไปยังตำแหน่งที่เรากำหนดไว้และค่าคงที่ของกล้อง เพื่อคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม ตามสมการดังนี้

$$Rd_{hkl} = \lambda L \quad (2.6)$$

โดยที่ ... R คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงจุดเลี้ยวเบนที่สนใจ

d_{hkl} คือ ค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม (hkl)

λ คือ ความยาวคลื่นอิเล็กตรอน

และ L คือ ความยาวกล้อง (Camera Length)

3. นำระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่ได้จาก สมการ 2.6 เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงจาก Joint Committee Powder Diffraction Standard (JCPDS) ของตำแหน่งระนาบ (h,k,l) ที่กำหนดในรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนและตรวจสอบระนาบกับสมการ 2.7 และสมการ 2.8 ตามลำดับ

$$R_1 + R_2 = R_3 \quad (2.7)$$

$$-R_1 + R_2 = R_4 \quad (2.8)$$

4. วัดมุมระหว่างระนาบ (h_1, k_1, l_1) กับ (h_2, k_2, l_2) (ในรูปที่ 2.8) จากที่กำหนดในรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณมุมระหว่างระนาบ ตามสมการ 2.9

$$\cos \theta = \left[\frac{[(h_1 \ h_2) + (k_1 \ k_2) + (l_1 \ l_2)]}{\sqrt{[(h_1)^2 + (k_1)^2 + (l_1)^2] \cdot [(h_2)^2 + (k_2)^2 + (l_2)^2]}} \right] \quad (2.9)$$

5. ตรวจสอบมุมระหว่างระนาบของการวัดจริงกับการคำนวณ โดยต้องมีค่าความคลาดเคลื่อน คือ ± 2 องศา

6. กำหนดแกนโซน [u,v,w] ของระนาบระหว่าง (h_1, k_1, l_1) กับ (h_2, k_2, l_2) จากสมการนี้

$$u = k_1 l_2 - k_2 l_1$$

$$v = l_1 h_2 - l_2 h_1$$

$$w = h_1 k_2 - h_2 k_1$$

7. คำนวณค่าพารามิเตอร์ของโครงผลึก (Lattice Parameter) [16] และคำนวณพารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของระบบโครงผลึกแบบ ลูกบาศก์ จากสมการ 2.3 และสมการ 2.6 ดังนี้

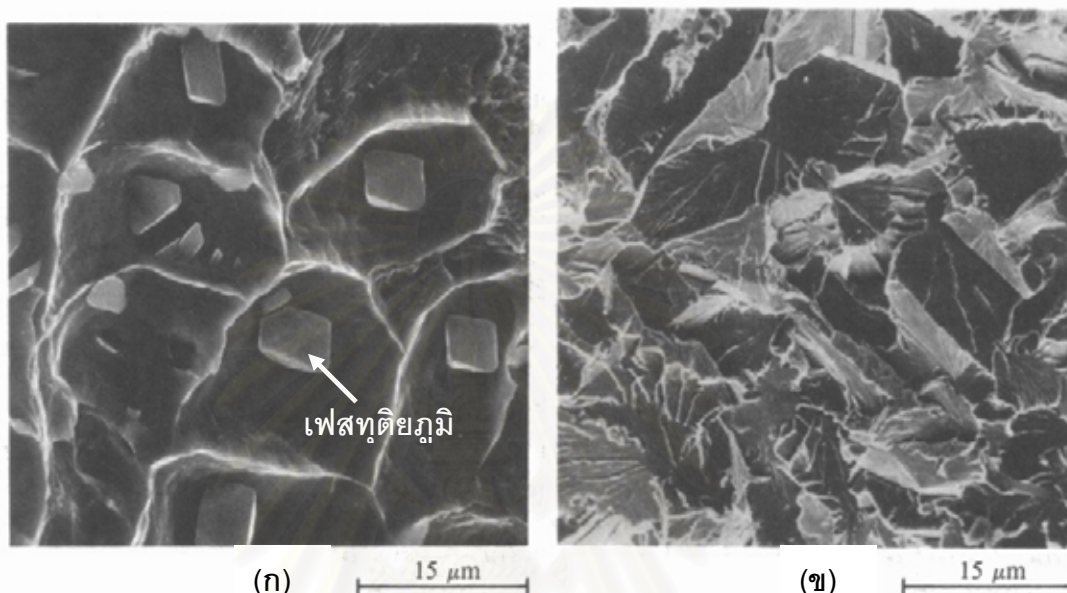
$$a = (h^2 + k^2 + l^2) \lambda L / R \quad (2.10)$$

โดยที่ ... **a** คือ ค่าพารามิเตอร์ของโครงผลึก
R คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงจุดเลี้ยวเบนที่สนใจ
 λ คือ ความยาวคลื่นอิเล็กตรอน
L คือ ความยาวกล้อง (Camera Length)
 และ **(h,k,l)** คือ ตำแหน่งอะตอมในรูปแบบการเลี้ยวเบน

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะการแตกหัก (Fracture Analysis)

วิธีแฟร็กโตกราฟี (Fractography) [18,19,20,21,22,23,24,25] เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของรอยแตกหักของวัสดุ ทำให้สามารถแบ่งพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุได้ การแตกหักของวัสดุเหนียวจะพบลักษณะของหลุมบ่อ (Dimple) และส่วนวัสดุเปราะจะพบลักษณะแตกหักแบบรอยแตก (Cleavage) [21] ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก)-(ข) ตามลำดับ

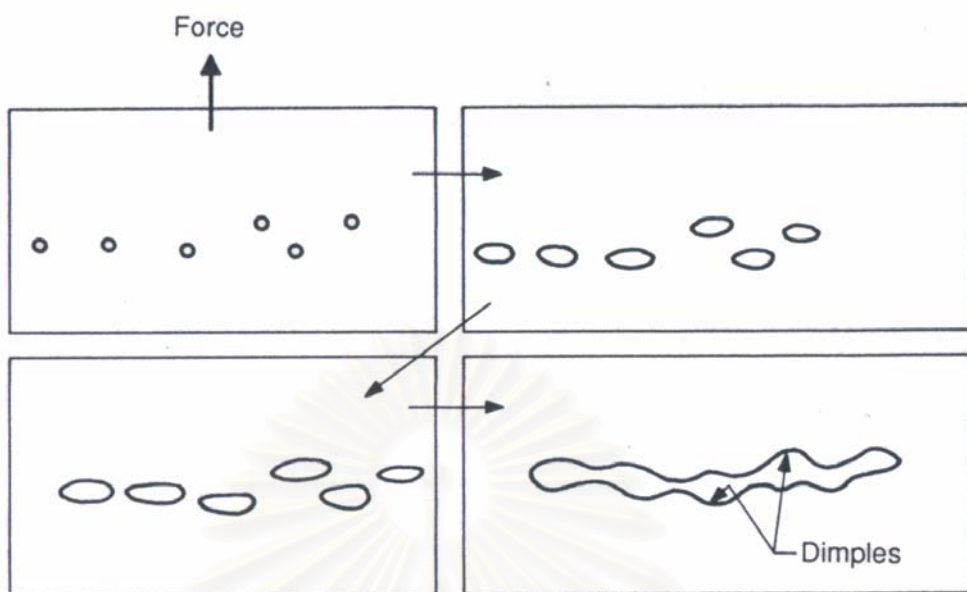


รูปที่ 2.9 ผิวของรอยแตกหักของเหล็กกล้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [21]

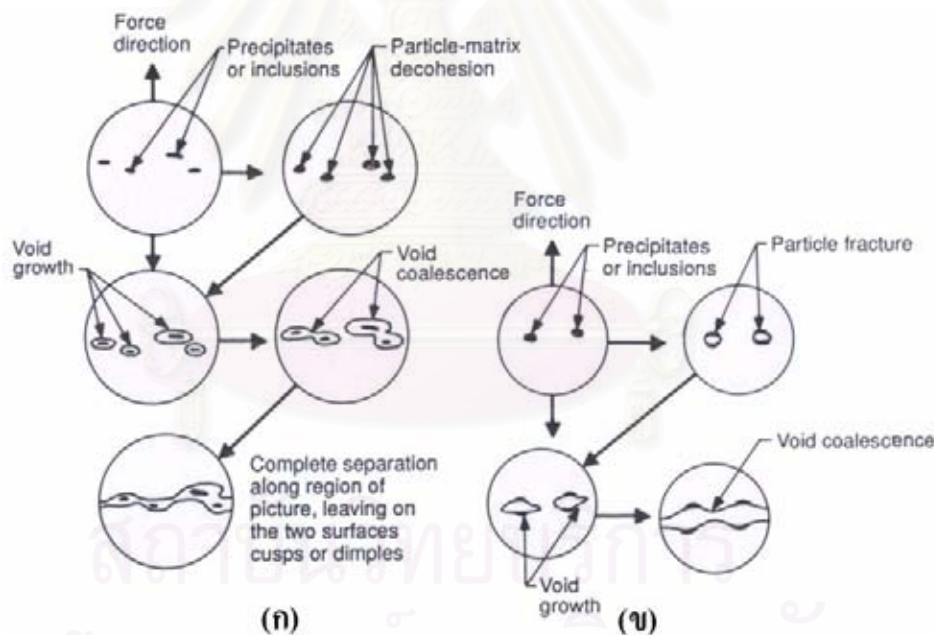
(ก) การแตกหักของวัสดุเหนียวเกิดเป็นหลุมบ่อของเนื้อพื้น (Dimple)

(ข) การแตกหักของวัสดุเปราะเกิดเป็นรอยแตก (Cleavage)

รูปที่ 2.10 แสดงกลไกการแตกหักแบบหลุมบ่อด้วยการโตของช่องว่างขนาดเล็ก ซึ่งแสดงพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุเหนียว [22] หลังการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของวัสดุทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของระนาบเลื่อนไถล (Plane Slip) ของช่องว่างขนาดเล็ก (Microvoids) เมื่ออัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้ช่องว่างขนาดเล็กขยายตัวและเชื่อมต่อกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้ทำให้บริเวณพื้นผิวของเนื้อพื้นเกิดการยกตัวขึ้นและเกิดการแตกหักลักษณะแบบหลุมบ่อ สำหรับรูปที่ 2.11 แสดงกลไกการแตกหักจากความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อพื้นกับเฟสทุติยภูมิ (Second-phase particle) [22] เมื่ออนุภาคทุติยภูมิมีการจัดเรียงตัวไม่สัมพันธ์กันกับเนื้อพื้น (Incoherent) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) ดังนั้น หลังการแตกหักจึงพบอนุภาคทุติยภูมิที่บริเวณก้นของหลุมบ่อ (รูปที่ 2.9 (ก)) ส่วนวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวสัมพันธ์กันระหว่างเนื้อพื้นกับเฟสทุติยภูมิ (Coherent) ทำให้มีการยึดติดแน่นของบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นกับเฟสทุติยภูมิ การแตกหักจึงเริ่มจากรอยแตกขนาดเล็กของเฟสทุติยภูมิแล้วขยายตัวเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ ดังนั้น บริเวณหลุมบ่อจะปรากฏการแตกหักของอนุภาคทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.10 กลไกการแตกหักแบบหลุมบ่อด้วยการโตของช่องว่าง (Void Coalescence) [22]



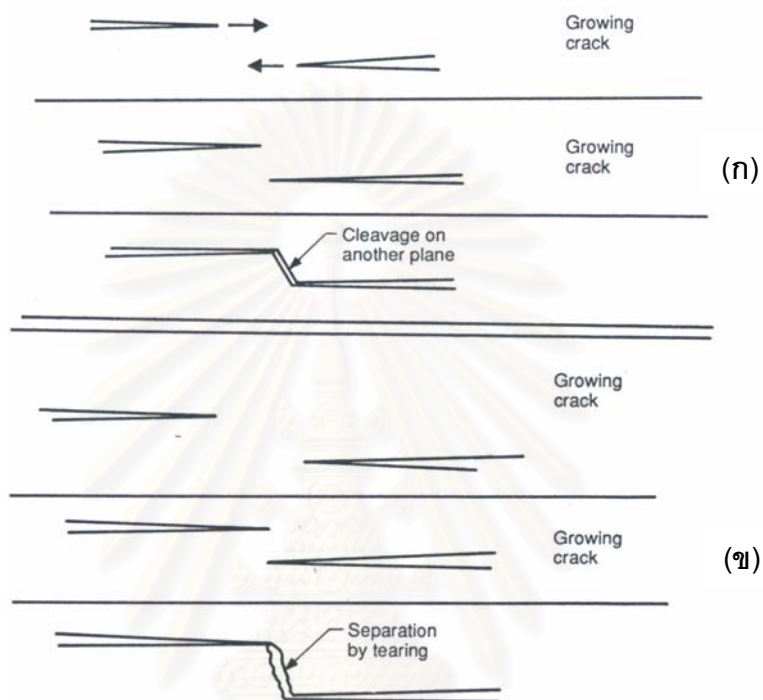
รูปที่ 2.11 กลไกการแตกหักจากความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อพื้นกับเฟสทุติยภูมิ [22]

(ก) เนื้อพื้นกับเฟสทุติยภูมิมีการจัดเรียงตัวไม่สัมพันธ์กัน

(ข) เนื้อพื้นกับเฟสทุติยภูมิมีการจัดเรียงตัวสัมพันธ์กัน

รูปที่ 2.12 (ก) แสดงการแตกหักแบบรอยแตก (Cleavage) ซึ่งการแตกหักในลักษณะนี้เกิดขึ้นกับวัสดุที่แสดงพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ ทำให้การแตกเกิดขึ้นตามระนาบผลึกในทิศทางเดียวกัน โดยที่การขยายตัวของรอยแตกจะกระจายตัวตามแนวระนาบผลึกไปรวมตัวกับรอยแตก

ในระนาบผลึกที่ต่างกัน ดังนั้นการโตของรอยแตก (Growing Crack) เริ่มขยายตัวตามทิศทางแบบขนานกับระนาบรอยแตก ส่วนรูปที่ 2.12 (ข) แสดงการเลื่อนไหลของวัสดุในลักษณะแบบโค้งงอหรือไม่เป็นเส้นตรง จึงเกิดแตกหักแบบฉีกขาด (Tearing)

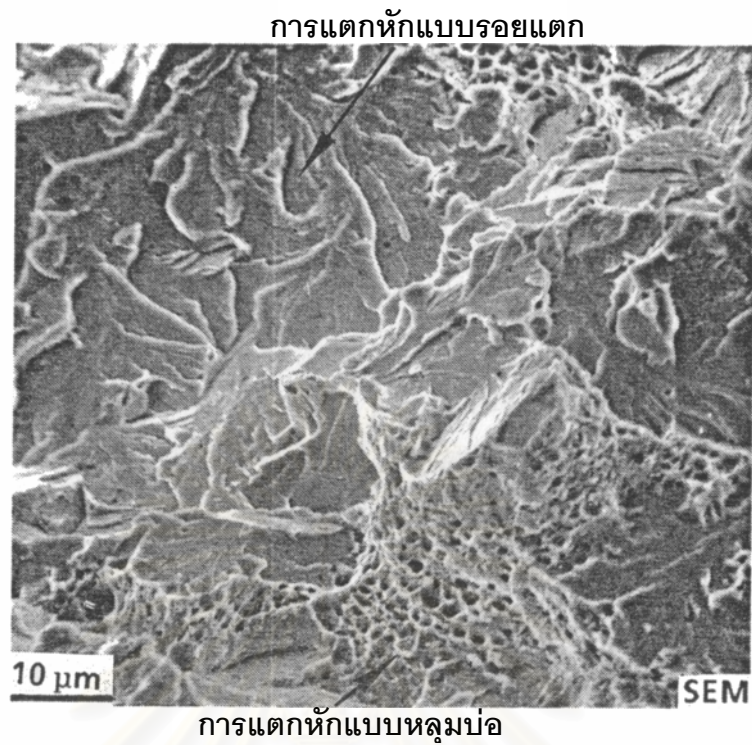


รูปที่ 2.12 กลไกการแตกหักจากการแยกตัวระหว่างระนาบรอยแตก (Cleavage Planes) [22]

(ก) ลักษณะการแตกหักด้วยรอยแตก (Cleavage)

(ข) ลักษณะการแตกหักแบบฉีกขาด (Tearing)

การวิเคราะห์ลักษณะการแตกหักของโลหะส่วนใหญ่ พบว่ามีพฤติกรรมการแตกหักแบบกลไกผสมระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ (Mixed-mechanism Fracture Mechanism) หรือเรียกว่ากลไกการแตกหักแบบ Quasi-cleavage [21,22,25] จึงทำให้ปรากฏการแตกแบบหลุมบ่อและแบบรอยแตกผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะแตกหักด้วยกลไกการแตกหักแบบผสม (Mixed-mechanical Fracture) [25]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สวรินทร์ รัตนมหาสกุลและคณะ [26] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการ Johnson–Mehl และ Avrami ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบความร้อนที่ 1000 °C เวลา 24 ชั่วโมง พบว่าปฏิกิริยาในช่วงแรกของการตกตะกอนมีค่า n เท่ากับ 1.2 และมีค่าพลังงานกระตุ้น 213.4 กิโลจูลต่อกรัมโมล และช่วงที่สองมีค่า n เท่ากับ 0.4 และมีค่าพลังงานกระตุ้น 51.7 กิโลจูลต่อกรัมโมล ดังนั้นจากความหมายของค่า n ตามสมการ Johnson–Mehl และ Avrami ของผลการทดลองที่กล่าวมานี้สามารถอธิบายได้ตามตารางที่ 2.3 คือ กลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในช่วงแรกเป็น Growth of particles of appreciable initial volume และในช่วงที่สองเป็น Thickening of long cylinders or needle หรือ Thickening of very large plates

ตารางที่ 2.3 ความหมายของค่า n ตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami [27]

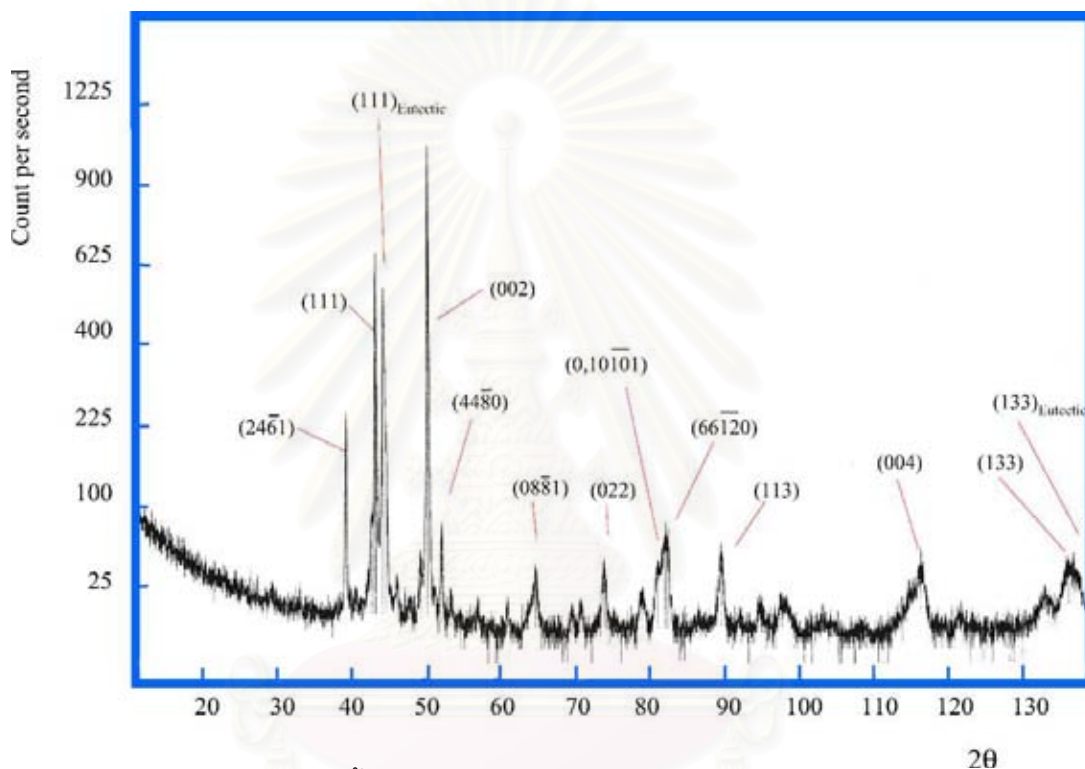
(a) Polymorphous changes, discontinuous precipitation, eutectoidal reactions, interface controlled growth, etc.

Conditions	N
Increasing nucleation rate	>4
Constant nucleation rate	4
Decreasing nucleation rate	3-4
Zero nucleation rate (saturation of point sites)	3
Grain-edge nucleation after saturation	2
Grain-boundary nucleation after saturation	1

(b) Diffusion-controlled growth (early stages of reaction only)

Conditions	N
All shapes growing from small dimensions, increasing nucleation rate	>2½
All shapes growing from small dimensions, constant nucleation rate	2½
All shapes growing from small dimensions, decreasing nucleation rate	1½-2½
All shapes growing from small dimensions, Zero nucleation rate	1½
Growth of particles of appreciable initial volume	1-1½
Needles and plates of finite long dimensions, small in comparison with their separations.	1
Thickening of long cylinders (needles), e.g. after complete edge impingement	
Thickening of very large plates, e.g. after complete edge impingement	½
Segregation to dislocations (very early stage only)	~ 2/3

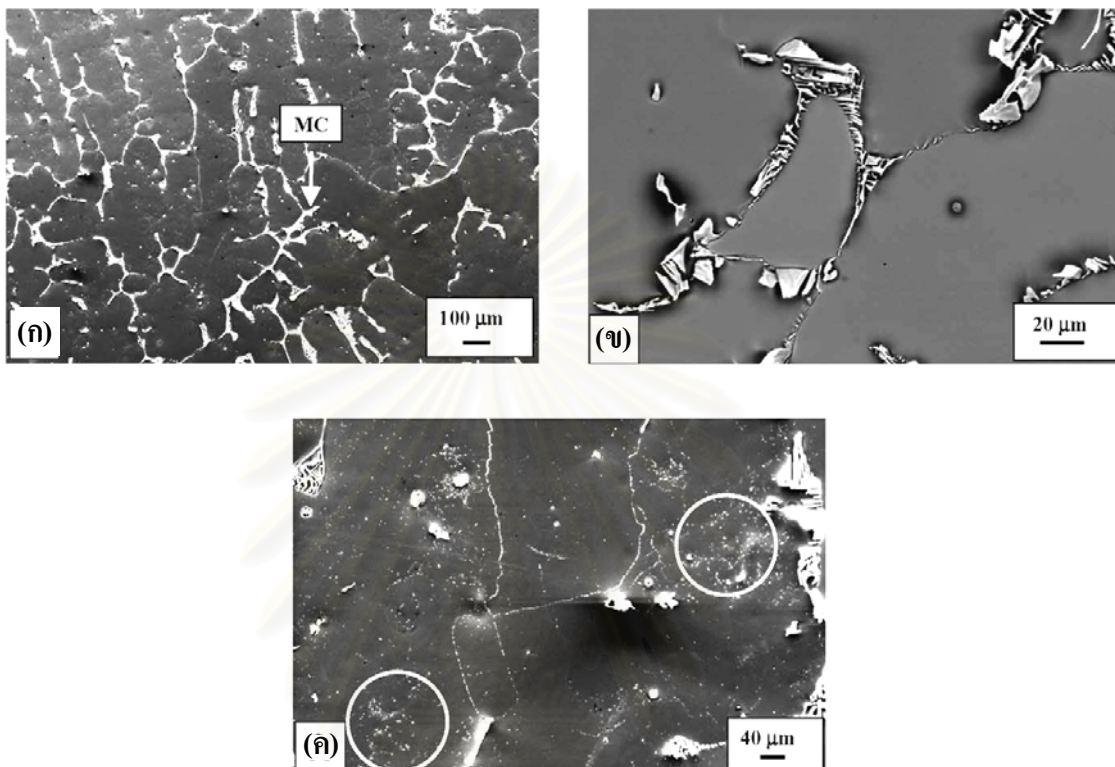
S.D.Carpenter, D.Carpenter และ J.T.H.Pearce [28] ศึกษาโครงสร้างผลึกของเหล็กหล่อขาว 26.6% โครเมียมในสภาพหล่อ ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาชนิดของเฟสต่างๆ และคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter) จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อขาว 26.6%โครเมียม ดังแสดงในรูปที่ 2.14 สามารถยืนยันว่าเนื้อพื้นเป็นออสเทนไนต์ (γ) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึก a เท่ากับ 0.361 nm และคาร์ไบด์ชนิด $(Fe,Cr)_7C_3$ มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึก a และ c เท่ากับ 1.394 และ 0.452 nm ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเหล็กหล่อขาว 26.6%โครเมียม [28]

Q.Z.Chen, C.W. Thomas และ D.M.Knowles [29] ศึกษาตะกอนของสารประกอบคาร์ไบด์ของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ พบว่าตะกอนยูเทกติกคาร์ไบด์ชนิด MC มีรูปร่างเป็นแผ่นบางขนาดใหญ่ตกตะกอนระหว่างเดนไดรต์ และพบอนุภาคขนาดเล็กของคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ หรือ M_7C_3 ตกตะกอนในเนื้อพื้นและตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก)-(ค) ตามลำดับ รูปที่ 2.16 แสดงผลการตรวจสอบส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS พบว่าบริเวณคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง (Nb-rich) เป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และคาร์ไบด์ที่มีปริมาณโครเมียมสูง (Cr-rich) อาจเป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ หรือ M_7C_3 ก็ได้ โดยสามารถยืนยันชนิดของตะกอนคาร์ไบด์ในโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb เปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของสารประกอบคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.17

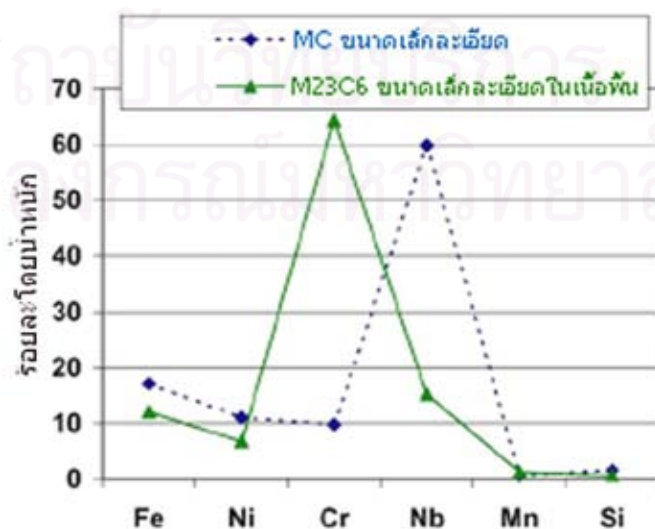
รูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูงเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และคาร์ไบด์ที่มีปริมาณโครเมียมสูงเป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ตามลำดับ



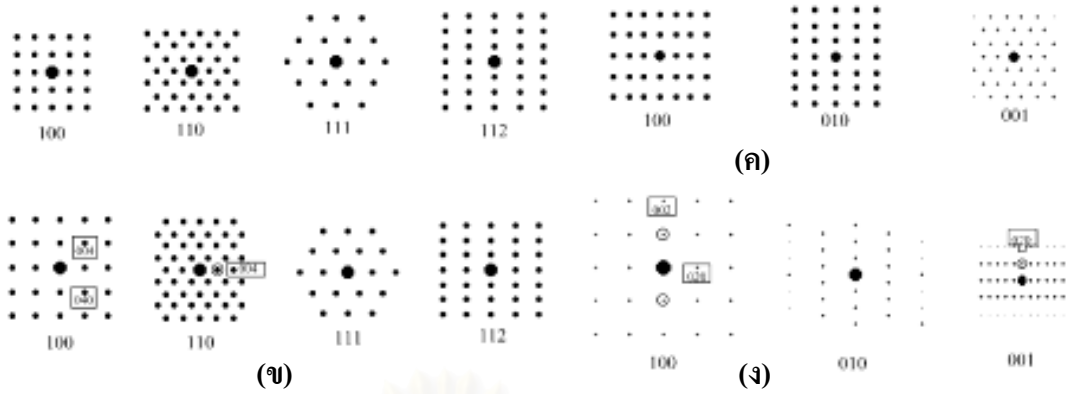
รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ [29]

(ก) - (ข) คาร์ไบด์ชนิด MC

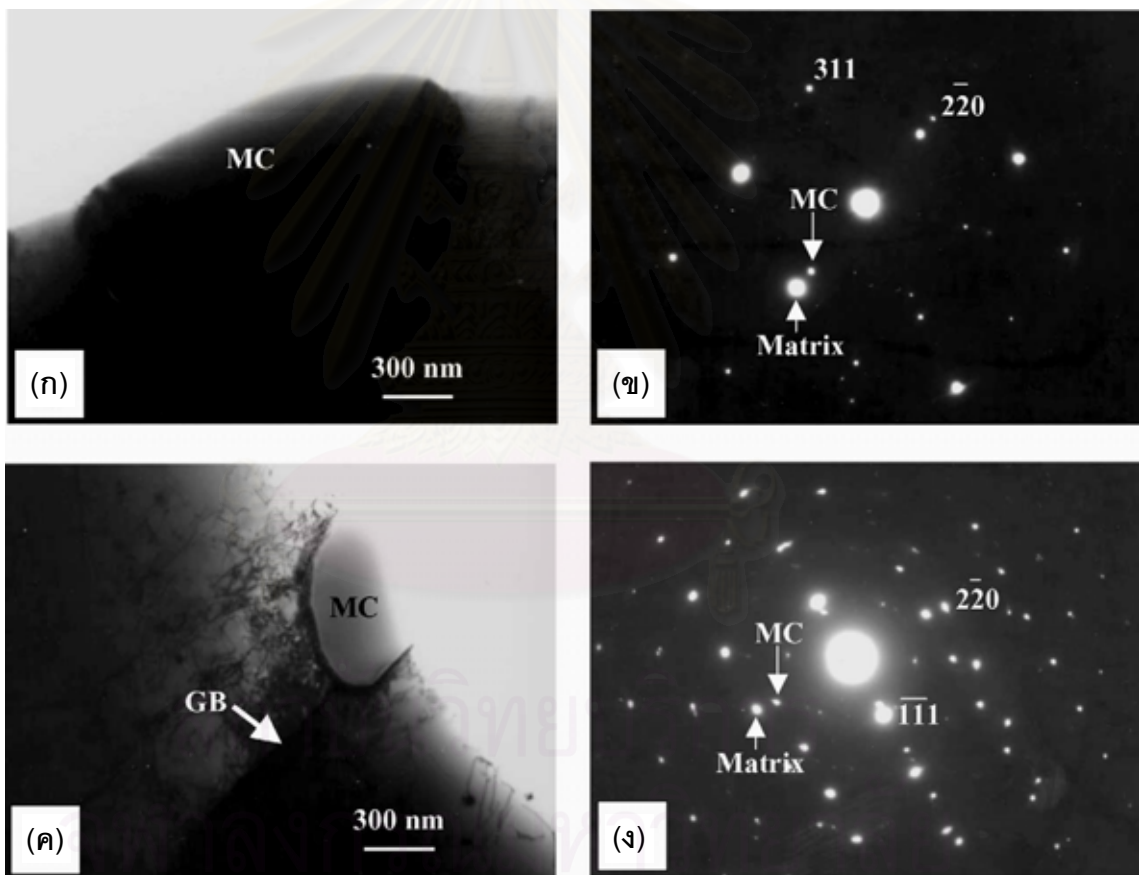
(ค) กลุ่มอนุภาคขนาดเล็กของคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ และ M_7C_3



รูปที่ 2.16 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของคาร์ไบด์ชนิด MC และ $M_{23}C_6$ [29]

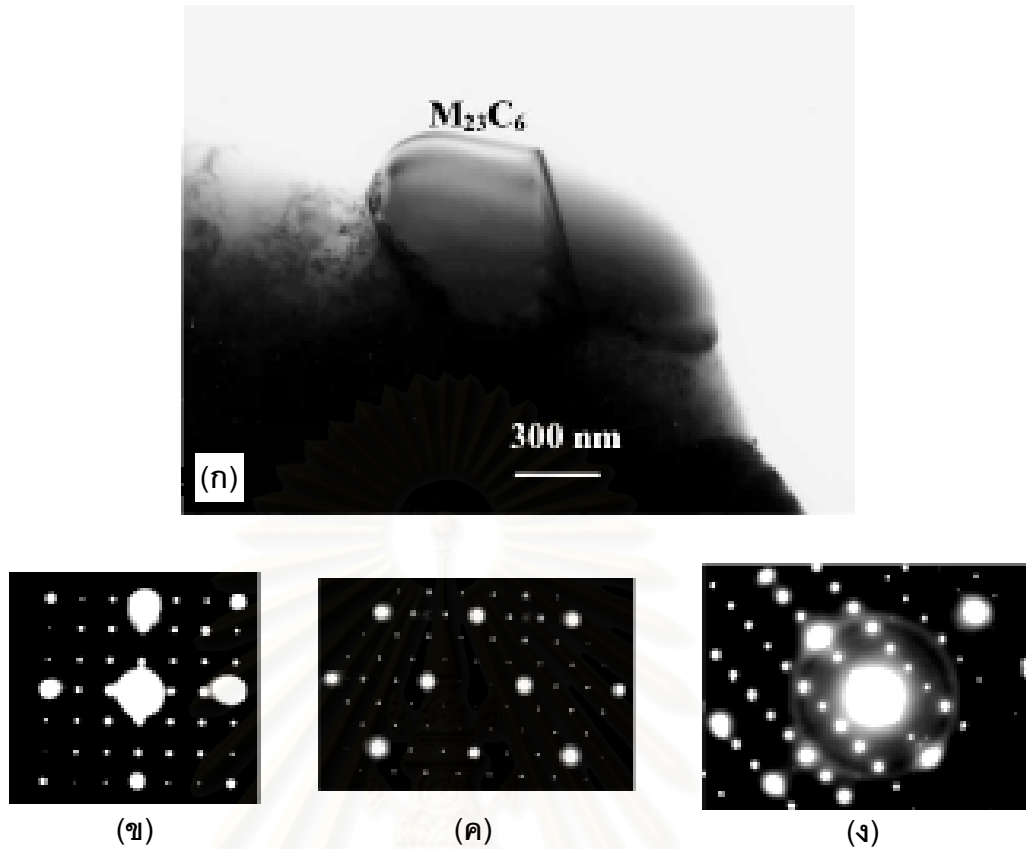


รูปที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของสารประกอบคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ (ก) $M_{23}C_6$ (ข) M_6C (ค) M_7C_3 (ง) M_3C_2 [29]



รูปที่ 2.18 คาร์ไบด์ชนิด MC ตกตะกอนในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ [29]

- (ก) โครงสร้างจุลภาคของตะกอนคาร์ไบด์ชนิด MC ในเนื้อพื้นออสเทนไนต์
- (ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ $[114]_{matrix} // [114]_{MC}$
- (ค) โครงสร้างจุลภาคของตะกอนคาร์ไบด์ชนิด MC ตามขอบเกรน
- (ง) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ $[112]_{matrix} // [112]_{MC}$



รูปที่ 2.19 คาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ตกตะกอนในเนื้อพื้นอสเทนไนต์ของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ในสภาพหล่อ [29]

(ก) โครงสร้างจุลภาคของคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ที่ตกตะกอนในเนื้อพื้น

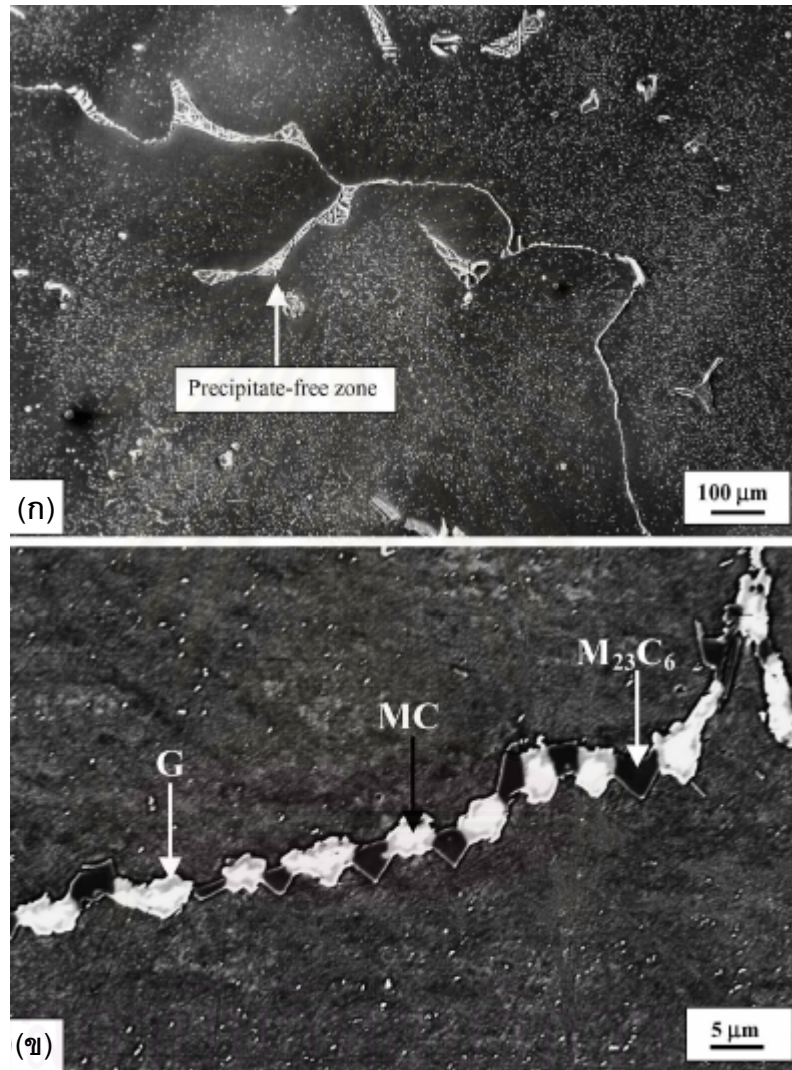
(ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ $[001]_{M_{23}C_6} // [001]_{matrix}$

(ค) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนส่วนที่ $[011]_{M_{23}C_6} // [011]_{matrix}$

(ง) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ $[112]_{M_{23}C_6} // [112]_{matrix}$

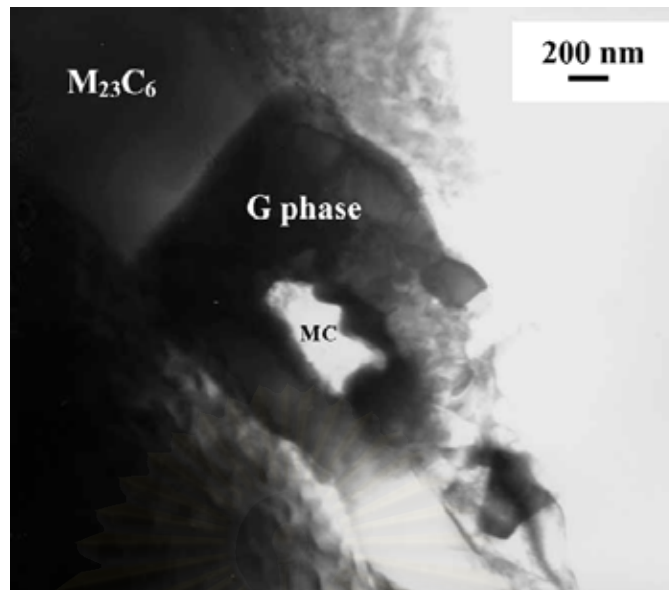
โลหะผสม 20Cr32Ni1Nb หลังใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 760°C เวลา 4 ปี พบว่าเกิดตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดใหญ่จากการรวมตัวของคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดเล็ก และบริเวณที่ไม่มีเกิดการตกตะกอน (Precipitate-Free Zone, PFZ) มีลักษณะเป็นแนวยาวและต่อเนื่องกันตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ก) การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของเฟสที่ตกตะกอนตามขอบเกรน ในรูปที่ 2.20 (ข) พบว่า บริเวณที่มีปริมาณของไนโอเบียมสูงเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และบริเวณที่มีปริมาณโครเมียมสูงเป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ เช่นเดียวกับในสภาพหล่อ และพบตะกอนเฟส G (สารประกอบซิลิไซด์) บริเวณใกล้เคียงกับตะกอนคาร์ไบด์ชนิด MC (รูปที่ 2.20(ข)) เฟส G นี้ประกอบด้วยธาตุซิลิคอน ธาตุโครเมียม ธาตุ निकิลและธาตุไนโอเบียม

การศึกษาสัณฐานและโครงสร้างผลึกของตะกอนต่าง ๆ ตามขอบเกรนในโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb หลังใช้งานที่ 760 °ซ เวลา 4 ปี [29] ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22 ทำให้สามารถยืนยันว่าเป็นตะกอน MC, $M_{23}C_6$ และเฟส G

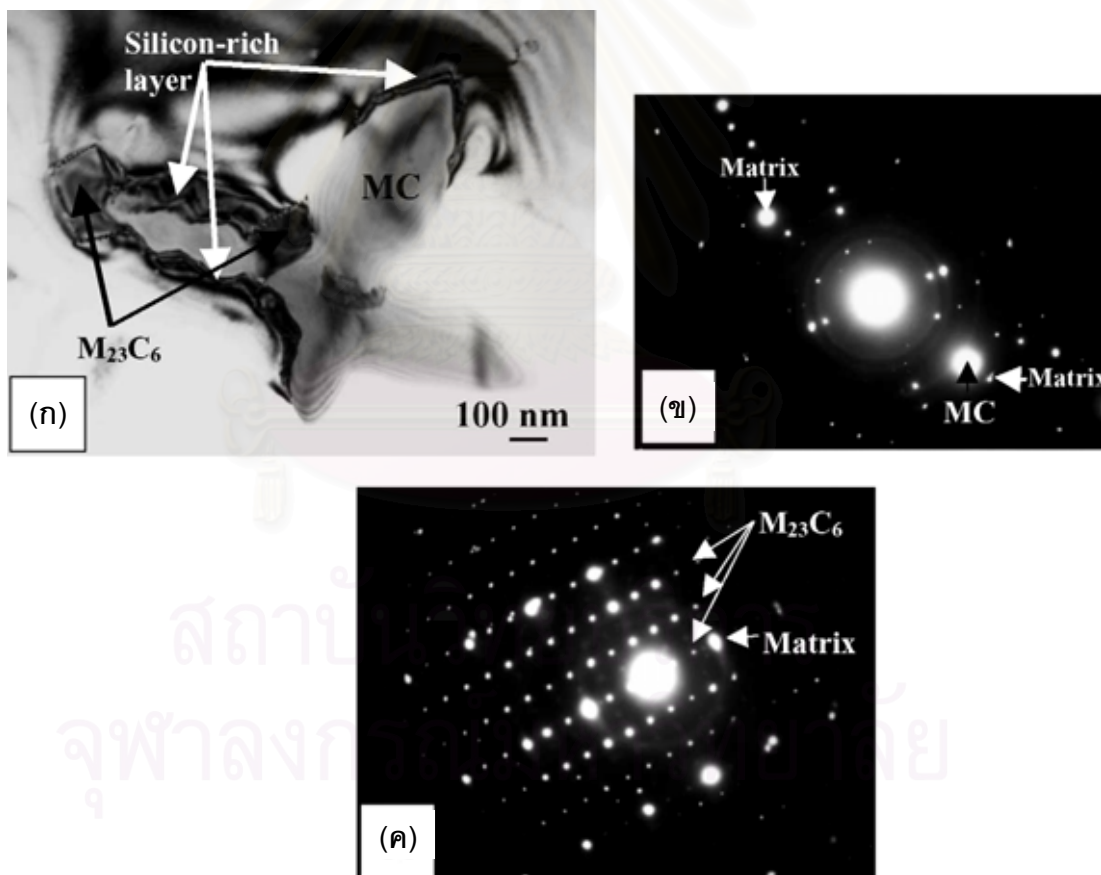


รูปที่ 2.20 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb ที่อุณหภูมิ 760 °ซ เวลา 4 ปี [29]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.21 โครงสร้างจุลภาคของ MC, $M_{23}C_6$ และเฟส G ที่ตกตะกอนตามขอบเกรน [29]



รูปที่ 2.22 โลหะผสม $20Cr32Ni1Nb$ หลังใช้งานที่อุณหภูมิ $760^{\circ}C$ เวลา 4 ปี [29]

(ก) โครงสร้างจุลภาคของ MC, Si-rich Layer และอนุภาค $M_{23}C_6$

(ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ $[112]_{MC} // [112]_{matrix}$

(ค) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ $[112]_{M_{23}C_6} // [112]_{matrix}$

จากผลการศึกษาของ Q.Z.Chen, C.W. Thomas และ D.M.Knowles [29] สามารถพิสูจน์และยืนยันชนิดของตะกอนในโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb พบว่า ตัวอย่างในสภาพหล่อมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ชนิด MC และ $M_{23}C_6$ ตามขอบเกรน และตัวอย่างหลังใช้งานที่ 760 °ซ เวลา 4 ปี พบการตกตะกอนตามขอบเกรนของคาร์ไบด์ชนิด MC, $M_{23}C_6$ และเฟส G ซึ่งได้วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเฟส G พบว่ามีสูตรโมเลกุล $Nb_6(Ni,Fe)_{16}(Si,Cr)_7$ จากการทดลองนี้สอดคล้องกันกับผลการทดลองของ Bogdan Piekarski [30] ถึงผลของธาตุไนโอเบียมและธาตุไทเทเนียมต่อการตกตะกอนของเฟส G ในเหล็กกล้าหล่อ निकิล-โครเมียมหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 300 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของเฟส G หรือสารประกอบ $(Nb,Ti)_6Ni_{16}Si_7$ ในบริเวณตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดไนโอเบียมคาร์ไบด์

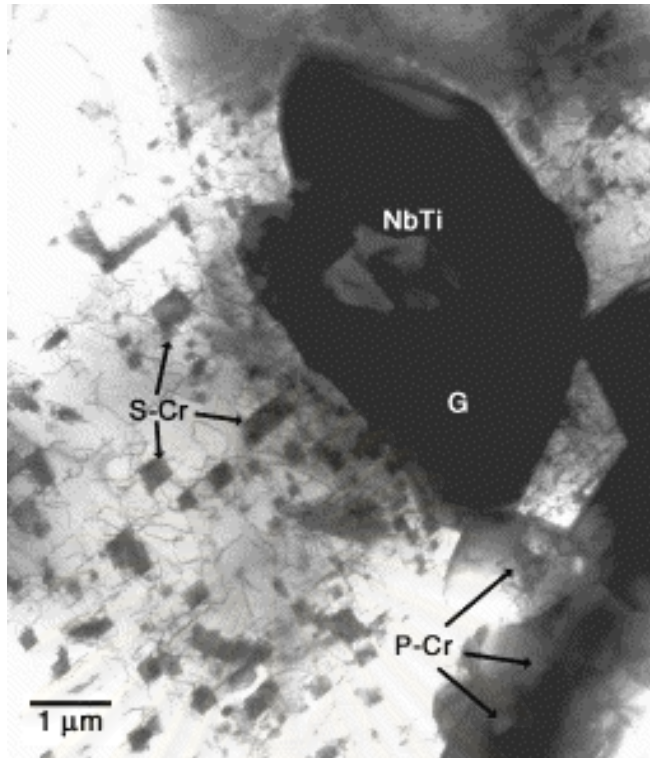
Luiz Henrique de Almeida [31] ศึกษาพื้นฐานและโครงสร้างผลึกของตะกอนต่างๆ ในโลหะผสมชนิด HP-Nb กับ HP-NbTi หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง โดยที่โลหะผสมที่ได้กล่าวมานี้มีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสม HP-Nb และ HP-NbTi (ร้อยละโดยน้ำหนัก) [31]

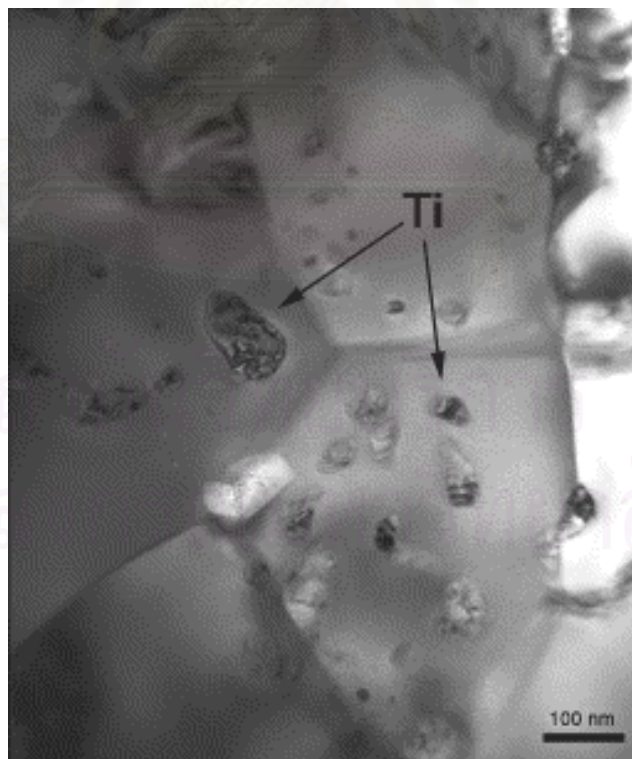
โลหะผสม	C	Cr	Ni	Si	Mn	Nb	Ti	Fe
HP-Nb	0.43	24.8	34.1	1.67	1.0	1.34	-	Balance
HP-NbTi	0.41	25.5	34.9	1.91	1.0	0.78	0.04	Balance

โลหะผสมชนิด HP-NbTi หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง พบโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิจำนวนมาก ส่วนบริเวณเฟส G เกิดจากการเปลี่ยนรูปของไนโอเบียมคาร์ไบด์และไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์ รูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24 แสดงตะกอนของเฟส G ในโลหะผสมชนิด HP-NbTi พบว่าไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กตกตะกอนบริเวณตรงกลางของเฟส G แสดงว่าไทเทเนียมไม่สามารถรวมตัวเกิดเป็นเฟส G

โลหะผสม HP-Nb หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง พบไนโอเบียมคาร์ไบด์มีการเปลี่ยนรูปไปเป็นเฟส G แสดงว่าไนโอเบียมคาร์ไบด์มีความเสถียรต่ำจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสหลังใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ส่วนโลหะผสม HP-NbTi มีไนโอเบียมคาร์ไบด์บางส่วนที่เปลี่ยนรูปไปเป็นเฟส G โดยที่บริเวณด้านนอกเป็นเฟส G ล้อมรอบไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์



รูปที่ 2.23 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม HP-NbTi หลังการอบความร้อน ประกอบด้วยเฟสของโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิ (P-Cr), โครเมียมคาร์ไบด์ทุติยภูมิ (S-Cr) และเฟส G [31]



รูปที่ 2.24 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเฟส G และมีไทเทเนียมคาร์ไบด์ตกตะกอนภายในเฟส G [31]

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยตามที่ได้กล่าวมานี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อศึกษาสัดส่วน ส่วนผสมทางเคมี และโครงสร้างผลึกของตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังการอบความร้อน และสามารถใช้เป็นหลักฐานยืนยันผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami ของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ [1,26] ซึ่งพบว่ากลไกช่วงแรกเป็นแบบ Growth of particles of appreciable initial volume ทำให้การโตของอนุภาคเป็นลักษณะสามมิติ และกลไกในช่วงที่สองเป็นแบบ Thickening of long cylindres or needle หรือ Thinkening of very large plates ทำให้เพิ่มความหนาของอนุภาคแบบ รูปเข็ม-ทรงกระบอกหรือแบบแผ่นบาง การศึกษาสัดส่วน ส่วนผสมทางเคมี และโครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน สามารถใช้ตรวจสอบและสนับสนุนกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ตามค่า n จากสมการ Johnson-Mehl และ Avrami



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. วัตถุดิบและสารเคมี

- ท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%
- สารละลายกลีเซอรอล [32,33] ประกอบด้วย กรดเกลือ (HCl) 40%+ กรดไนตริก (HNO₃) 45%+กลีเซอรอล (C₃H₈O₃) 15% (โดยปริมาตร)
- สารละลายกรดเปอร์คลอริก (HClO₄) 10% + เอทานอล 90% [34] (โดยปริมาตร)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมืออบชุบความร้อน

- เตอบไฟฟ้า
- เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน

3.2.2 เครื่องมือเตรียมผิวชิ้นงาน

- กระดาษทรายเบอร์ 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
- ผ้าสักหลาดสำหรับขัดมัน
- ผงขัดเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอน
- เครื่องขัดผิวชิ้นงาน
- วัสดุสำหรับทำเรือนชนิดเย็น (Cold Mounting)

3.2.3 เครื่องมือในการทดลองและการวิเคราะห์

- กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)
- เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
- เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค (Emission Spectroscopy)
- เครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)
- เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Testing Machine)
- เครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์ส (Microvickers Hardness Testing Machine)
- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Testing Machine)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 อบตัวอย่างด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1000 °ซ เวลา 3, 24, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ

3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี

3.3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

- นำชิ้นงานในสภาพหล่อและตัวอย่างจากข้อ 3.3.1 ชัดผิวหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

- นำชิ้นงานชัดผิวมันด้วยผงขัดเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

- กัดผิวด้วยสารละลายเกลือเชอเรเกีย ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

- ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิค

- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS

3.3.2.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

- นำชิ้นงานหลังการอบความร้อนที่ 1000 °C เวลา 24 และ 1000 ชั่วโมง มาชัดผิวหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 โดยชัดชิ้นงานทั้งสองด้านและให้มีความหนาต่ำกว่า 100 ไมโครเมตรหรือ 0.1 มิลลิเมตร

- ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.

- กัดบางด้วยไฟฟ้า (Electropolishing) ในสารละลาย Perchloric acid (HClO_4) 10%+ Ethanol 90% (โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ -15 °ซ และความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 โวลท์ [34] แล้วทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเอทานอล

- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS

3.3.3 การวิเคราะห์สัดส่วนโครงสร้างจุลภาค

- นำชิ้นงานในสภาพหล่อและหลังอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ เวลา 24 และ 1000 ชั่วโมง และ 1000 °ซ เวลา 24 และ 1000 ชั่วโมง มาชัดผิวหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

- นำชิ้นงานหลังการชัดหยาบมาชัดผิวมันด้วยผงขัดเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอนตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

- กัดผิวด้วยสารละลายกลีเซอรอลล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล
- ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก
- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและวิเคราะห์สัดส่วนโดยพื้นที่ของสารประกอบคาร์ไบด์และเนื้อพื้นด้วย *Image-Pro Plus version 5.0* และวิเคราะห์สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume Fraction) ของคาร์ไบด์ทุกิติภูมิโดยวิธี Manual Point Counting ตามมาตรฐาน ASTM E 562 [35] (ภาคผนวก ข)

3.3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

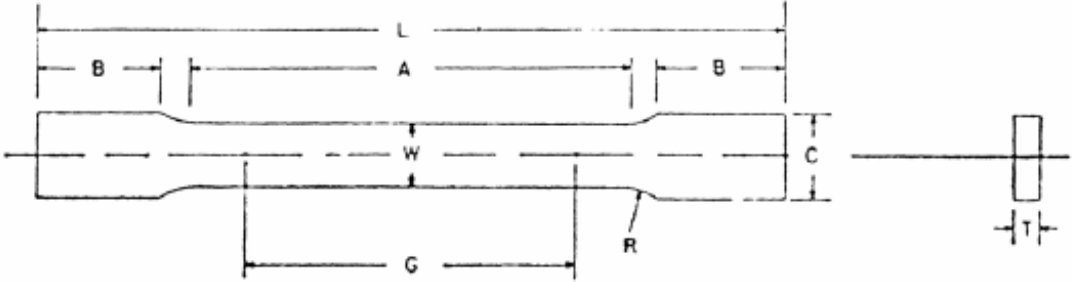
- นำชิ้นงานในสภาพหล่อขัดผิวหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล
- นำชิ้นงานหลังการขัดหยาบมาขัดผิวมันด้วยผงขัดเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอนตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล
- ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก
- ตรวจสอบโครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบน (X-ray Diffractometer)

3.3.5 การทดสอบความแข็ง

- เตรียมชิ้นงานตามข้อ 3.3.2.1
- ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ใช้น้ำหนักกด 500 กรัม ใช้เวลากด 15 วินาที และทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบ Rockwell สเกล B (HRB)
- ทดสอบความแข็งบริเวณเนื้อพื้นและบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ใช้น้ำหนักกด 25 กรัม ใช้เวลากด 15 วินาที

3.3.6 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

- เตรียมชิ้นงานตามข้อ 3.3.1 มาขึ้นรูปโดยให้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M [36] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 มาทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (ภาคผนวก ข)
- วิเคราะห์ผิวรอยแตกของตัวอย่างหลังการทดสอบแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



Nominal Width	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate Type 40 mm	Sheet Type 12.5 mm	6 mm
G-Gage Length	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W-Width	40.0 ± 0.2	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T-Thickness	thickness of material	thickness of material	thickness of material
R-Radius	25	12.5	6
L-Overall Length	450	200	100
A-Length of Reduced Section, min	225	57	32
B- Length of Grip Section, min	75	50	30
C-Width of Grip Section, approximate	50	20	10

รูปที่ 3.1 ขนาดของตัวอย่างการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E 8M [36]



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานตัวอย่างการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

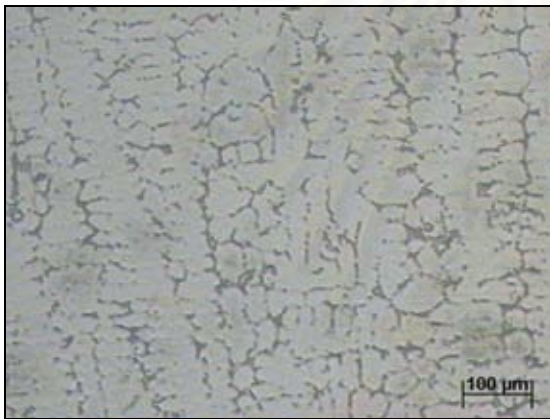
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ

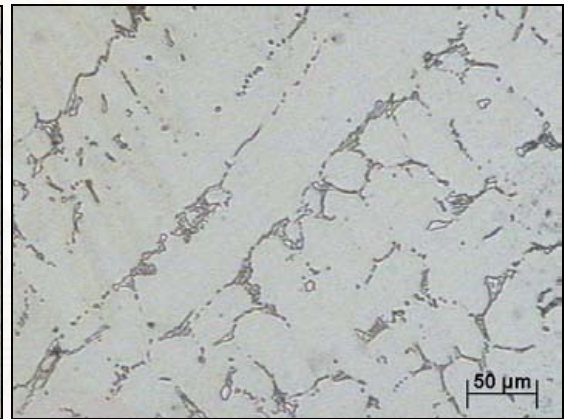
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission spectroscopy (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Cu	%Co	%Al	%Nb	%Ti	%V	%Pb	%W	%Fe
0.30	1.43	1.40	26.6	30.8	0.05	0.17	0.003	0.68	0.054	0.049	0.005	0.25	38.2

4.2 โครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%



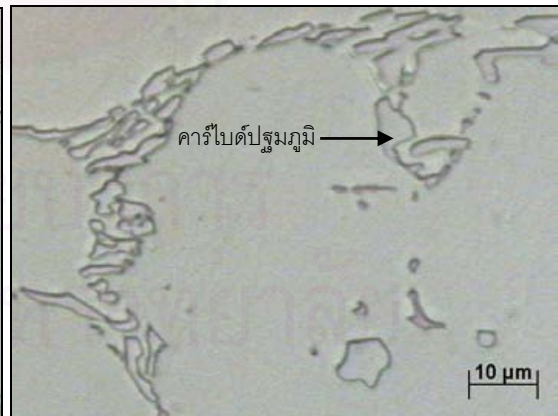
(ก) กำลังขยาย 50 เท่า



(ข) กำลังขยาย 100 เท่า

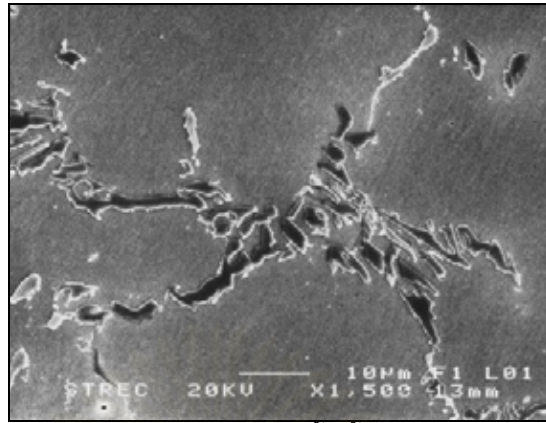


(ค) กำลังขยาย 200 เท่า

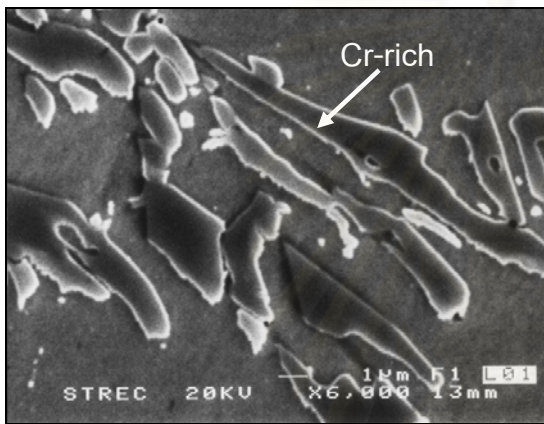


(ง) กำลังขยาย 500 เท่า

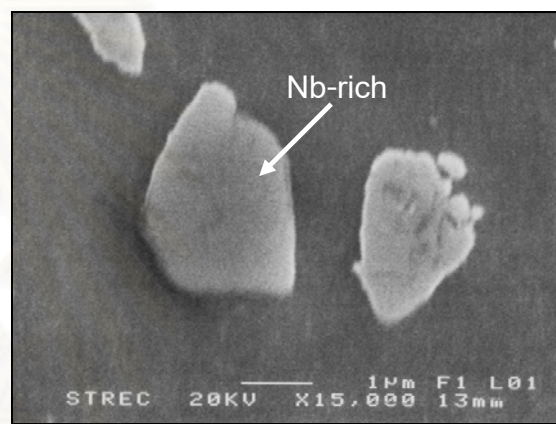
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ จากกล้องจุลทรรศน์แสง



(ก) คาร์ไบด์ปฐมภูมิในเนื้อพื้นออกสเตนไนต์



(ข) คาร์ไบด์ปฐมภูมิที่มีปริมาณโครเมียมสูง



(ค) คาร์ไบด์ปฐมภูมิที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8 % โครเมียม 26.6% ผลิตจากกรรมวิธีการหล่อจึงทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นแบบเดนไดรต์ ซึ่งในขณะที่น้ำโลหะเย็นตัวจากอุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลวเกิดการแยกชั้นของยูเทกติกคาร์ไบด์ (Eutectic carbide) ตกตะกอนบริเวณระหว่างเดนไดรต์ (Interdendrite) การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของท่อโลหะผสมชนิดนี้ ด้วยเครื่อง Emission spectroscopy ตามที่แสดงตารางที่ 4.1 พบว่า ประกอบด้วยธาตุเหล็ก 38.2% ธาตุ นิกเกิล 30.8% และธาตุโครเมียม 26.6% โดยที่โลหะผสมชนิดนี้มีปริมาณธาตุนิกเกิลสูง ทำให้โครงสร้างเนื้อพื้นเป็นออกสเตนไนต์และมีการตกตะกอนของสารประกอบคาร์ไบด์ ดังนั้นโลหะผสมชนิดนี้จึงสามารถทนการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีเนื่องจากเฟสออกสเตนไนต์ที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง

รูปที่ 4.1(ก)-(ง) และรูปที่ 4.2(ก)-(ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8 % โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ตามลำดับ พบเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิตาม บริเวณระหว่างเดนไดรท์ การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (ภาคผนวก ก) จาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดในตารางที่ 4.2 พบว่าเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ (รูปที่ 4.2 (ก)) ประกอบด้วยธาตุเหล็ก 37.95% ธาตุ นิกเกิล 34.66% และธาตุโครเมียม 23.74% และบริเวณ ตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิทั้งสองชนิดนี้ประกอบด้วยคาร์ไบด์ที่มีปริมาณโครเมียมสูง (Cr-rich) และ คาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง (Nb-rich) (รูปที่ 4.2(ข)-(ค) ตามลำดับ) การวิเคราะห์ส่วนผสม เคมีของเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ และคาร์ไบด์ปฐมภูมิทั้งสองชนิดนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ของ Q.Z.Chen, C.W. Thomas และ D.M.Knowles [29] คือบริเวณเฟสที่มีปริมาณธาตุโครเมียม สูงเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ชนิดโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) อย่างไรก็ตาม โครเมียมคาร์ไบด์อาจ เป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$, M_6C , M_7C_3 หรือ M_3C_2 ก็ได้ โดยส่วนใหญ่พบว่าเป็นตะกอนโครเมียม คาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ หรือ M_7C_3 จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของคาร์ไบด์ปฐมภูมิที่มีปริมาณ โครเมียมสูง (Cr-rich) พบว่ามีธาตุเหล็กและธาตุนิกเกิลเป็นส่วนประกอบอีกด้วย อาจเป็นเพราะ โครเมียมคาร์ไบด์เกิดการรวมตัวกับธาตุต่าง ๆ ได้เช่น ธาตุเหล็ก ธาตุนิกเกิล ธาตุทังสเตน หรือ ธาตุโมลิบดีนัม โดยมีสูตรโมเลกุลเป็น $(Cr,Fe,Ni,Mo,W)_{23}C_6$ [5,11] ดังนั้นอาจคาดว่าตะกอน คาร์ไบด์ปฐมภูมิที่มีปริมาณโครเมียมสูง (Cr-rich) เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ ส่วนบริเวณ คาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง (Nb-rich) เป็นไนโอเบียมคาร์ไบด์ชนิด MC

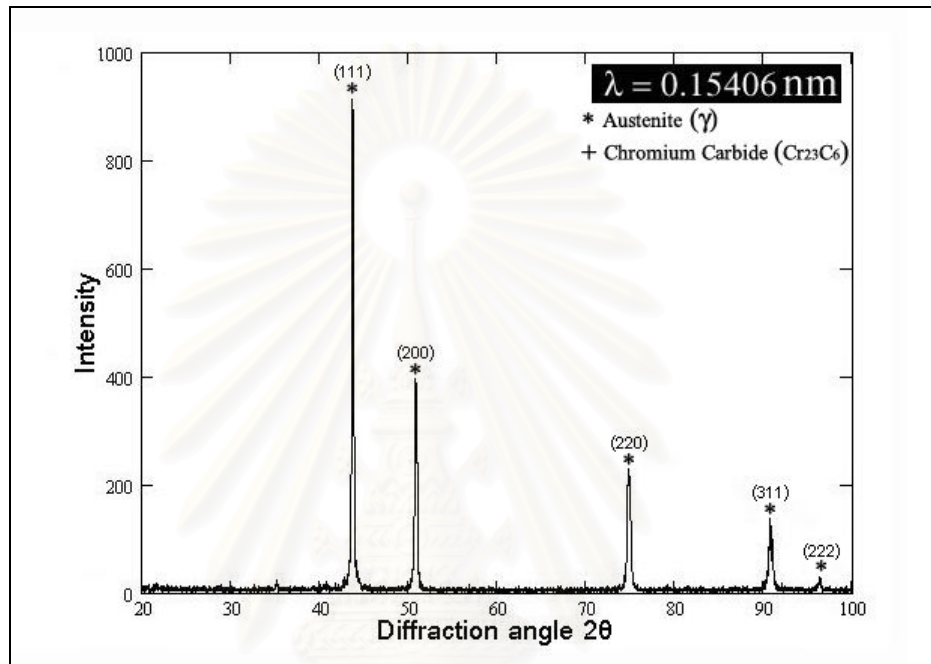
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

ในสภาพหล่อ ด้วยเทคนิค EDS จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

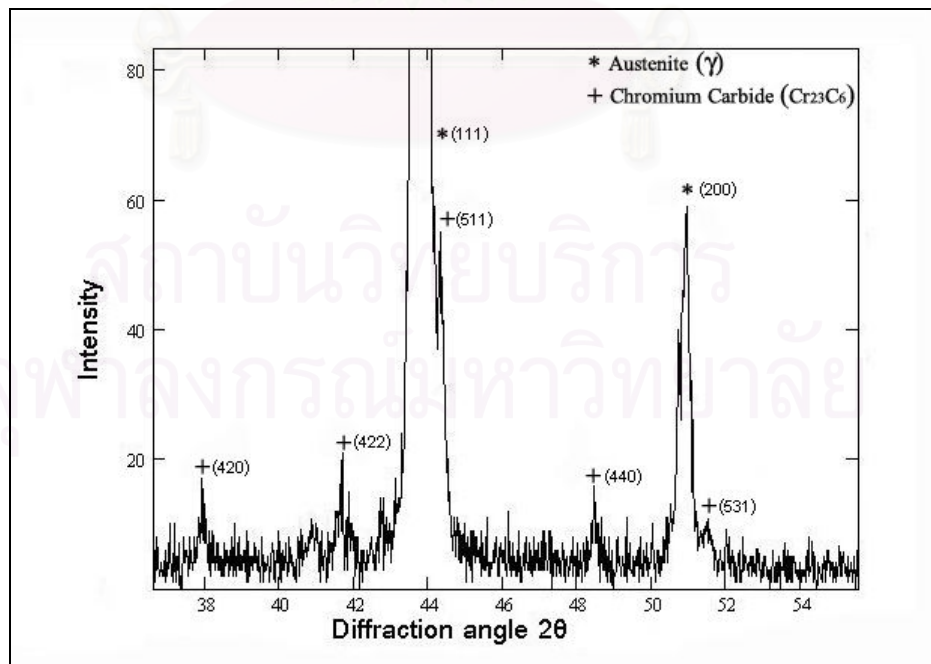
เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	37.95	34.66	23.74	1.98	1.67	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดโครเมียมสูง	18.18	8.89	72.24	0.69	-	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดไนโอเบียมสูง	18.22	16.15	16.01	0.99	0.95	45.59	2.09

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์ระบบโครงสร้างผลึกและคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก)-(ข)



(ก) มุมระหว่าง 20 – 100 องศา



(ข) มุมระหว่าง 37 – 55 องศา

รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปแบบที่ 4.3(ก) แสดงตำแหน่งของยอดกราฟตามข้อมูลอ้างอิงของเฟสออสเทนไนต์จาก Joint Committee Powder Diffraction Standard (JCPDS) ในหมายเลข 31-0619 (ภาคผนวก ข) ดังนี้

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 43.725$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.0686 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 43.473$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.0800 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟสออสเทนไนต์แสดงตำแหน่งระนาบ (1 1 1)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 50.905$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.7924 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 50.674$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.8000 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟสออสเทนไนต์แสดงตำแหน่งระนาบ (2 0 0)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 74.990$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.2655 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 74.679$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.2700 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟสออสเทนไนต์แสดงตำแหน่งระนาบ (2 2 0)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 90.855$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.0813 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 90.676$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.0830 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟสออสเทนไนต์แสดงตำแหน่งระนาบ (3 1 1)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 96.235$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.0346 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 95.944$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.0370 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟสออสเทนไนต์แสดงตำแหน่งระนาบ (2 2 2)

สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปแบบที่ 4.3(ข) แสดงตำแหน่งของยอดกราฟตามข้อมูลอ้างอิงของเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_{23}C_6 จาก JCPDS ในหมายเลข 35-0783 (ภาคผนวก ข) ดังนี้

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 37.890$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.3726 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 37.718$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.3830 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟส Cr_{23}C_6 แสดงตำแหน่งระนาบ (4 2 0)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 41.695$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.1645 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 41.461$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.1761 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟส Cr_{23}C_6 แสดงตำแหน่งระนาบ (4 2 2)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 44.315$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.0397 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 44.097$ และระยะระหว่างระนาบ $= 2.0519 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟส Cr_{23}C_6 แสดงตำแหน่งระนาบ (5 1 1)

ยอดกราฟที่มุม $2\theta = 48.455$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.8771 \text{ \AA}$ มีความสอดคล้องกับยอดกราฟที่มุม $2\theta = 48.266$ และระยะระหว่างระนาบ $= 1.8840 \text{ \AA}$ ตามข้อมูลอ้างอิงของเฟส Cr_{23}C_6 แสดงตำแหน่งระนาบ (4 4 0)

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ (ภาคผนวก ค)

ระยะระหว่างระนาบ (\AA)	มุม (2θ)	(h k l)	$H^2+K^2+L^2$	พารามิเตอร์โครงผลึก (\AA)	เฟส
2.3726	37.890	4 2 0	20	10.6106	Cr_{23}C_6
2.1645	41.695	4 2 2	24	10.6038	Cr_{23}C_6
2.0686	43.725	1 1 1	3	3.5829	ออสเทนไนต์
2.0397	44.315	5 1 1	27	10.5986	Cr_{23}C_6
1.8771	48.455	4 4 0	32	10.6185	Cr_{23}C_6
1.7924	50.905	2 0 0	4	3.5848	ออสเทนไนต์
1.2655	74.990	2 2 0	8	3.5794	ออสเทนไนต์
1.0813	90.855	3 1 1	11	3.5863	ออสเทนไนต์
1.0346	96.235	2 2 2	12	3.5840	ออสเทนไนต์

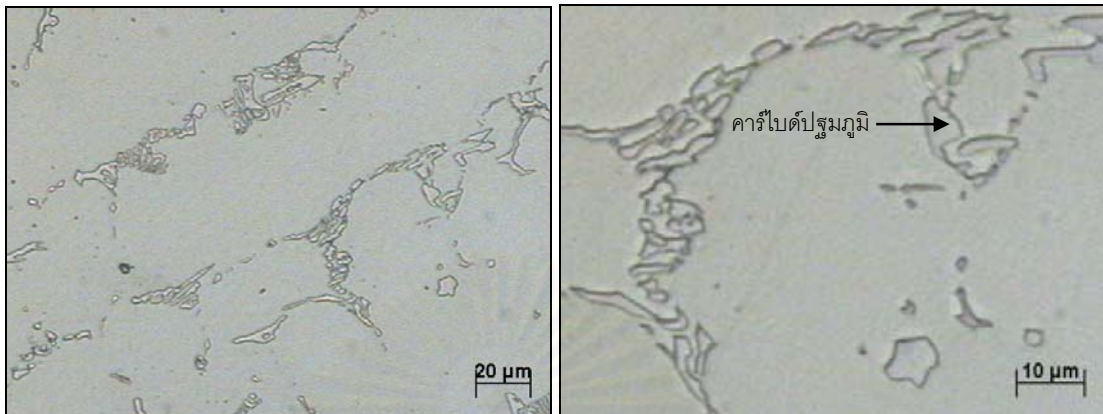
ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลค่าพารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter) ของยอดกราฟที่ปรากฏในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างในสภาพหล่อ (รูปที่ 4.3(ก)-(ข)) พบยอดกราฟของเฟสออสเทนไนต์และเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด M_{23}C_6 โดยในแต่ละยอดกราฟมีตำแหน่งมุมใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากข้อมูลอ้างอิง (Reference Pattern) ของ JCPDS (ภาคผนวก ข) ทำให้สามารถระบุระนาบโครงสร้างผลึก (h,k,l) ของแต่ละยอดกราฟ

และสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของแต่ละยอดกราฟได้ จากความสัมพันธ์ของระบบโครงสร้างผลึกกับระยะระหว่างระนาบในแต่ละยอดกราฟตามตารางที่ 4.3 และการคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกนี้ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ภาคผนวก ค) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกอ้างอิงของเฟสออกสเทนไนต์ และเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_{23}C_6 คือ 3.595 \AA และ 10.5699 \AA ตามลำดับ [37] ซึ่งมีความสอดคล้องและสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างในสภาพหล่อ คือ พบตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดโครเมียมคาร์ไบด์ (รูปที่ 4.1(ก)-(ง)) แต่คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดไนโอเบียมคาร์ไบด์ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากปริมาณตะกอนไนโอเบียมคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนในเนื้อพื้นมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับโครเมียมคาร์ไบด์ จากผลการวิเคราะห์ตามที่กล่าวมานี้สามารถยืนยันว่าท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ มีตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิส่วนใหญ่เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_{23}C_6 และมีเนื้อพื้นเป็นออกสเทนไนต์



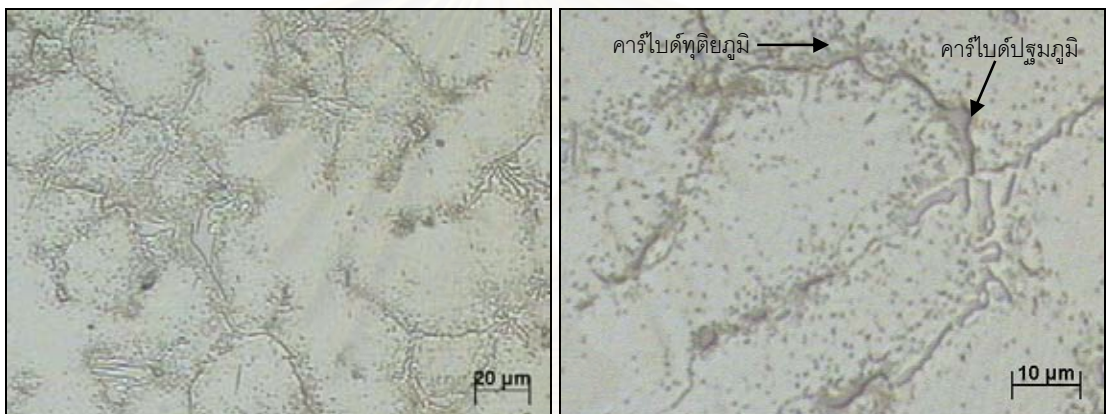
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 โครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ



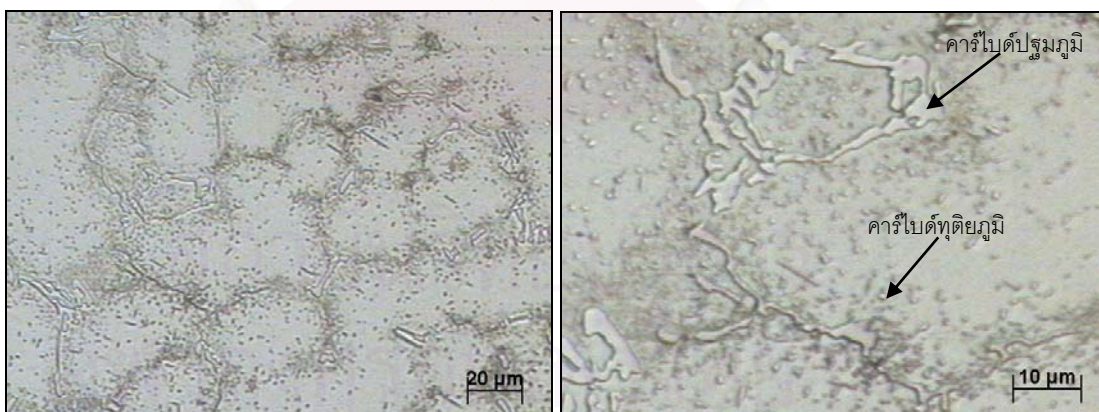
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า

(ข) กำลังขยาย 500 เท่า



(ค) กำลังขยาย 200 เท่า

(ง) กำลังขยาย 500 เท่า



(จ) กำลังขยาย 200 เท่า

(ฉ) กำลังขยาย 500 เท่า

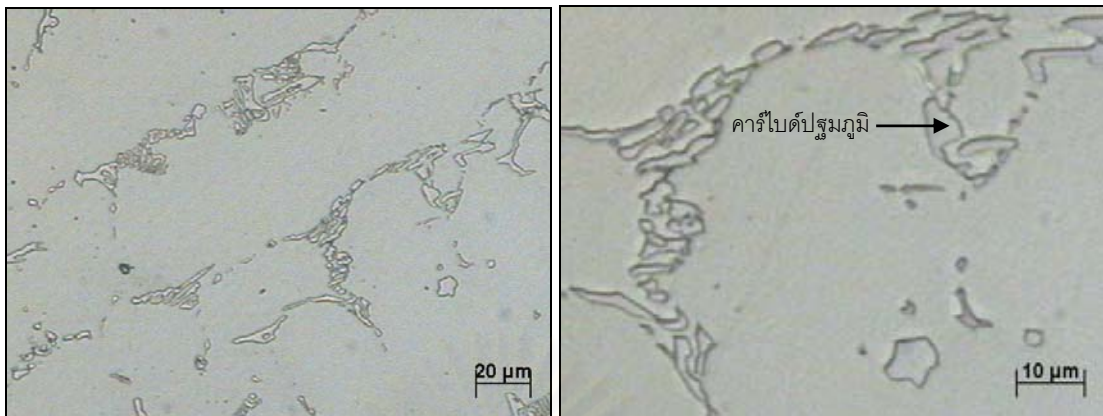
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

ในสภาพหล่อและหลังอบที่ 900 °ซ จากกล้องจุลทรรศน์แสง

(ก) - (ข) ในสภาพหล่อ

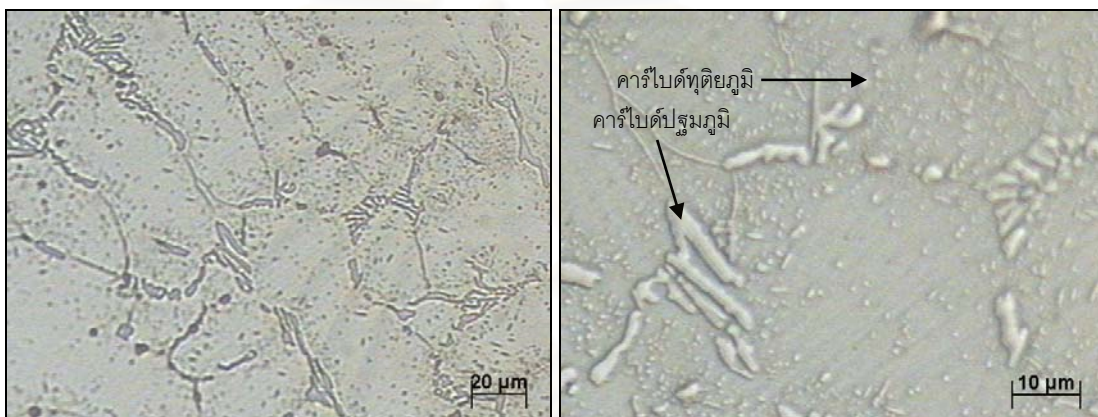
(ค) - (ง) หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง

(จ) - (ฉ) หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



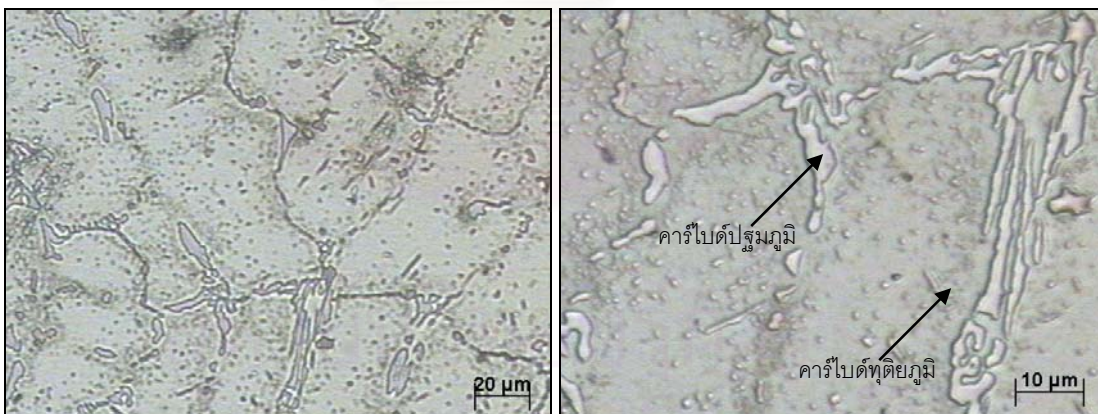
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า

(ข) กำลังขยาย 500 เท่า



(ค) กำลังขยาย 200 เท่า

(ง) กำลังขยาย 500 เท่า



(จ) กำลังขยาย 200 เท่า

(ฉ) กำลังขยาย 500 เท่า

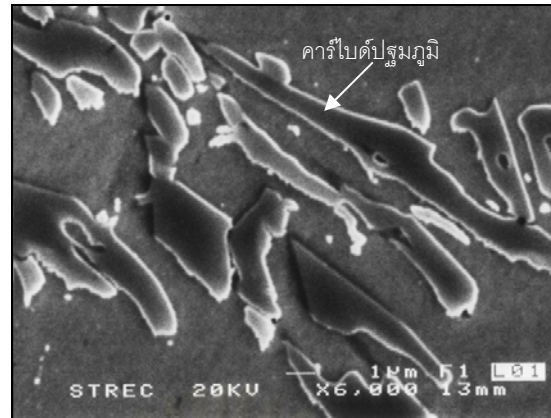
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

ในสภาพหล่อและหลังอบที่ 1000 °ซ จากกล้องจุลทรรศน์แสง

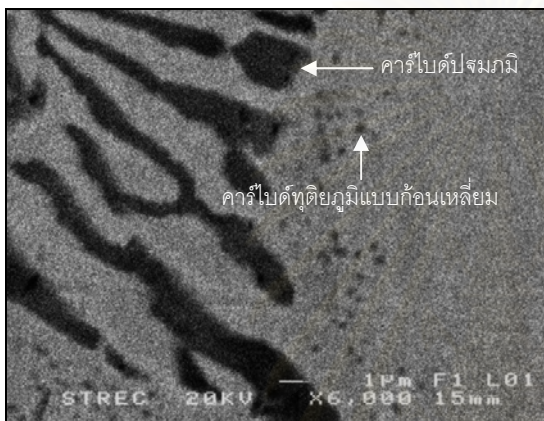
(ก) - (ข) ในสภาพหล่อ

(ค) - (ง) หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง

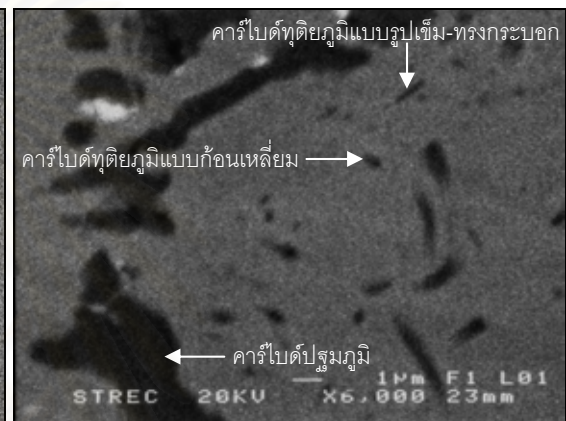
(จ) - (ฉ) หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



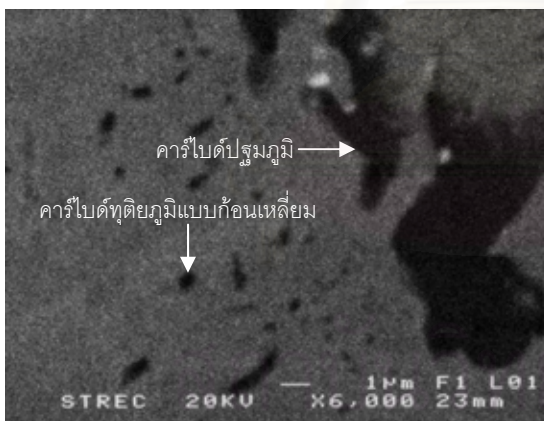
(ก) สภาพหล่อ



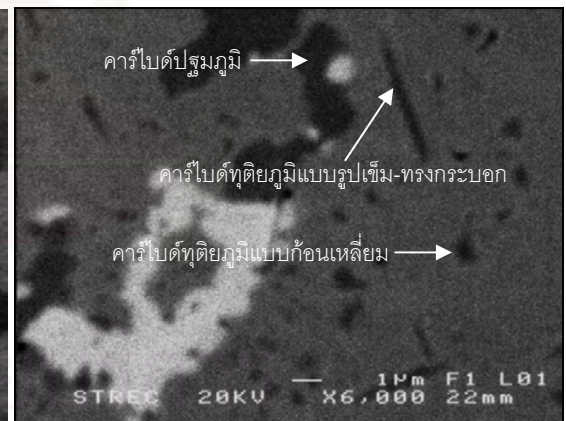
(ข) หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง



(ค) หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



(ง) หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง

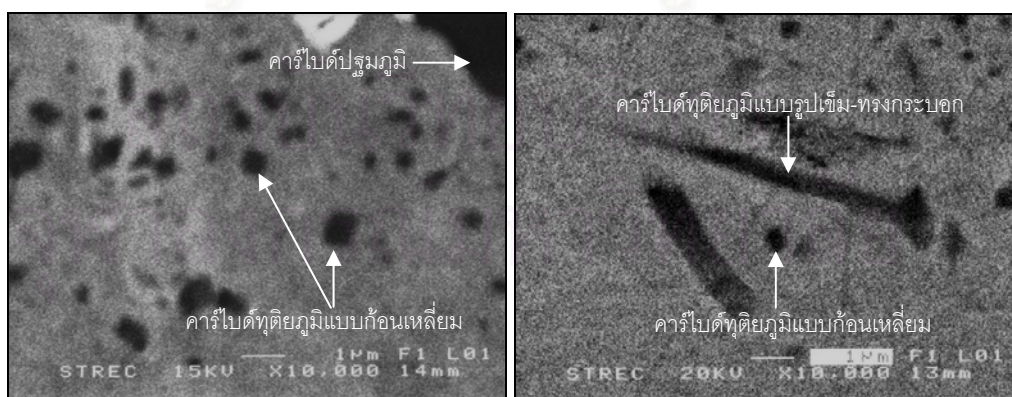


(จ) หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังอบความร้อน จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ 24 ชั่วโมง มีโครงสร้างจุลภาคคล้ายกับตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ข)-(จ) ตามลำดับ คือมีโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นออสเทนไนต์

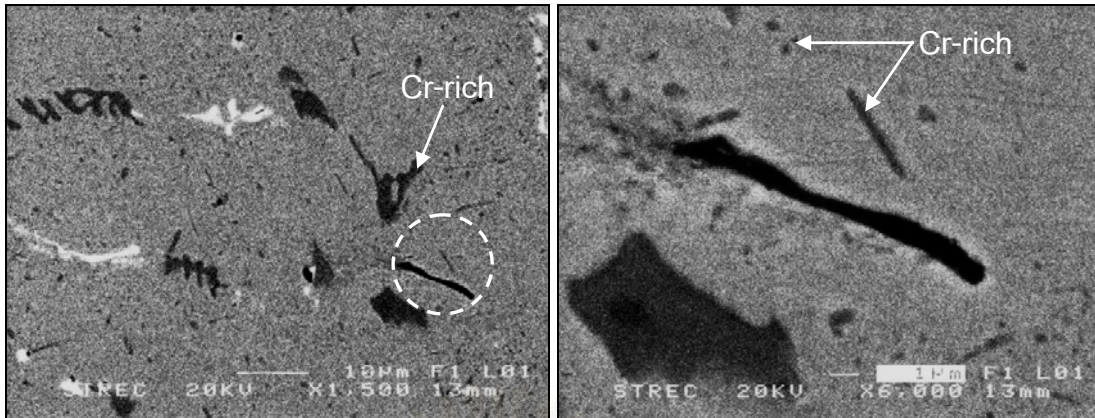
และตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ โดยที่บริเวณเนื้อพื้นมีตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิตัวเล็กตกตะกอนกระจายตัวและมีปริมาณหนาแน่นใกล้เคียงกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างในสภาพหล่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด พบว่าโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นออสเทนไนต์และคาร์ไบด์ปฐมภูมิ แต่ตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 3 ชั่วโมงและตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.6(ข) และรูปที่ 4.6(ง) ตามลำดับ) พบตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิลักษณะก้อนเหลี่ยมกระจายตัวในเนื้อพื้นเช่นเดียวกัน แต่ตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมงและตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ค)-(จ) ตามลำดับ พบตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิสองชนิด คือ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก ซึ่งลักษณะการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามที่ได้กล่าวมานี้ สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ [26] คือ กลไกในช่วงแรก (หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง) มีค่า n อยู่ในช่วง 1.0 - 1.5 เป็น Growth of particles of appreciable initial volume ทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคด้วยปริมาตร (แบบสามมิติ) และกลไกในช่วงที่สอง (หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง) มีค่า n อยู่ในช่วง 0.5 - 1.0 เป็น Thinkening of long cylinders or needle หรือ Thinkening of very large plates เกิดการเพิ่มความหนาของตะกอนแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกหรือแผ่นบาง จากโครงสร้างจุลภาคของตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิและผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิดังที่กล่าวมานี้ จึงสรุปว่าการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิในตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.7(ก)) เกิดตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.7(ข)) เกิดตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก



(ก) ตัวอย่างหลังอบ 3 ชั่วโมง

(ข) ตัวอย่างหลังอบ 24 ชั่วโมง

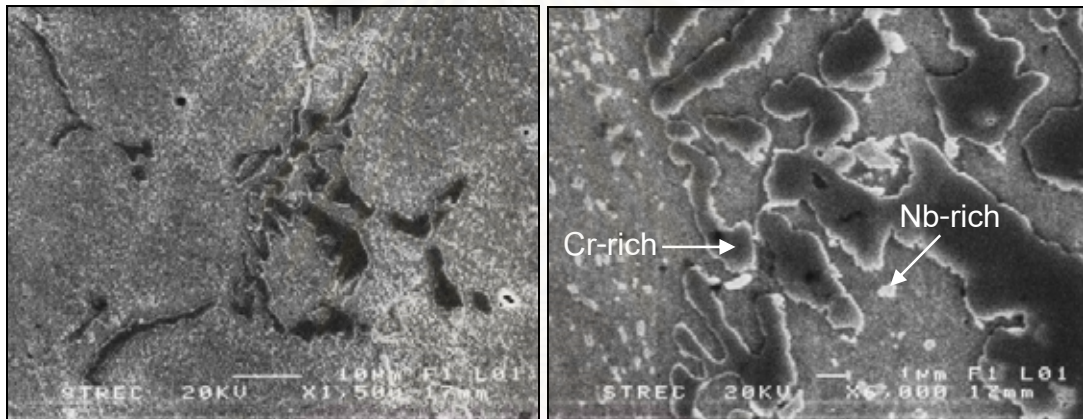
รูปที่ 4.7 ตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด



(ก) กำลังขยาย 1500 เท่า

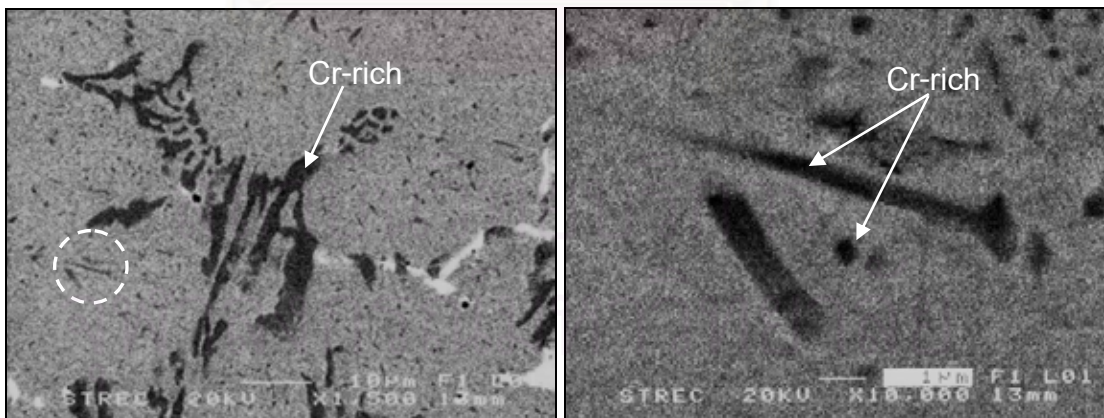
(ข) กำลังขยาย 6000 เท่า

รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่อุณหภูมิ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



(ค) กำลังขยาย 1500 เท่า

(ข) กำลังขยาย 6000 เท่า



(ค) กำลังขยาย 1500 เท่า

(ง) กำลังขยาย 10000 เท่า

รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS

เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	39.05	34.12	22.76	2.27	1.80	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดโครเมียมสูง	18.10	10.31	71.04	0.55	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	14.23	9.82	74.46	1.49	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	17.72	11.59	68.48	1.15	1.05	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดไนโอเบียมสูง	19.05	14.96	13.40	1.43	1.12	47.95	2.10

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS

เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	39.11	32.89	22.89	2.88	2.23	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดโครเมียมสูง	17.62	10.35	71.02	1.00	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	15.61	9.84	72.94	1.60	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	16.88	11.08	69.84	0.84	1.36	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดไนโอเบียมสูง	18.66	13.19	12.95	1.96	1.12	49.55	2.56

รูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ตามลำดับ) พบว่า บริเวณเนื้อพื้น ออสเทนไนต์มีปริมาณธาตุเหล็ก ธาตุ นิกเกิล และธาตุโครเมียม บริเวณตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม และตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกมีปริมาณธาตุโครเมียมสูง (Cr-rich) และบริเวณตะกอนคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง (Nb-rich) สำหรับโครงสร้างจุลภาคและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS ของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.5 (ตามลำดับ) พบว่า บริเวณเนื้อพื้น ออสเทนไนต์มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับ

บริเวณเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ของตัวอย่างสภาพหล่อ และบริเวณเนื้อพื้นออกสเทนไนต์มีตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก ซึ่งตะกอนคาร์ไบด์ตามที่กล่าวนี้เป็นสารประกอบคาร์ไบด์ที่มีปริมาณธาตุโครเมียมสูง (Cr-rich) อย่างไรก็ตามบริเวณตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณธาตุโครเมียมสูงกว่าคาร์ไบด์ปฐมภูมิ อาจเนื่องจากการละลายธาตุโครเมียมออกจากคาร์ไบด์ปฐมภูมิในขณะอบความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนส่วนเกินในเนื้อพื้นรวมตัวเป็นตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามความสมดุลของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ ส่วนบริเวณคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง (Nb-rich) พบว่ามีปริมาณธาตุไนโอเบียมใกล้เคียงกับคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูงในตัวอย่างสภาพหล่อเช่นกัน แต่ธาตุซิลิกอนและธาตุแมงกานีสมีปริมาณเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจเกิดจากความไม่เสถียรของคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูงหลังอบความร้อนที่อุณหภูมิสูง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °C เวลา 24 ชั่วโมง และ 1000 °C เวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายกันคือพบตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกในเนื้อพื้นเช่นกัน บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณโครเมียมสูง (Cr-rich) และจากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างในสภาพหล่อ (รูปที่ 4.3) สามารถยืนยันว่าคาร์ไบด์ปฐมภูมิเป็นคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ และอาจกล่าวได้ว่าคาร์ไบด์ปฐมภูมิเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ชนิดเดียวกันคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก และบริเวณคาร์ไบด์ที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง (Nb-rich) อาจเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC สอดคล้องกับผลการทดลองของ Q.Z.Chen, C.W. Thomas และ D.M.Knowles [29] คือบริเวณที่มีปริมาณธาตุโครเมียมสูงเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ชนิดโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) และบริเวณที่มีปริมาณธาตุไนโอเบียมสูงเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ชนิดไนโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC)

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมในเนื้อพื้น

(ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ

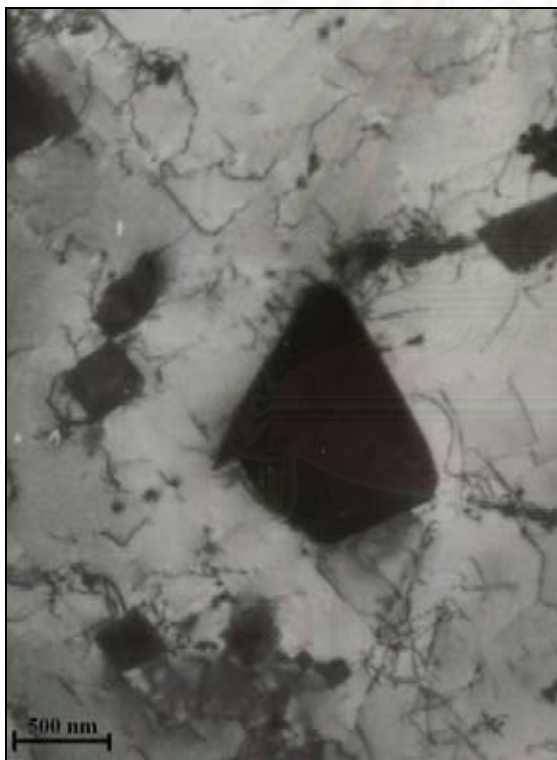
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6 หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6 หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

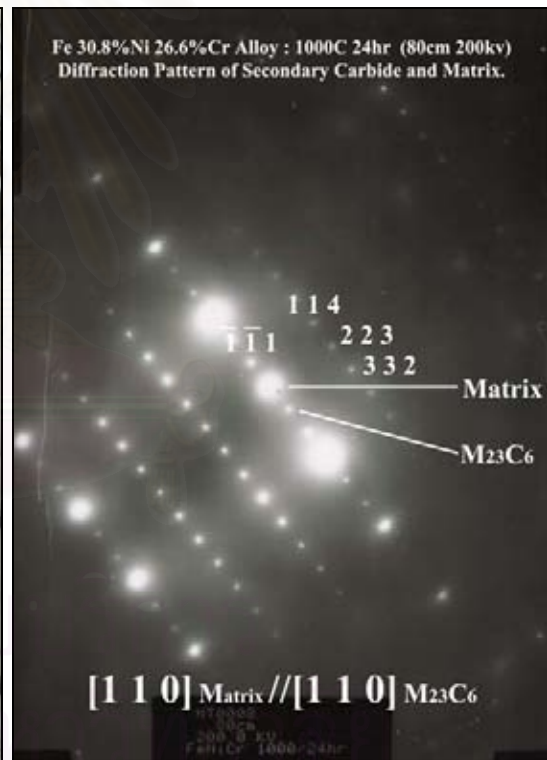
เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	C	O	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	W
เนื้อพื้น	-	-	1.06	-	23.83	1.44	41.71	31.96	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิที่มีปริมาณโครเมียมสูง	1.71	-	0.14	-	84.53	-	10.03	3.58	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	1.35	-	0.58	-	82.26	-	11.49	4.32	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	1.78	-	0.32	-	84.18	-	9.52	3.97	-	-

รูปที่ 4.10(ก) และตารางที่ 4.6 แสดงสัณฐานและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมินาขนาดเล็กในเนื้อพื้นออกสเตนไนต์ ตามลำดับ พบว่าบริเวณเนื้อพื้นประกอบด้วยธาตุเหล็ก 41.71% ธาตุ นิกเกิล 31.96% ธาตุโครเมียม 23.83%

ธาตุซิลิกอน 1.06% และธาตุแมงกานีส 1.44% บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิประกอบด้วยธาตุโครเมียม 84.53% ธาตุเหล็ก 10.03% ธาตุนิกเกิล 3.58% ธาตุคาร์บอน 1.71% และธาตุซิลิกอน 1.71% การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของเนื้อพื้นออกเทนไนต์และคาร์ไบด์ปฐมภูมิในรูปที่ 4.10(ข) พบว่ามีทิศทางของอิเล็กตรอนต่อระนาบของชิ้นงานที่ $[133]_{M_{23}C_6}$ และโครงสร้างผลึกเป็น Face Center Cubic ซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง 6,10,11,15,16 และ 38 การคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (ภาคผนวก ง) คือ ระนาบ (0 -3 -3), (3 -3 -2), (3 0 1) และ (3 3 4) มีค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกเท่ากับ 10.4085 Å, 10.6673 Å, 10.2631 Å และ 10.7289 Å ตามลำดับจากผลลัพธ์ตามที่กล่าวมานี้มีค่าใกล้เคียงค่าพารามิเตอร์อ้างอิงของโครเมียมคาร์ไบด์ [37] คือ 10.5699 Å จึงสามารถพิสูจน์ว่าตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คือ โครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ และมีสูตรโมเลกุลเป็น $(Cr,Fe,Ni)_{23}C_6$



(ก) ตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิแบบก้อนเหลี่ยม



(ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของคาร์ไบด์ปฐมภูมิก้อนเหลี่ยมกับเนื้อพื้น

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิแบบก้อนเหลี่ยมของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °C เวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

รูปที่ 4.11(ก) แสดงสัณฐานคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °C เวลา 24 ชั่วโมง และผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (ตาราง ที่ 4.6) พบว่า คาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมประกอบด้วยธาตุโครเมียม 82.26% ธาตุเหล็ก 11.49% ธาตุนิเกิล 4.32% ธาตุคาร์บอน 1.35% และธาตุซิลิคอน 0.58% จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.11(ข) สามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมกับเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ พบว่ามีทิศทางของลำอิเล็กตรอนตั้งฉากต่อระนาบชั้นงาน $[110]_{\text{Matrix}} // [110]_{\text{M}_{23}\text{C}_6}$ และโครงสร้างผลึกทั้งสองเฟสนี้เป็นลูกบาศก์ชนิด Face Center Cubic โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อพื้นออกสเทนไนต์กับคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมชนิด M_{23}C_6 คือ Cube-on-cube Orientation การคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกของเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และตะกอนคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยม (ตามลำดับ) มีดังนี้

- ตำแหน่งระนาบ (-1 -1 1) มีค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกเท่ากับ 3.8952 Å และ 10.7867 Å
- ตำแหน่งระนาบ (1 1 4) มีค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกเท่ากับ 3.6541 Å และ 10.7339 Å
- ตำแหน่งระนาบ (2 2 3) มีค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกเท่ากับ 3.4062 Å และ 10.1152 Å
- ตำแหน่งระนาบ (3 3 2) มีค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกเท่ากับ 3.7229 Å และ 10.5478 Å

การคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกอ้างอิงของออกสเทนไนต์และโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด M_{23}C_6 คือ 3.595 Å และ 10.5699 Å ตามลำดับ จึงสามารถยืนยันคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมเป็นคาร์ไบด์ชนิด M_{23}C_6 หรือ $(\text{Cr,Fe,Ni})_{23}\text{C}_6$ และสรุปได้ว่าคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมเป็นคาร์ไบด์ชนิดเดียวกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนในรูปที่ 4.11(ข) แสดงตำแหน่งจุดของเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยม จากความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างจุดกับค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึก (Lattice Parameter) ทำให้สามารถระบุจุดที่มีขนาดใหญ่เป็นจุดที่แสดงตำแหน่งของเฟสออกสเทนไนต์ ส่วนจุดที่มีขนาดเล็กแสดงตำแหน่งของเฟสคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยม เนื่องจากค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึก (Lattice Parameter) ของเฟสออกสเทนไนต์มีค่าเท่ากับ 3.595 Å และคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมชนิด M_{23}C_6 มีค่าเท่ากับ 10.5699 Å ทำให้ระยะห่างระหว่างจุดของเฟสออกสเทนไนต์มีค่ามากกว่าเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด M_{23}C_6 ด้วยเหตุนี้สามารถอธิบายความแตกต่างระหว่างจุดที่เกิดในรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนได้

$$Rd_{hkl} = \lambda L \quad (4.1)$$

$$d_{hkl} = a / [h^2+k^2+l^2]^{1/2} \quad (4.2)$$

$$a = [h^2+k^2+l^2]^{1/2} \lambda L/R \quad (4.3)$$

การคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมในรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน หรือค่า d_{hkl} (สมการ 4.1) สามารถหาค่า R จากการวัดระยะห่างจุดที่สนใจกับจุดศูนย์กลางของรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน สำหรับค่า λL เป็นค่าคงที่ของกล้อง ทำให้ความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างระนาบแปรผกผันกันกับระยะห่างระหว่างจุด ด้วยเหตุนี้ทำให้ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม (d_{hkl}) โดยที่ $(h \ k \ l)$ เป็นค่าคงที่ (สมการ 4.2) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกกับระยะห่างระหว่างจุด (สมการ 4.3) พบว่าค่าพารามิเตอร์โครงผลึกแปรผกผันกับระยะที่วัดได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน ดังนั้นระยะห่างระหว่างจุดของเฟสเนื้อพื้นออกสเทนไนต์จึงมีค่ามากกว่าเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ประมาณ 3 เท่า ซึ่งสอดคล้องและสัมพันธ์กับพารามิเตอร์โครงผลึกของออกสเทนไนต์ คือมีค่าประมาณ 1/3 เท่าของพารามิเตอร์โครงผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$



(ก) คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก ตกตะกอนในเนื้อพื้นออกสเตนไนต์



(ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนบริเวณคาร์ไบด์แบบรูปเข็มกับเนื้อพื้น

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก และคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ลักษณะและส่วนผสมเคมีของตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก และตะกอนขนาดเล็กของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12(ก) และตารางที่ 4.6 (ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีบริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกกับคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม พบว่า ตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกประกอบด้วยธาตุโครเมียม 84.18% ธาตุเหล็ก 9.52% ธาตุ निकเกิด 3.97% ธาตุคาร์บอน 1.78% และธาตุซิลิคอน 0.32% ส่วนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ปฐมภูมิมีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้ยืนยันได้ว่าเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ หรือ $(Cr,Fe,Ni)_{23}C_6$ อาจมีธาตุเหล็กและธาตุนิกเกิดเป็นส่วนประกอบทางเคมีด้วยเช่นกัน การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกกับเนื้อพื้น ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) พบว่าโครงสร้างผลึกเป็น Face Center Cubic และมีทิศทางของลำอิเล็กตรอนตั้งฉากต่อระนาบชั้นงาน คือ $[103]_{Matrix} // [103]_{M_{23}C_6}$ ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกของออสเทนไนต์กับคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกคือ Cube-on-cube Orientation เช่นเดียวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของออสเทนไนต์กับคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม (รูปที่ 4.11(ข)) การคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงผลึกของเนื้อพื้นออสเทนไนต์กับคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก (ตามลำดับ) มีดังนี้

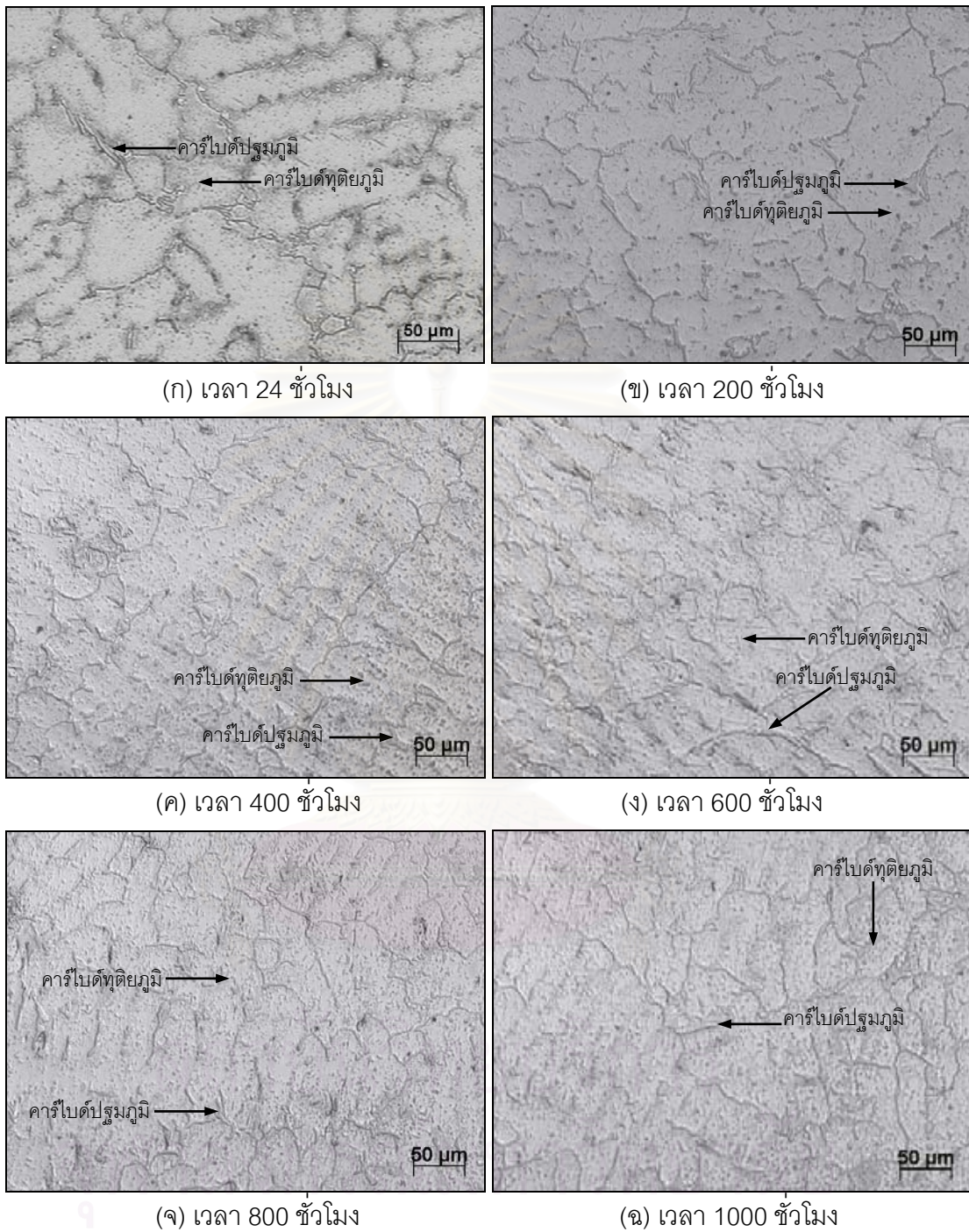
- ตำแหน่งระนาบ (3 0 1) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 3.8952 Å และ 10.7867 Å
- ตำแหน่งระนาบ (3 3 1) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 3.6541 Å และ 10.7339 Å
- ตำแหน่งระนาบ (0 3 0) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 3.4062 Å และ 10.1152 Å
- ตำแหน่งระนาบ (-3 3 1) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 3.7229 Å และ 10.5478 Å

การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS และค่าพารามิเตอร์โครงผลึกของคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก สามารถพิสูจน์และยืนยันว่าคาร์ไบด์ตามที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นสารประกอบคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ หรือ $(Cr,Fe,Ni)_{23}C_6$ ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับผลการทดลองของสวรินทร์ รัตนมหาสกุล และคณะ [26] ศึกษาจลนพลศาสตร์การตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิด 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °C พบว่า กลไกการตกตะกอนในช่วงแรกมีค่า n อยู่ในช่วง 1.0 - 1.5 เป็น Growth of particles of appreciable initial volume หรือการเพิ่มปริมาตรของอนุภาคคาร์ไบด์ (แบบสามมิติ) และช่วงที่สองมีค่า n อยู่ในช่วง 0.5 - 1.0 เป็น Thinkening of long cylindres or needle หรือ Thinkening of very large plates เกิดตะกอนของอนุภาคด้วยการเพิ่มความหนาแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกหรือแผ่นบาง จากลักษณะ

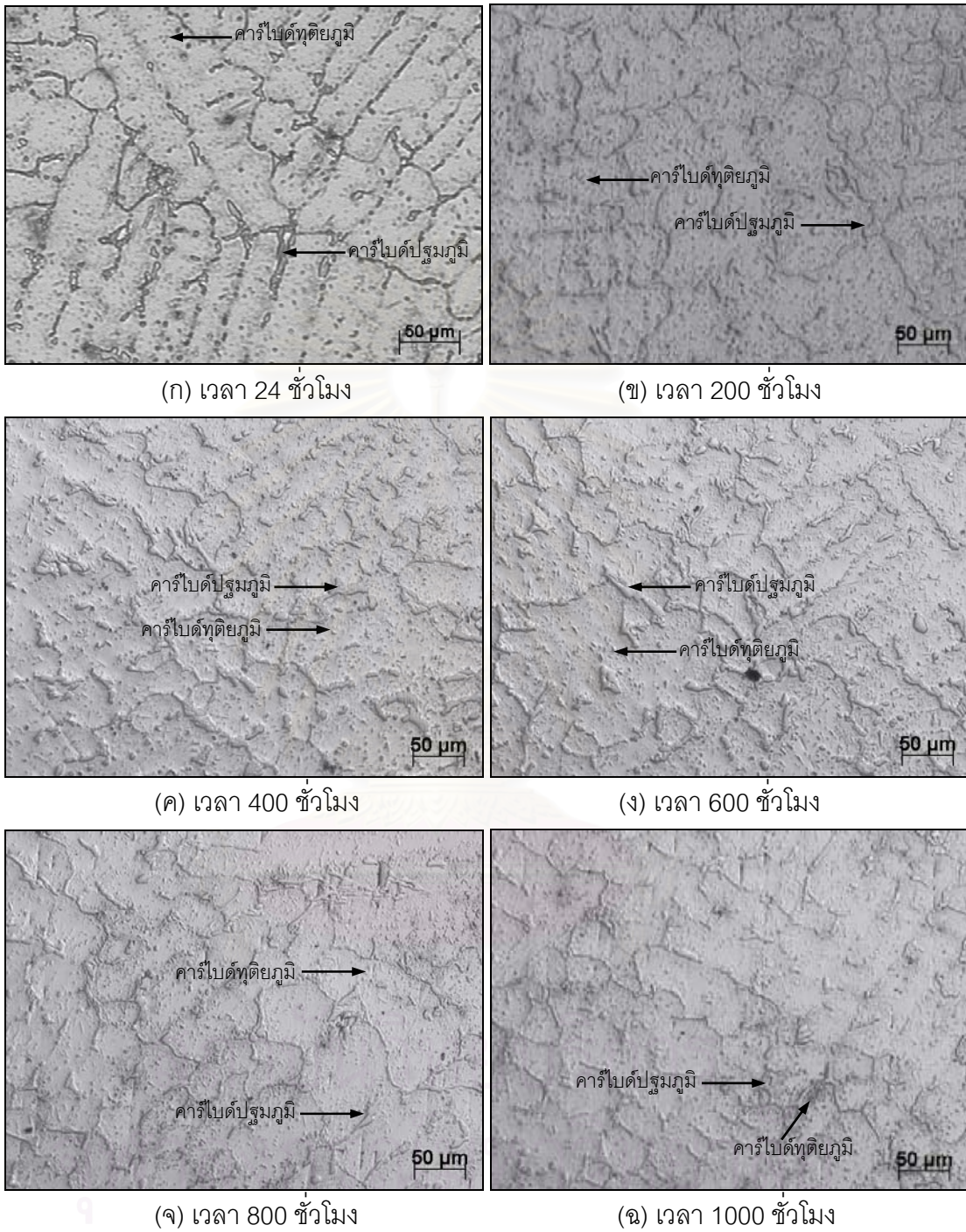
ของตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามที่ได้กล่าวมานี้ ทำให้สามารถยืนยันกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมถูกควบคุมด้วยกลไก Growth of particles of appreciable initial volume คือการเพิ่มขนาดตะกอนด้วยปริมาตรแบบสามมิติ และกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกถูกควบคุมด้วย Thinkening of long cylindles or needle คือตะกอนมีการเพิ่มขนาดด้วยความหนาแบบสองมิติ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



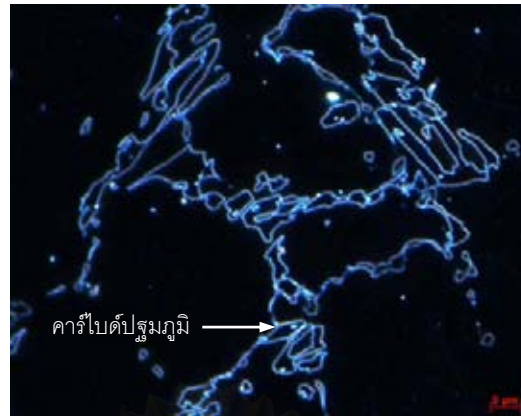
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%
หลังอบที่ 900 °ซ จากกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า



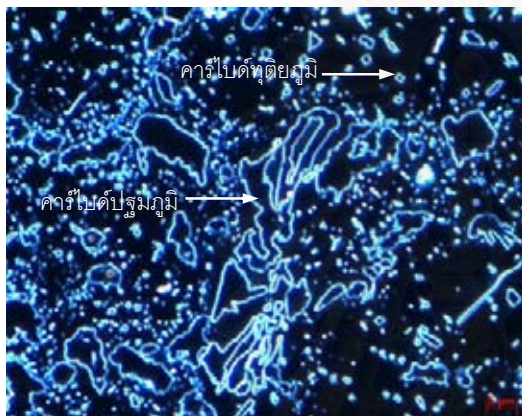
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%
 หลังอบที่ 1000 °ซ จากกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 100 เท่า

รูปที่ 4.13 (ก)-(ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่ามีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างในสภาพหล่อ คือ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และคาร์ไบด์ปฐมภูมิเช่นเดียวกัน โดยที่บริเวณเนื้อพื้นมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตัวเล็กกระจายตัวใกล้ตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ จากโครงสร้างจุลภาคตามที่กล่าวมานี้มีลักษณะคล้ายกันกับตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง (รูปที่ 4.14 (ก)-(ข) ตามลำดับ) จากการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภากระหว่างตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ พบตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิในเนื้อพื้นและมีปริมาณหนาแน่นใกล้เคียงกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิเช่นกัน เนื่องจากการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิเกิดจากการทำปฏิกิริยาของธาตุคาร์บอนส่วนเกินในเนื้อพื้นกับธาตุต่าง ๆ ในโลหะผสมชนิดนี้ เช่น ธาตุโครเมียม ธาตุไนโอเบียม ธาตุไทเทเนียม เป็นต้น ซึ่งเป็นธาตุที่มีสนับสนุนการเกิดคาร์ไบด์ สำหรับคาร์บอนส่วนเกินจะเกิดหลังจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในกระบวนการหล่อ ทำให้บริเวณเนื้อพื้นมีการละลายธาตุคาร์บอนส่วนเกินแบบสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) เมื่อมีพลังงานความร้อนจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทำให้ธาตุต่างๆ ตามที่กล่าวมานี้เกิดปฏิกิริยากับธาตุคาร์บอนส่วนเกินเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ตกตะกอนที่บริเวณระหว่างเดนไดรต์หรือตามขอบเกรน

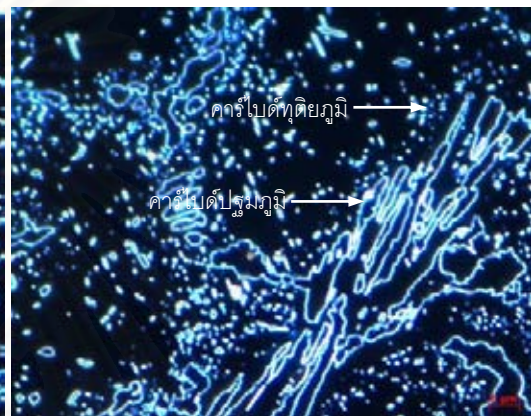
การวิเคราะห์สัดส่วนโดยพื้นที่ (Area Fraction) ของคาร์ไบด์ปฐมภูมิ-คาร์ไบด์ทุติยภูมิในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ด้วยโปรแกรม *Image-Pro Plus version 5.0* พบว่าตัวอย่างในสภาพหล่อมียุทธศาสตร์โดยพื้นที่ของคาร์ไบด์ปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว คือ 19.3% ส่วนตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง มีสัดส่วนโดยพื้นที่ของคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิ เท่ากับ 55.3% และ 54.3% ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง มีสัดส่วนโดยพื้นที่ของคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิ เท่ากับ 48.8% และ 48.7% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์สัดส่วนโดยพื้นที่ของปริมาณตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามที่กล่าวมานี้สามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่างหลังการอบความร้อนที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ มีปริมาณการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ และหลังอบที่ 1000 °ซ (รูปที่ 4.13 (ก)-(ข) และรูปที่ 4.14 (ก)-(ข) ตามลำดับ)



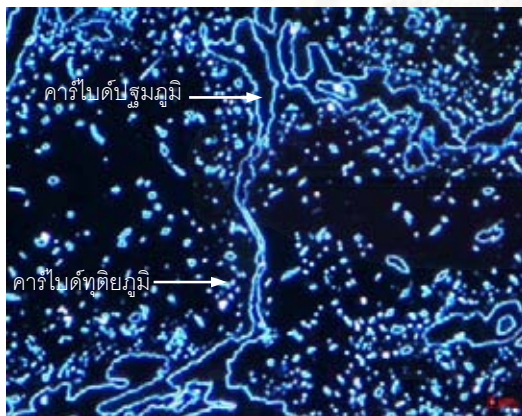
(ก) สภาพหล่อ



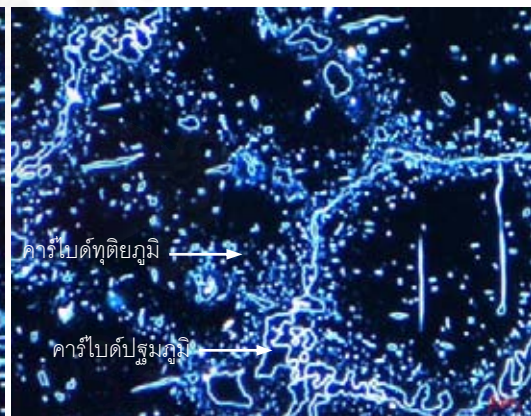
(ข) หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



(ค) หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



(ง) หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง



(จ) หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคแบบดาร์คฟิลด์ (Dark Field) ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% จากกล้องจุลทรรศน์แสง (กำลังขยาย 1000 เท่า)

สำหรับการวิเคราะห์สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของปริมาณตะกอนของ คาร์ไบด์ทุติยภูมิ ด้วยวิธี manual point counting แบบ ASTM E562 (ภาคผนวก จ) จากโครงสร้าง จุลภาคแบบดาร์คฟิลด์ (Dark Field) ดังแสดงในรูปที่ 4.15(ก)-(จ) ตามลำดับ สามารถเปรียบเทียบ ปริมาณตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบ

ที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง เท่ากับ 42.67% และ 42.79% ตามลำดับ ส่วนปริมาณตะกอนคาร์ไบด์
 ทูติยภูมิของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา
 1000 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 41.1% และ 40.9% ตามลำดับ ซึ่งการเปรียบเทียบปริมาณตะกอน
 คาร์ไบด์ทูติยภูมิของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณคาร์ไบด์ทูติยภูมิ
 ตกตะกอนมากกว่าตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง เพียงเล็กน้อยอาจเพราะขนาดและ
 ปริมาณการตกตะกอนคาร์ไบด์ทูติยภูมิมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากคาร์ไบด์ทูติยภูมิที่มีขนาดเล็กเกิด
 รวมตัวกัน (Agglomerate) เป็นคาร์ไบด์ทูติยภูมิขนาดใหญ่ และอัตราการเกิดของตะกอนคาร์ไบด์
 ทูติยภูมิมีแนวโน้มลดลง เพราะการเกิดตะกอนคาร์ไบด์ทูติยภูมิมีปริมาณเข้าสู่สมดุลและปริมาณ
 คาร์บอนส่วนเกินมีปริมาณลดลงจากการเกิดตะกอนคาร์ไบด์ทูติยภูมิ ทำให้คาร์ไบด์ทูติยภูมิที่เกิด
 ใหม่มีปริมาณคงที่เมื่อระยะเวลาการอบความร้อนเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ
 เวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณคาร์ไบด์ทูติยภูมิมากกว่าตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง
 ด้วยเหตุนี้สามารถยืนยันว่าการอบความร้อนระหว่าง 900 °ซ และ 1000 °ซ ในระยะเวลาเท่ากันไม่
 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค

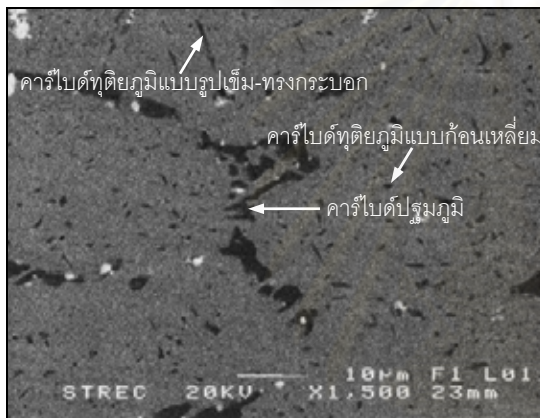
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600,
 800 และ 1000 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.16(ก)-(ข)
 ตามลำดับ พบเนื้อพื้นออกสเตนไนต์, คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดที่มีปริมาณโครเมียมสูง (Cr-rich) และ
 คาร์ไบด์ปฐมภูมิชนิดที่มีปริมาณไนโอเบียมสูง (Nb-rich) รวมทั้งพบตะกอนขนาดเล็กของคาร์ไบด์
 ทูติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทูติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก ซึ่งคาร์ไบด์ทูติยภูมิทั้งสอง
 ชนิดนี้เป็นคาร์ไบด์ชนิดที่มีปริมาณโครเมียมสูง (Cr-rich) จากโครงสร้างจุลภาคตามที่กล่าวมานี้
 มีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง
 ดังแสดงในรูปที่ 4.17(ก)-(ข) ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

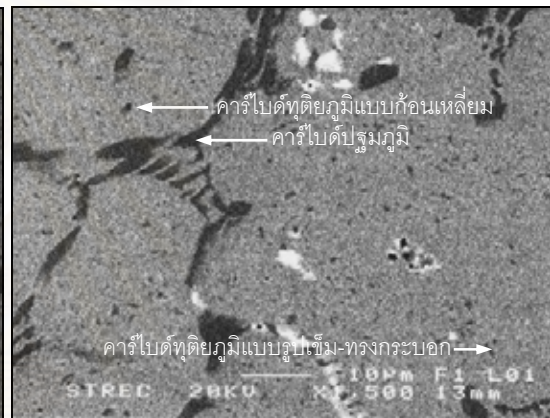


(ก) เวลา 24 ชั่วโมง

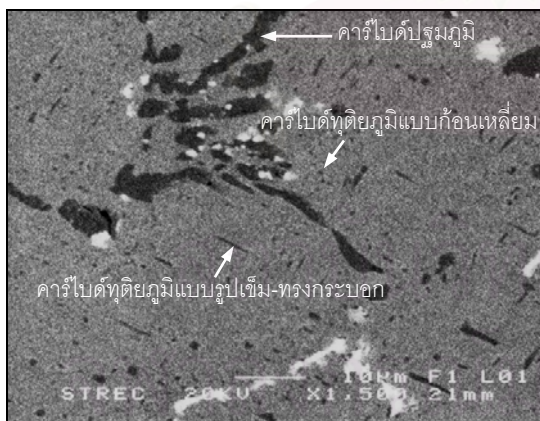
(ข) เวลา 200 ชั่วโมง



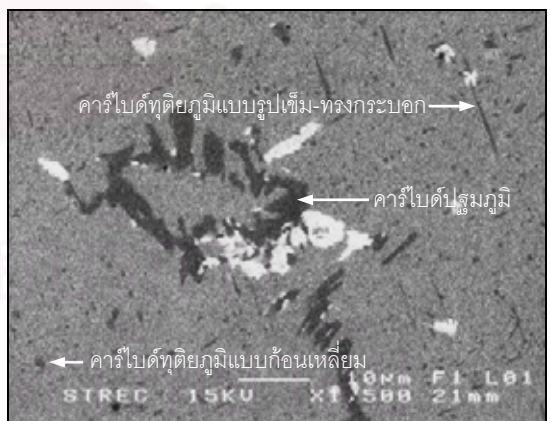
(ค) เวลา 400 ชั่วโมง



(ง) เวลา 600 ชั่วโมง

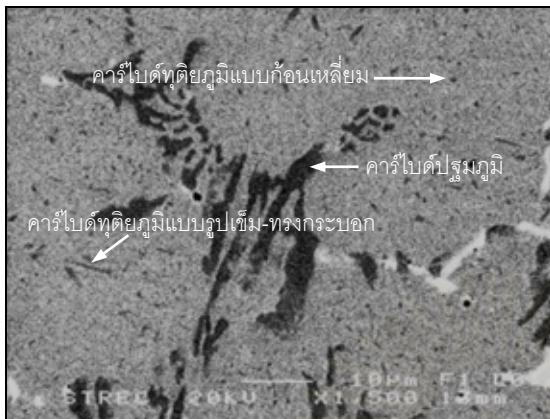


(จ) เวลา 800 ชั่วโมง



(ฉ) เวลา 1000 ชั่วโมง

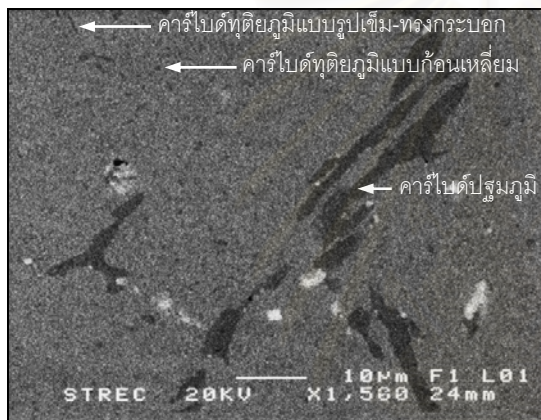
รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 900 °ซ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



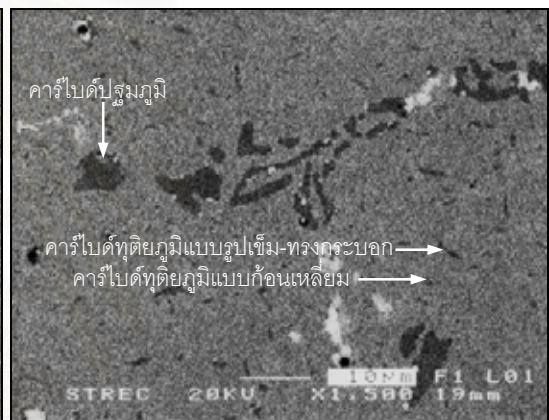
(ก) เวลา 24 ชั่วโมง



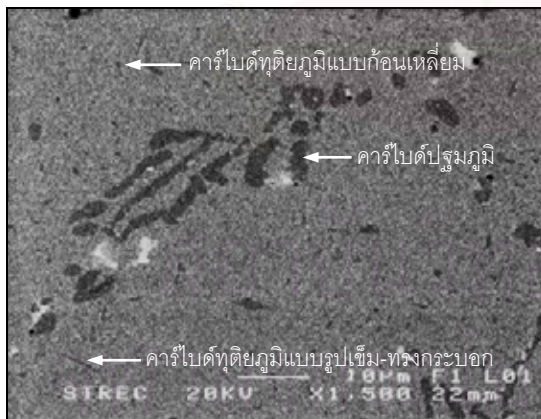
(ข) เวลา 200 ชั่วโมง



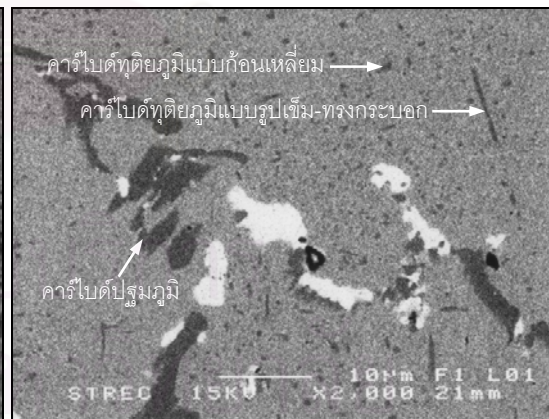
(ค) เวลา 400 ชั่วโมง



(ง) เวลา 600 ชั่วโมง



(จ) เวลา 800 ชั่วโมง



(ฉ) เวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%
หลังอบที่ 1000 °ซ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%
หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS

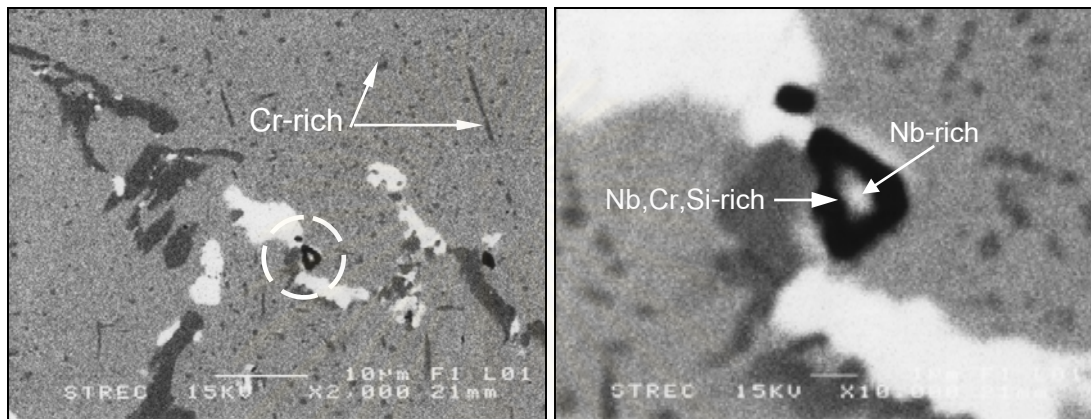
เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	39.58	32.25	25.06	1.33	1.78	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	18.55	9.24	71.10	1.12	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	13.23	9.05	77.01	0.71	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	18.05	10.18	70.94	0.83	-	-	-
เฟส G (สารประกอบซิลิไซด์)	27.95	17.54	21.69	2.74	1.34	23.88	4.86

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%
หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS

เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	40.61	32.25	24.40	1.22	1.52	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	18.89	10.09	70.26	0.77	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	13.80	6.25	78.77	1.18	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	20.30	10.53	68.19	0.99	-	-	-
เฟส G (สารประกอบซิลิไซด์)	28.86	17.16	21.82	3.78	1.657	21.63	5.11

การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค EDS จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าบริเวณเนื้อพื้นประกอบด้วยธาตุเหล็ก 39.58% ธาตุโครเมียม 25.06% และธาตุนิกเกิล 32.25% โดยที่มีปริมาณธาตุโครเมียมลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อพื้นของตัวอย่างในสภาพหล่อ บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิประกอบด้วยธาตุเหล็ก 18.55 % ธาตุโครเมียม 71.10% และธาตุนิกเกิล 9.24% ส่วนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม และคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกมีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ แต่บริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณธาตุโครเมียมสูงกว่าบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิ เนื่องจากการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิหลังอบความร้อนทำให้มีการละลายธาตุโครเมียมออกจากคาร์ไบด์ปฐมภูมิแล้วเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนส่วนเกินในเนื้อพื้นเกิด

ตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก และจากการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS ของไนโอเบียมคาร์ไบด์มีปริมาณธาตุไนโอเบียมลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างในสภาพหล่อ พบว่าบริเวณนี้มีปริมาณเพิ่มขึ้นของธาตุเหล็ก ธาตุ निकเกิด ธาตุโครเมียม ธาตุซิลิกอน และธาตุแมงกานีส ตามเอกสารอ้างอิงที่ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของไนโอเบียมคาร์ไบด์เป็นเฟส G [29,30,31]

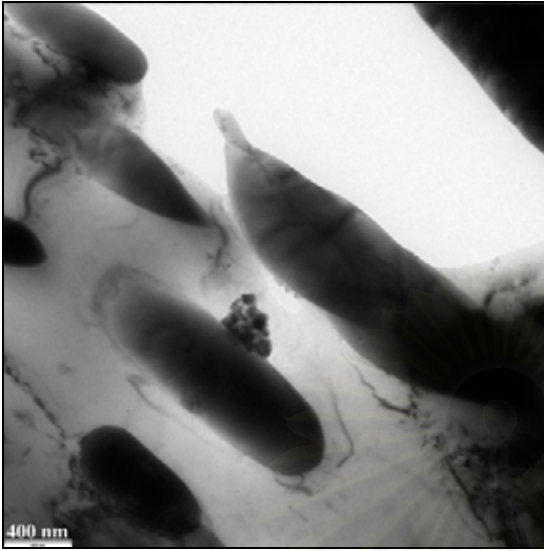


(ก) คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก และคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม

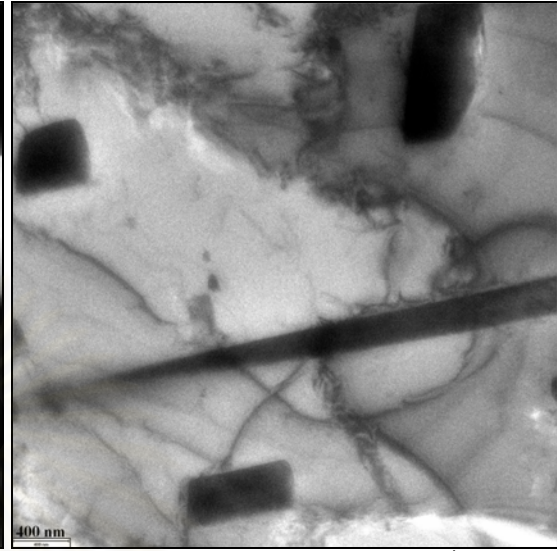
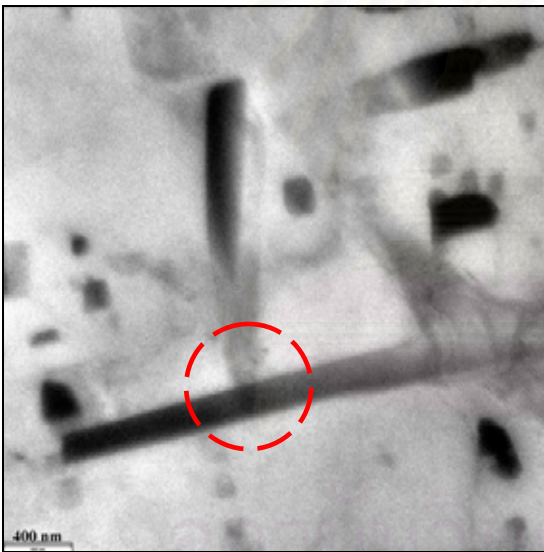
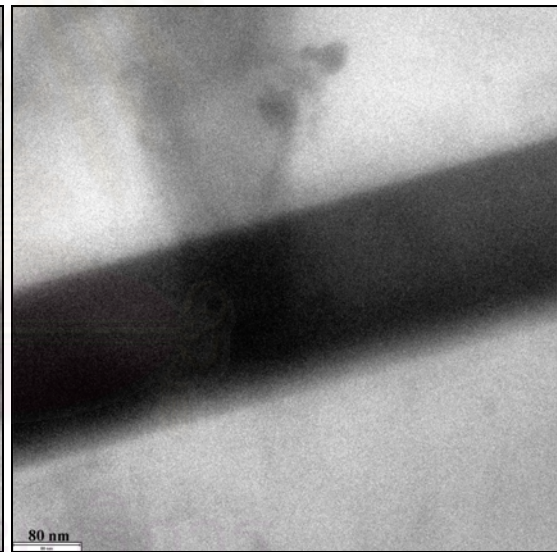
(ข) ตะกอนไนโอเบียมคาร์ไบด์

รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบโครงสร้างเนื้อพื้นออกสเตนไนต์และตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม และคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกมีปริมาณของธาตุโครเมียมสูง (Cr-rich) รวมทั้งมีส่วนประกอบของธาตุเหล็กและธาตุนิกเกิลเช่นกัน ส่วนบริเวณตะกอนที่ล้อมรอบไนโอเบียมคาร์ไบด์มีปริมาณธาตุไนโอเบียมลดลง โดยที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นของธาตุเหล็ก ธาตุนิกเกิล ธาตุโครเมียม ธาตุซิลิกอน และธาตุแมงกานีส ดังนั้นเฟสล้อมรอบตะกอนของไนโอเบียมคาร์ไบด์อาจเป็นเฟส G ก็ได้ เนื่องจากบริเวณเฟสที่กล่าวมานี้มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับเฟส G ในการทดลองของ Luiz Henrique de Almeida [31] และ Bogdan Piekarski [30]



(ก) คาร์บอนนาโนทิวส์

(ข) คาร์บอนนาโนทิวส์แบบก้านเหลื่อม
และคาร์บอนนาโนทิวส์แบบรูปเข็ม(ค) คาร์บอนนาโนทิวส์แบบก้านเหลื่อมและ
คาร์บอนนาโนทิวส์แบบทรงกระบอก

(ง) คาร์บอนนาโนทิวส์แบบทรงกระบอก

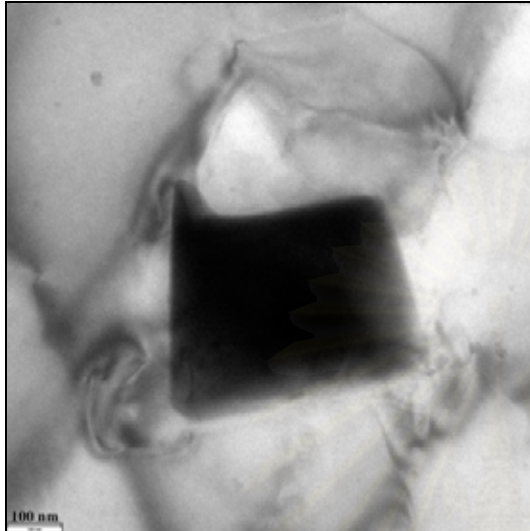
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °C เวลา 1000 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6

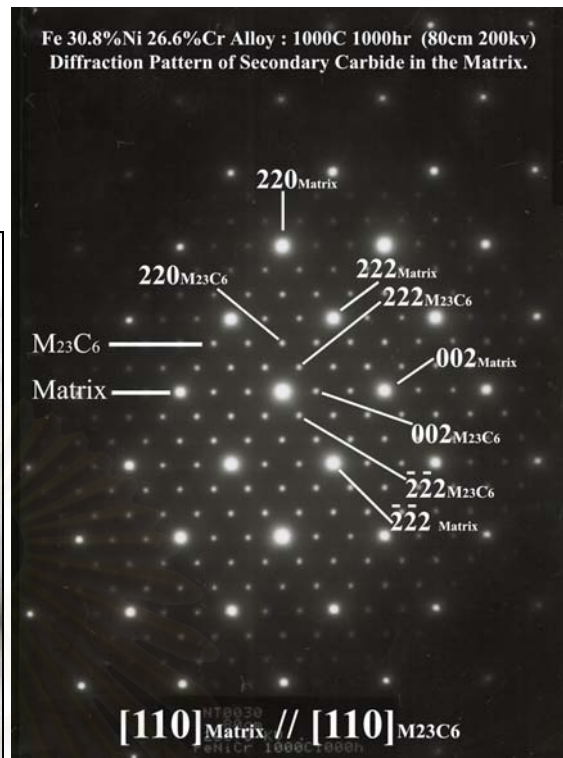
หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	C	O	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	W
เนื้อพื้น	-	-	0.95	-	24.49	1.53	40.11	32.92	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	1.33	-	-	-	84.01	-	9.61	5.05	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	1.28	-	0.46	-	80.19	-	11.10	5.57	-	1.41
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	1.42	-	-	-	84.74	-	9.55	4.33	-	-
เฟส G (สารประกอบซิลิไซด์)	-	0.99	0.88	5.33	24.89	-	30.44	19.39	18.08	-

โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน รูปที่ 4.19(ก)-(ง) ตามลำดับ แสดงถึงฐานตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกตกตะกอนในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ซึ่งคาร์ไบด์ทุติยภูมิทั้งสองชนิดตามที่กล่าวนี้มีพื้นฐานเช่นเดียวกัน ตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกตะกอนในตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบพื้นฐานและขนาดของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก พบว่า ตัวอย่างหลังอบความร้อนที่มีระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมมีขนาดใหญ่ขึ้น และตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกมีขนาดความหนาเพิ่มขึ้น จากพื้นฐานของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามที่กล่าวมานี้มีความสัมพันธ์และสอดคล้องกับกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami คือ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมมีการเพิ่มขนาดด้วยปริมาตรหรือแบบสามมิติ ($n = 1.2$) และคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกมีการเพิ่มขนาดความหนาแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก ($n = 0.4$) ด้วยเหตุนี้สามารถยืนยันผลของการอบความร้อนที่ 1000 °ซ ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ถึง 1000 ชั่วโมง เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami คือ ช่วงแรกมีค่า n อยู่ในช่วง 1.0-1.5 และช่วงที่สองมีค่า n อยู่ในช่วง 0.5-1.0 ตามลำดับ



(ก) ตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม
ในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์



(ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน
ของคาร์ไบด์ทุติยภูมิกับเนื้อพื้น

รูปที่ 4.20 คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ของตัวอย่างหลังอบที่
1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

รูปที่ 4.20(ก) และตารางที่ 4.9 แสดงสัดส่วนและส่วนผสมเคมีของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ
แบบก้อนเหลี่ยมตกตะกอนในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
พบว่า บริเวณเนื้อพื้นประกอบด้วยธาตุเหล็ก 40.11% ธาตุนิเกิล 32.92% ธาตุโครเมียม 24.49%
ธาตุแมงกานีส 1.53% และธาตุซิลิกอน 0.95% และคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมประกอบด้วย
ธาตุโครเมียม 80.19% ธาตุเหล็ก 11.10% ธาตุนิเกิล 5.57% ธาตุทังสเตน 1.41% ธาตุคาร์บอน
1.28% และธาตุซิลิกอน 0.46% จากการเปรียบเทียบส่วนผสมเคมีของตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิ
แบบก้อนเหลี่ยม (รูปที่ 4.20(ก)) พบว่ามีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกันตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ
(รูปที่ 4.19(ก)) ดังแสดงในตารางที่ 4.9

การศึกษาโครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและเนื้อพื้นด้วยรูปแบบ
การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.20(ข) พบว่ามีแกนโซน $[110]_{\text{Matrix}} // [110]_{\text{M}_{23}\text{C}_6}$
และโครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยมและเนื้อพื้นแบบ Face Center Cubic
โดยที่ความสัมพันธ์ของโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Cube-on-cube Orientation ซึ่งสอดคล้องกับ

เอกสารอ้างอิงที่ 15,16 และ 36 เมื่อคำนวณพารามิเตอร์โครงผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน พบว่า ค่าพารามิเตอร์โครงผลึกมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงของออสเทนไนต์และโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ เท่ากับ 3.595 \AA และ 10.5699 \AA ตามลำดับ การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีและโครงสร้างผลึกของสารประกอบคาร์ไบด์ในตัวอย่างหลังอบที่ $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 24 และตัวอย่างหลังอบที่ $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 1000 ชั่วโมง ทำให้ยืนยันสัณฐานและชนิดของตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม และคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก คือโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ และมีความสัมพันธ์ของโครงสร้างผลึกระหว่างเนื้อพื้นออสเทนไนต์กับคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$ แบบ Cube-on-cube Orientation เช่นกัน



(ก) เฟส G ตกตะกอนในเนื้อพื้นออสเทนไนต์ (ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนของเฟส G

รูปที่ 4.21 เฟส G (สารประกอบซิลิไซด์) ของตัวอย่างหลังอบที่ $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 1000 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เฟส G (สารประกอบซิลิไซด์) ตกตะกอนในเนื้อพื้นออสเทนไนต์หลังอบที่ $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 1000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.21(ก) และผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (ตารางที่ 4.9) พบว่าเฟส G ประกอบด้วยธาตุเหล็ก 30.44% ธาตุนิเกิล 19.39% ธาตุโครเมียม 24.89% ธาตุไนโอเบียม 18.08% ธาตุไทเทเนียม 5.33% ธาตุซิลิคอน 0.88% และธาตุออกซิเจน 0.99% ซึ่งส่วนผสมเคมีตามที่กล่าวนี้มีค่าใกล้เคียงกับสูตรโมเลกุลของ $Nb_6(Ni,Fe)_{16}(Si,Cr)_7$ [29]

หรือ $(\text{Nb,Ti})_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ [30] แต่ในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเฟส G พบว่ามีส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกับส่วนประกอบของ Nickel Chromium Silicide หรือ $\text{Nb}_6(\text{Ni,Fe})_{16}(\text{Si,Cr})_7$ [29]

รูปที่ 4.21(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของเฟส G มีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic เช่นเดียวกับการศึกษาโครงสร้างผลึกเฟส G โดย Luiz Henrique de Almeida [30] ในโลหะผสม 25Cr-35Ni หลังอบที่อุณหภูมิ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง และค่าพารามิเตอร์โครงผลึกของเฟส G (JCPDS ในหมายเลข 17-0332 มีค่าเท่ากับ 11.140 Å^o ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์โครงผลึกของเฟส G ดังนี้

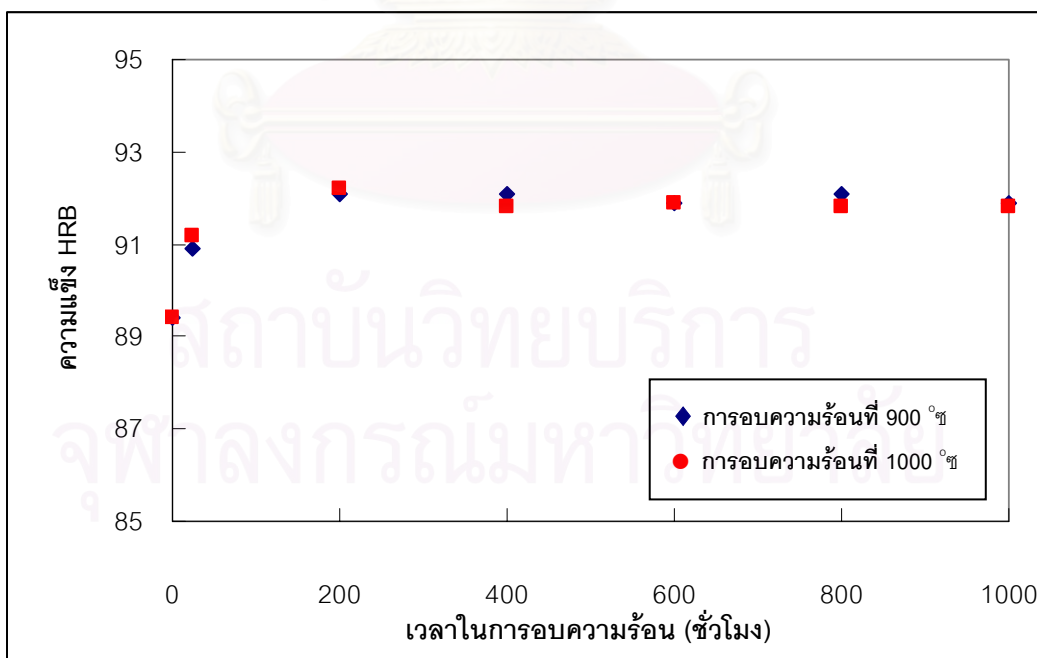
- ตำแหน่งระนาบ (3 3 1) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 11.0280 Å
- ตำแหน่งระนาบ (3 4 5) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 11.0089 Å
- ตำแหน่งระนาบ (0 1 4) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 11.1270 Å
- ตำแหน่งระนาบ (-3 -2 3) มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 11.1688 Å

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน และส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ตามที่กล่าวมานี้สามารถยืนยันได้ว่าคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทิตานียมแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด M_{23}C_6 หรือ $(\text{Cr,Fe,Ni})_{23}\text{C}_6$ รวมทั้งเป็นคาร์ไบด์ชนิดเดียวกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ และพบตะกอนของเฟส G (สารประกอบซิลิไซด์) เป็นสารประกอบของเหล็ก นิกเกิล โครเมียม ไนโอเบียม และซิลิคอน ซึ่งสอดคล้องและสามารถยืนยันตามที่ได้รายงานในเอกสารอ้างอิง 6, 29, 30 และ 31 โดยมีระบบโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic เช่นเดียวกับเนื้อพื้นออกสเตนไนต์และสารประกอบคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนในท่อโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง

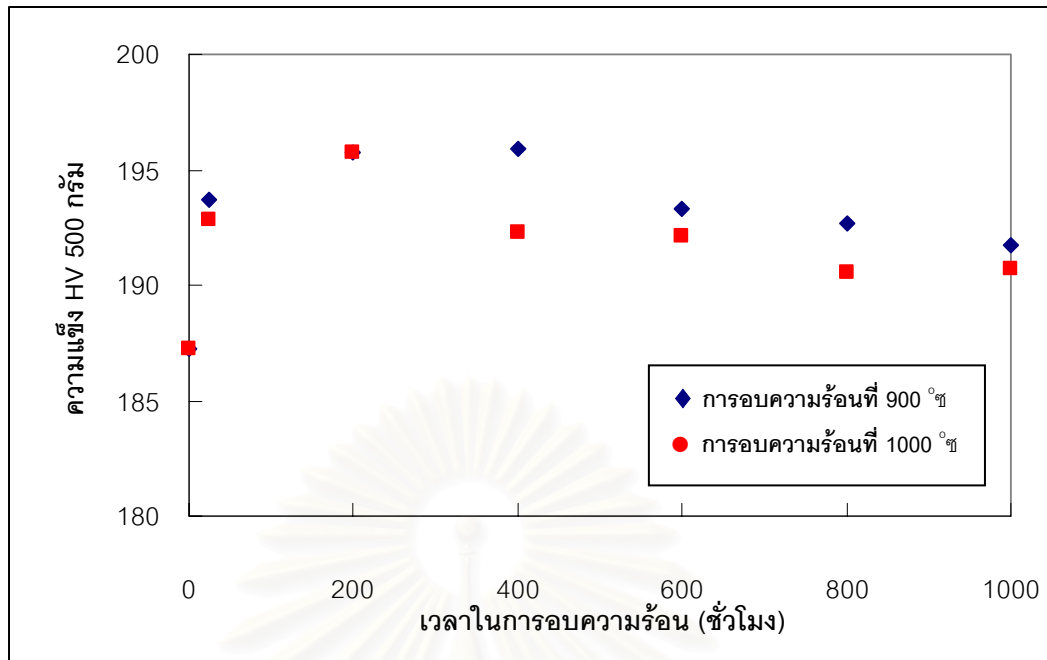
การศึกษาตามทีกล่าวมานี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Q.Z.Chen, C.W. Thomas และ D.M. Knowles [29] คือการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตานียมและเฟส G ในโลหะผสม 20Cr32Ni1Nb หลังใช้งานที่อุณหภูมิ 760 °ซ เวลา 4 ปี และ Luiz Henrique de Almeida [31] ศึกษาส่วนผสมเคมีของคาร์ไบด์ชนิด M_{23}C_6 และเฟส G ในโลหะผสม 25Cr-35Ni หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง พบความสัมพันธ์ระหว่างคาร์ไบด์ชนิด M_{23}C_6 กับเนื้อพื้นออกสเตนไนต์เป็นแบบ Cube-on-cube Orientation และเฟส G มีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic เช่นกันโดยมีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ 10.50 Å และสูตรโมเลกุลคือ $\text{Nb}_6(\text{Ni,Fe})_{16}(\text{Si,Cr})_7$

4.5 ความแข็งของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังอบความร้อน

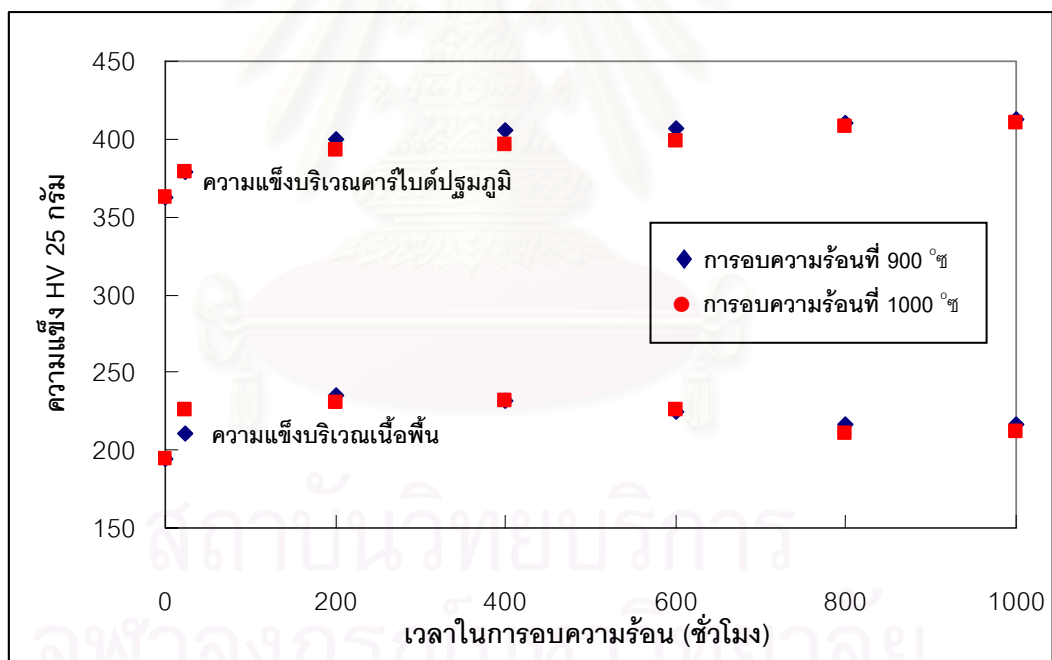
การทดสอบความแข็งของตัวอย่างในสภาพหล่อและตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (ภาคผนวก ฉ) ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า ตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ มีความแข็งประมาณ 92 HRB และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ มีความแข็งประมาณ 92 HRB ความแข็งของตัวอย่างหลังอบความร้อนมีค่ามากกว่าตัวอย่างในสภาพหล่อ การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างในสภาพหล่อและตัวอย่างหลังการอบความร้อน พบว่า ตัวอย่างในสภาพหล่อประกอบด้วยเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และตะกอนคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ส่วนตัวอย่างหลังการอบความร้อนประกอบด้วยเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และคาร์ไบด์ปฐมภูมิ เช่นเดียวกับตัวอย่างในสภาพหล่อ แต่บริเวณเนื้อพื้นมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิจานาดเล็ก d แสดงว่าตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิจานาดเล็กสามารถเพิ่มความแข็งให้กับเนื้อพื้นออกสเทนไนต์จึงทำให้ความแข็งของตัวอย่างหลังอบความร้อนมีสูงกว่าตัวอย่างในสภาพหล่อ รูปที่ 4.23 แสดงความแข็งของตัวอย่างในสภาพหล่อและตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 500 กรัม พบว่าตัวอย่างหลังอบความร้อนมีความแข็งสูงกว่าในสภาพหล่อเช่นเดียวกับผลทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (รูปที่ 4.22) เช่นกัน



รูปที่ 4.22 ความแข็งแบบ HRB ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังอบความร้อน



รูปที่ 4.23 ความแข็งแรงของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังอบความร้อน



รูปที่ 4.24 ความแข็งแรงบริเวณเนื้อพื้นกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังอบความร้อน

ผลการทดสอบความแข็งแรงบริเวณเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 25 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าความแข็งแรงมีแนวโน้มใกล้เคียงกันผลทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องทดสอบแบบรีกเวล และเครื่องทดสอบความ

แข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ด้วยแรงกด 500 กรัม (รูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม ความแข็งบริเวณเนื้อพื้นจากการทดสอบด้วยน้ำหนักกด 25 กรัม มีค่าสูงกว่าการทดสอบด้วยน้ำหนักกด 500 กรัม อาจเกิดจากน้ำหนักกดที่ต่างกันทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะเส้นทแยงมุมของรอยกดบนผิวชิ้นงาน จากค่าความแข็งระหว่างการทดสอบด้วยแรงกด 500 กรัม และ 25 กรัม ยังคงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือบริเวณเนื้อพื้นของตัวอย่างหลังอบความร้อนมีความแข็งสูงกว่าตัวอย่างในสภาพหล่อ เนื่องจากคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดเล็กตกตะกอนในเนื้อพื้น ส่งผลทำให้ตัวอย่างหลังอบความร้อนมีความแข็งมากกว่าตัวอย่างในสภาพหล่อ การเพิ่มความแข็งให้กับเนื้อพื้นด้วยการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Precipitation Hardening) แต่ความแข็งบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เมื่อระยะเวลาอบความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้คาร์ไบด์ทุติยภูมิที่มีขนาดเล็กเกิดรวมตัวเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิขนาดใหญ่ขึ้น (Agglomerate) และมีปริมาณหนาแน่นใกล้เคียงกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ดังนั้นความแข็งบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิของตัวอย่างหลังอบความร้อนมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 สมบัติความต้านแรงดึงของท่อโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังอบความร้อน

การทดสอบความต้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M [34] (ภาคผนวก ข) ของตัวอย่างในสภาพหล่อ [26] และตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมงและตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.10

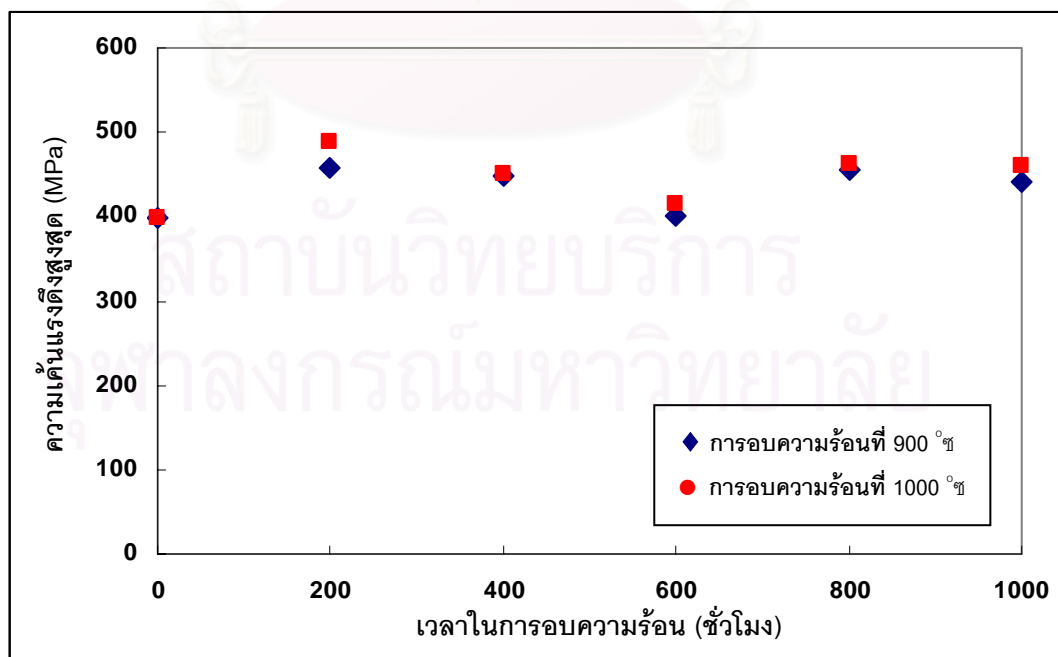
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังอบความร้อน

ชิ้นตัวอย่าง	ความเค้นแรงดึงสูงสุด (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
สภาพหล่อ [26]	399	9.30
900 °ซ – 200 ชั่วโมง	457	3.60
900 °ซ – 400 ชั่วโมง	448	3.60
900 °ซ – 600 ชั่วโมง	400	3.60
900 °ซ – 800 ชั่วโมง	456	3.60
900 °ซ – 1000 ชั่วโมง	440	3.20
1000 °ซ – 200 ชั่วโมง	489	4.00
1000 °ซ – 400 ชั่วโมง	451	3.75
1000 °ซ – 600 ชั่วโมง	416	3.20
1000 °ซ – 800 ชั่วโมง	462	3.60
1000 °ซ – 1000 ชั่วโมง	459	3.75

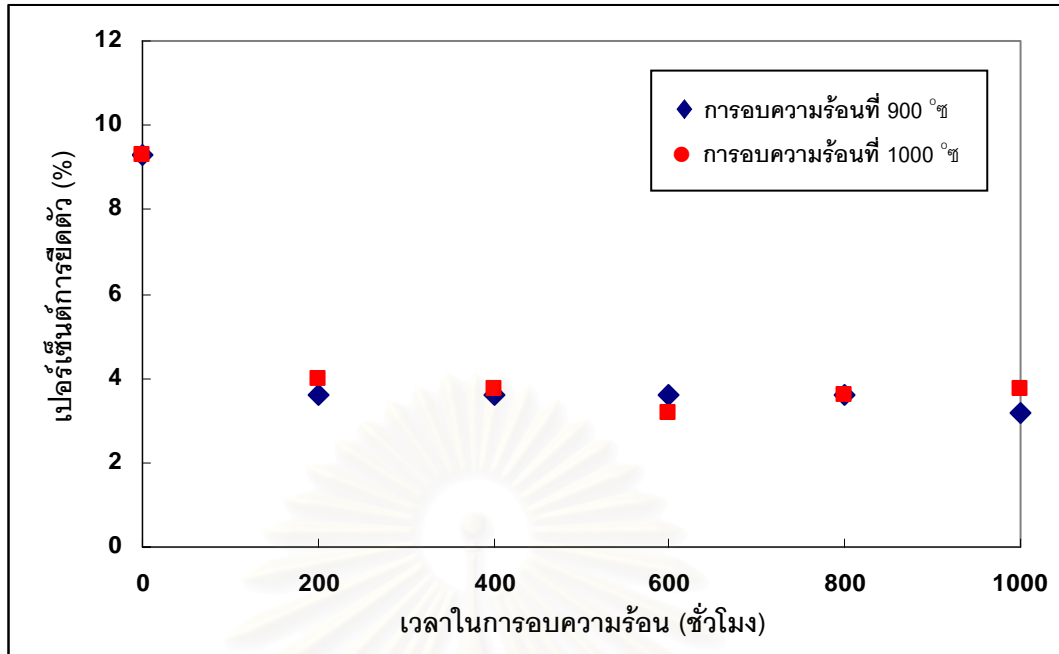
รูปที่ 4.25 แสดงความเค้นแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างในสภาพหล่อและตัวอย่างหลังอบความร้อน พบว่า ตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 200 ชั่วโมง และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 200 ชั่วโมง มีความเค้นแรงดึงสูงสุดและตัวอย่างหลังอบความร้อนมีความเค้นแรงดึงมากกว่าตัวอย่างในสภาพหล่อ เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคหลังอบความร้อนพบการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิวติยภูมินาขนาดเล็กในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ เนื่องจากตะกอนคาร์ไบด์ทิวติยภูมิที่มีขนาดเล็กจะทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) จึงเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และคาร์ไบด์ทิวติยภูมิที่ตกตะกอนที่ขอบเกรนสามารถป้องกันการเคลื่อนที่ของเกรน [26] เมื่อระยะเวลาอบความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความเค้นแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งความเค้นแรงดึงสูงสุด

อาจมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะปริมาณการตกตะกอนใหม่ของคาร์ไบด์ ทุติยภูมิมีแนวโน้มคงที่หรือลดลง และคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดโตขึ้นจากการรวมตัวของคาร์ไบด์ ทุติยภูมินขนาดเล็ก (Agglomerate) ส่งผลทำให้มีปริมาณอนุภาคคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่สามารถ ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันลดลง

การทดสอบแรงดึงของตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 600 ชั่วโมง และตัวอย่างหลัง อบที่ 1000 °ซ เวลา 600 ชั่วโมง พบว่ามีความเค้นแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกับตัวอย่างในสภาพหล่อ จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างตามที่กล่าวมานี้ พบว่ามีลักษณะคล้ายกับตัวอย่าง หลังอบที่ 900 °ซ และตัวอย่างหลังอบที่ 1000 °ซ ที่มีระยะเวลาการอบแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ ความเค้นแรงดึงสูงสุดน่ามีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างหลังอบความร้อนที่มีเวลาต่าง ๆ กัน รูปที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวอย่างในสภาพหล่อ [26] และตัวอย่างหลังอบความร้อน (ตารางที่ 4.10) พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวอย่างในสภาพหล่อ [26] มีค่ามากกว่าตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ ที่มีเวลาอบความร้อนต่างๆกัน และตัวอย่างหลังการอบความร้อนตามที่ กล่าวมานี้มีแนวโน้มคงที่เมื่อมีเวลาในการอบความร้อนเพิ่มขึ้น จากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืด ตัวกับโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 4.13(ก)-(ข) และรูปที่ 4.14(ก)-(ข)) แสดงว่าการตกตะกอนของ คาร์ไบด์ทุติยภูมิในเนื้อพื้นส่งผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง แต่อัตราการยืดตัวของเนื้อ พื้นมีค่าลดลง



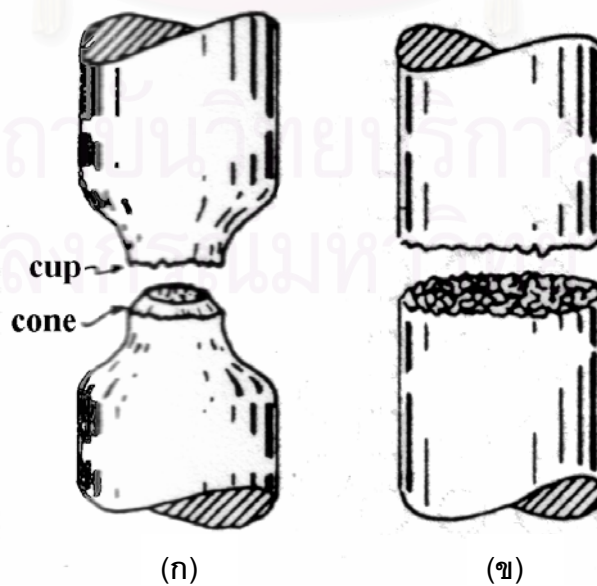
รูปที่ 4.25 ความเค้นแรงดึงสูงสุดของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ [26] และหลังการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1000 °ซ



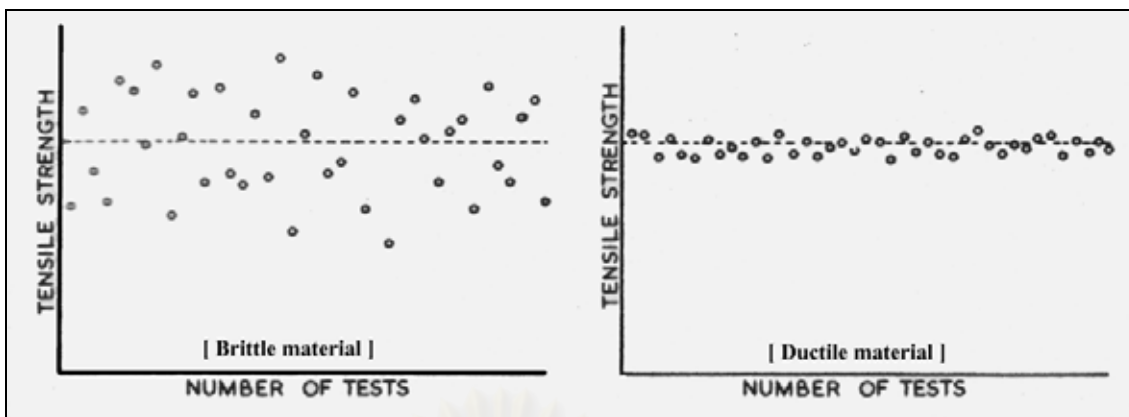
รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของโลหะผสมหล่อเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ [26] และหลังการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C และ 1000 °C



รูปที่ 4.27 ตัวอย่างหลังทดสอบแรงดึงของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ ตามมาตรฐาน ASTM E 8M

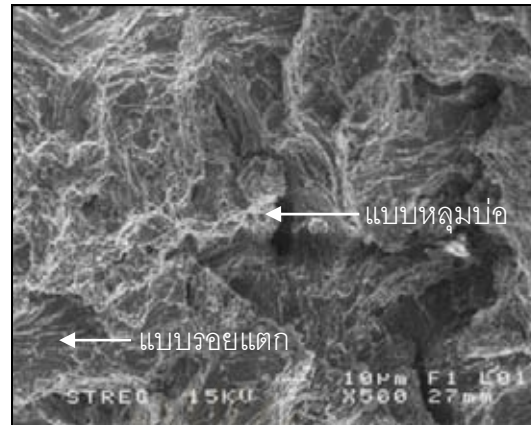


รูปที่ 4.28 ตัวอย่างหลังทดสอบแรงดึงระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ [21]

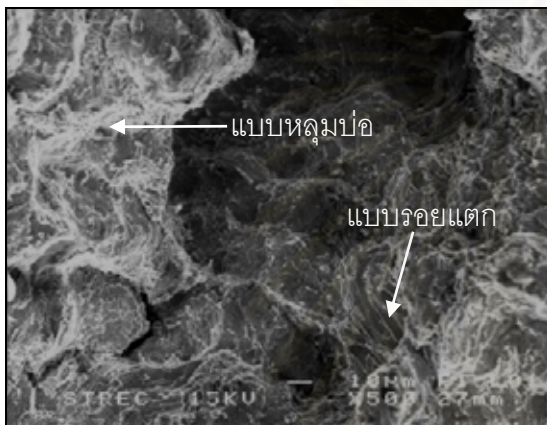


รูปที่ 4.29 ความแปรผันของผลการทดสอบความแข็งแรงด้วยแรงดึงกับจำนวนในการทดสอบของวัสดุเปราะและวัสดุเหนียว [21]

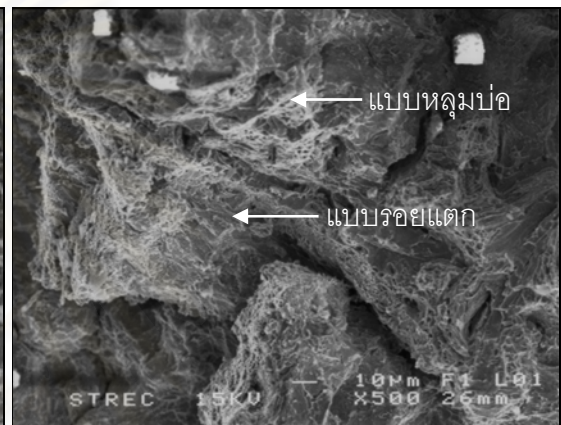
หลังทดสอบแรงดึงของตัวอย่างในสภาพหล่อ พบลักษณะผิวขรุขระและไม่มีคอคอด ดังแสดงในรูปที่ 4.27 เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวอย่างหลังการทดสอบแรงดึงระหว่างวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ [21] พบว่าวัสดุเหนียว (รูปที่ 4.28(ก)) มีการยืดตัวของเนื้อวัสดุอย่างชัดเจน และพบคอคอด หรือ cup and cone ตรงบริเวณพื้นที่ตัดขวาง (Cross-section) และวัสดุเปราะ (รูปที่ 4.28(ข)) เกิดการเปลี่ยนรูปเพียงเล็กน้อยและมีการแตกหักอย่างรวดเร็ว โดยบริเวณพื้นที่ตัดขวางมีขนาดใกล้เคียงกับตัวอย่างก่อนทดสอบแรงดึง [33,34,35] จากการสังเกตตัวอย่างในสภาพหล่อหลังทดสอบแรงดึงปรากฏว่ามีพฤติกรรมคล้ายกับวัสดุเปราะ แต่ในความเป็นจริงโลหะเป็นวัสดุที่แสดงพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียวมากกว่าวัสดุเปราะ รูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของตัวอย่างในสภาพหล่อและตัวอย่างหลังอบความร้อน พบว่ามีความสอดคล้องกับความแปรผันการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.29 กล่าวคือวัสดุเปราะมีความแปรผันของความเค้นแรงดึงมากกว่าวัสดุเหนียว จึงทำให้ความเค้นแรงดึงของวัสดุเปราะอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากกว่า ดังนั้นในทางปฏิบัติควรต้องมีตัวอย่างทดสอบเป็นจำนวนมากเพื่อให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แต่การทดลองจริงพบว่ามีจำนวนตัวอย่างเพียงชิ้นเดียวต่อเงื่อนไขการอบความร้อน อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบได้ เนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้มีปริมาณจำกัดและราคาแพง ดังนั้นการวิเคราะห์การแตกหักด้วยวิธีแฟร็กโตกราฟฟีเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนผลการทดสอบแรงดึงและยืนยันพฤติกรรมการแตกหักของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและหลังอบความร้อน



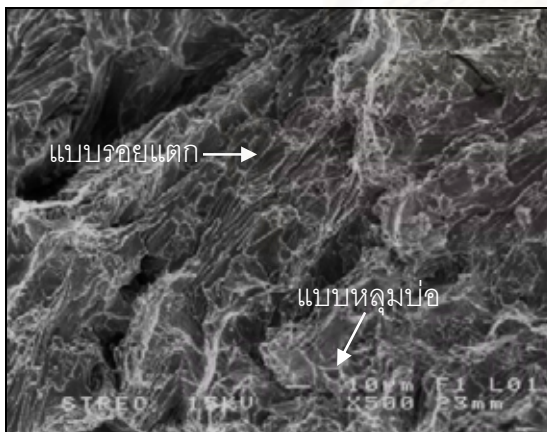
(ก) สภาพหล่อ



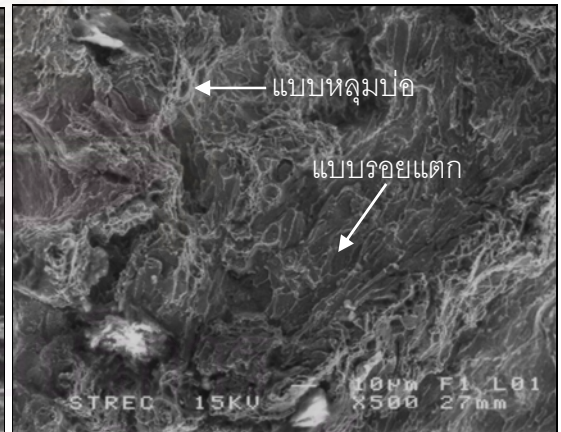
(ข) หลังอบที่ 90 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



(ค) หลังอบที่ 100 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง



(ง) หลังอบที่ 90 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง



(จ) หลังอบที่ 100 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง

รูปที่ 4.30 ลักษณะการแตกหักของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1000 °ซ

การวิเคราะห์การแตกหักของตัวอย่างในสภาพหล่อ (รูปที่ 4.30(ก)) พบลักษณะการแตกหักแบบหลุมบ่อ (Dimple) และแบบรอยแตก (Cleavage) ซึ่งการแตกหักแบบหลุมบ่อเป็นพฤติกรรมเฉพาะของวัสดุเหนียวและการแตกหักแบบรอยแตกเป็นพฤติกรรมเฉพาะของวัสดุเปราะ [22,24,25] จากลักษณะการแตกหักตามที่ได้กล่าวมานี้มีการแตกหักแบบวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะหรืออาจกล่าวว่าเป็นการแตกหักแบบผสม สำหรับตัวอย่างในสภาพหล่อหลังมีแรงดึงมากระทำทำให้เนื้อพื้นเกิดการยืดตัวออกเป็นช่องว่างขนาดเล็ก แล้วช่องว่างขนาดเล็กเกิดรวมตัวกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่แล้วยกตัวขึ้น (Pinching Off) เกิดเป็นพื้นผิวของหลุมบ่อ เนื่องจากวัสดุหลังทดสอบแรงดึงตรงบริเวณเนื้อพื้นออกสเทนไนต์มีอัตราการยืดตัวสูงกว่าคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ดังนั้นพื้นผิวของหลุมบ่อจึงเกิดจากการยืดตัวของเนื้อพื้น ส่วนการแตกหักแบบรอยแตกเกิดจากการขยายตัวของรอยแตก (Growing crack) ตามระนาบผลึกตรงบริเวณรอยต่อ (Interface) ระหว่างเนื้อพื้นกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์ลักษณะการแตกหักของตัวอย่างในสภาพหล่อพบว่าเป็นการแตกหักแบบผสม (Mixed-mechanism Fracture Mechanism) หรือการแตกหักแบบ Quasi-cleavage [22,24,25] ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง และหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง แสดงลักษณะการแตกหักแบบผสมเช่นเดียวกับตัวอย่างหลังอบที่ 900 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมงและหลังอบที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.32(ข)-(จ) ตามลำดับ จากการแตกหักของตัวอย่างตามที่กล่าวมานี้มีลักษณะการแตกหักคล้ายกับตัวอย่างในสภาพหล่อ คือ การแตกหักแบบหลุมบ่อและแบบรอยแตกผสมกัน เนื่องจากเนื้อพื้นออกสเทนไนต์มีอัตราการยืดตัวมากกว่าคาร์ไบด์ปฐมภูมิและคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กขึ้นแล้วมีการขยายตัวของช่องว่างเพิ่มขึ้นเกิดเชื่อมต่อกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ของเนื้อพื้น และเนื้อพื้นบริเวณผิวสัมผัสกับตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิทำให้ยกตัวขึ้นเป็นขอบผิวของหลุมบ่อ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเนื้อพื้นกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ หลังทดสอบแรงดึงทำให้เกิดการแตกหักแบบรอยแตกตามแนวระนาบผลึกของคาร์ไบด์ปฐมภูมิ การพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างในสภาพหล่อและตัวอย่างหลังอบความร้อนมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะการแตกหัก พบว่าตัวอย่างหลังอบความร้อนมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิกระจายตัวในเนื้อพื้นออกสเทนไนต์ ทำให้อัตราการยืดตัวของเนื้อพื้นมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของตัวอย่างในสภาพหล่อจึงมีค่ามากกว่าตัวอย่างหลังอบความร้อน อย่างไรก็ตามการแตกหักของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อและสภาพหลังอบความร้อนแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบผสมกันของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาผลของการอบความร้อนที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ เวลา 24, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ชั่วโมง ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตเนียมในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% สรุปได้ดังนี้

1. จากพื้นฐานของคาร์ไบด์ทิตเนียมสามารถยืนยันกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตเนียมตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami คือ ช่วงแรกมีค่า n อยู่ในช่วง 1.0 - 1.5 เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตเนียมแบบก้อนเหลี่ยมและช่วงที่สองมีค่า n อยู่ในช่วง 0.5 - 1.0 เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตเนียมแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก
2. คาร์ไบด์ทิตเนียมแบบก้อนเหลี่ยมและคาร์ไบด์ทิตเนียมแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอกเป็นคาร์ไบด์ชนิดเดียวกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ คือ โครเมียมคาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$
3. พบสารประกอบซิลิไซด์ประกอบด้วยธาตุผสมของซิลิคอน เหล็ก โครเมียม นิกเกิล และไนโอเบียม
4. ออกสเทนไนต์ คาร์ไบด์ปฐมภูมิ คาร์ไบด์ทิตเนียมแบบก้อนเหลี่ยม คาร์ไบด์ทิตเนียมแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก และสารประกอบซิลิไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic
5. การอบความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °ซ และ 1000 °ซ ในช่วงเวลา 24 และ 1000 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อปริมาณการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตเนียม
6. การตกตะกอนของคาร์ไบด์ทิตเนียมส่งผลทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าในสภาพหล่อ

รายการอ้างอิง

1. Lothongkum G, Ratanamahasakul S, Wangyao P. Effect of Heat Treatment on Dynamic Parameters of Secondary Carbide Precipitation in Centrifugally Cast Iron Base Superalloy. Acta Metallurgical Slovaca, Nov 2005, pp.54-60.
2. J.R. Davis, Heat-resistant Material, ASM Specialty Handbook, Ohio, 1999.
3. P. Iacombe, B. Baroux, G. Beranger, Stainless Steels, Les Editions de Physique France, 1993.
4. J.R. Davis, Stainless Steels, ASM Specialty Handbook, ASM International, USA, 1994.
5. John D. Verhoeven., Fundamentals of Physical Metallurgy. 1st Edition, John Wiley & Sons.Inc., Singapore,1975.
6. Matthew J. Donachie and Stephen J. Donachie., Superalloys a Technical Guide, 2nd Edition, ASM International, USA, 2002.
7. William F. Smith, Structure and Properties of Engineering Alloys, 2nd Edition. McGraw-Hill, Singapore, 1993.
8. Sidney H. Avner, Introduction to Physical Metallurgy, 2nd Edition, McGraw-Hill, Singapore, 1974.
9. Roger C. Reed., The Superalloys Fundamentals and Applications., 1st edition. Cambridge University Press, UK, 2006.
10. Chester T. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hagel, Superalloy II , 1st Edition, John Wiley & Sons, New York, 1987.
11. J.H. Westbrook and R.L.Fleischer., Intermetallic Compounds: Structural Application of Intermetallic Compounds, 1st Edition, John Wiley & Sons, Great Britain, 2000.
12. P.Marshall, Austenitic Stainless Steels Microstructure and Mechanical Properties, 1st Edition, Elsevier Applied Science Publishers, New York, 1984.
13. A. Wiengmoon, T. Chairuangri, A. Brown, R. Brydson, D.V. Edmonds, J.T.H. Pearce Microstructural and Crystallographical Study of Carbides in 30wt% Cr Cast Irons, Acta Materialia, 53, 2003, pp. 4143 - 4154.
14. บัญชา ธนบุญสมบัติ, การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน, พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น กรุงเทพมหานคร, มีนาคม 2544.

15. Gareth Thomas and Michael J. Goringe, Transmission Electron Microscopy of Materials, 1st edition. John Wiley & Sons, Inc., USA, 1979.
16. K.W. Andrews, D.J. Dyson, S.R. Keown, Interpretation of Electron Diffraction Patterns, 2nd Edition, Plenum Press, New York, USA, 1971.
17. ชัญชนา ธนชยานนท์ และคณะ, การประยุกต์ TEM ในงานด้านวัสดุศาสตร์และวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พ.ศ. 2546
18. Donald R. Askeland, The Science and Engineering of Materials, 3rd Edition, Chapman & Hall, Oxford, Great Britain, 1996.
19. Raymond A. Higgins, Engineering Metallurgy (Part 1: Applied Physical Metallurgy), 6th edition, ELBS (Education Low-Priced Books Scheme), England, 1993.
20. William F. Smith, Principles of Materials Science and Engineering, 4th edition, McGraw-Hill, Singapore, 1997.
21. J.C. Anderson, K.D. Leaver, R.D. Rawlings and J.M. Alexander, Materials Science, 4th edition, Chapman & Hall., Hong Kong, 1994.
22. Charlie R. Brooks and Ashok Choudhury, Metallurgical Failure Analysis, 1st Edition. McGraw-Hill, USA, 1993.
23. George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, SI Edition. McGraw-Hill, Singapore 1988.
24. ศิวะ พงศ์พิพัฒน์, การวิเคราะห์ความเสียหายในงานโลหะ (Failure Analysis of Metal), พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2537
25. David K. Felbeck and Anthony G. Atkins, Strength and Fracture of Engineering Solids, 2nd edition, Practice Hall, Inc., New Jersey, 1996.
26. สรวินทร์ รัตนมหาสกุล , ผลของการอบด้วยความร้อนต่อการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ โลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546
27. J.W. Christain, The Theory of Transformations in Metal and Alloys, 2nd Edition, Pergamon Press, Oxford, 1985.
28. S.D. Carpenter, D Carpenter, J.T.H. Pearce, XRD and electron microscope study of as-cast 26.6% chromium white iron microstructure., Materials Chemistry and Physics, Nov 13 2003, pp.32-40.

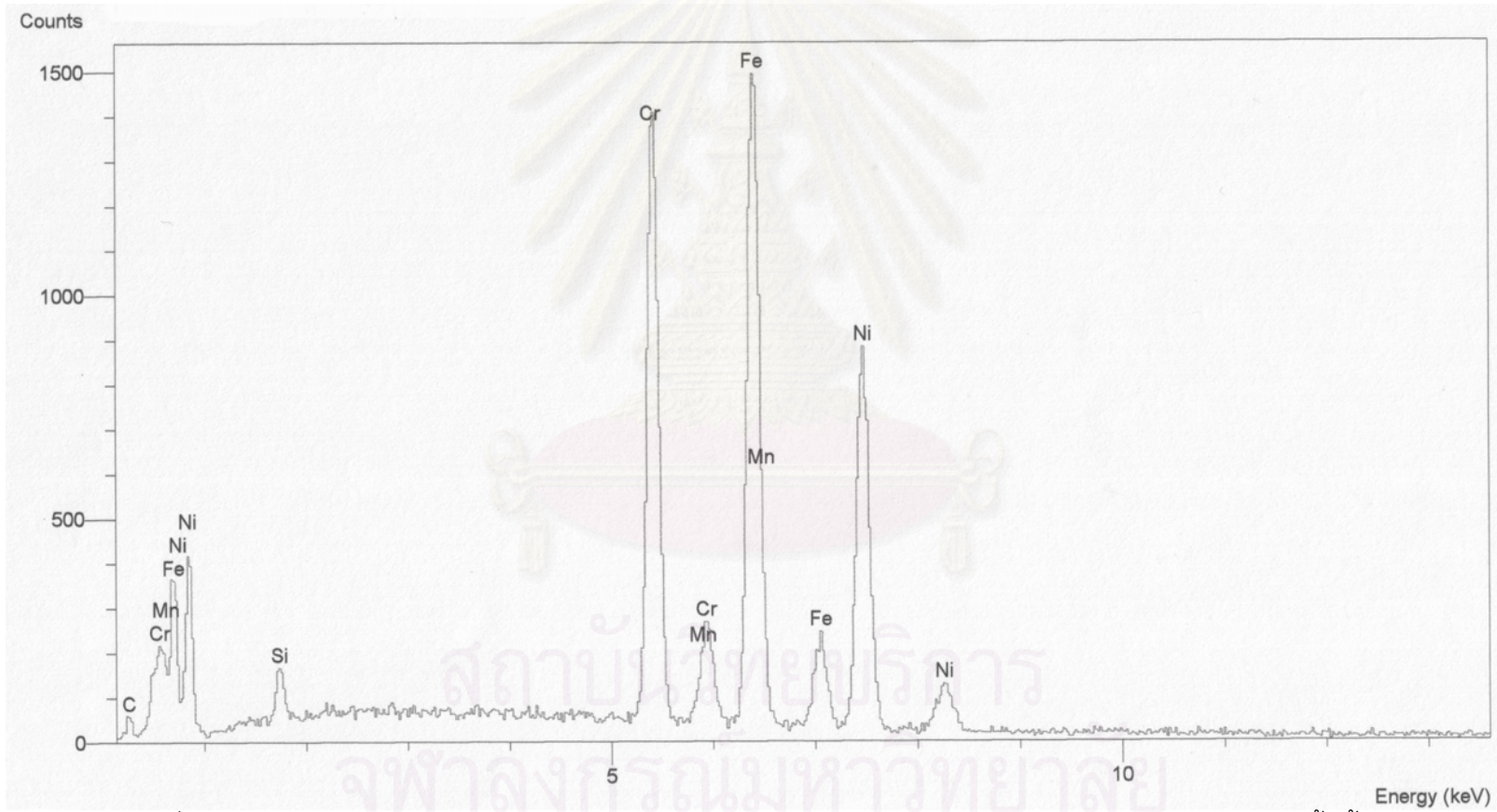
29. Q.Z. Chen, C.W. Thomas and D.M. Knowles, Characterisation of 20Cr32Ni1Nb alloys in as-cast and Ex-Service conditions by SEM, TEM and EDX., *Materials Science and Engineering A* 374, 2004, pp. 398-408.
30. Bogdan Piekarski , Effect of Nb and Ti additions on microstructure, and identification of precipitates in stabilized Ni-Cr cast austenitic steels., *Materials characterization*, Jul 22 2001, pp.181-186.
31. Luiz Henrique de Almeida, Andre Freitas Ribeiro and Iain Le May, Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes, *Materials Characterization*, Vol. 49, Issue 3, October 2002, pp. 219-229.
32. Bruce L. Bramfitt and Arlan O. Benscoter, *Metallographer's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels*, 1st ed, ASM International, 2002.
33. Gunter Petzow, *Metallographic Etching*, 2nd ed, Preparation and Etching Recipes for Metallic Materials – Iron, Steel and Cast Iron, ASM International, 1999.
34. P.J. Goodhew, *Thin Foil Preparation for Electron Microscopy*, 2nd edition, Elsevier Science Publishers, Great Britain, 1985, p.63.
35. ASTM E 562, Manual Point Counting by Volume Fractions.
36. ASTM E 8 M, Standard test methods for tension testing of metallic material [Metric].
37. J.D.H Donny and Helen M. Ondik, *Crystal Data Determinative Tables*, Volume1 : Organic Compounds 3rd edition, JCPDS, USA, 1972.
38. E.A. Kenik, P.J. Maziasz, R.W. Swindeman, J.Cervenka and D. May, Structure and phase stability in cast modified-HP austenite after long-term ageing. *Scripa Materialia* 49, 2003, pp. 117-122.



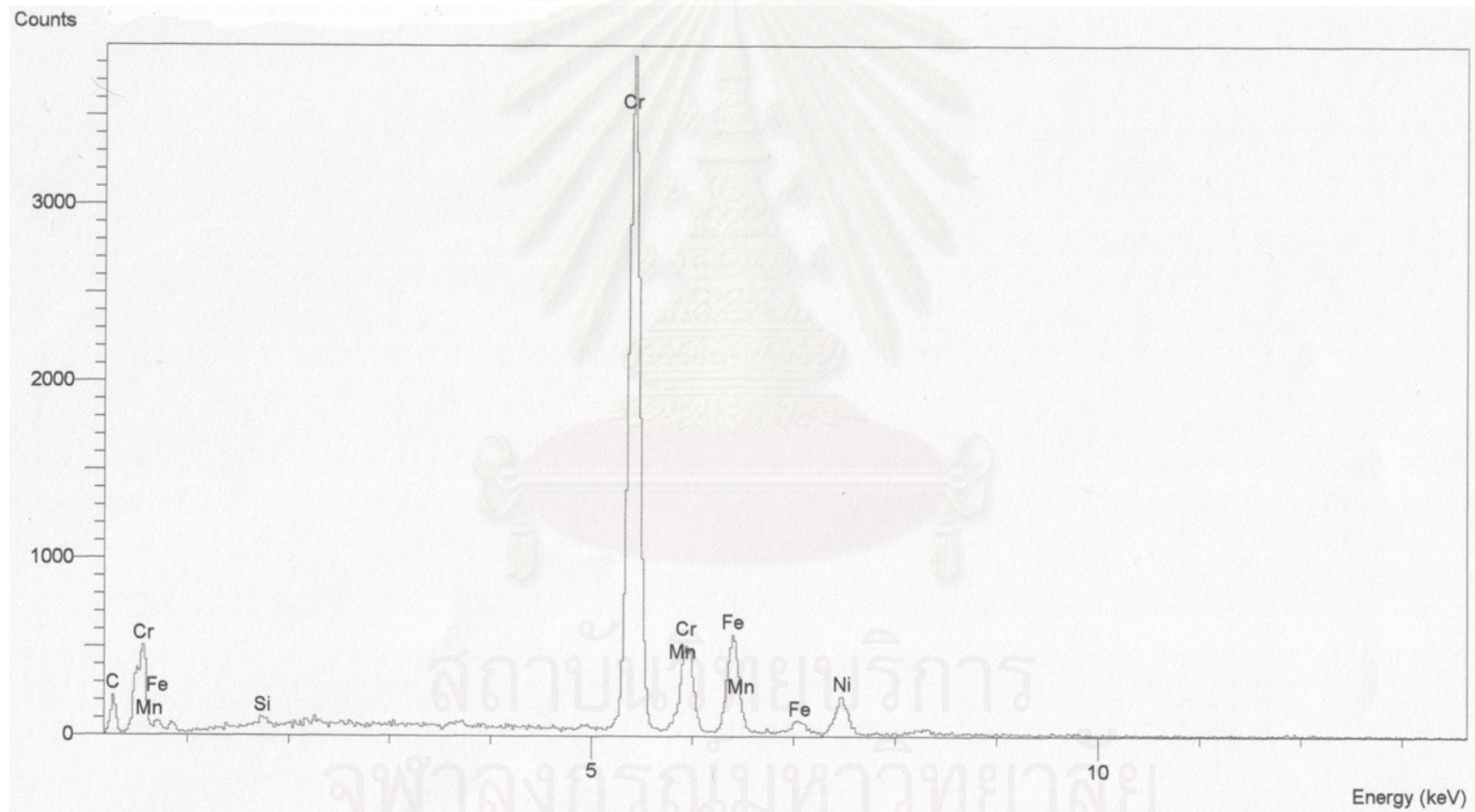
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

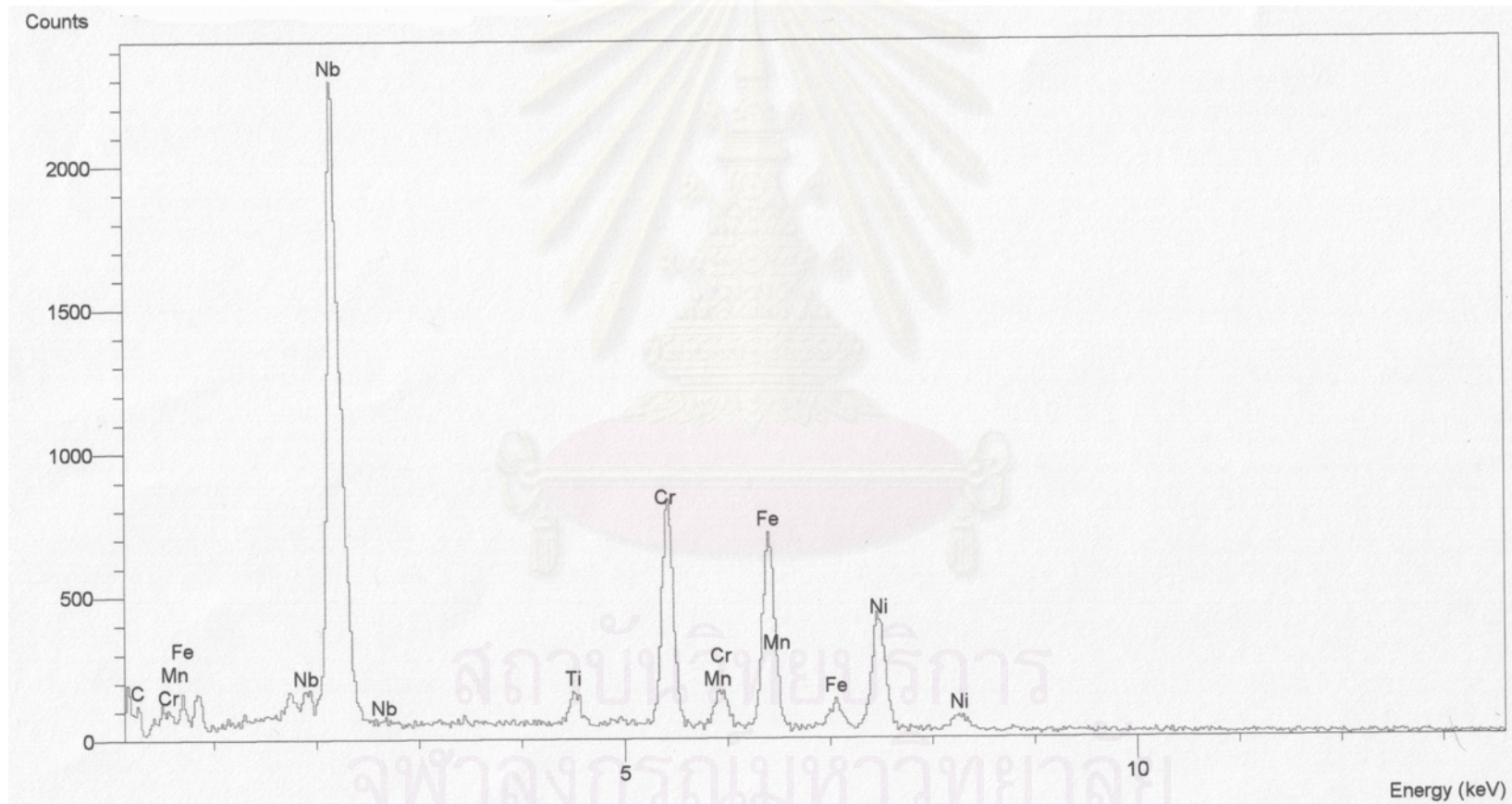
ภาคผนวก ก.



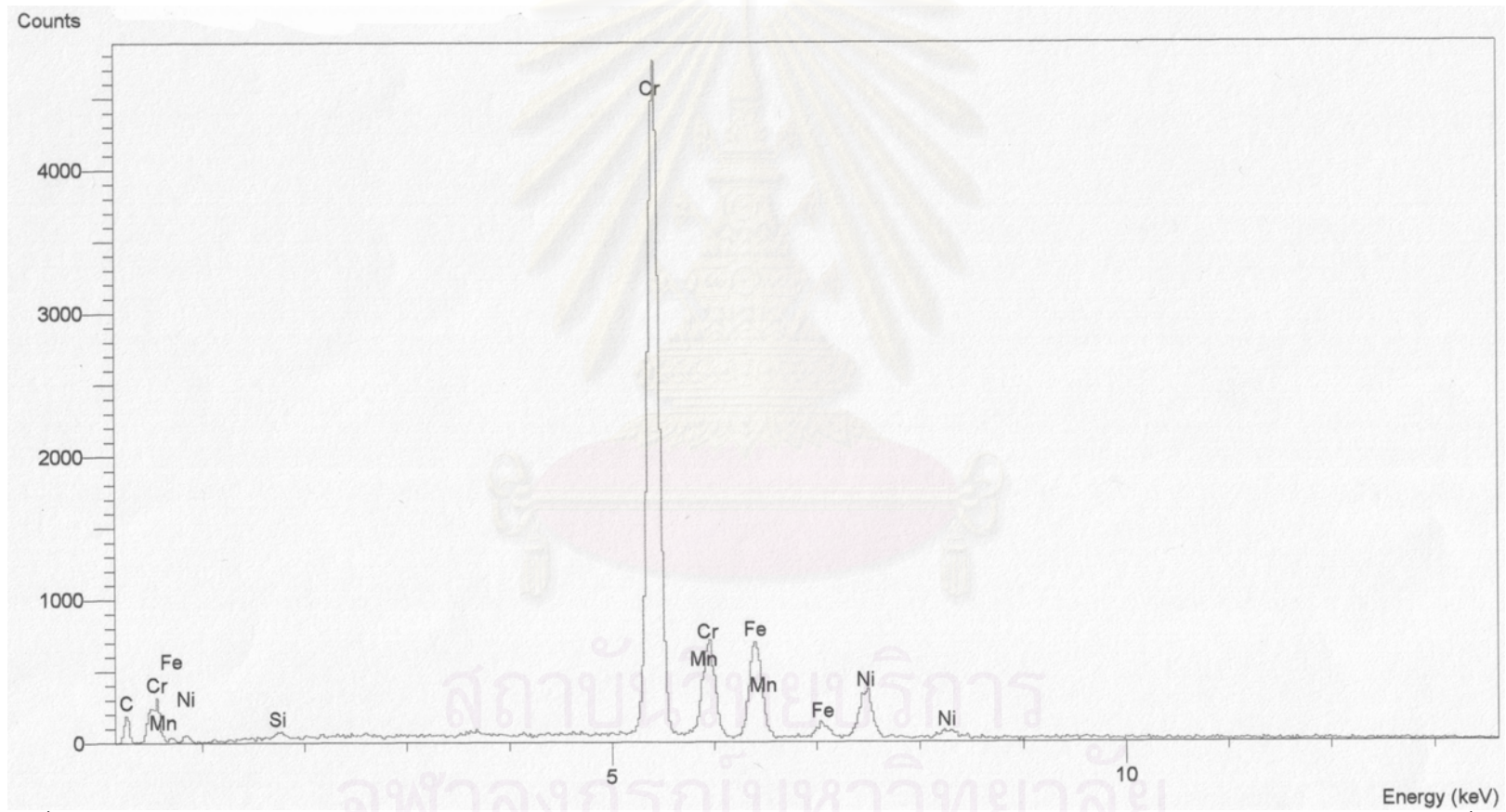
รูปที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดบริเวณเนื้อพื้น



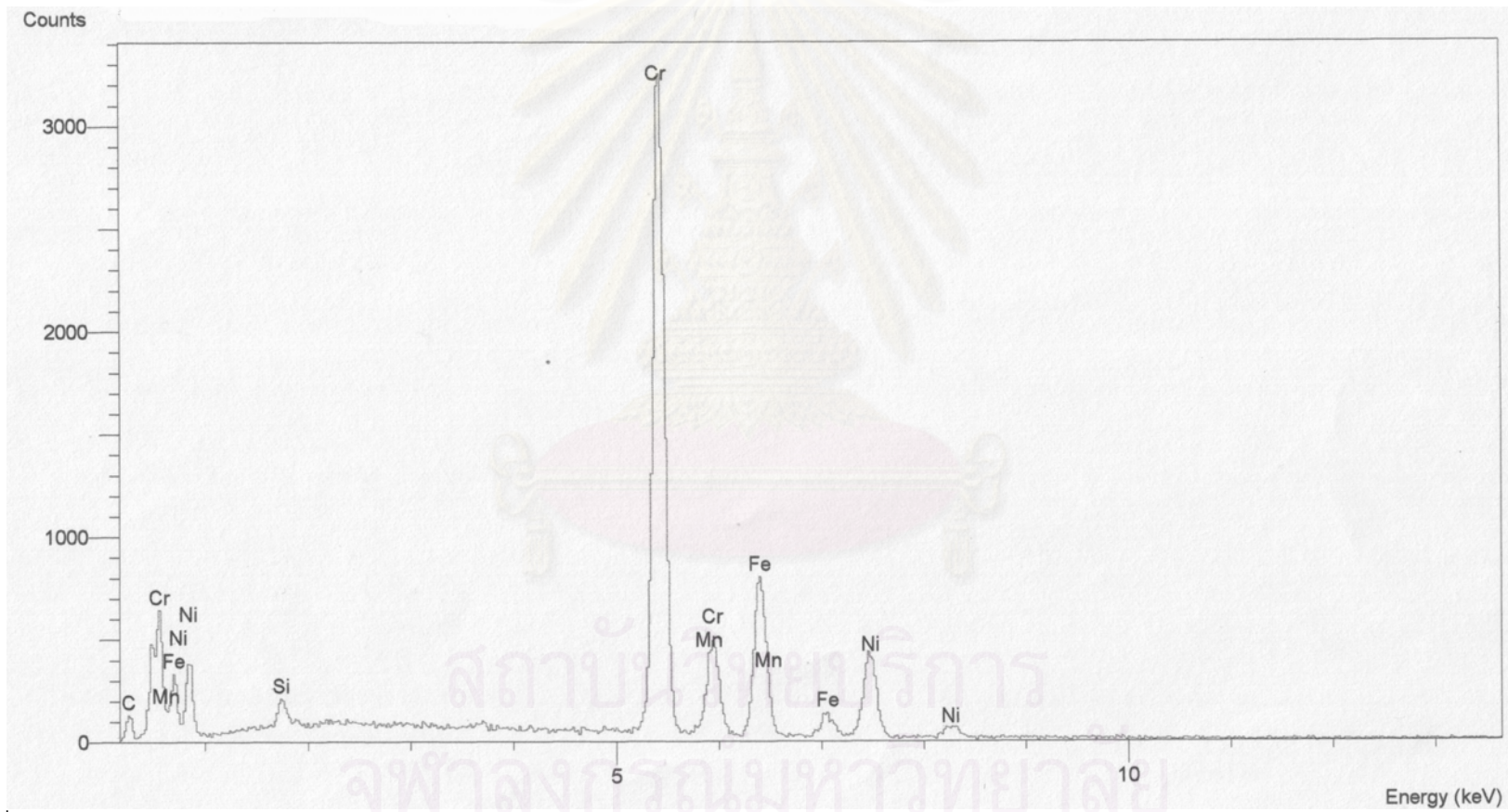
รูปที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิ



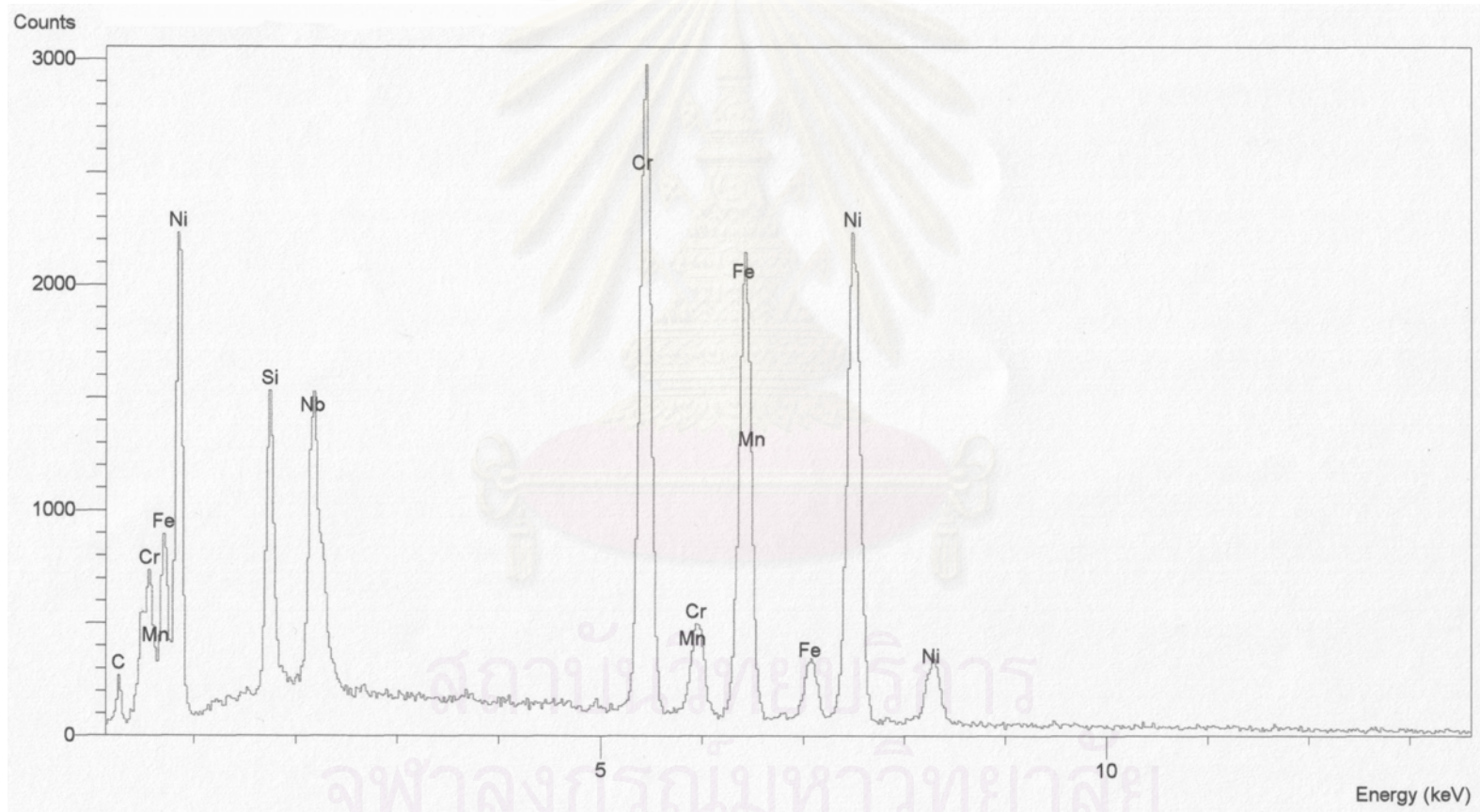
รูปที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในล่องจูลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกวาดบริเวณไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์



รูปที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในห้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม



รูปที่ ก.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดบริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก



รูปที่ ก.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดบริเวณสารประกอบซิลิไซด์

ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ

เฟส	การทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
		Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	ครั้งที่ 1	38.98	34.71	23.76	1.31	1.24	-	-
	ครั้งที่ 2	37.87	33.89	24.34	2.06	1.84	-	-
	ครั้งที่ 3	37.01	35.39	23.11	2.57	1.92	-	-
	ค่าเฉลี่ย	37.95	34.66	23.74	1.98	1.67	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	ครั้งที่ 1	18.93	8.03	72.14	0.9	-	-	-
	ครั้งที่ 2	17.32	9.19	73	0.49	-	-	-
	ครั้งที่ 3	18.28	9.44	71.59	0.69	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	18.18	8.89	72.24	0.69	-	-	-
ไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์	ครั้งที่ 1	18.67	16.43	15.59	0.66	0.96	45.90	1.79
	ครั้งที่ 2	18.12	16.35	15.93	1.37	1.03	44.66	2.54
	ครั้งที่ 3	17.86	15.67	16.51	0.95	0.87	46.21	1.93
	ค่าเฉลี่ย	18.22	16.15	16.01	0.99	0.95	45.59	2.09

ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบความร้อนที่ 900 °ซ 24 ชั่วโมง

เฟส	การทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
		Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	ครั้งที่ 1	39.75	33.10	22.71	2.40	2.04	-	-
	ครั้งที่ 2	39.02	34.87	22.56	2.07	1.48	-	-
	ครั้งที่ 3	38.39	34.37	23.01	2.34	1.89	-	-
	ค่าเฉลี่ย	39.05	34.12	22.76	2.27	1.80	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	ครั้งที่ 1	17.84	9.95	71.58	0.63	-	-	-
	ครั้งที่ 2	18.33	10.47	70.66	0.54	-	-	-
	ครั้งที่ 3	18.14	10.51	70.88	0.47	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	18.10	10.31	71.04	0.55	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	ครั้งที่ 1	13.72	9.45	75.25	1.58	-	-	-
	ครั้งที่ 2	14.33	10.47	73.82	1.38	-	-	-
	ครั้งที่ 3	14.64	9.54	74.32	1.50	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	14.23	9.82	74.46	1.49	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม - ทรงกระบอก	ครั้งที่ 1	17.24	12.4	68.01	1.15	1.2	-	-
	ครั้งที่ 2	18.56	11.88	67.74	1.01	0.81	-	-
	ครั้งที่ 3	17.36	10.49	69.70	1.3	1.15	-	-
	ค่าเฉลี่ย	17.72	11.59	68.48	1.15	1.05	-	-
ไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์	ครั้งที่ 1	20.18	14.50	13.29	1.17	1.05	48.02	1.79
	ครั้งที่ 2	18.35	15.74	12.88	1.59	0.95	48.14	2.35
	ครั้งที่ 3	18.61	14.63	14.02	1.54	1.36	47.69	2.15
	ค่าเฉลี่ย	19.05	14.96	13.40	1.43	1.12	47.95	2.10

ตารางที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบความร้อนที่ 1000 °ซ 24 ชั่วโมง

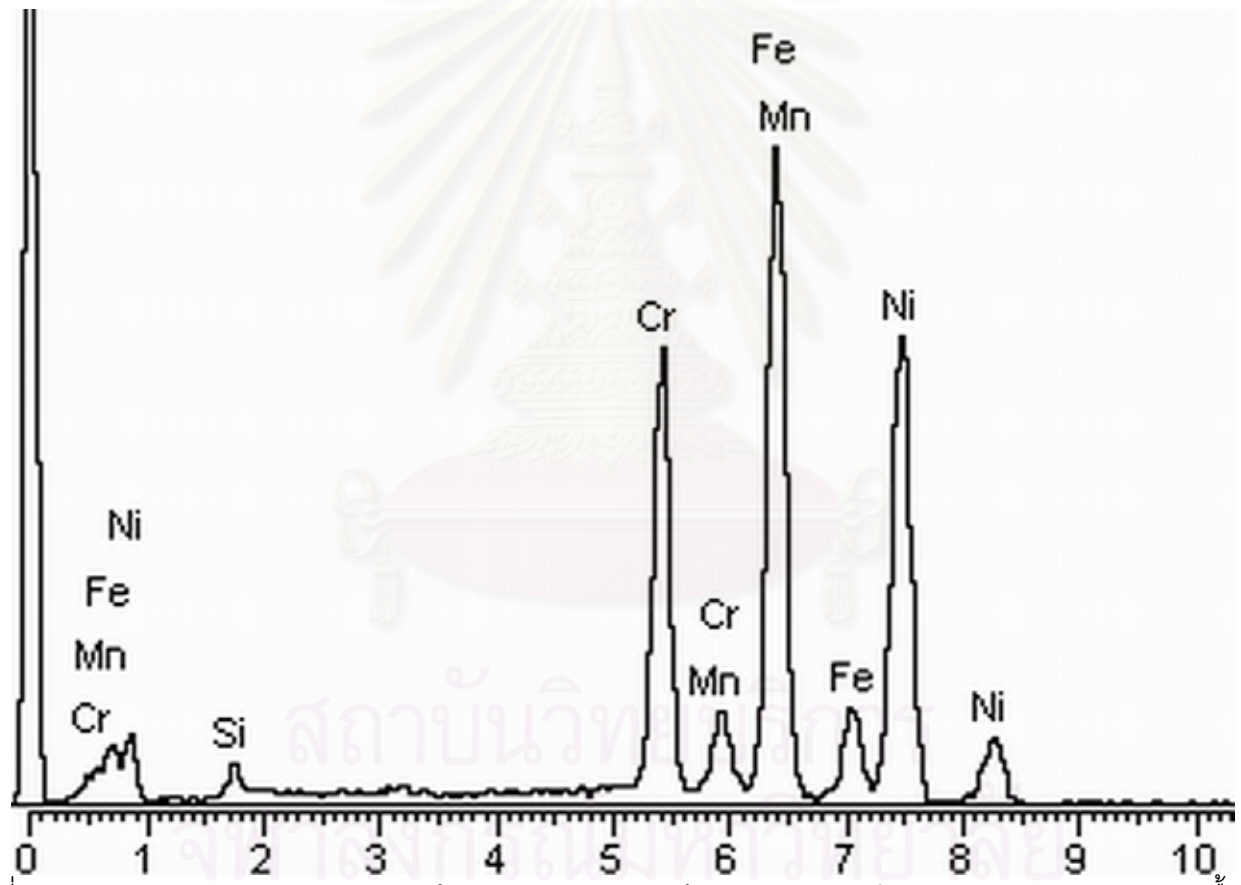
เฟส	การทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
		Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	ครั้งที่ 1	38.87	33.42	22.92	2.98	1.81	-	-
	ครั้งที่ 2	39.55	32.57	22.68	2.84	2.36	-	-
	ครั้งที่ 3	38.91	32.69	23.07	2.81	2.52	-	-
	ค่าเฉลี่ย	39.11	32.89	22.89	2.88	2.23	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	ครั้งที่ 1	18.05	10.02	70.75	1.18	-	-	-
	ครั้งที่ 2	17.68	11.08	70.29	0.95	-	-	-
	ครั้งที่ 3	17.14	9.96	72.03	0.87	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	17.62	10.35	71.02	1.00	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	ครั้งที่ 1	16.32	9.79	72.61	1.28	-	-	-
	ครั้งที่ 2	15.05	9.62	73.42	1.91	-	-	-
	ครั้งที่ 3	15.47	10.11	72.80	1.62	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	15.61	9.84	72.94	1.60	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม - ทรงกระบอก	ครั้งที่ 1	15.75	11.13	71.16	0.94	1.02	-	-
	ครั้งที่ 2	16.51	12.08	69.17	0.87	1.37	-	-
	ครั้งที่ 3	18.38	10.04	69.18	0.72	1.68	-	-
	ค่าเฉลี่ย	16.88	11.08	69.84	0.84	1.36	-	-
ไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์	ครั้งที่ 1	18.75	12.08	13.29	2.10	1.05	49.89	2.84
	ครั้งที่ 2	18.21	13.86	13.55	1.54	0.95	49.70	2.19
	ครั้งที่ 3	19.04	13.63	12.02	2.24	1.36	49.07	2.64
	ค่าเฉลี่ย	18.66	13.19	12.95	1.96	1.12	49.55	2.56

ตารางที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบความร้อนที่ 900 °ซ 1000 ชั่วโมง

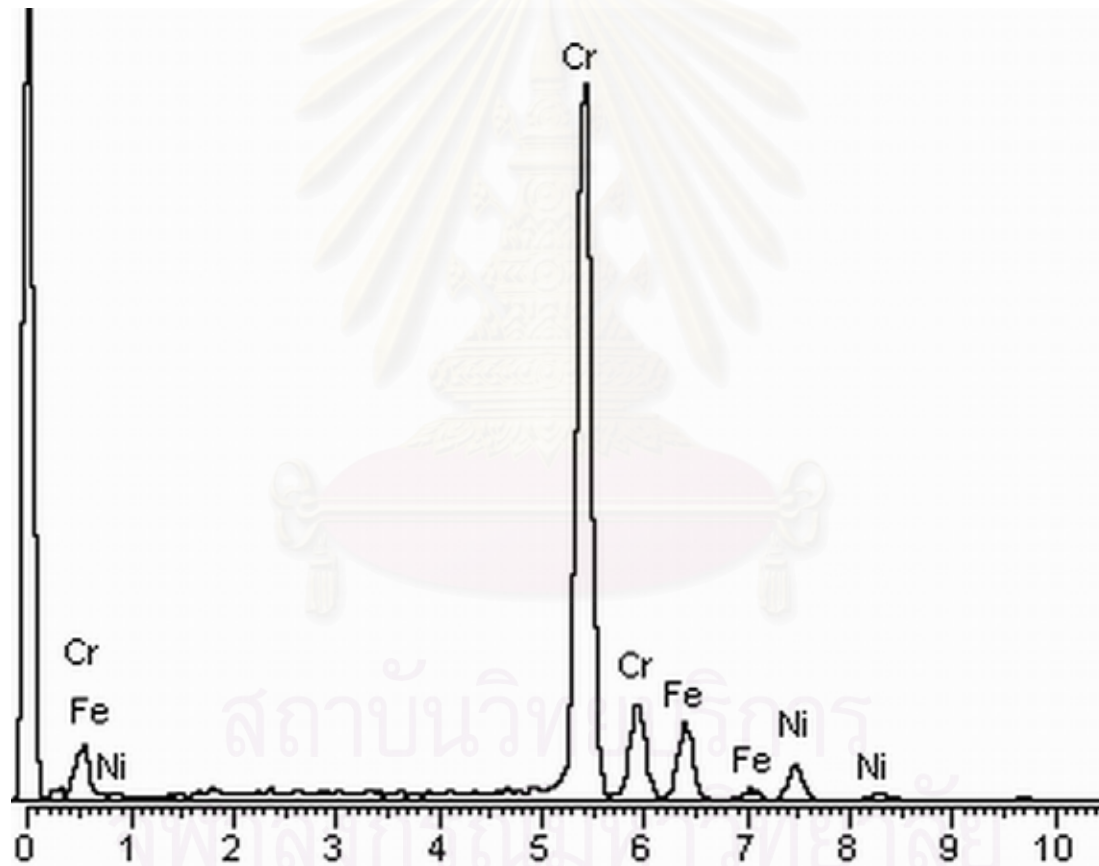
เฟส	การทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
		Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	ครั้งที่ 1	39.96	32.92	24.45	1.04	1.63	-	-
	ครั้งที่ 2	40.05	31.24	25.61	1.39	1.71	-	-
	ครั้งที่ 3	38.73	32.60	25.12	1.55	2.00	-	-
	ค่าเฉลี่ย	39.58	32.25	25.06	1.33	1.78	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	ครั้งที่ 1	18.42	9.59	71.04	0.95	-	-	-
	ครั้งที่ 2	18.22	10.07	70.63	1.08	-	-	-
	ครั้งที่ 3	19.01	8.05	71.62	1.32	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	18.55	9.24	71.10	1.12	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	ครั้งที่ 1	13.51	9.48	76.37	0.64	-	-	-
	ครั้งที่ 2	14.64	9.95	74.7	0.71	-	-	-
	ครั้งที่ 3	11.55	7.72	79.95	0.78	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	13.23	9.05	77.01	0.71	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม - ทรงกระบอก	ครั้งที่ 1	17.2	10.56	71.25	0.99	-	-	-
	ครั้งที่ 2	17.94	9.87	71.46	0.73	-	-	-
	ครั้งที่ 3	19.01	10.1	70.12	0.77	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	18.05	10.18	70.94	0.83	-	-	-
สารประกอบซิลิไซด์	ครั้งที่ 1	26.95	16.27	24.68	2.71	1.10	23.62	4.67
	ครั้งที่ 2	25.72	19.04	21.19	3.08	1.57	24.19	5.21
	ครั้งที่ 3	31.18	17.31	19.20	2.43	1.35	23.82	4.71
	ค่าเฉลี่ย	27.95	17.54	21.69	2.74	1.34	23.88	4.86

ตารางที่ ก.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบความร้อนที่ 1000 °ซ 1000 ชั่วโมง

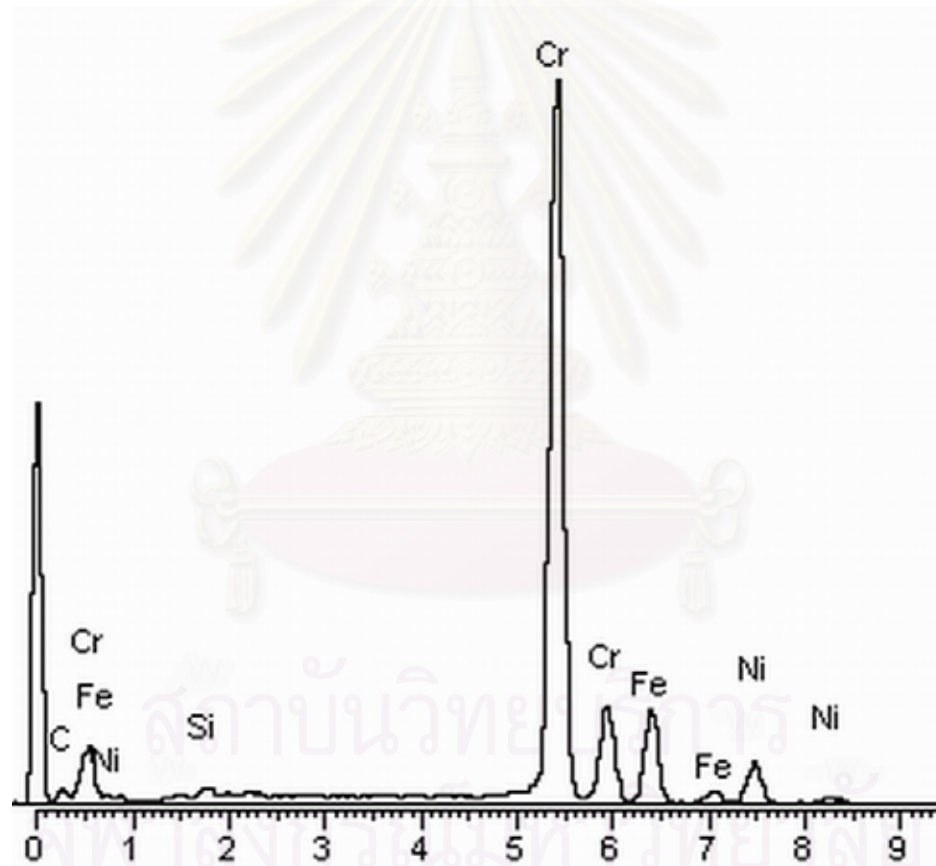
เฟส	การทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
		Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Nb	Ti
เนื้อพื้น	ครั้งที่ 1	41.79	30.81	25.24	0.95	1.21	-	-
	ครั้งที่ 2	40.48	33.01	23.85	1.16	1.5	-	-
	ครั้งที่ 3	39.56	32.93	24.12	1.55	1.84	-	-
	ค่าเฉลี่ย	40.61	32.25	24.40	1.22	1.52	-	-
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	ครั้งที่ 1	19.43	9.58	70.25	0.74	-	-	-
	ครั้งที่ 2	17.22	10.77	71.15	0.86	-	-	-
	ครั้งที่ 3	20.01	9.91	69.37	0.71	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	18.89	10.09	70.26	0.77	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	ครั้งที่ 1	12.56	6.26	80.16	1.02	-	-	-
	ครั้งที่ 2	14.37	7.01	77.2	1.42	-	-	-
	ครั้งที่ 3	14.47	5.48	78.95	1.10	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	13.80	6.25	78.77	1.18	-	-	-
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม - ทรงกระบอก	ครั้งที่ 1	21.08	10.56	67.31	1.05	-	-	-
	ครั้งที่ 2	19.62	11.27	68.10	1.01	-	-	-
	ครั้งที่ 3	20.20	9.74	69.15	0.91	-	-	-
	ค่าเฉลี่ย	20.30	10.53	68.19	0.99	-	-	-
สารประกอบซิลิไซด์	ครั้งที่ 1	27.45	17.67	20.10	3.86	1.70	23.97	5.25
	ครั้งที่ 2	30.35	15.27	22.31	3.54	1.09	22.31	5.13
	ครั้งที่ 3	28.78	18.53	23.05	3.93	2.15	18.61	4.95
	ค่าเฉลี่ย	28.86	17.16	21.82	3.78	1.657	21.63	5.11



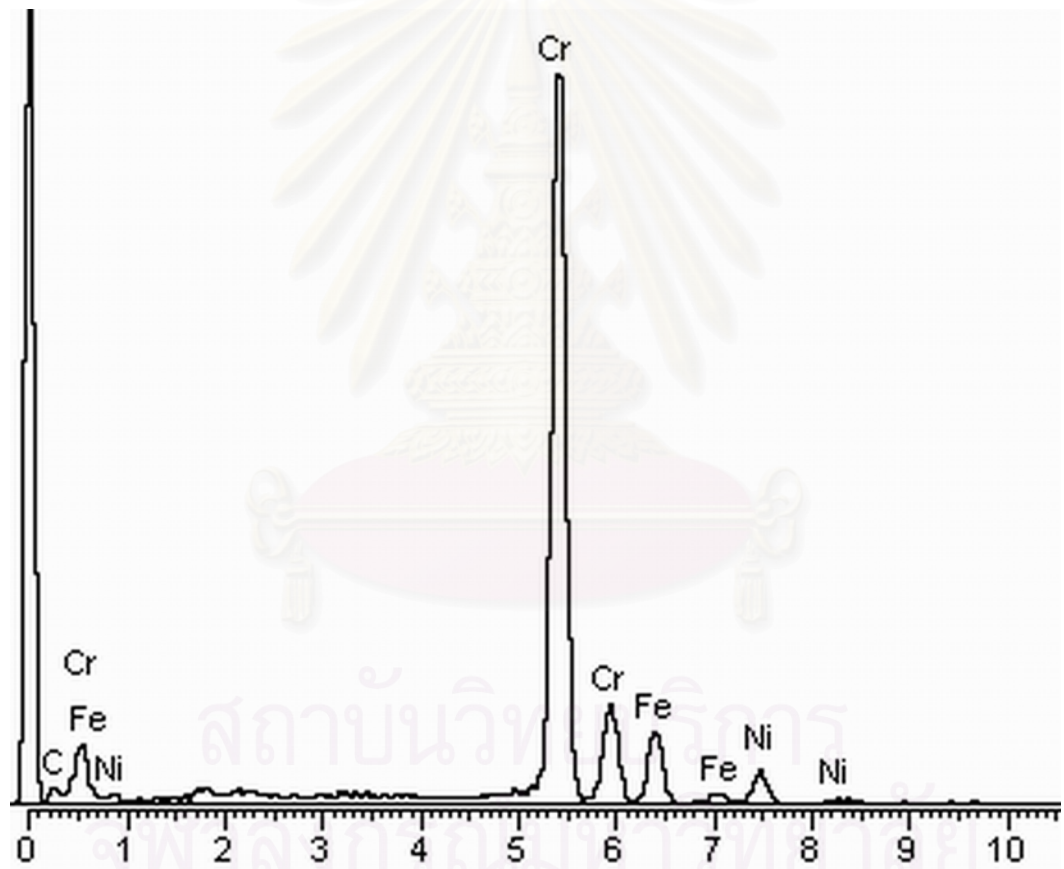
รูปที่ ก.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านบริเวณเนื้อพื้น



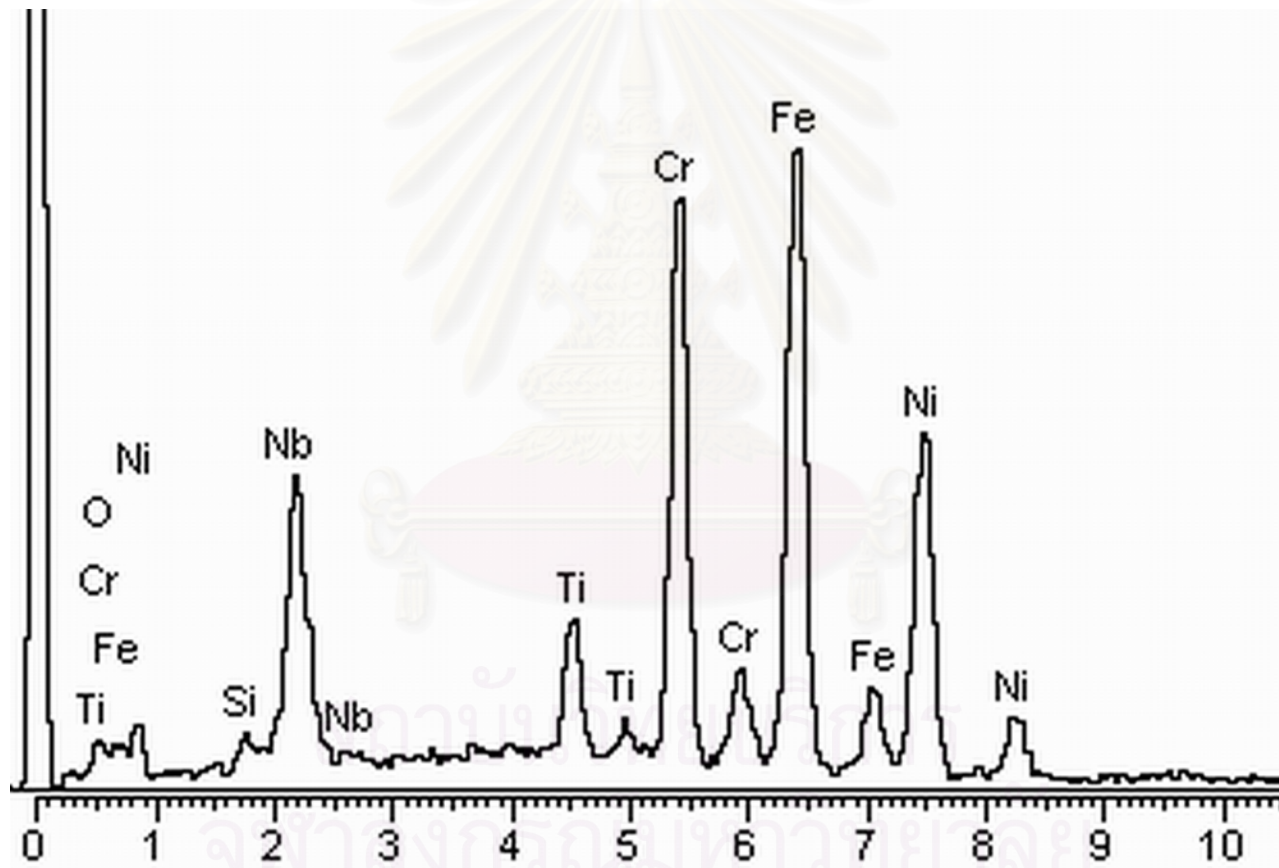
รูปที่ ก.8 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิ



รูปที่ ก.9 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านบริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม



รูปที่ ก.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านบริเวณคาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก



รูปที่ ก.11 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านบริเวณสารประกอบซิลิไซด์

ตารางที่ ก.6 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบความร้อนที่ 1000 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง

เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)										
	C	O	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	W	Total
เนื้อพื้น	-	-	1.06	-	23.83	1.44	41.71	31.96			100.0
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	1.71	-	0.14	-	84.53	-	10.03	3.58	-	-	100.0
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	1.35	-	0.58	-	82.26	-	11.49	4.32	-	-	100.0
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	1.78	-	0.32	-	84.18	-	9.52	3.97	-	-	100.0

ตารางที่ ก.7 การวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบความร้อนที่ 1000 °ซ เวลา 1000 ชั่วโมง

เฟส	ส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)										
	C	O	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	W	Total
เนื้อพื้น	-	-	0.95	-	24.49	1.53	40.11	32.92	-	-	100.0
คาร์ไบด์ปฐมภูมิ	1.33	-	-	-	84.01	-	9.61	5.05	-	-	100.0
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบก้อนเหลี่ยม	1.28	-	0.46	-	80.19	-	11.10	5.57	-	1.41	100.0
คาร์ไบด์ทุติยภูมิแบบรูปเข็ม-ทรงกระบอก	1.42	-	-	-	84.74	-	9.55	4.33	-	-	100.0
สารประกอบซิลิไซด์	-	0.99	0.88	5.33	24.89	-	30.44	19.39	18.08	-	100.0

ภาคผนวก ข.

Reference Pattern : 31-0619

Name: Iron (Austenite)
Wave Length: 1.54060 Å

d-value	Angle (2θ)	Rel .Int.	(h,k,l)
2.0800	43.473	100	1 1 1
1.8000	50.674	80	2 0 0
1.2700	74.679	50	2 2 0
1.0830	90.676	80	3 1 1
1.0370	95.944	50	2 2 2
0.9000	117.716	30	4 0 0

Reference Pattern : 35-0783

Name: Chromium Carbide (Cr₂₃C₆)
Wave Length: 1.54060 Å

d-value	Angle (2θ)	Rel .Int.	(h,k,l)
6.1481	14.395	1	1 1 1
3.2136	27.737	1	3 1 1
3.0772	28.993	1	2 2 2
2.6657	33.591	4	4 0 0
2.4452	36.724	1	3 3 1
2.3830	37.718	23	4 2 0
2.1761	41.461	24	4 2 2
2.0519	44.097	100	5 1 1
1.8840	48.266	20	4 4 0
1.8016	50.625	22	5 3 1
1.7766	51.388	12	6 0 0
1.6857	54.382	2	6 2 0
1.6260	56.552	2	5 3 3
1.6066	57.298	6	6 2 2
1.4930	62.120	1	5 5 1
1.4787	62.786	1	6 4 0
1.3326	70.622	2	8 0 0
1.2927	73.146	2	8 2 0
1.2560	75.654	12	8 2 2
1.2307	77.490	6	7 5 1
1.2227	78.096	15	6 6 2
1.1919	80.516	2	8 4 0
1.1698	82.367	4	9 1 1
1.1174	87.160	1	9 3 1
1.0878	90.157	6	8 4 4
1.0712	91.959	3	7 7 1
1.0452	94.945	1	10 2 0
1.0259	97.322	1	10 2 2

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การคำนวณค่าพารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter) จากรูปแบบการเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 900 °ซ เวลา 24 ชั่วโมง ดังนี้

$$a = d_{(h,k,l)} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

โดยที่ ... a คือ พารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter)

d_{hkl} คือ ค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม (hkl)

(h,k,l) คือ ระนาบของยอดในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การคำนวณพารามิเตอร์โครงผลึกที่ระนาบ (111) ของออสเทนไนต์และระนาบ (420) ของโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ดังนี้

- ยอดของออสเทนไนต์ที่ระนาบ (111) มีค่า d_{111} เท่ากับ 2.0681

$$\begin{aligned} a &= (2.0681) [1^2 + 1^2 + 1^2]^{1/2} \\ &= 3.5821 \text{ \AA} \end{aligned}$$

- ยอดของโครเมียมคาร์ไบด์ที่ระนาบ (420) มีค่า d_{420} เท่ากับ 2.3708

$$\begin{aligned} a &= (2.3708) [4^2 + 2^2 + 0^2]^{1/2} \\ &= 10.6012 \text{ \AA} \end{aligned}$$

จากข้อมูลของพารามิเตอร์โครงผลึกและ%ความคลาดเคลื่อนของออสเทนไนต์และโครเมียมคาร์ไบด์ คือ 3.595 Å และ 10.6599 Å ตามลำดับ ดังนี้

$$[(3.595 - 3.589) / 3.595] \times 100 = 0.167\%$$

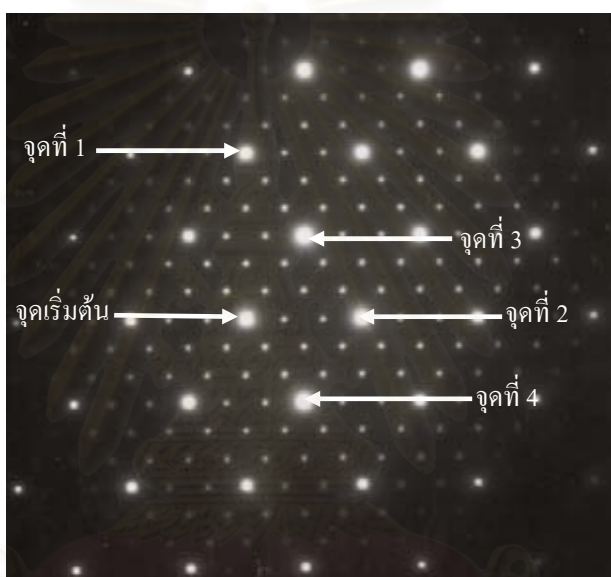
$$[(10.6599 - 10.6012) / 10.6599] \times 100 = 0.551\%$$

ภาคผนวก ง.

การคำนวณระนาบของผลึกและแกนโซนในรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณระนาบและแกนโซนของรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของเนื้อพื้นและคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยมของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลังอบที่ 1000°C 1000 ชั่วโมง

1. กำหนดจุดในรูปแบบการเลี้ยวเบนในส่วนที่เลือกไว้ R_{01} , R_{02} , R_{03} และ R_{04} ดังนี้



2. วัดระยะของเวกเตอร์ที่กำหนดไว้ในข้อที่ 1. และนำค่าคงที่ของกล้องมาคำนวณหาระยะระหว่างระนาบของจุดที่กำหนดไว้

$$d_{hkl} = \lambda L / R$$

โดยที่ ค่าคงที่ของกล้องคือ λL เท่ากับ $(0.0253 \text{ \AA}^{\circ}) (800 \text{ mm}) = 20.24 \text{ mm \AA}^{\circ}$
 $R_{01} = 16.0 \text{ mm}$, $R_{02} = 11.0 \text{ mm}$, $R_{03} = 9.5 \text{ mm}$ และ $R_{04} = 9.5 \text{ mm}$

$$d_{01} = 20.24 \text{ mm \AA}^{\circ} / 16.0 \text{ mm} \rightarrow d_{01} = 1.265 \text{ \AA}^{\circ}$$

$$d_{02} = 20.24 \text{ mm \AA}^{\circ} / 11.0 \text{ mm} \rightarrow d_{02} = 1.840 \text{ \AA}^{\circ}$$

$$d_{03} = 20.24 \text{ mm \AA}^{\circ} / 9.5 \text{ mm} \rightarrow d_{03} = 2.131 \text{ \AA}^{\circ}$$

$$d_{04} = 20.24 \text{ mm \AA}^{\circ} / 9.5 \text{ mm} \rightarrow d_{04} = 2.131 \text{ \AA}^{\circ}$$

3. นำค่า d_{01} , d_{02} , d_{03} และ d_{04} เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงที่มีค่าระหว่างระนาบใกล้เคียงกับระบบระนาบ (h,k,l) ใดๆ (หมายเหตุ ระบบระนาบ (h,k,l) สามารถสลับทั้งเครื่องหมายและตำแหน่งได้) และนำมาหาความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ในระนาบที่ได้กำหนดไว้

$$\mathbf{d}_{01} = 1.265 \text{ \AA} \rightarrow (2 \ 2 \ 0)$$

$$\mathbf{d}_{02} = 1.840 \text{ \AA} \rightarrow (0 \ 0 \ 2)$$

$$\mathbf{d}_{03} = 2.131 \text{ \AA} \rightarrow (1 \ 1 \ 1)$$

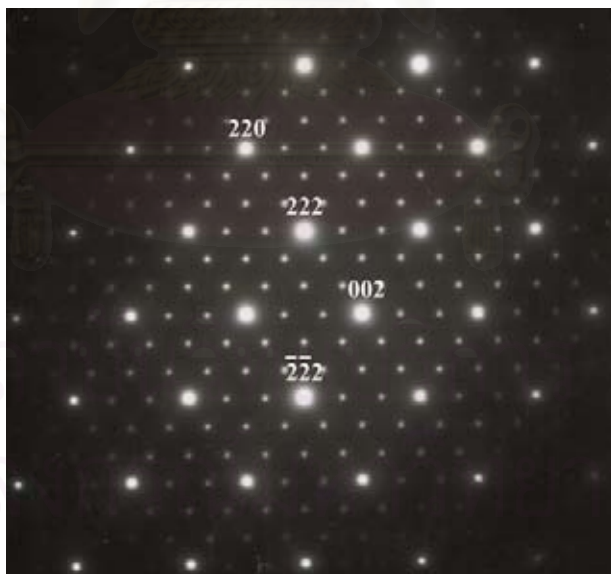
$$\mathbf{d}_{04} = 2.131 \text{ \AA} \rightarrow (1 \ 1 \ 1)$$

จากความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ ดังนี้

$$\mathbf{d}_{01} + \mathbf{d}_{02} \rightarrow \mathbf{d}_{03} \text{ คือ } (2 \ 2 \ 0) + (0 \ 0 \ 2) \rightarrow (2 \ 2 \ 2)$$

$$\text{และ } -\mathbf{d}_{01} + \mathbf{d}_{02} \rightarrow \mathbf{d}_{04} \text{ คือ } (-2 \ -2 \ 0) + (0 \ 0 \ 2) \rightarrow (-2 \ -2 \ 2)$$

4. วัดมุมระหว่างระนาบ (h_1, k_1, l_1) กับ (h_2, k_2, l_2) จากจุดที่กำหนดไว้ในรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนและคำนวณมุมระหว่างระนาบตามที่ได้กำหนดไว้ ดังนี้



สมการการคำนวณมุมระหว่างระนาบที่กำหนดไว้ ดังนี้

$$\cos \theta = \left[\frac{(h_1 \ h_2) + (k_1 \ k_2) + (l_1 \ l_2)}{\sqrt{[(h_1)^2 + (k_1)^2 + (l_1)^2] \cdot [(h_2)^2 + (k_2)^2 + (l_2)^2]}} \right]$$

แทนค่า (h_1, k_1, l_1) กับ (h_2, k_2, l_2) ด้วย $(2\ 2\ 0)$ และ $(2\ 2\ 2)$ ตามลำดับ ในสมการการคำนวณมุม จะได้มุมระหว่างระนาบ $(2\ 2\ 0)$ กับ $(2\ 2\ 2)$ คือ 35.2644° เป็นต้น

5. การตรวจสอบมุมระหว่างระนาบจากการวัดจริงกับการคำนวณ ดังนี้

มุมระหว่างระนาบ	วัดจริง	การคำนวณ	ผลต่างของมุม
$(2\ 2\ 0) \wedge (2\ 2\ 2)$	36.0°	35.2644°	0.7356°
$(2\ 2\ 0) \wedge (0\ 0\ 2)$	90.0°	90.0°	0.0°
$(2\ 2\ 0) \wedge (-2\ -2\ 2)$	143.5°	144.7356°	1.2356°

ดังนั้น ผลต่างระหว่างมุมที่วัดได้จริงกับมุมที่ได้จากการคำนวณมีค่าผลต่างไม่เกิน ± 2 องศา ทำให้ระนาบที่กำหนดไว้เป็นการระบุระนาบที่ถูกต้อง

6. คำนวณแกนไซน $[u, v, w]$ ของระนาบระหว่าง (h_1, k_1, l_1) กับ (h_2, k_2, l_2) ด้วย $(2\ 2\ 0)$ กับ $(2\ 2\ 2)$

$$u = k_1 l_2 - k_2 l_1 \rightarrow (2)(2) - (2)(0) = 2$$

$$v = l_1 h_2 - l_2 h_1 \rightarrow (0)(2) - (2)(2) = -2$$

$$w = h_1 k_2 - h_2 k_1 \rightarrow (2)(2) - (2)(2) = 0$$

ดังนั้น แกนไซนของระนาบระหว่าง $(2\ 2\ 0)$ กับ $(2\ 2\ 2)$ คือ $[2, -2, 0]$ หรือ $[1, 1, 0]$

7. คำนวณค่าพารามิเตอร์โครงผลึกของเนื้อพื้นออกสเทนไนต์และคาร์ไบด์ทิตานียมแบบก้อนเหลี่ยม (ตามลำดับ) ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% หลอมที่ 1000°C 1000 ชั่วโมง ดังนี้

$$a = [h^2 + k^2 + l^2]^{1/2} \lambda L/R \quad (4.3)$$

- ตำแหน่งระนาบ $(2\ 2\ 0)$ มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ $3.8952\ \text{\AA}$ และ $10.7867\ \text{\AA}$
- ตำแหน่งระนาบ $(2\ 2\ 2)$ มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ $3.6541\ \text{\AA}$ และ $10.7339\ \text{\AA}$
- ตำแหน่งระนาบ $(0\ 0\ 2)$ มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ $3.4062\ \text{\AA}$ และ $10.1152\ \text{\AA}$
- ตำแหน่งระนาบ $(-2\ -2\ 2)$ มีค่าพารามิเตอร์โครงผลึกเท่ากับ $3.7229\ \text{\AA}$ และ $10.5478\ \text{\AA}$

ภาคผนวก จ

การหาสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume Fraction) ของคาร์ไบด์ทุติยภูมิโดยวิธี manual point counting ตามมาตรฐาน ASTM E562 มีขั้นตอนดังนี้

สัญลักษณ์:

P_T	=	จำนวนจุดบน Grid
P_i	=	จำนวนจุดที่นับได้ต่อ field
$Pp_{(i)}$	=	$P_i/P_T \times 100$ คือจำนวนจุดบน Grid ในแต่ละ field
$Pp_{(average)}$	=	$1/n \sum_{i=1}^n Pp_{(i)}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ $Pp_{(i)}$
SD.	=	ค่าประมาณของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
95%CI	=	$\pm ts/\sqrt{n}$
t	=	factor ตัวคูณสำหรับหาค่า 95% CI
V_v	=	สัดส่วนเชิงปริมาตรของเฟสเป็นเปอร์เซ็นต์
%RA	=	เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำสัมพัทธ์ = $(95\%CI/Pp_{(average)}) \times 100$

1. การหาสัดส่วนเชิงปริมาตรของเฟสที่สนใจ เพื่อกำหนดจำนวน Grid เปอร์เซ็นต์ความมั่นใจ ดังแสดงในตารางที่ ข(1) และกำหนดลักษณะของ Grid ตามความเหมาะสมต่อวิธี manual point counting ดังแสดงในรูปที่ ข(1)

2. นำ Grid ใส่ใน Eye piece แล้วเลือกกำลังขยายที่สามารถสังเกตขนาดเฟสที่สนใจได้ชัดเจน แล้วนับจำนวนจุดที่ตกบนเฟสที่สนใจ โดยที่นับ 1 เมื่อตกภายในเฟส และนับ 0.5 เมื่อตกบนขอบของเฟส

3. นำจำนวนจุดที่นับได้มาหาค่าต่างๆ ดังนี้

- เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของจุด

$$P_{p(average)} = 1/n \sum_{i=1}^n Pp_{(i)} = 1/n \sum_{i=1}^n P_i/P_T \quad \text{สมการที่ 1}$$

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$SD. = \left[\frac{1}{n-1} \sum (Pp_{(i)} - Pp_{(average)})^2 \right]^{1/2} \quad \text{สมการที่ 2}$$

- 95%CI (Confidence Interval)

$$95\%CI = (t)(SD) / \sqrt{n} \quad \text{สมการที่ 3}$$

- V_v (Volume fraction of the constituent or phase expressed as a percentage)

$$V_v = P_p \pm 95\%CI \quad \text{สมการที่ 4}$$

4. การคำนวณหาค่า $P_{p(average)}$, V_v , 95% CI และ Standard Deviation (SD.) ด้วยการนับเฟสตามวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น คือใช้ grid ขนาด 100 จุดและนับทั้งหมด 20 field นำจำนวนจุดที่นับได้ในแต่ละ field มาหาค่า P_{pi} และ $P_{p(average)}$ ตามสมการที่ 1. แล้วนำค่าที่ได้นี้มาคำนวณเบี่ยงเบนมาตรฐานและ 95% CI ดังแสดงในสมการที่ 2 และสมการที่ 3 ตามลำดับ

5. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนโดยปริมาตร ตามสมการที่ 4

ตารางที่ ๑1 การประมาณค่าตัวแปร n จากค่าความแม่นยำสัมพัทธ์และสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟสที่สนใจ

Prediction of the Number of Fields (n) to be Observed as a Function of the Desired Relative Accuracy and of the Estimated Magnitude of the Volume Fraction of the Constituent

Amount of volume fraction, V_v , in percent	33 % Relative Accuracy				20 % Relative Accuracy				10 % Relative Accuracy			
	Number of fields n for a grid of $P_T =$				Number of fields n for a grid of $P_T =$				Number of fields n for a grid of $P_T =$			
	16 points	25 points	49 points	100 points	16 points	25 points	49 points	100 points	16 points	25 points	49 points	100 points
2	110	75	35	20	310	200	105	50	1,250	800	410	200
5	50	30	15	8	125	80	40	20	500	320	165	80
10	25	15	10	4	65	40	20	10	250	160	85	40
20	15	10	5	4	30	20	10	5	125	80	40	20

NOTE. 1—The given values in the table above are based on the formula:

$$n = \frac{4}{E^2} \frac{100 - V_v}{V_v}$$

where:

E = $0.01 \times \% \text{ RA}$, and

V_v = is expressed in %.



รูปที่ ๑1. ชนิดของ Grid แบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยม ตามมาตรฐาน ASTM E562

ตารางที่ ๑๒ การนับปริมาณตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8%
โครเมียม 26.6% หลังการอบความร้อนที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ

Field No.	จำนวนจุดที่นับได้จาก Grid แบบสี่เหลี่ยมจำนวน 100 จุด			
	900 °ซ 24 ชั่วโมง	1000 °ซ 24 ชั่วโมง	900 °ซ 1000 ชั่วโมง	1000 °ซ 1000 ชั่วโมง
1	43	41	41	44
2	47	35	42	37
3	42	42	37	39
4	41	37	41	40
5	39	40	35	42
6	42	42	38	37
7	40	41	40	42
8	38	40	42	37
9	40	48	39	40
10	42	39	43	41
11	37	44	40	40
12	44	47	44	41
13	39	42	36	37
14	45	41	36	43
15	37	41	43	40
16	43	38	37	38
17	43	40	43	42
18	40	44	42	40
19	45	45	40	39
20	41	39	37	39

ตารางที่ ๑3 สัดส่วนเชิงปริมาตรตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8%
โครเมียม 26.6% หลังการอบความร้อนที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ

ตัวอย่าง	900 °ซ 24 ชั่วโมง	1000 °ซ 24 ชั่วโมง	900 °ซ 1000 ชั่วโมง	1000 °ซ 1000 ชั่วโมง
$Pp_{(i)}$	41.4	41.3	39.8	39.9
SD	2.72	3.18	2.76	2.07
$95\%CI$	1.27	1.49	1.29	0.97
$\%RA$	3.08	3.60	3.25	2.43
$V_v = P_p + 95\%CI$	42.67	42.79	41.09	40.87
$V_v = P_p - 95\%CI$	40.13	39.81	38.51	38.93

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ.1 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ด้วยน้ำหนักกด 500 กรัม ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

ตัวอย่างทดสอบความแข็ง (น้ำหนักกด 500 กรัม)	สภาพหล่อ	อบความร้อน 900 °ซ 24 ชั่วโมง	อบความร้อน 1000 °ซ 24 ชั่วโมง
ครั้งที่ 1	182.2	194.3	204.3
ครั้งที่ 2	195.2	180.8	191.0
ครั้งที่ 3	187.1	199.1	184.4
ครั้งที่ 4	196.0	200.2	192.1
ครั้งที่ 5	168.5	203.6	186.5
ครั้งที่ 6	202.7	190.3	190.8
ครั้งที่ 7	195.4	187.4	193.9
ครั้งที่ 8	189.3	189.6	187.2
ครั้งที่ 9	174.2	191.4	180.7
ครั้งที่ 10	174.0	192.8	183.4
ครั้งที่ 11	191.6	186.5	202.2
ครั้งที่ 12	193.2	192.0	204.5
ครั้งที่ 13	177.8	199.3	197.0
ครั้งที่ 14	189.1	202.4	195.7
ครั้งที่ 15	192.9	195.5	198.3
ค่าเฉลี่ย	187.28	193.68	192.8

ตัวอย่างทดสอบความแข็ง (น้ำหนักกด 500 กรัม)	อบความร้อน 900 °ซ 200 ชั่วโมง	อบความร้อน 900 °ซ 400 ชั่วโมง	อบความร้อน 900 °ซ 600 ชั่วโมง	อบความร้อน 900 °ซ 800 ชั่วโมง	อบความร้อน 900 °ซ 1000 ชั่วโมง
ครั้งที่ 1	200.4	187.4	199.2	175.2	192.7
ครั้งที่ 2	191.6	201.1	187.6	196.8	188.4
ครั้งที่ 3	195.7	205.6	201.5	181.8	186.7
ครั้งที่ 4	202.1	192.0	192.4	200.3	179.0
ครั้งที่ 5	198.3	193.6	190.9	202.1	190.2
ครั้งที่ 6	203.8	185.1	193.6	195.5	203.4
ครั้งที่ 7	192.2	193.9	200.0	197.2	199.5
ครั้งที่ 8	185.7	199.1	187.4	186.7	197.2
ครั้งที่ 9	193.0	202.3	175.4	199.1	183.9
ครั้งที่ 10	196.5	197.5	202.9	196.0	194.3
ครั้งที่ 11	186.9	193.0	200.4	185.3	190.2
ครั้งที่ 12	201.6	197.8	195.0	198.0	168.2
ครั้งที่ 13	202.4	189.7	184.1	199.4	207.3
ครั้งที่ 14	187.3	202.6	197.3	182.6	193.7
ครั้งที่ 15	198.9	197.5	191.8	194.2	201.4
ค่าเฉลี่ย	195.76	195.88	193.3	192.68	191.74

ตัวอย่างทดสอบความแข็ง (น้ำหนักกด 500 กรัม)	อบความร้อน 1000 ^o ซ 200 ชั่วโมง	อบความร้อน 1000 ^o ซ 400 ชั่วโมง	อบความร้อน 1000 ^o ซ 600 ชั่วโมง	อบความร้อน 1000 ^o ซ 800 ชั่วโมง	อบความร้อน 1000 ^o ซ 1000 ชั่วโมง
ครั้งที่ 1	183.5	203.3	192.2	176.6	171.7
ครั้งที่ 2	207.3	190.5	180.5	194.5	199.5
ครั้งที่ 3	199.6	202	201.3	202.2	179.4
ครั้งที่ 4	192.8	196.2	186.9	198.5	186.5
ครั้งที่ 5	184.9	205.8	193.7	177.7	204
ครั้งที่ 6	189.6	174.3	199.5	186.4	187.8
ครั้งที่ 7	203.2	184.3	194.1	203	196.1
ครั้งที่ 8	199	191.6	179.1	188.2	198.6
ครั้งที่ 9	197.1	186.5	184.6	173.6	182.2
ครั้งที่ 10	179	187.8	203.3	205.8	198.9
ครั้งที่ 11	205.5	192.4	194.4	189.3	183.4
ครั้งที่ 12	194.3	176.9	187	176.5	197.3
ครั้งที่ 13	199.5	190.4	198.8	194.2	200.2
ครั้งที่ 14	198	204.5	200.5	193.8	180.9
ครั้งที่ 15	202.8	198	186.2	198.4	194.6
ค่าเฉลี่ย	195.74	192.3	192.14	190.58	190.74

ตารางที่ ๑.2 การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ด้วยน้ำหนักกด 25 กรัม ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%

การทดสอบความแข็ง (น้ำหนักกด 25 กรัม)	สภาพหล่อ		อบความร้อน 900 °ซ 24 ชั่วโมง		อบความร้อน 1000 °ซ 24 ชั่วโมง	
	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์
ครั้งที่ 1	186.4	338.2	210.2	302.3	213.3	353.3
ครั้งที่ 2	202.3	396.9	218.9	321.1	241.8	383.1
ครั้งที่ 3	211.0	306.4	210.1	397.4	257.5	412.0
ครั้งที่ 4	185.9	388.1	227.5	365.1	222.7	386.5
ครั้งที่ 5	194.7	404.2	199.4	402.1	203.7	350.0
ครั้งที่ 6	191.7	417.2	213.6	381.0	216.1	339.6
ครั้งที่ 7	198.0	328.3	207.0	427.5	230.5	418.2
ครั้งที่ 8	188.1	363.7	225.6	406.8	210.4	396.1
ครั้งที่ 9	193.6	306.8	219.8	366.3	228.0	373.5
ครั้งที่ 10	200.8	364.2	197.4	430.8	218.9	407.8
ครั้งที่ 11	180.5	381.0	218.3	354.7	234.3	360.2
ครั้งที่ 12	194.1	392.7	199.6	382.0	207.2	341.0
ครั้งที่ 13	200.6	317.4	203.5	344.3	222.1	374.2
ครั้งที่ 14	204.5	375.2	200.7	407.7	244.3	404.2
ครั้งที่ 15	187.6	351.1	208.9	394.4	238.6	385.7
ค่าเฉลี่ย	194.65	362.09	210.70	378.90	225.96	379.03

ตัวอย่างทดสอบความแข็ง (น้ำหนักกด 25 กรัม)	อบความร้อน 900 °ซ 200 ชั่วโมง		อบความร้อน 900 °ซ 400 ชั่วโมง		อบความร้อน 900 °ซ 600 ชั่วโมง		อบความร้อน 900 °ซ 800 ชั่วโมง		อบความร้อน 900 °ซ 1000 ชั่วโมง	
	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์
ครั้งที่ 1	221.3	362.9	235.0	415.6	239.4	421.2	210.7	391.8	209.1	389.6
ครั้งที่ 2	211.4	374.5	224.3	343.2	214.5	471.5	236.6	386.0	213.4	407.7
ครั้งที่ 3	232.6	398.7	247.3	419.4	221.0	378.9	214.8	435.2	230.3	373.5
ครั้งที่ 4	271.2	443.5	234.9	427.1	240.1	381.4	203.4	372.0	208.2	421.4
ครั้งที่ 5	260.3	427.6	211.8	450.7	218.9	408.1	207.1	362.3	214.8	455.8
ครั้งที่ 6	212.8	382.0	235.7	417.7	217.3	421.8	227.2	391.1	214.1	421.3
ครั้งที่ 7	206.8	403.5	241.8	392.3	226.6	391.1	216.8	427.6	201.6	498.3
ครั้งที่ 8	229.1	487.2	229.5	386.6	213.8	368.2	202.5	436.3	226.7	346.8
ครั้งที่ 9	256.5	376.3	243.6	412.6	258.2	451.6	230.3	448.9	215.3	375.1
ครั้งที่ 10	242.7	401.1	216.7	364.2	238.1	439.3	217.1	428.4	207.9	455.2
ครั้งที่ 11	210.9	384.6	231.1	439.1	227.1	370.7	210.3	396.1	211.1	393.7
ครั้งที่ 12	244.8	390.2	247.7	373.4	223.4	365.2	221.1	387.2	223.9	401.6
ครั้งที่ 13	263.4	375.0	218.2	390.3	201.4	411.4	224.8	410.8	239.3	415.5
ครั้งที่ 14	217.3	384.4	230.4	423.8	213.8	420.4	215.9	443.7	217.7	421.8
ครั้งที่ 15	253.9	400.9	228.3	420.9	225.5	407.3	205.3	434.6	214.9	405.9
ค่าเฉลี่ย	235.67	399.49	231.75	405.13	225.27	407.20	216.26	410.13	216.55	412.21

ตัวอย่างทดสอบความแข็ง (น้ำหนักกด 25 กรัม)	อบความร้อน 1000 ^o ซ 200 ชั่วโมง		อบความร้อน 1000 ^o ซ 400 ชั่วโมง		อบความร้อน 1000 ^o ซ 600 ชั่วโมง		อบความร้อน 1000 ^o ซ 800 ชั่วโมง		อบความร้อน 1000 ^o ซ 1000 ชั่วโมง	
	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์	เนื้อพื้น	คาร์ไบด์
ครั้งที่ 1	260.7	377.2	212.5	384.2	240.5	399.2	200.9	421.2	204.6	395.8
ครั้งที่ 2	219.5	396.9	241.4	377.1	228.3	454.1	217.7	388.6	199.3	403.9
ครั้งที่ 3	215.1	381.2	228.1	376.9	223.6	411.2	198.2	453.5	210.2	402.5
ครั้งที่ 4	228.9	376.0	246.0	350.4	212.4	368.9	216.5	395.1	201.8	406.5
ครั้งที่ 5	230.1	411.1	213.6	352.6	229.4	386.5	211.7	413.7	230.4	379.4
ครั้งที่ 6	218.6	371.5	252.4	378.1	237.5	378.2	202.8	392.8	225.6	425.6
ครั้งที่ 7	244.8	438.6	237.8	409.3	218.1	448.2	235.8	429.6	208.7	414.1
ครั้งที่ 8	215.7	408.8	247.1	438.2	212.3	370.7	218.1	380.6	217.0	412.7
ครั้งที่ 9	238.4	397.5	230.5	449.9	248.2	391.0	210.4	408.0	217.4	421.0
ครั้งที่ 10	233.6	371.3	219.1	436.5	207.4	436.5	212.1	420.4	199.6	413.2
ครั้งที่ 11	221.6	383.4	239.7	412.3	216.5	377.3	197.4	441.7	225.5	420.0
ครั้งที่ 12	237.1	390.6	224.4	385.7	225.2	380.9	217.4	395.2	212.2	404.3
ครั้งที่ 13	216.5	382.0	210.1	368.8	229.6	381.2	199.6	400.9	208.4	410.1
ครั้งที่ 14	223.5	414.8	239.6	411.7	214.4	403.5	208.5	391.3	207.6	422.2
ครั้งที่ 15	248.8	384.7	240.9	411.3	236.8	394.4	216.9	385.3	201.6	419.3
ค่าเฉลี่ย	230.19	392.37	232.21	396.2	225.35	398.79	210.93	407.86	211.33	410.04

ตารางที่ ๑.3 การทดสอบความแข็งแบบ HRB (Rockwell) ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพหล่อ และหลังการอบความร้อนที่ 900 °ซ และ 1000 °ซ

ตัวอย่าง	สภาพหล่อ	900 °ซ 24 ชั่วโมง	900 °ซ 200 ชั่วโมง	900 °ซ 400 ชั่วโมง	900 °ซ 600 ชั่วโมง	900 °ซ 800 ชั่วโมง	900 °ซ 1000 ชั่วโมง
ครั้งที่ 1	87.2	91.2	90.5	92.5	92.0	93.1	90.5
ครั้งที่ 2	91.4	90.7	92.4	91.7	91.3	90.9	93.3
ครั้งที่ 3	88.7	89.9	91.6	90.3	92.1	92.4	91.7
ครั้งที่ 4	89.4	90.1	93.8	93.6	90.8	91.5	91.8
ครั้งที่ 5	90.5	92.4	92.0	92.2	93.2	92.6	92.4
ค่าเฉลี่ย	89.4	90.9	92.1	92.1	91.9	92.1	91.9

ตัวอย่าง	1000 °ซ 24 ชั่วโมง	1000 °ซ 200 ชั่วโมง	1000 °ซ 400 ชั่วโมง	1000 °ซ 600 ชั่วโมง	1000 °ซ 800 ชั่วโมง	1000 °ซ 1000 ชั่วโมง
ครั้งที่ 1	92.1	94.1	91.0	90.6	92.0	91.8
ครั้งที่ 2	91.0	92.7	92.5	92.1	91.7	92.5
ครั้งที่ 3	90.4	92.6	92.3	90.8	92.4	91.7
ครั้งที่ 4	91.6	91.2	90.9	93.3	90.7	91.2
ครั้งที่ 5	90.7	90.4	92.4	92.5	92.0	91.7
ค่าเฉลี่ย	91.2	92.2	91.8	91.9	91.8	91.8

ภาคผนวก ซ.



รูปที่ ซ.1 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Tensile Testing Machine)



รูปที่ ซ.2 ชิ้นงานตัวอย่างก่อนการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E 8M



รูปที่ ซ.3 ชิ้นงานตัวอย่างหลังการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E 8M



รายงานผลการวิเคราะห์

รายงานเลขที่ 239/2549*

หน้า 1/2

รหัสตัวอย่าง : MTL/06/136 - 145	วัตถุประสงค์ : เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกล
ประเภทตัวอย่าง : โลหะผสมท่อ เหล็ก นิกเกิล โครเมียม	วิธีทดสอบ : ASTM E8M : 1998 ; ความยาวกีด 25 มม.
ลักษณะตัวอย่างเมื่อรับ : เหมาะสมที่จะทดสอบ	การเตรียมตัวอย่าง : ASTM E8M : 1998
เจ้าของตัวอย่าง : นายณัฐกันท์ ทวีพรเกษมสุข	เครื่องมือทดสอบ : Universal testing machine; Shimadzu DSS - 10 T
ที่อยู่ : 54 ซอยอ่อนนุช 17 ถนนสุขุมวิท 77	วันที่ทดสอบ : 3 มีนาคม 2549
แขวงสภาพทอง เซตสถานทอง กรุงเทพฯ 10250	ผู้ทดสอบ : นายวีรภูมิ ไก่ศิริ

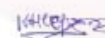
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล			
ชื่อตัวอย่าง	ความเค้นแรงดึงสูงสุด (นิวตัน/มม ²)	% การยืดตัว	พื้นที่หน้าตัด (มม ²)
1. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (900 °C - 200 hr)	457	3.6	41.3
2. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (900 °C - 400 hr)	448	3.6	40.4
3. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (900 °C - 600 hr)	400	3.6	39.7
4. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (900 °C - 800 hr)	456	3.6	40.3
5. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (900 °C - 1000 hr)	440	3.2	41.2


เลขที่ 239/2549*


หน้า 2/2

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล			
ชื่อตัวอย่าง	ความเค้นแรงดึงสูงสุด (นิวตัน/มม ²)	% การยืดตัว	พื้นที่หน้าตัด (มม ²)
6. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (1000 °C - 200 hr)	489	4.0	40.6
7. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (1000 °C - 400 hr)	451	3.8	40.6
8. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (1000 °C - 600 hr)	416	3.2	41.2
9. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (1000 °C - 800 hr)	462	3.6	40.8
10. Fe - 30.8 Ni - 26.6 Cr alloy (1000 °C - 1000 hr)	459	3.8	40.6

* ยกยัดเลขรายงานเลขที่ 191/2549


(นายวีรภูมิ ไก่ศิริ)
ผู้วิเคราะห์


(นายณัฐกันท์ ทวีพรเกษมสุข)
หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์


(ยศ.ดร. สุพงศ์ นิยมสารรัตน์)
ผู้อำนวยการ

หมายเหตุ : 1. ผลการทดสอบนี้เป็นผลเฉพาะของตัวอย่างที่ส่งให้ทดสอบเท่านั้น 2. รายงานผลการทดสอบข้อมูลถูกต้องสำหรับเฉพาะตัวอย่างรายงาน โดยไม่ได้เป็นการยืนยันเป็นลายลักษณ์อักษรว่าวัสดุนี้จะมีคุณสมบัติอย่างอื่นนอกเหนือจาก
ตามที่ระบุไว้

รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบความเค้นแรงดึงสูงสุดตามมาตรฐาน ASTM E 8M

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐศิษฐ์ ทวีพรเกษมสุข
วัน-เดือน-ปีเกิด	วันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2523
ที่อยู่	54 (352/13) ซ.อ่อนนุช 17 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จหลักสูตรประถมศึกษา ปีการศึกษา พ.ศ. 2535 จากโรงเรียนอนุบาลพิบูลเวศม์ สำเร็จหลักสูตรมัธยมศึกษา ปีการศึกษา พ.ศ. 2541 จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ สำเร็จหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีการศึกษา พ.ศ. 2545 สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ภาคการศึกษาตอนปลาย ปีการศึกษา พ.ศ. 2546 ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย