

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของท่อโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ ได้รับ

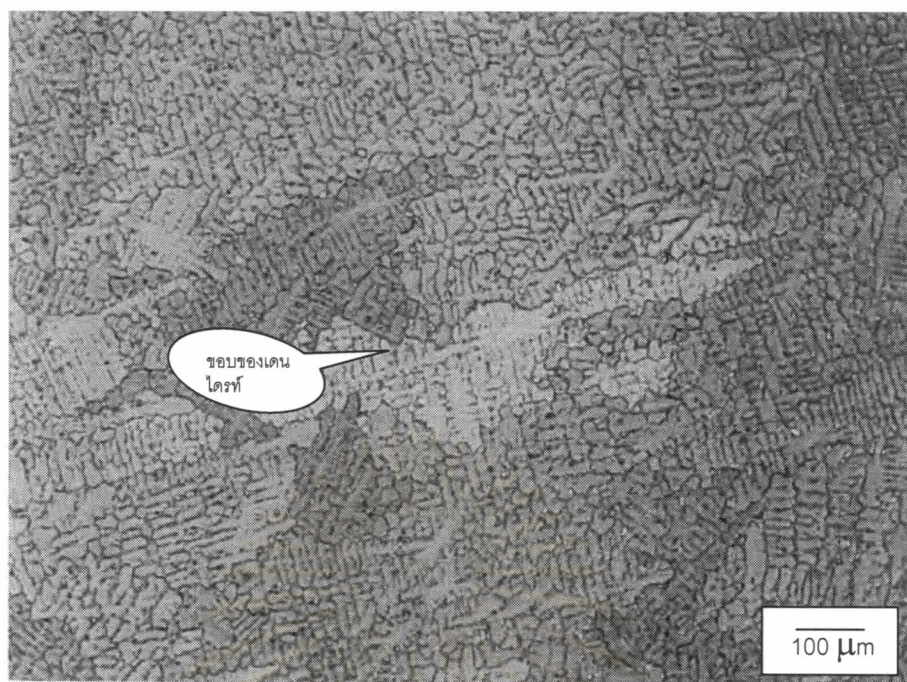
4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของท่อเหล็ก-นิกเกิล-โครเมียมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Emission spectroscopy ดูตารางที่ 2.1 และภาคผนวก จ.

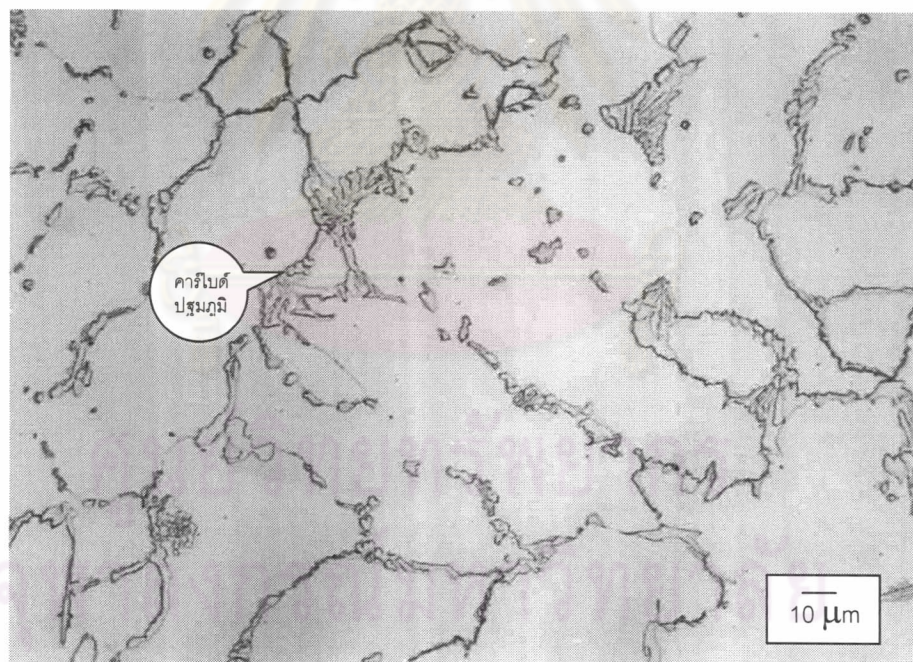
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับประกอบ ด้วยโครงสร้างตาข่ายของคาร์ไบด์ปฐมภูมิบนโครงสร้างพื้นฐานออสเทนไนท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงถึง โครงสร้างจุลภาคแบบเดนไดรต์เนื่องมาจากการแข็งตัวเนื่องมาจากการหล่อ และเมื่อขยายบริเวณ โครงสร้างพื้นฐานพบว่ามีอนุภาคของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และโครงสร้างจุลภาคจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดพบว่าโครงสร้างตาข่ายประกอบด้วยคาร์ไบด์ปฐมภูมิสองชนิด คือ ชนิดที่เป็นเฟสสีดำ และสีขาว รูปที่ 4.3 ซึ่งได้ตรวจสอบส่วนผสมของแต่ละเฟสและโครงสร้างพื้นฐาน ด้วยเทคนิค EDS พบว่าเฟสสีดำมีปริมาณโครเมียม 70.59% เฟสสีขาวมีปริมาณของไทเทเนียม 19.93% ไนโอเบียม 32.60% และโครเมียม 0.61% ซึ่งมีน้ำหนักอะตอมมากกว่าเฟสสีดำ และโครงสร้าง พื้นฐานประกอบด้วยเหล็ก 35.74% นิกเกิล 31.59% และ โครเมียม 24.54% ดูตารางที่ 4.1 นอกจากนี้ ยังพบผลึกรูปทรงคิวบิก รูปที่ 4.4 ซึ่งจากการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเทคนิค EDS พบว่ามีปริมาณ ไทเทเนียม 60.20% ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ได้ดังนี้

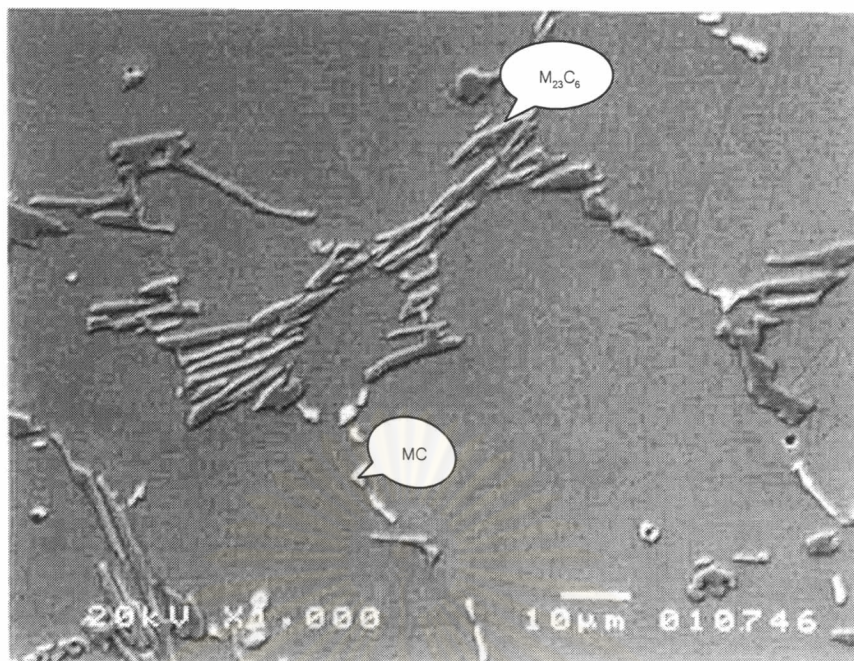
เนื่องจากโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล โครเมียม มีส่วนผสมของนิกเกิลประมาณ 30.8 % จึง ทำให้มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนท์ สำหรับโครงสร้างตาข่ายของคาร์ไบด์ปฐมภูมิเกิดจากธาตุ ผสมโครเมียม ไนโอเบียม และไทเทเนียม ซึ่งสามารถสร้างสารประกอบคาร์ไบด์ได้ในขณะที่นำโลหะ เย็นตัวอย่างช้าๆ ธาตุผสมไทเทเนียมและไนโอเบียมจะรวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นไนโอเบียมไทเทเนียม คาร์ไบด์ตกตะกอนที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าโครเมียม ทำให้อัตราส่วนโครเมียม : คาร์บอนสูง ดังนั้น สารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิจึงเป็นชนิด $M_{23}C_6$ โดยคาร์ไบด์ปฐมภูมิตั้งนี้จะเป็น โครงสร้างตาข่ายที่บริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์^(13,15)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับ



รูปที่ 4.2 ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับ



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง
ในสภาพที่ได้รับ



รูปที่ 4.4 อนุภาครูปทรงคิวบิกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง
ในสภาพที่ได้รับ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิด้วยเทคนิค EDS ของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ

เฟส	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	อื่นๆ
เฟสสีขาว	1.7	19.93	0.61	23.20	21.88	32.60	0.07
TiC (2)	0.14	60.20	5.89	0.75	0.54	0.43	32.06
เฟสสีดำ	0.85	-	70.59	15.03	7.7	2.29	1.36
โลหะพื้น	2.78	-	24.54	35.74	31.59	1.87	0.24

4.1.3. ความแข็ง

ชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับเตรียมผิวเพื่อทดสอบความแข็ง และความแข็งจุลภาค HV25g บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ดังแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความแข็งของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ

ชิ้นตัวอย่าง	ความแข็งเฉลี่ย (บริเนลล์)	ความแข็งจุลภาคเฉลี่ย (HV25g)	
		คาร์ไบด์	โลหะพื้น
สภาพที่ได้รับ	183	351	188

4.1.4. คุณสมบัติแรงดึง

ชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับนำมาเตรียมตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E 8m 00b เพื่อหาค่าแรงดึงสูงสุด ความเค้นคราก (0.2% proof stress) เปอร์เซ็นต์การยืด และ โมดูลัสความแกร่ง (Modulus of toughness) จากกราฟความเค้นและความเครียด รูปที่ 4.14 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความแข็งแรงดึงของโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ

ชิ้นตัวอย่าง	ความเค้นดึง สูงสุด (MPa)	ความเค้นคราก (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด	โมดูลัสความแกร่ง (จูล)
สภาพที่ได้รับ	399	330	9.30	58.46

4.2 ผลของการอบด้วยความร้อน

ผลการทดลองอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800° , 900° , 1000° และ 1100° ซ ที่เวลาต่างๆ กันเป็นดังนี้

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800° , 900° , 1000° และ 1100° ซ โดยแต่ละอุณหภูมิจะทำการอบด้วยความร้อนที่เวลา 1, 3, 10 และ 24 ชม.

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของทุกชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบให้ผลคล้ายกัน โดยโครงสร้างจุลภาคยังคงประกอบด้วยคาร์ไบด์ปฐมภูมิเหมือนในสภาพที่ได้รับ แต่บริเวณโครงสร้างพื้นฐานใกล้กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิพบว่าการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่มีขนาดละเอียด โครงสร้างจุลภาคภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800° ซ รูปที่ 4.5-4.8 อนุภาคของคาร์ไบด์ทุติยภูมิละเอียดหนาแน่นบริเวณใกล้คาร์ไบด์ปฐมภูมิ และปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 24 ชม. นอกจากนี้คาร์ไบด์ทุติยภูมิตกตะกอนแบบแผ่นฟิล์มบาง รูปที่ 4.6-4.7 และรูปเข็มเล็กน้อย รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาด (ดูรูปที่ ก15-ก18 ภาคผนวก ก) พบว่าอนุภาคคาร์ไบด์ทุติยภูมินาแน่นในบริเวณใกล้กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ และกระจายเข้าสู่ใจกลางของเดนไดรต์เมื่อเวลาการอบด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.10

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900° ซ (ดูรูปที่ ก6-ก9 ภาคผนวก ก) คล้ายกับชิ้นตัวอย่างที่ 800° ซ แต่ต่างกันที่ปริมาณ โดยที่เวลา 1 และ 3 ชม.คาร์ไบด์ทุติยภูมียังคงหนาแน่นที่บริเวณใกล้คาร์ไบด์ปฐมภูมิ เมื่อเวลาการอบด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 24 ชม. คาร์ไบด์ละเอียดที่ตกตะกอนก่อนรวมตัวกันจนมีขนาดโตขึ้นและบางส่วนกระจายเข้าสู่ใจกลางเดนไดรต์ คาร์ไบด์รูปเข็มมีขนาดใหญ่และหนาขึ้น

และยังคงพบคาร์ไบด์แบบแผ่นฟิล์ม (ดูรูปที่ ก9 ภาคผนวก ก) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดพบว่าคาร์ไบด์ทิตานียมยังคงหนาแน่นที่บริเวณใกล้กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ แต่อุณหภูมิคาร์ไบด์ทิตานียมโตขึ้น

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 °ซ (ดูรูปที่ ก10-ก13 ภาคผนวก ก) คล้ายกับชิ้นตัวอย่างที่ 900 °ซ แต่อุณหภูมิคาร์ไบด์ทิตานียมมีขนาดโตขึ้นแต่ยังคงหนาแน่นที่บริเวณใกล้กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ และบางส่วนกระจายเข้าสู่ใจกลางเดนไดรต์ คาร์ไบด์รูปเข็มด้านปลายจะมน คาร์ไบด์แบบฟิล์มหนาขึ้นมาก รูปที่ 4.10 ในขณะที่ปริมาณของคาร์ไบด์ทิตานียมที่มีขนาดละเอียดมีปริมาณน้อยลง โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดให้ผลในลักษณะเดียวกัน

โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1100 °ซ (ดูรูปที่ ก10-ก13 ภาคผนวก ก) ประกอบด้วยคาร์ไบด์ทิตานียมที่มีลักษณะกลมและกระจายสู่ใจกลางของเดนไดรต์ โดยที่เวลา 1, 3 และ 10 ชม. คาร์ไบด์จะมีปริมาณมากบริเวณใกล้กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ และที่เวลา 24 ชม. คาร์ไบด์ละเอียดบริเวณใกล้กับคาร์ไบด์ปฐมภูมิรวมตัวกันจนมีลักษณะกลมโต และการตกตะกอนใหม่เกิดขึ้นน้อย ดังรูปที่ ก14-ก17 ภาคผนวก ก. นอกจากนี้คาร์ไบด์ทิตานียมตกตะกอนรูปเข็มและจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดให้ผลในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ ก31-ก34 ภาคผนวก ก. และภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่างทุกชิ้นภายหลังจากการอบด้วยความร้อนพบว่าบริเวณติดกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิเกิดบริเวณแคบๆ ที่ไม่พบการตกตะกอนคาร์ไบด์ทิตานียม (Precipitate Free Zone; PFZ) รูปที่ 4.11 เนื่องจากบริเวณนี้มีความเข้มข้นโครเมียมต่ำเพราะถูกใช้ในการตกตะกอนคาร์ไบด์ทิตานียมก่อนหน้านี้

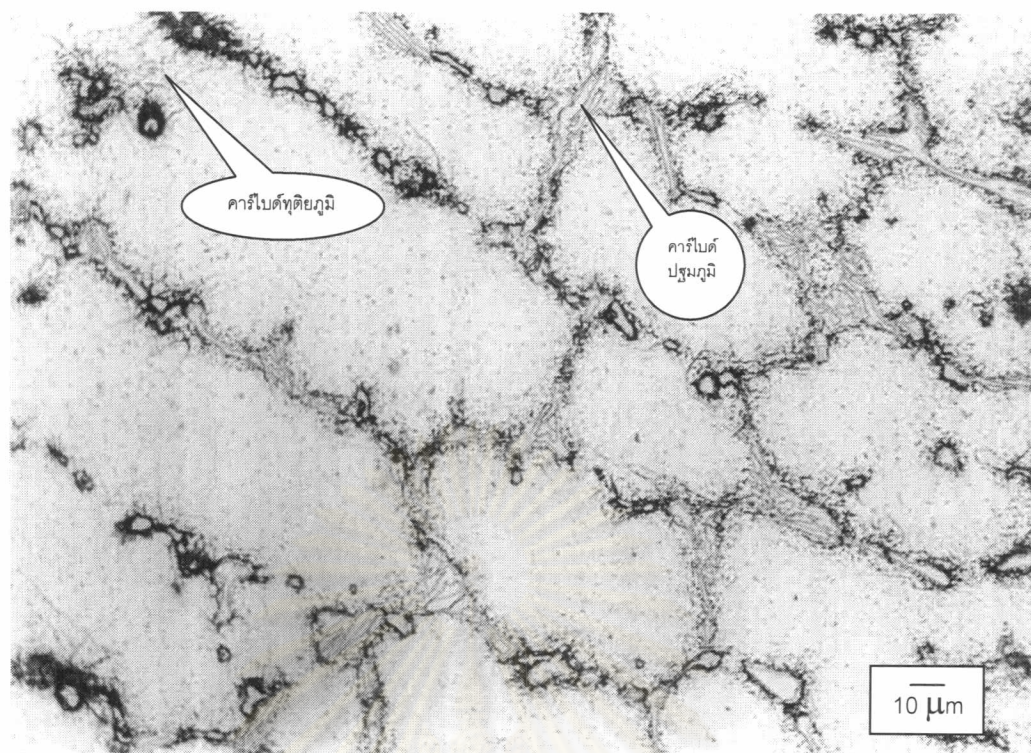
และจากการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค EDS บริเวณโครงสร้างพื้นฐาน คาร์ไบด์ปฐมภูมิ และคาร์ไบด์ทิตานียม พบว่าบริเวณโครงสร้างพื้นฐานภายหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °ซ มีปริมาณของโครเมียมลดลงในขณะที่ธาตุผสมอื่นๆ ค่อนข้างคงที่ รูปที่ 4.12-4.15 (และตารางที่ ข5-ข8 ภาคผนวก ข) เนื่องจากโครเมียมถูกนำมาใช้ในการตกตะกอนคาร์ไบด์ทิตานียมนั่นเอง ซึ่งจากการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมีของคาร์ไบด์ทิตานียมก็ให้ผลสอดคล้องกันดังแสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้พบว่าปริมาณโครเมียม 70.72% ในคาร์ไบด์ทิตานียมนี้ใกล้เคียงกับปริมาณโครเมียมในโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิด้วย ส่วนคาร์ไบด์ทิตานียมรูปเข็มมีส่วนผสมเคมีของเหล็ก 37.86% นิกเกิล 32.33% และโครเมียม 27.92% ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เช่นกัน สำหรับโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิ

ภายหลังการอบด้วยความร้อนส่วนผสมเคมีค่อนข้างคงที่ (ตารางที่ ๗5-๗8 ภาคผนวก ๗) เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แต่คาร์ไบด์ปฐมภูมิที่มีส่วนผสมไนโอเบียม 32.6% ไทเทเนียม 0.61% ซิลิกอน 1.7% และนิกเกิล 21.88% ภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 800, 900, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 24 ชม. จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณไนโอเบียมมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณของนิกเกิลและซิลิกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากความไม่เสถียรของเฟสที่อุณหภูมิสูง

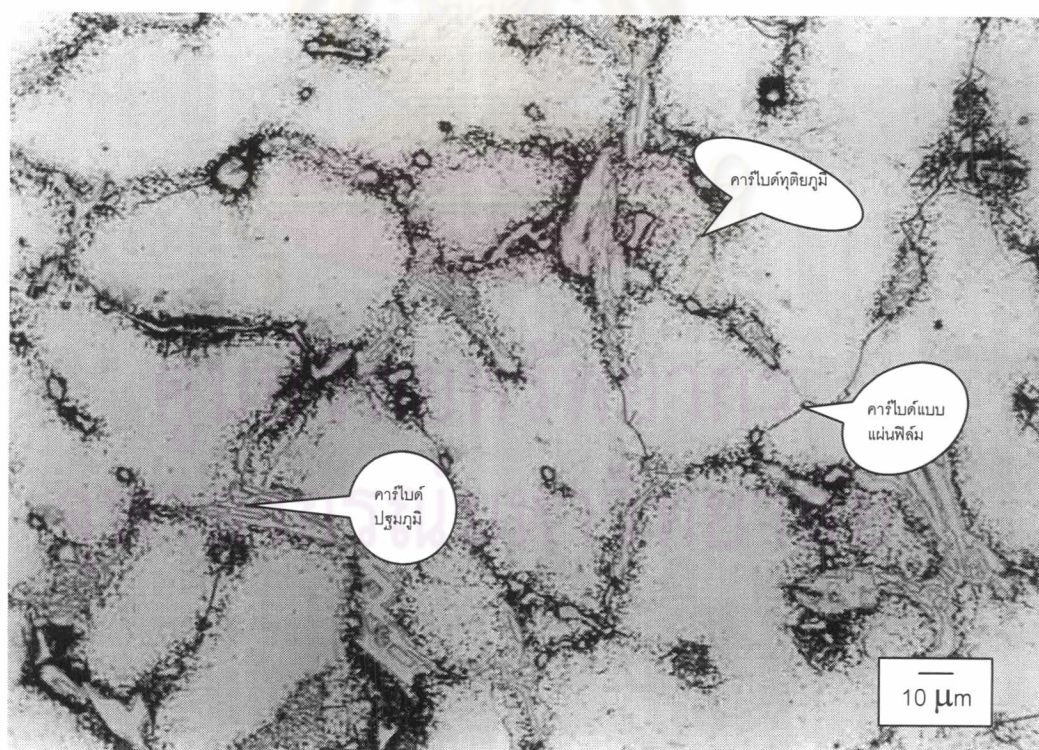
เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างแต่ละอุณหภูมิประกอบด้วยเฟสที่เหมือนกัน ดังนั้นจะขออธิบายปรากฏการณ์ทั้งหมดดังนี้

สำหรับโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1 โครงสร้างจุลภาค ภายหลังการอบชุบด้วยความร้อนเกิดการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิเนื่องมาจากโครงสร้างพื้นฐานในสภาพหล่อมีอะตอมของธาตุสร้างสารประกอบคาร์ไบด์ละลายอิมิตัวในโครงสร้างพื้นฐาน ภายหลังการอบด้วยความร้อนจึงตกตะกอนในรูปของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ จากงานวิจัย^(10,11,12,13,14,15,16,17,18,19) คาร์ไบด์ทุติยภูมิเป็นชนิดเดียวกับคาร์ไบด์ปฐมภูมิ $M_{23}C_6$ อุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อขนาด การกระจายตัว และรูปร่างคาร์ไบด์ทุติยภูมิ นอกจากนี้ธาตุผสมไนโอเบียมและโครเมียมยังส่งผลต่อรูปร่างคาร์ไบด์ทุติยภูมิด้วย^(14,17) พบว่าโลหะผสมที่มีปริมาณไนโอเบียมและโครเมียมสูงสามารถเกิดคาร์ไบด์รูปเข็มได้ดี ดังนั้นการผสมธาตุผสมไนโอเบียมและโครเมียมในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถลดการเกิดคาร์ไบด์ทุติยภูมิรูปเข็ม และลดปัญหาการเปราะด้วย อุณหภูมิและเวลาส่งผลให้ไนโอเบียมไทเทเนียมคาร์ไบด์มีปริมาณของไนโอเบียมลดลง ในขณะที่ปริมาณของนิกเกิลและซิลิกอนเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.5 เนื่องจากคาร์ไบด์ชนิดนี้ไม่เสถียรในช่วงอุณหภูมิ 700°-1000 °C โดยจะเปลี่ยนเป็น G-phase หรือนิกเกิลไนโอเบียมซิลิไซด์ บางส่วนเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากไทเทเนียมช่วยยับยั้งการเปลี่ยนแปลงได้ การเปลี่ยนแปลงเริ่มเกิดจากด้านนอกก่อนเข้าสู่ใจกลางของเฟส การเปลี่ยนแปลงยังส่งผลให้ปริมาตรของเฟสและพลังงานพื้นผิวเพิ่มขึ้น ดังนั้นบริเวณรอยต่อระหว่าง G-phase กับโครงสร้างพื้นฐานจึงมักเกิดความเสียหายเนื่องจากการคืบได้ง่าย

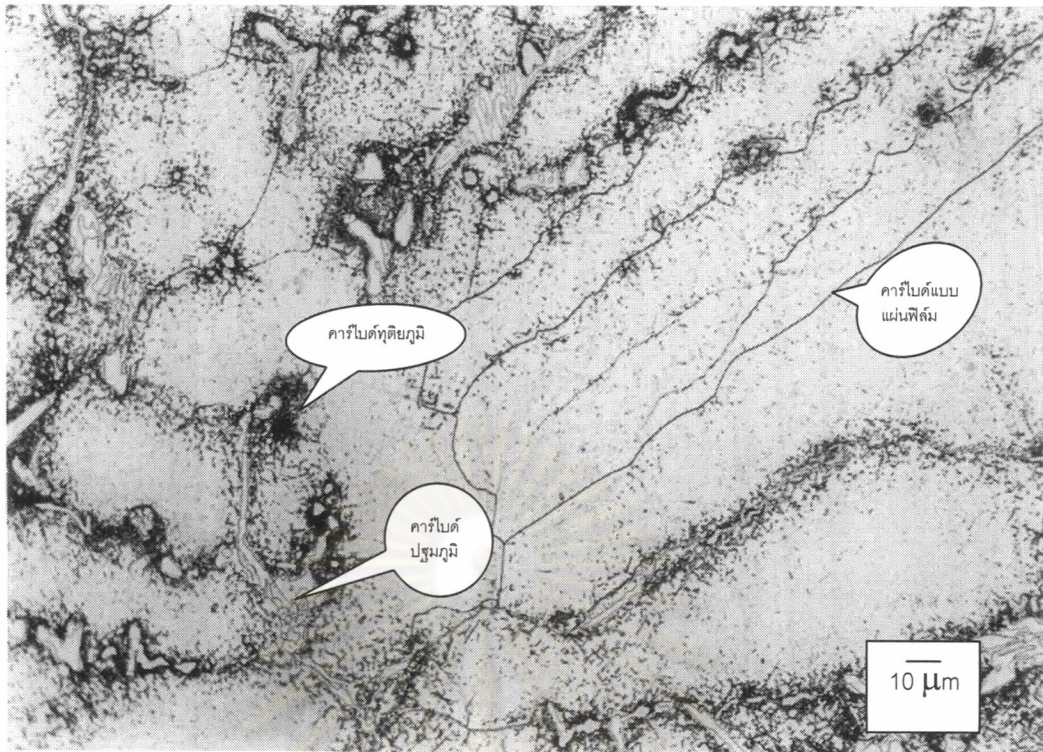
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



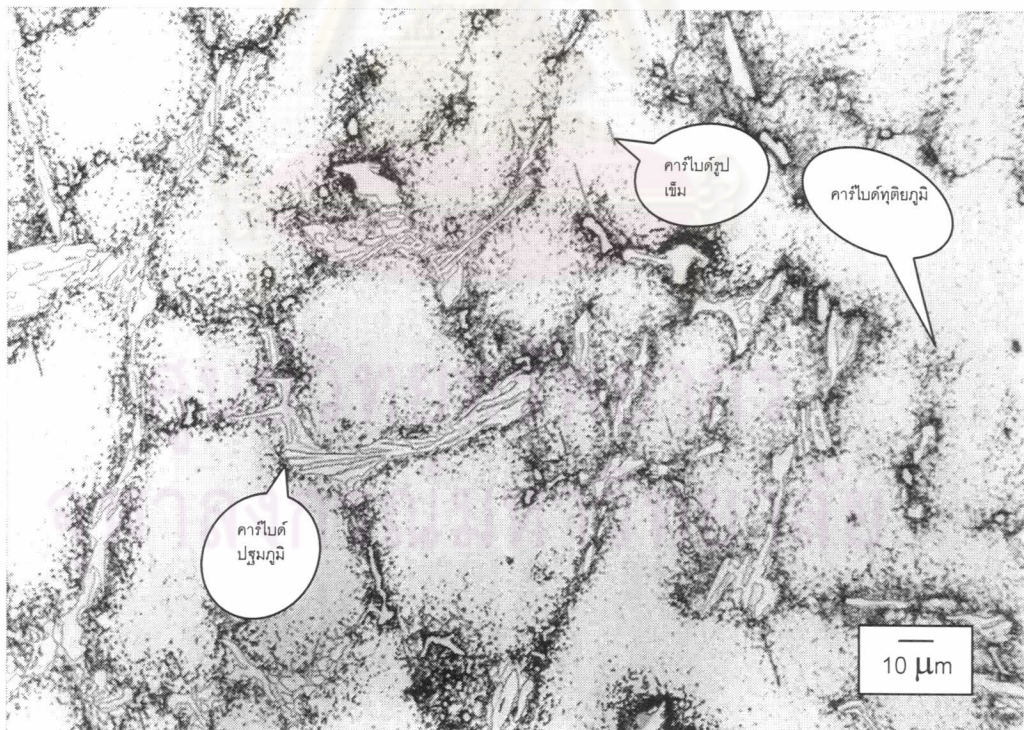
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่ 800 °ซ 1 ชม.



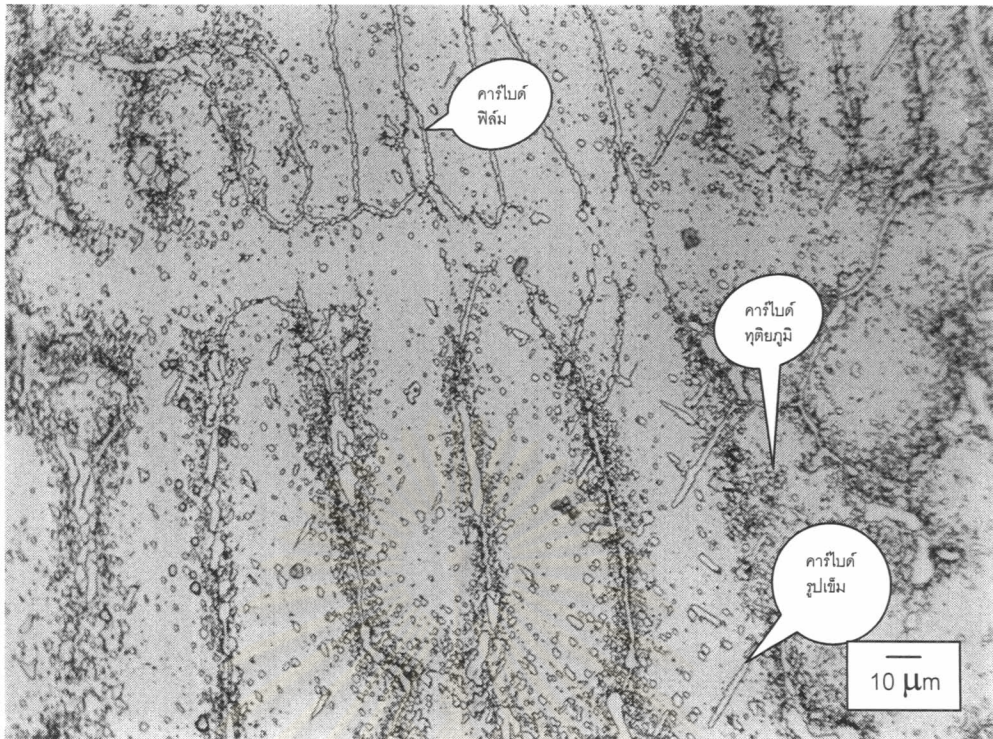
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่ 800 °ซ 3 ชม.



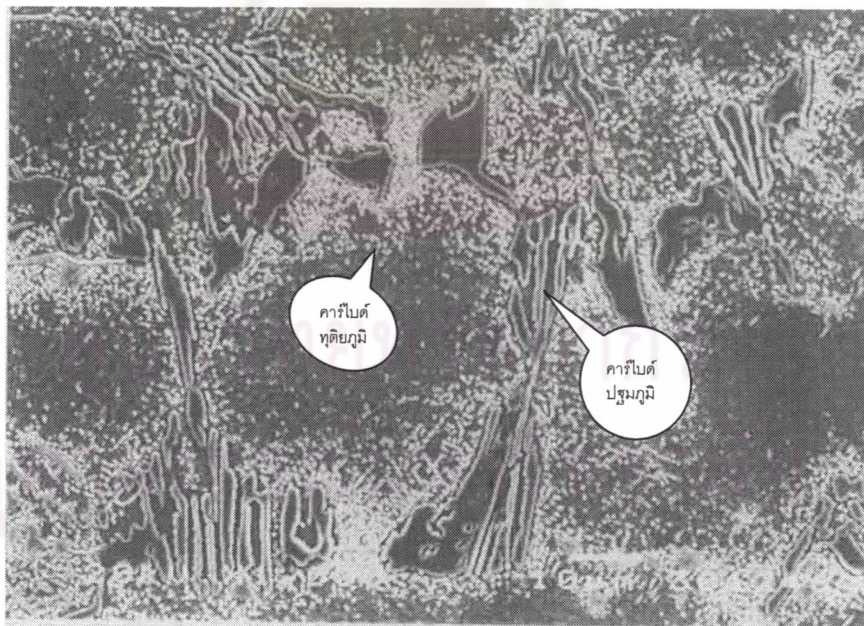
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่ 800 °ซ 10 ชม.



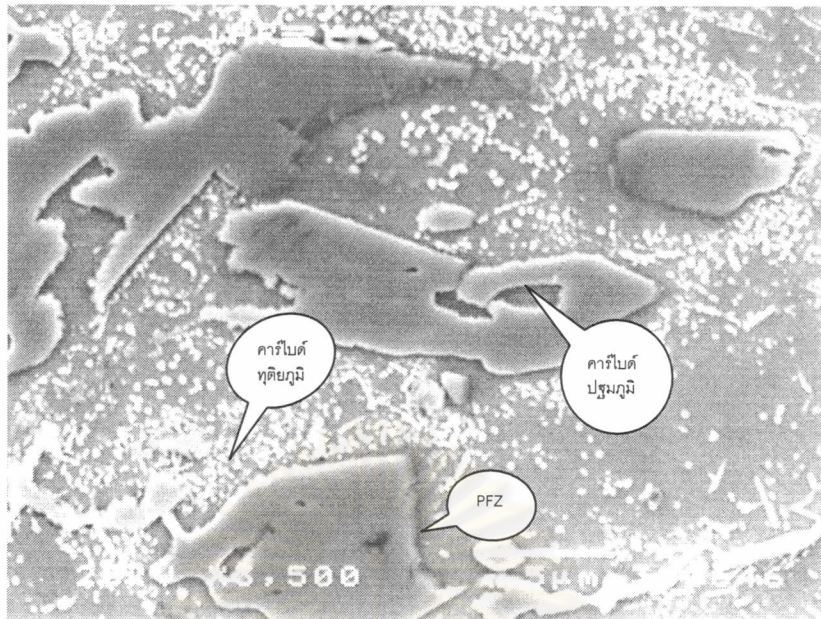
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่ 800 °ซ 24 ชม.



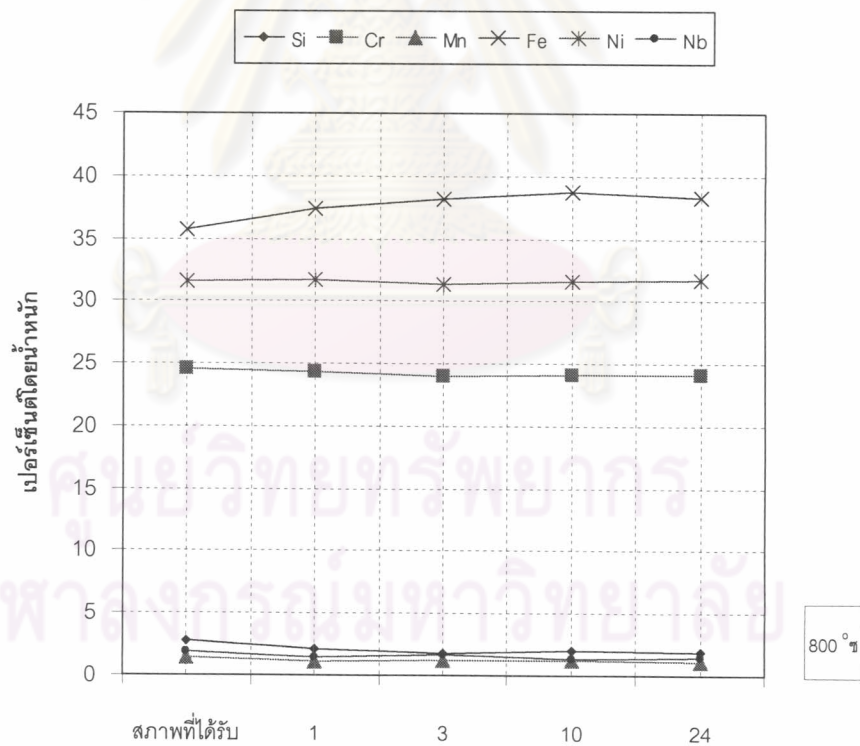
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่ 1000°C 24 ชม.



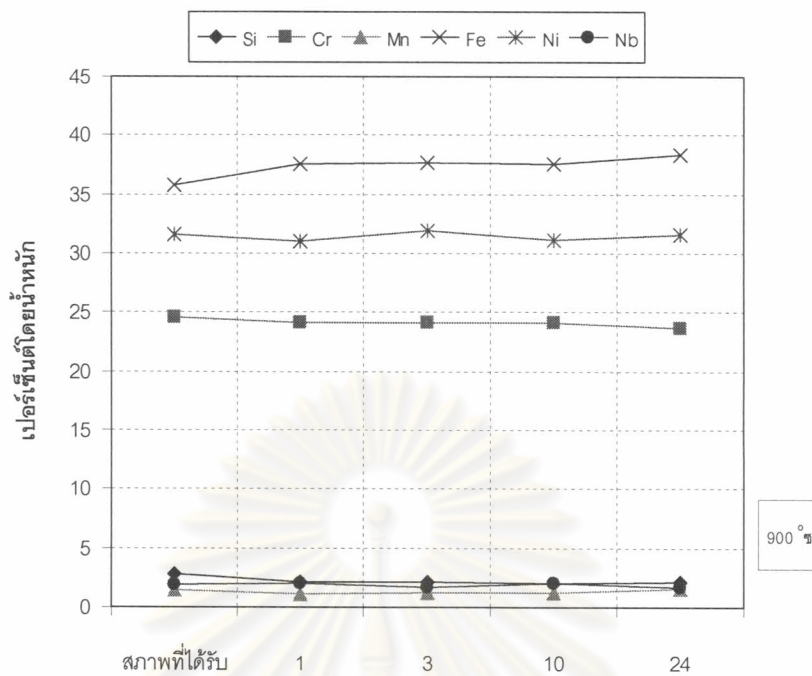
รูปที่ 4.10. โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกวาดของ ชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่ 800°C 24 ชม.



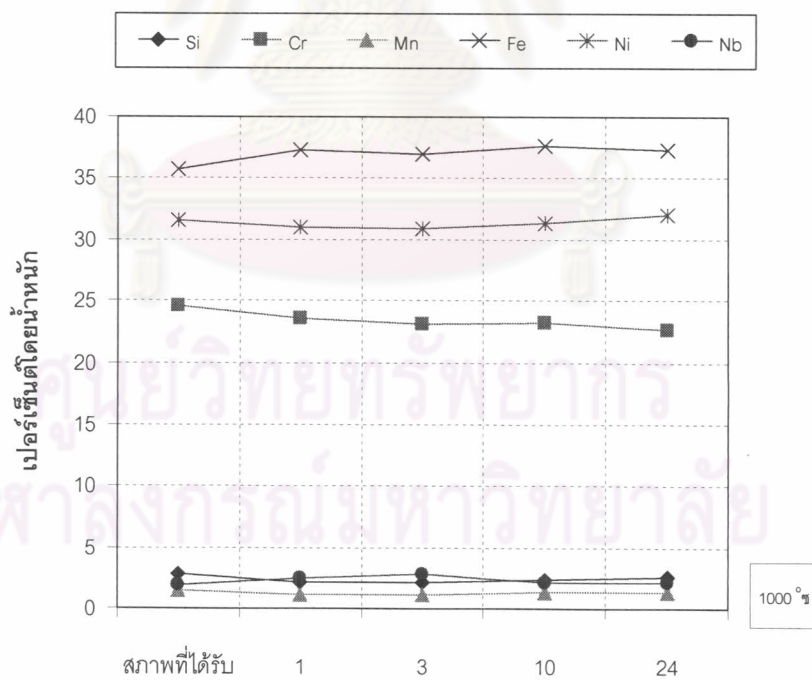
รูปที่ 4.11. โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกาวของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่ 800°C 1 ชม



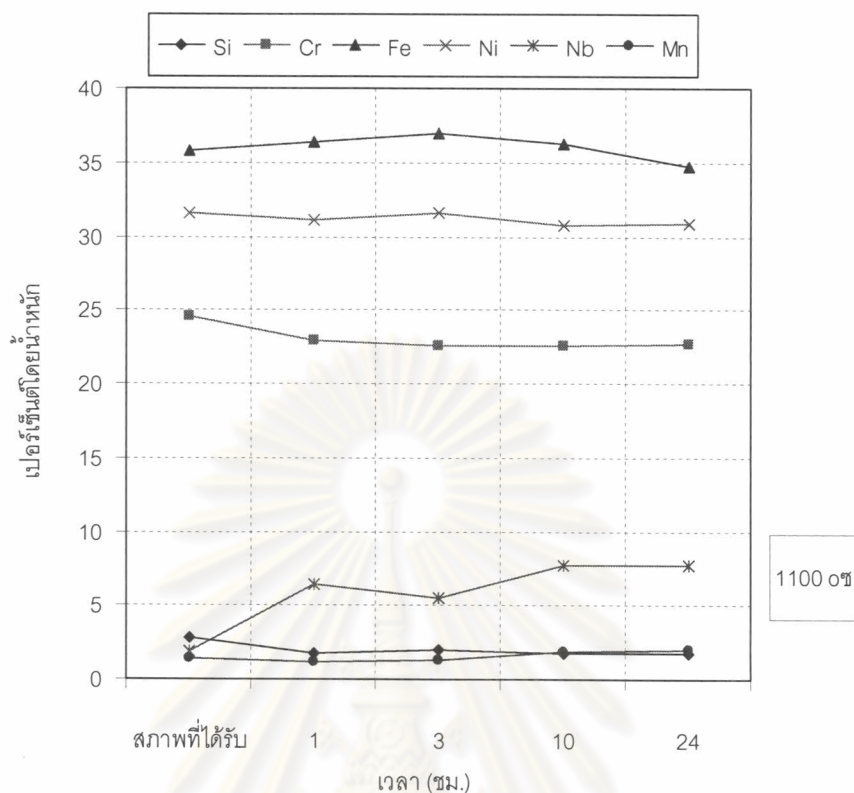
รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บริเวณโครงสร้างพื้นด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่ 800°C ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บริเวณโครงสร้างพื้นด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่ 900 °ซ ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บริเวณโครงสร้างพื้นด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่ 1000 °ซ ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บริเวณโครงสร้างพื้นด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่ 1100 °ซ ที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS ของคาร์ไบด์ทุติยภูมิ และคาร์ไบด์รูปเข็มของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบที่ 1000 °ซ 24 ชม.

ธาตุ	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	อื่นๆ
คาร์ไบด์ทุติยภูมิ	0.85	70.72	-	14.86	11.03	0.87	1.64
คาร์ไบด์รูปเข็ม	1.69	27.92	-	37.86	32.33	-	0.04
โลหะพื้น	5.46	29.07	1.46	35.36	29.73	1.11	0.10

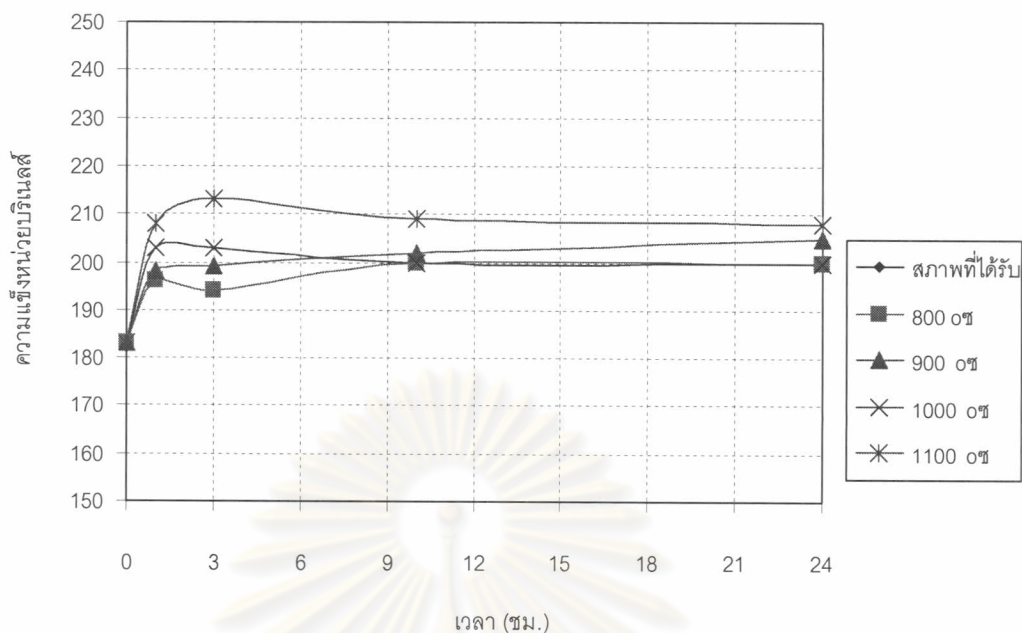
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ด้วยเทคนิค EDS บริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 800°, 900°, 1000° และ 1100 °ซ 24 ชม.

ชิ้นตัวอย่าง	Si	Cr	Ti	Fe	Ni	Nb	อื่นๆ
สภาพที่ได้รับ	1.7	19.93	0.61	23.2	21.88	32.6	0.07
800 °ซ 24ชม.	2.14	22.25	0.61	25.97	24.63	24.17	0.09
900 °ซ 24ชม.	5.56	19.94	0.74	12.89	29.96	30.65	0.22
1000 °ซ 24ชม.	3.23	21.63	0.68	21.94	22.78	29.6	0.15
1100 °ซ 24ชม.	1.29	16.99	0.81	24.36	21.16	35.32	0.08

4.2.2 ความแข็งของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800°, 900°, 1000° และ 1100 °ซ โดยแต่ละอุณหภูมิจะทำการอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 1, 3, 10 และ 24 ชม.

จากผลการทดสอบความแข็งชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800°, 900°, 1000° และ 1100 °ซ เป็นเวลา 1, 3, 10 และ 24 ชม. ได้ผลดังรูปที่ 4.16 (และภาคผนวก ค. ตารางที่ ค3-ค4) พบว่าชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบชุบด้วยความร้อนจะมีความแข็งสูงกว่าชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับโดยค่าความแข็งที่แต่ละอุณหภูมิมิมีแนวโน้มสูงขึ้นแล้วคงที่

จากปรากฏการณ์ความแข็งนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ ความแข็งที่ได้สัมพันธ์กับขนาดปริมาณ และการกระจายคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ 800° และ 900 °ซ อนุภาคคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อยทำให้ความแข็งที่ได้ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 1000° และ 1100 °ซ เมื่อเวลาการอบด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 1000° และ 1100 °ซ ความแข็งตกลงเล็กน้อยน่าจะมีสาเหตุจากการตกตะกอนใหม่ลดลงและคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนก่อนหน้านี้รวมตัวกันจนมีขนาดโตขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความแข็งจุลภาคบริเวณโครงสร้างพื้น และบริเวณคาร์ไบด์ปฐมภูมิ ดูตารางที่ 4.6-4.7 พบว่าความแข็งจุลภาคบริเวณโครงสร้างพื้นและคาร์ไบด์ค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างก่อนอบด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณที่ทำการทดสอบมีขนาดเล็ก และโครเมียมคาร์ไบด์ปฐมภูมิไม่มีการเปลี่ยนเฟส ผลความแข็งทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของขึ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความชื้นจุลภาค (HV25g) บริเวณคาร์โบได์ปฐมภูมิ

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (ชม.)			
	1	3	10	24
800	340	360	327	372
900	348	356	364	364
1000	378	358	351	343
1100	366	365	378	377

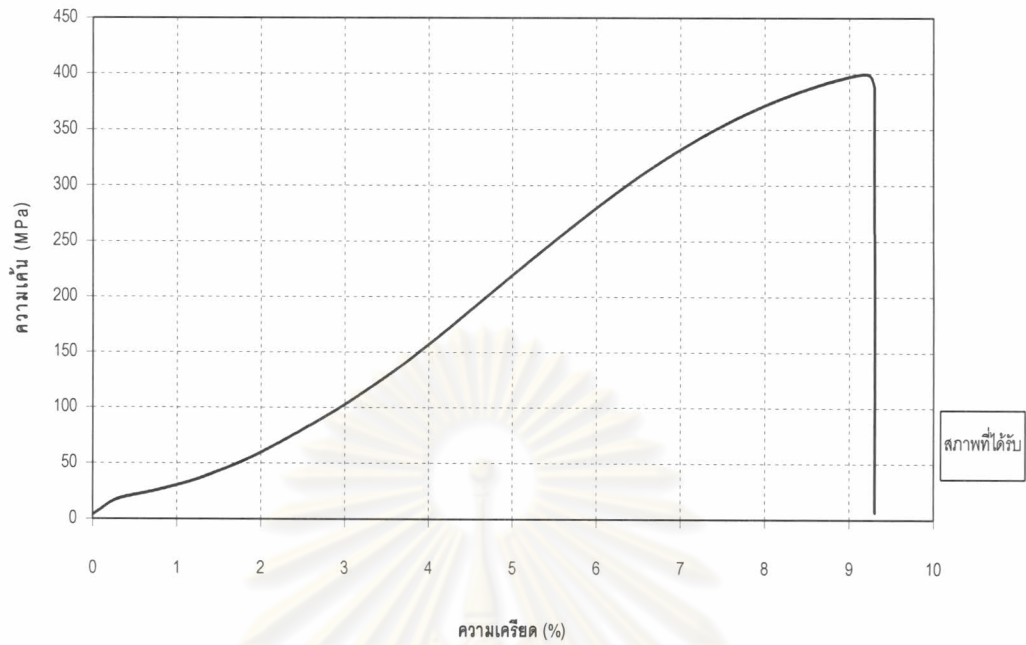
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความชื้นจุลภาค (HV25g) บริเวณโครงสร้างพื้น

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (ชม.)			
	1	3	10	24
800	164	169	189	181
900	167	172	181	180
1000	200	198	191	190
1100	226	215	215	195

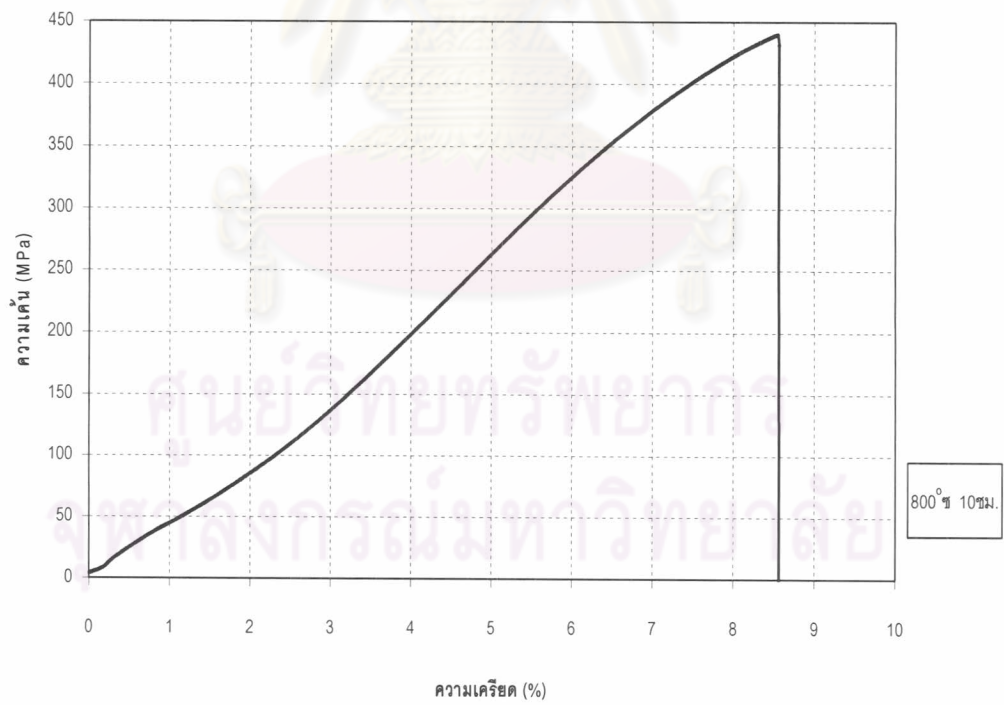
4.2.3 ความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800° , 900° , 1000° และ 1100° ซ โดยแต่ละอุณหภูมิจะทำการอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 13 10 และ 24 ชม.

จากการทดสอบแรงดึงชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับ ดังกราฟรูปที่ 4.17 และชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบชุบด้วยความร้อนดังกราฟรูปที่ 4.18 ส่วนชิ้นตัวอย่างอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ง. จากกราฟความเค้น-ความเครียดให้ข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.19 ความเค้นดึงสูงสุดของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบชุบด้วยความร้อนมีค่าสูงขึ้นกว่าชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับอย่างมีนัยสำคัญ ชิ้นตัวอย่าง 800° ซ ช่วงแรกความเค้นดึงสูงสุดต่ำกว่าที่ 900° 1000° และ 1100° ซ เนื่องจากปริมาณการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีปริมาณน้อย (ดูรูปที่ 4.5-4.6) และความเค้นดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณคาร์ไบด์ละเอียดเพิ่มขึ้น โดยคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่มีขนาดละเอียดจะจัดเรียงอนุภาคสัมพันธ์ (coherent) กับโครงสร้างพื้นซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ชิ้นตัวอย่างที่ 900° ซ ที่เวลาเพิ่มขึ้นแม้ว่าจะมีปริมาณคาร์ไบด์ละเอียดมากกว่าแต่ก็มีปริมาณของคาร์ไบด์รูปเข็มเพิ่มขึ้น (รูปที่ ก6-ก9) ด้วยทำให้ความเค้นดึงสูงสุดต่ำกว่าที่ 800° ซ สำหรับชิ้นตัวอย่าง 1000 และ 1100° ซ ความเค้นดึงสูงสุดช่วงแรกสูงกว่าที่ 800 และ 900° ซ เนื่องจากปริมาณการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีมากกว่าและกระจายตัวดีกว่า รูปที่ ก10-ก17 แต่ช่วงหลังลดลงเล็กน้อยน่าจะมีสาเหตุจากการรวมกันของคาร์ไบด์ทุติยภูมิจนมีขนาดโตขึ้นและคาร์ไบด์แบบแผ่นฟิล์ม อนุภาคที่มีขนาดโตการจัดเรียงตัวไม่สัมพันธ์กับโครงสร้างพื้นความสามารถในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันลดลง และพบว่าความเค้นดึงสูงสุดมีแนวโน้มเดียวกับความแข็ง เมื่อพิจารณาค่าความเค้นคราก (รูปที่ 4.20) ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบชุบด้วยความร้อนพบว่ามีความสูงกว่าสภาพที่ได้รับอย่างมีนัยสำคัญ และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความเค้นดึงสูงสุด สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว และ โมดูลัสความแกร่ง (รูปที่ 21 และ 22) ของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากการอบชุบด้วยความร้อนค่อนข้างคงที่ และต่ำกว่าสภาพก่อนอบด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น (รายละเอียดผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ง.) นอกจากนี้ความเค้นดึงสูงสุดยังขึ้นกับความซับซ้อนของอนุภาคตะกอน โครงสร้างพื้น โครงสร้างผลึก ค่าคงที่ผลึก และยังขึ้นกับปริมาณของอนุภาคตะกอนด้วย^(5,6)

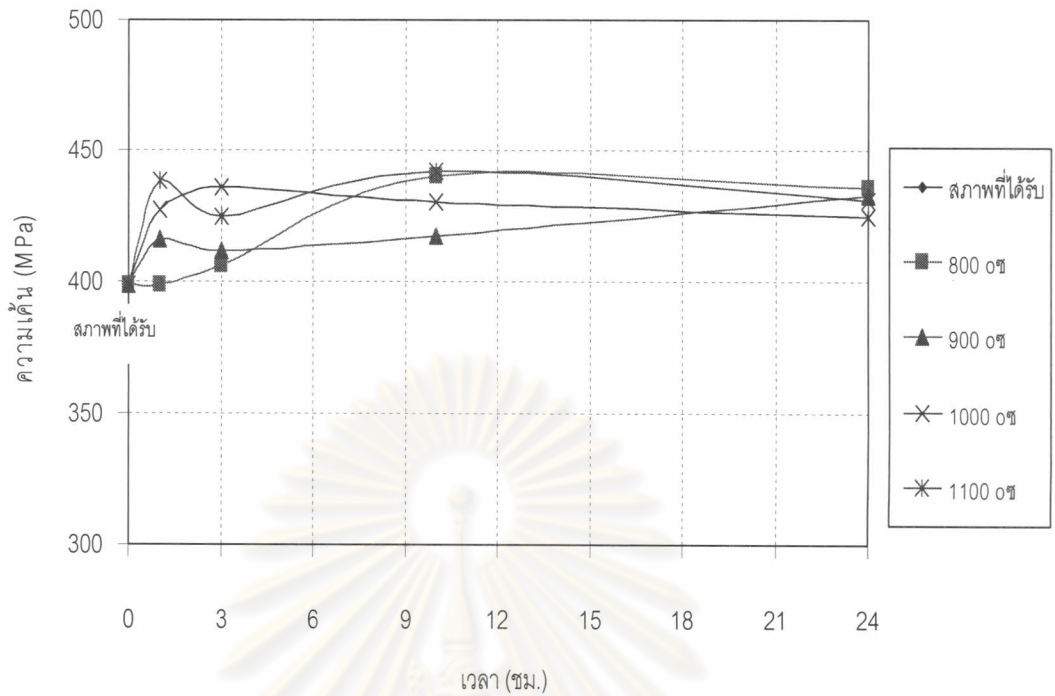
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



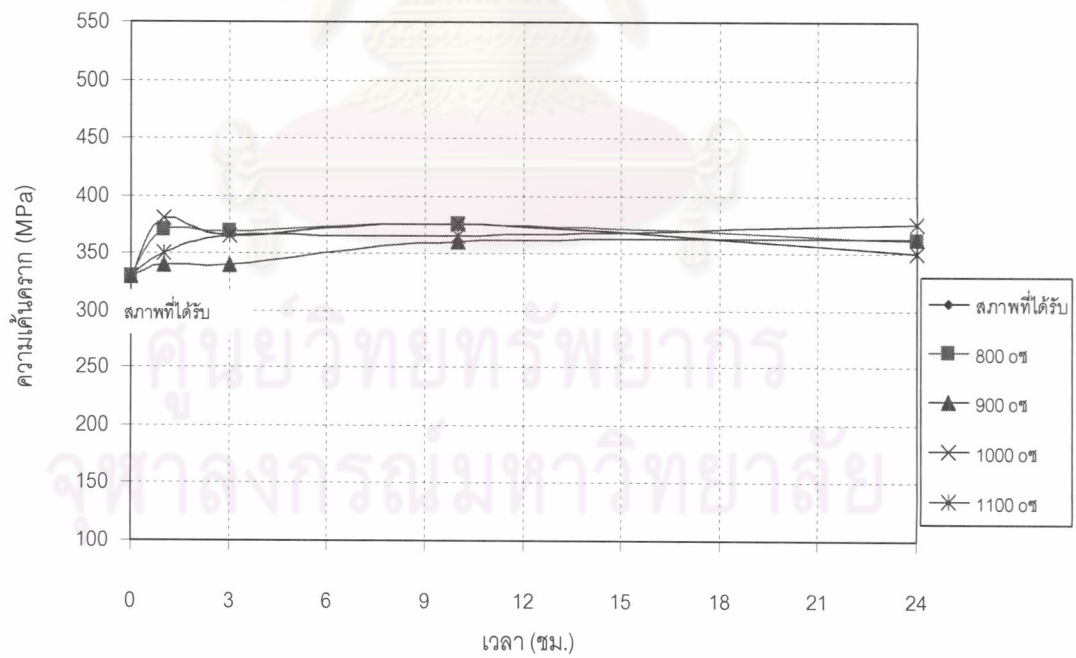
รูปที่ 4.17 กราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นตัวอย่างในสภาพที่ได้รับ



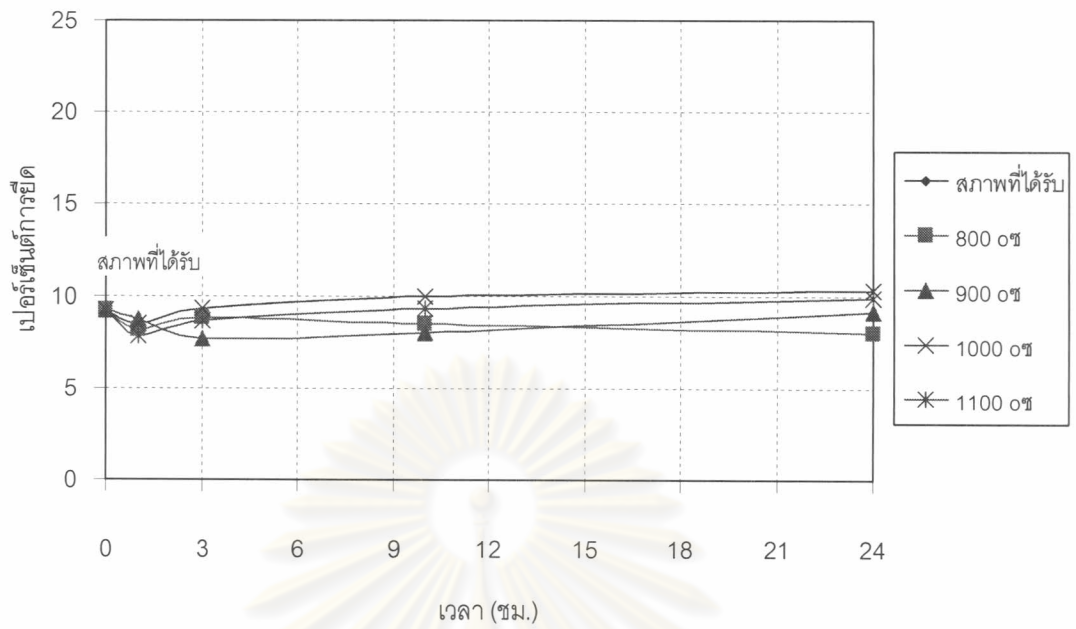
รูปที่ 4.18 กราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบชุบที่อุณหภูมิ 800 °ซ 10 ชม.



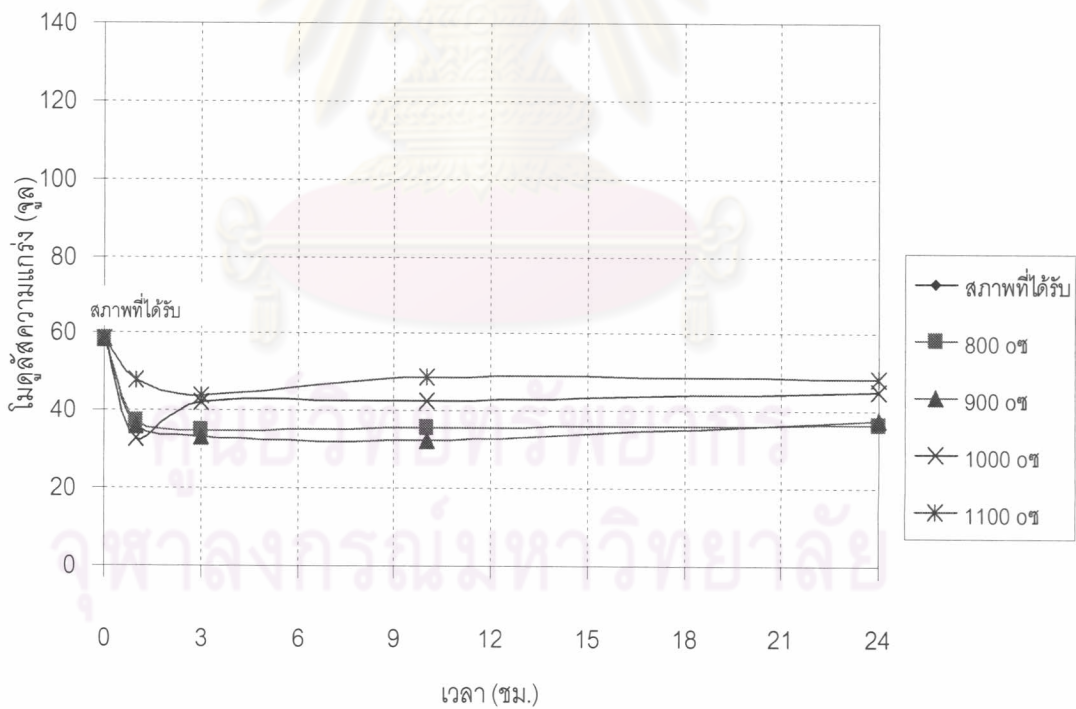
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับเวลาของชิ้นตัวอย่าง
ภายหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากกับเวลาของชิ้นตัวอย่าง
ภายหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การปิดกับเวลาของชิ้นตัวอย่าง
 ภายหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของความแกร่งกับเวลาของชิ้นตัวอย่าง
 ภายหลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน

4.3 แผนภูมิ TTP และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิ

4.3.1. แผนภูมิ TTP

นำชิ้นตัวอย่างภายหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800°, 900°, 1000° และ 1100 °ซ โดยแปรผันกับเวลาในช่วง 5 วินาที ถึง 24 ชม. มาทำการวัดสัดส่วนเชิงปริมาตรของคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่แต่ละเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งรายละเอียดการวัดและผลการวัดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข. นำค่าที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนเชิงปริมาตรกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งเป็นกราฟรูปตัวเอสที่ช่วงแรกปฏิกิริยาเกิดช้าเนื่องจากเวลาน้อย ส่วนช่วงที่สองปฏิกิริยาเกิดมากที่สุดและช่วงที่สามปฏิกิริยาเกิดช้าอีกครั้งเนื่องจากปฏิกิริยาเริ่มเข้าสู่สมดุล นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ ลดลงน่าจะมีสาเหตุจากคาร์ไบด์ทุติยภูมิละเอียดเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดโตขึ้นและการตกตะกอนใหม่เกิดน้อยลง จากรูปที่ ก19-ก34 (ภาคผนวก ก) ส่วนที่อุณหภูมิ 800 °ซ จะเห็นว่าปฏิกิริยาเกิดช้าสุด เนื่องจากพลังงานความร้อนน้อยกว่าทำให้การแพร่ของคาร์บอนช้ากว่า และยังเป็นสาเหตุให้ปริมาณของการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิน้อยด้วย สำหรับอุณหภูมิ 1000 °ซ เกิดการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิมากที่สุดคือประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และจากรูปที่ 4.24 พบว่าอุณหภูมิ 1000 °ซ คาร์ไบด์ทุติยภูมิใช้เวลาในการตกตะกอนน้อยที่สุดในขณะที่อุณหภูมิ 800 °ซ ใช้เวลาเวลาในการตกตะกอนมากที่สุด

4.3.2. จลนพลศาสตร์ของการตกตะกอนของคาร์ไบด์ทุติยภูมิตามสมการของ Johnson-Mehl และ Avrami

โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami สามารถหาผลของการตกตะกอนและการโตของคาร์ไบด์ทุติยภูมิได้เมื่อทราบค่าตัวแปร n ในสมการที่ (1) (รายละเอียดในการหาค่าตัวแปร n แสดงในภาคผนวก ข)

$$f = 1 - \exp(-kt^n) \dots \dots \dots (1)$$

f คือสัดส่วนเชิงปริมาตรของคาร์ไบด์ทุติยภูมิต่อคาร์ไบด์ปฐมภูมิที่อุณหภูมิคงที่ ค่าตัวแปร n (growth exponent) และค่าคงที่ k (temperature dependent constant)

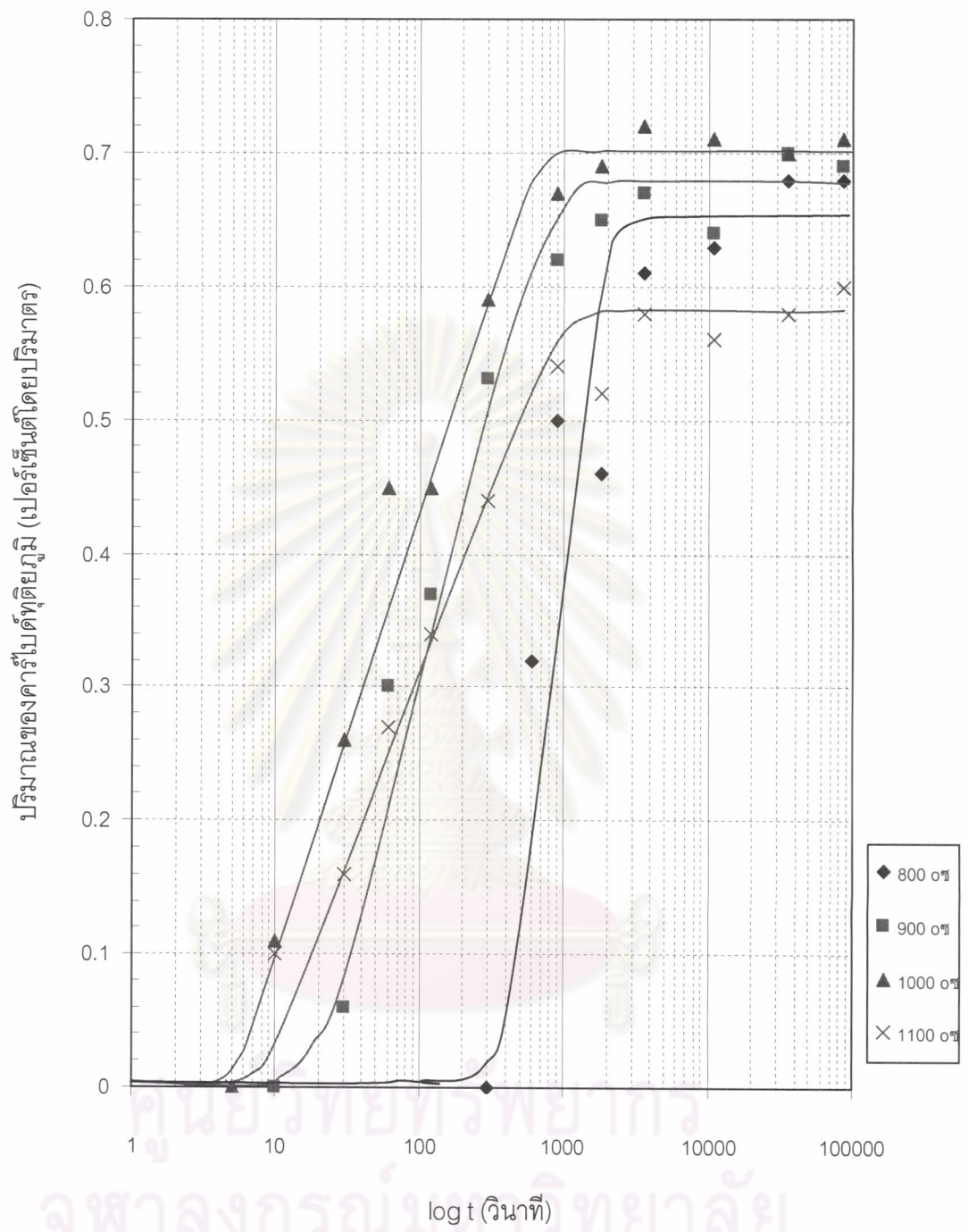
จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมานี้สามารถสร้างแผนภูมิการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิ ได้ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งแบ่งการตกตะกอนเป็นสองขั้นตอนที่ทุกอุณหภูมิ และเกิดการเปลี่ยนปฏิกิริยาจากขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนสองที่สัดส่วนเชิงปริมาตรประมาณ 0.22-0.26% และค่าตัวแปร n (ดูตารางที่ 4.8) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อปฏิกิริยาเปลี่ยนจากขั้นตอนแรกไปขั้นตอนสอง โดยขนาดและรูปร่างของคาร์ไบด์เปลี่ยนไปตามขั้นตอนของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาในขั้นแรกค่าตัวแปร n อยู่ระหว่าง 1-4 เกิดนิวเคลียสข้างขอบเกรน (grain edge boundary) และที่ขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ค่าตัวแปร n อยู่ระหว่าง 1-4 จากตารางที่ 4.9 ค่า n ในช่วงนี้หมายถึงอัตราการเกิดนิวเคลียสลดลง สำหรับปฏิกิริยาในขั้นตอนสองตัวแปร n มีค่าประมาณ 1 จากตารางที่ 4.9 ค่า n เท่ากับ 1 แสดงการโตของคาร์ไบด์รูปเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.27 แต่ปริมาณคาร์ไบด์รูปเข็มมีน้อยเนื่องจากในขั้นตอนสองอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา^(8,20) ได้จากสมการของอาร์เรเนียส ดังนี้

$$K = k_0 \exp (-Q/RT) \dots \dots \dots (2)$$

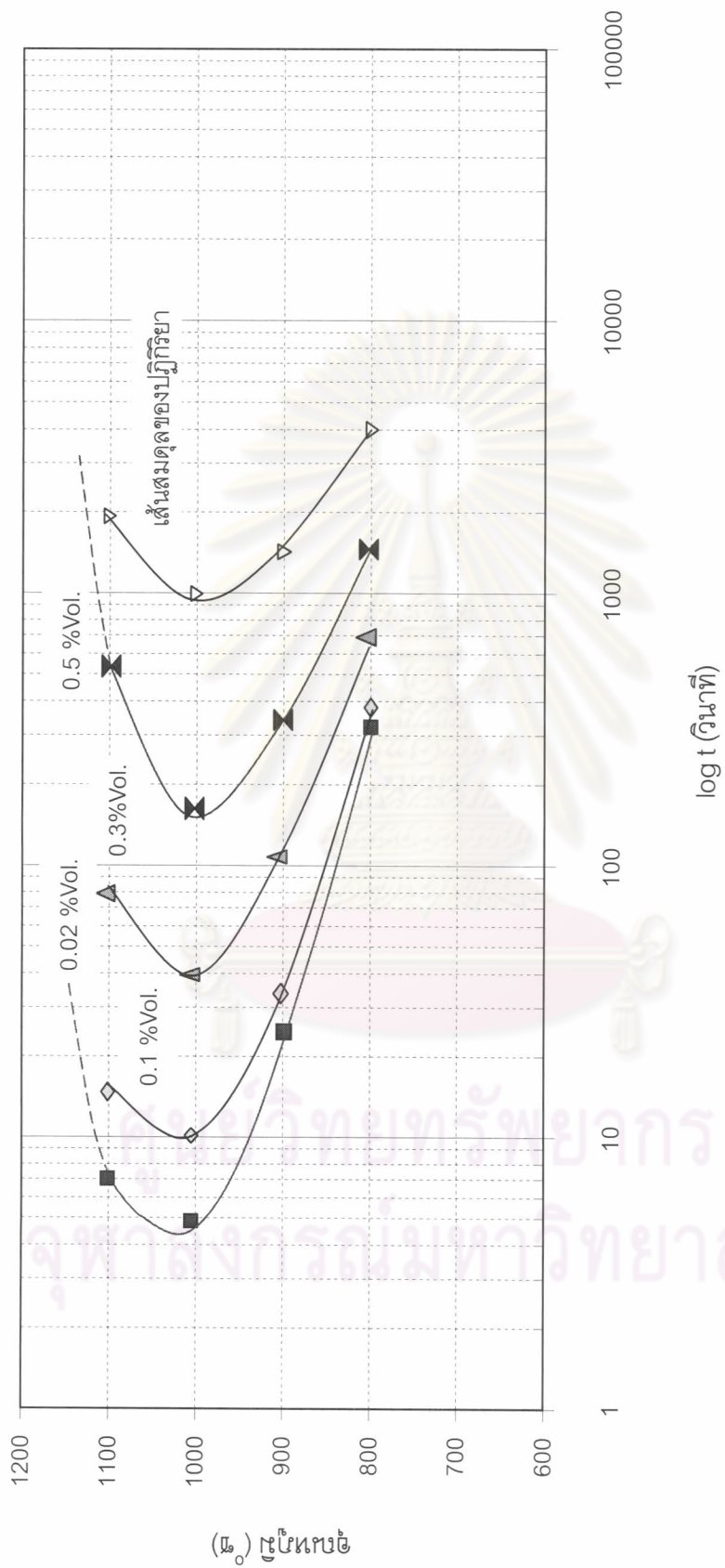
K คือค่าคงที่ได้จากสมการ (1) Q คือพลังงานกระตุ้น R คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 8.314 จูลต่อกรัมโมลเคลวิน และ T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

ค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากสมการข้างบนแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 โดยปฏิกิริยาขั้นตอนแรกใช้พลังงานกระตุ้นประมาณ 213.2 กิโลจูลต่อกรัมโมล การโตของตะกอนถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่ในเนื้อ (volume diffusion) นั่นคืออนุภาคโตในลักษณะ 3 มิติ ขั้นตอนสองใช้พลังงานกระตุ้นประมาณ 51.7 กิโลจูลต่อกรัมโมล การโตของตะกอนถูกควบคุมโดยกลไกการแพร่ที่ขอบเกรน^(8,20) นั่นคืออนุภาคโตในลักษณะ 2 มิติ

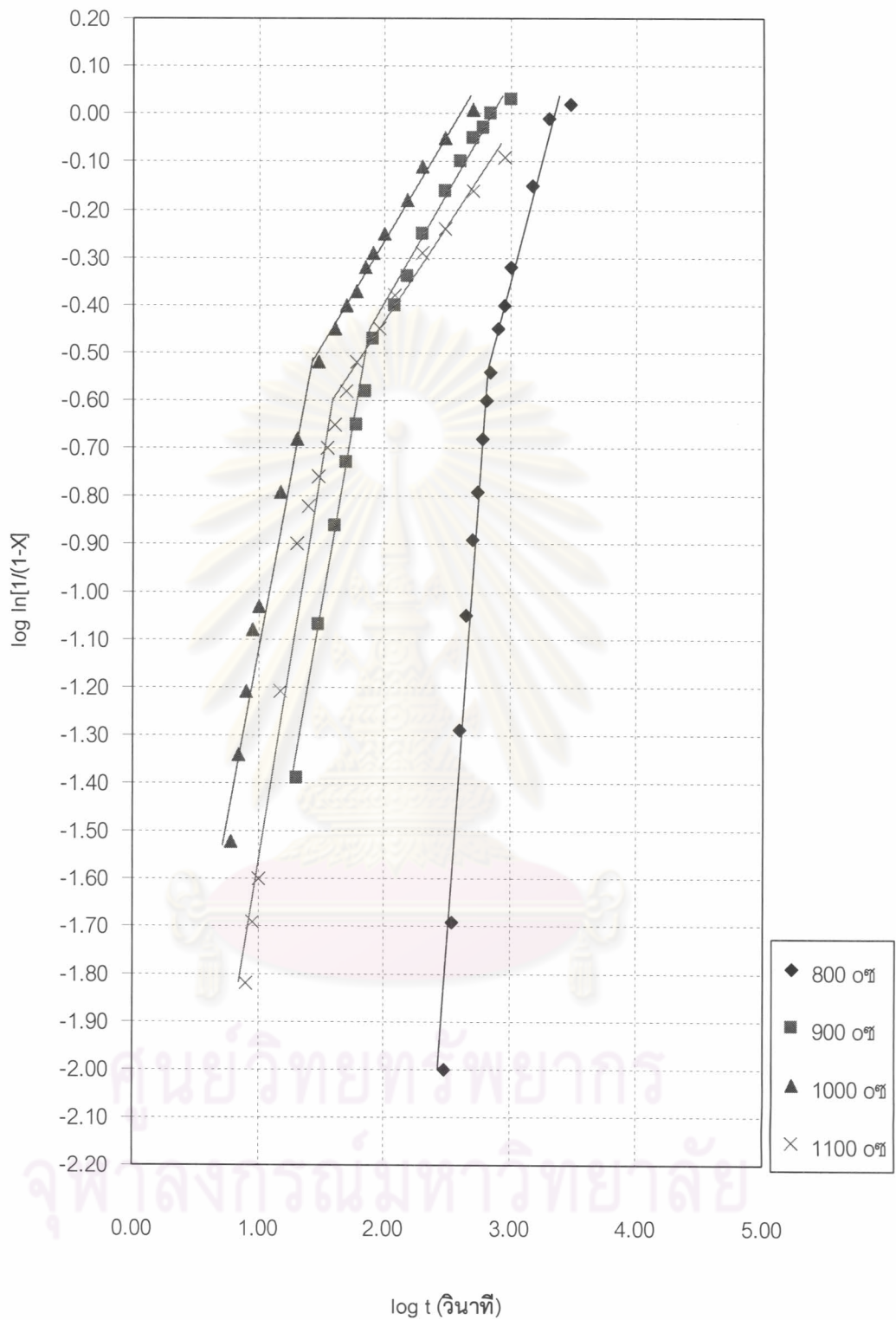
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตกตะกอนในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.24 แผนภูมิ TTP แสดงการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิโนโตหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6%



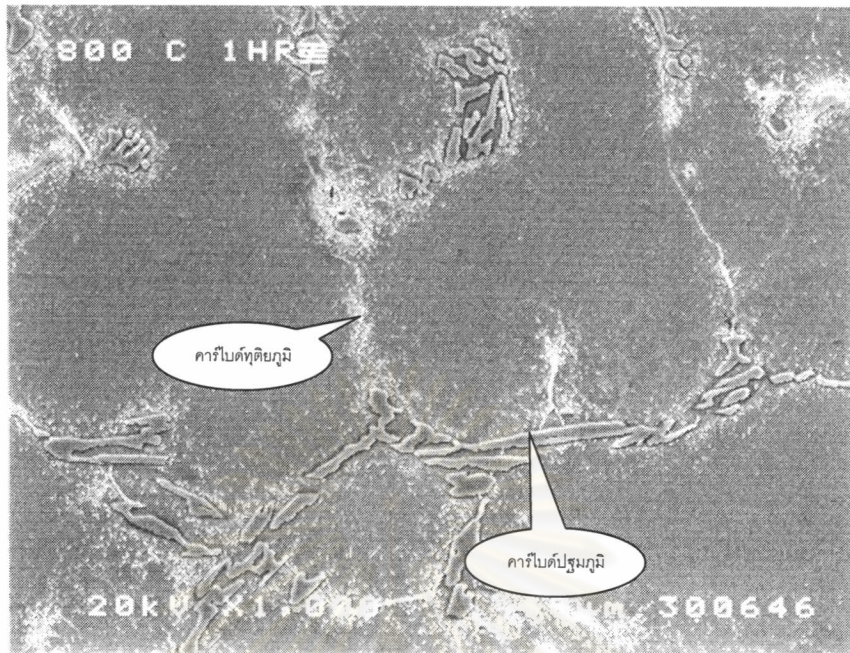
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิใน
โลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปร n (growth exponent), ค่าพลังงานกระตุ้น (Q), ค่าคงที่สมการอาร์เรเนียส (k_0) ของการตกตะกอนคาร์ไบด์ทิตานียมในโลหะผสมเหล็ก นิกเกิล 30.8% โครเมียม 26.6% ในสภาพที่ได้รับ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		800	900	1000	1100
ชั้นที่ 1	n	3.7	1.5	1.2	1.8
	Q , kJ/mol	213.2			
	k_0	9.08 E+11			
ชั้นที่ 2	n	0.9	0.5	0.4	0.4
	Q , kJ/mol	51.7			
	k_0	233.1			

ตารางที่ 4.9 ความหมายของค่า n ตามสมการ $f = 1 - \exp(-kt^n)$ ^(7,9) ตามสมการ Johnson-Mehl และ Avrami

(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	1
Thickening of very large plates, e.g. after complete edge impingement	½
Segregation to dislocations (very early stage only)	~ 2/3



รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง
ภายหลังจากการอบที่ 800 °ซ 1 ชม.



รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกวาดของชิ้นตัวอย่าง
ภายหลังจากการอบที่ 1000 °ซ 24 ชม.