

บทที่ 4

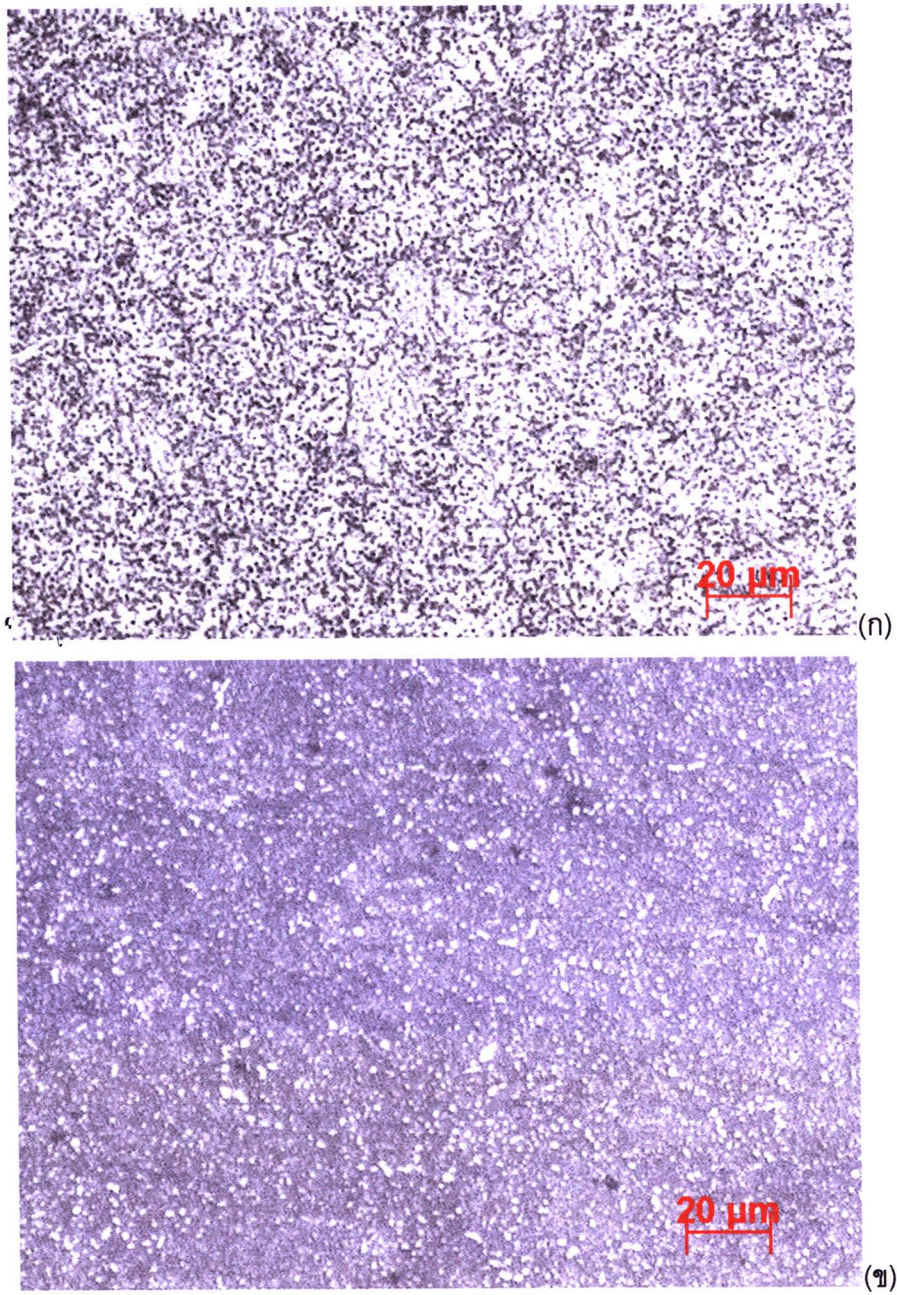
ผลการทดลองและการอภิปราย



4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

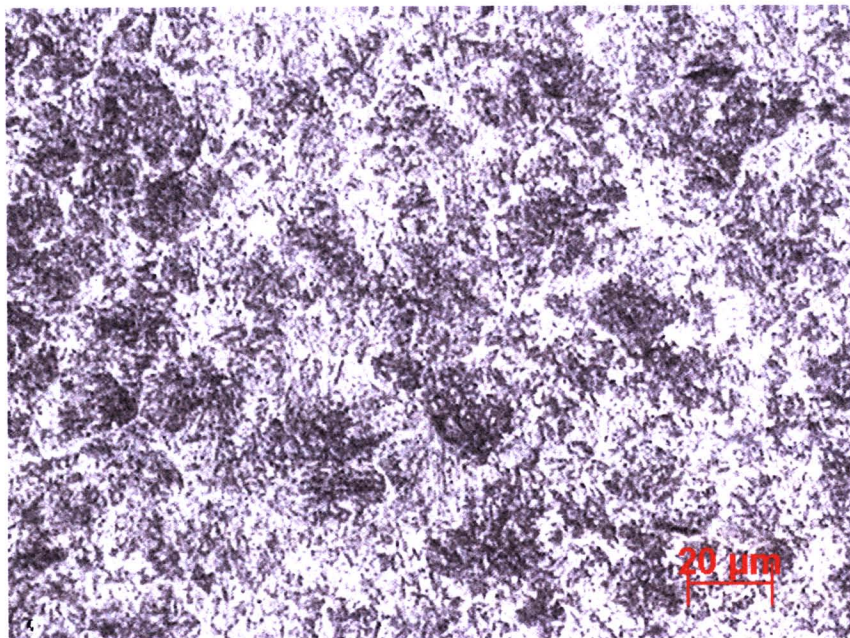
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคเริ่มต้น

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งมีโครงสร้างเป็นซีเมนต์ไคต์กลมบนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์ เมื่อกัดผิวด้วยสารละลาย nital 2% มีลักษณะของเนื้อพื้นขาวของเฟอร์ไรต์และมีลักษณะเม็ดกลมสีดำกระจายไปทั่วเนื้อพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และใช้สารละลาย Klemm ในการแยกแยะโครงสร้างจุลภาคซึ่งสารละลายชนิดนี้ทำให้เนื้อพื้นของเฟสอื่นถูกย้อมให้มีสีดำ ในขณะที่ซีเมนต์ไคต์ถูกทำให้เห็นชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูป 4.1(ข) ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคเริ่มต้นของชิ้นงานเป็นซีเมนต์ไคต์กลมบนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์

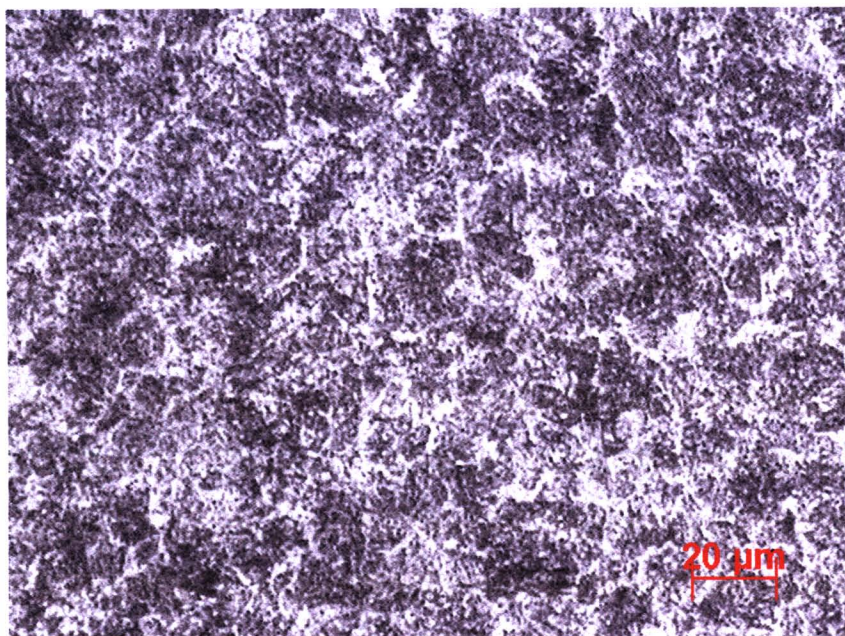


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคเริ่มต้นของชั้นงานซีเมนต์ไคต์กลมบนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์ (200x)

(ก) กัดผิวด้วยสารละลาย nital 2% (ข) กัดผิวด้วยสารละลาย Klemm

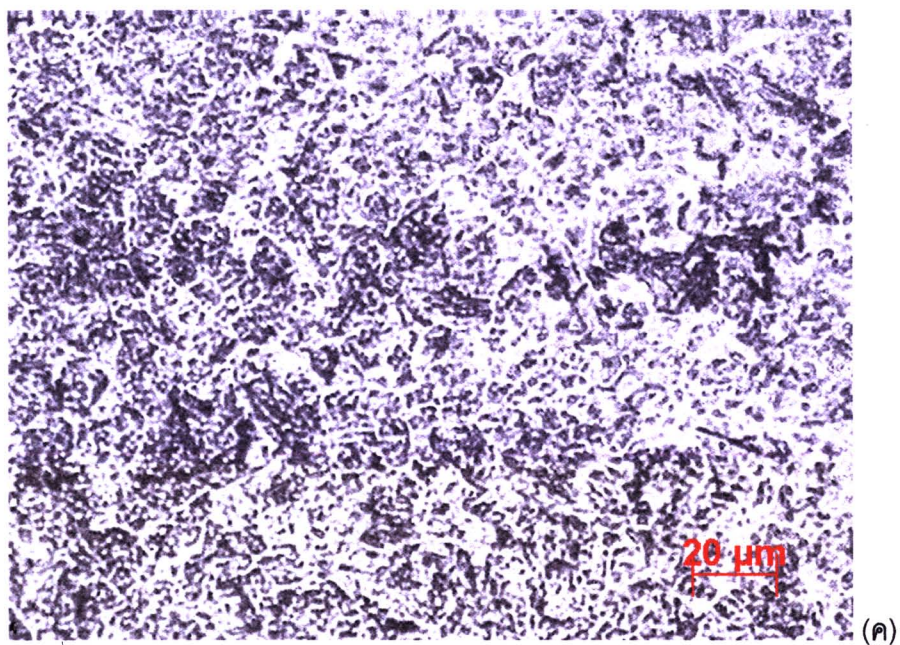


(ก)

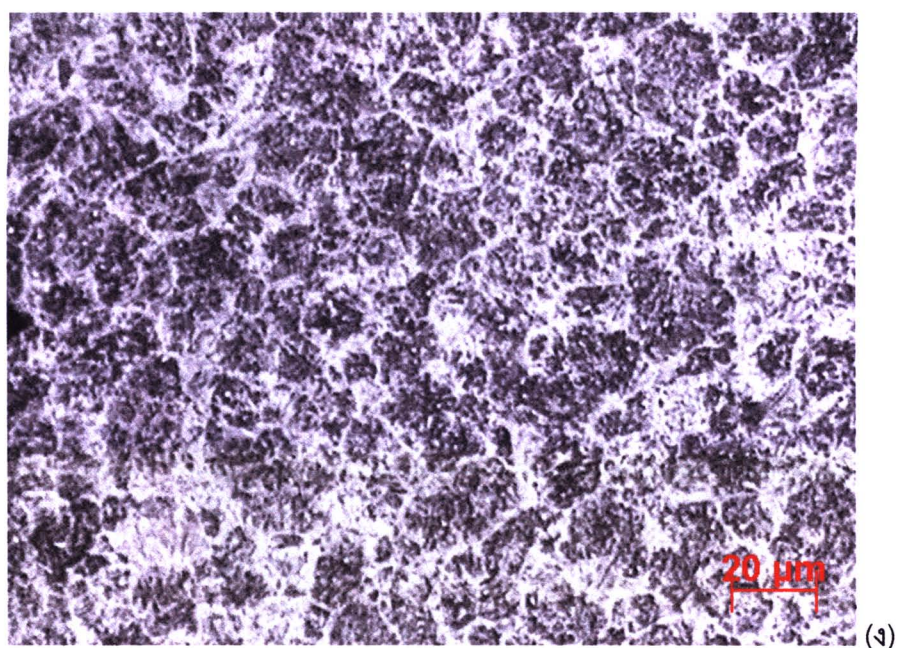


(ข)

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ต่างๆและอบคืนตัวกึ่งผิวของชิ้นงานด้วยสารละลาย nital 2%, 200x (ก) 800°C (ข) 815°C (ค) 845°C (ง) 860°C

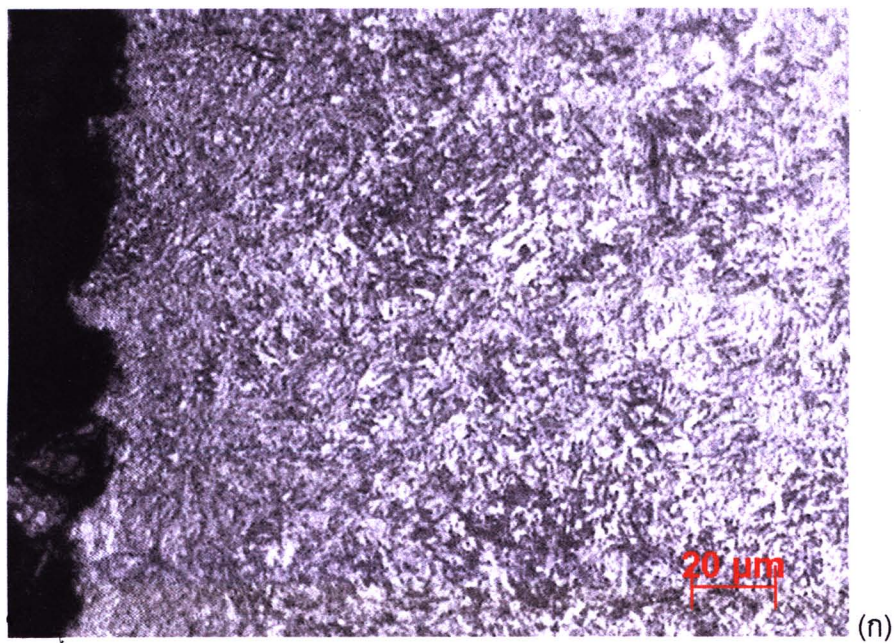


(ค)

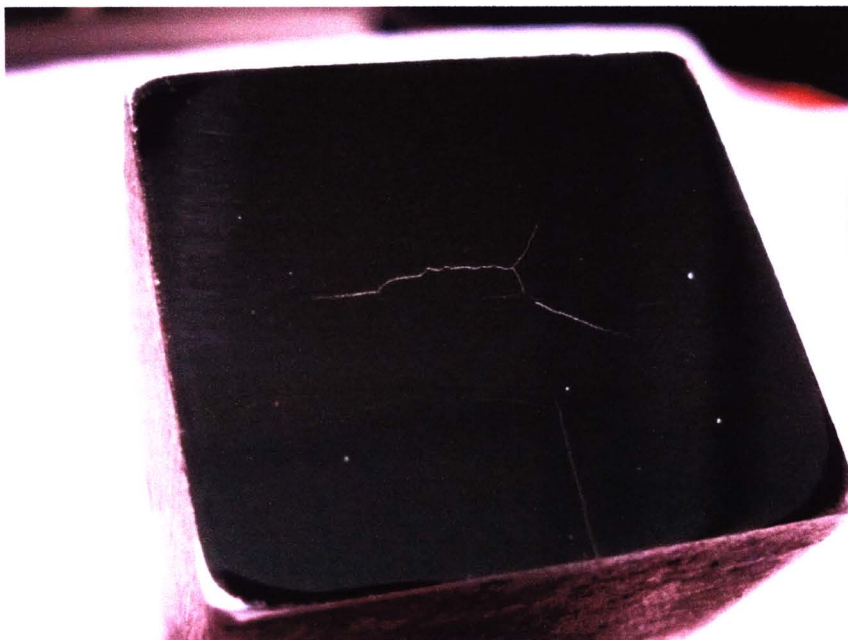


(ง)

รูปที่ 4.2(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ต่างๆและอบคืนตัว
 กัดผิวของชิ้นงานด้วยสารละลาย nital 2%, 200x (ก) 800°C (ข) 815°C (ค) 845°C (ง)
 860°C



(ก)

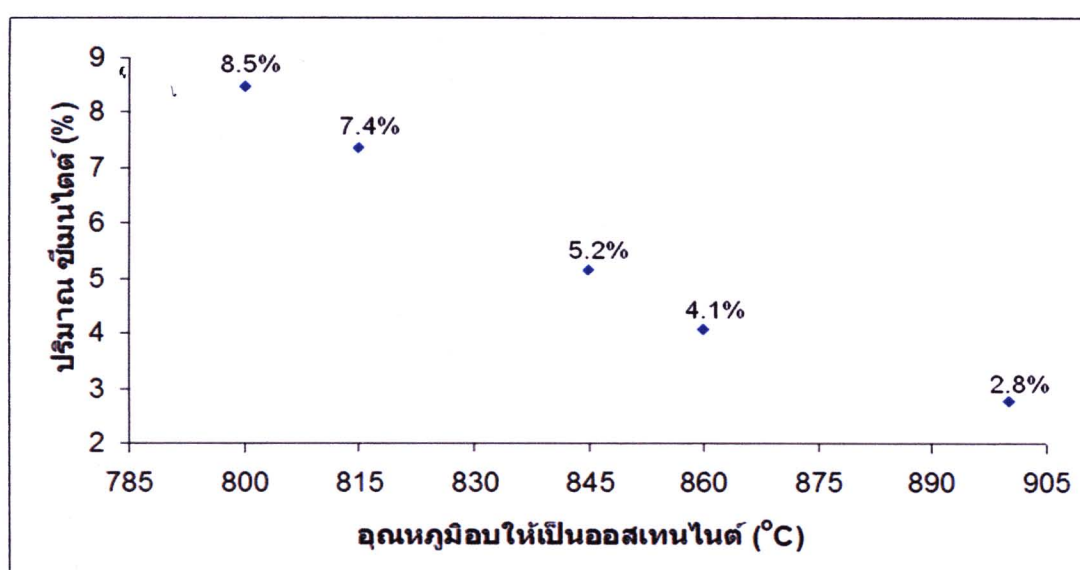


(ข)

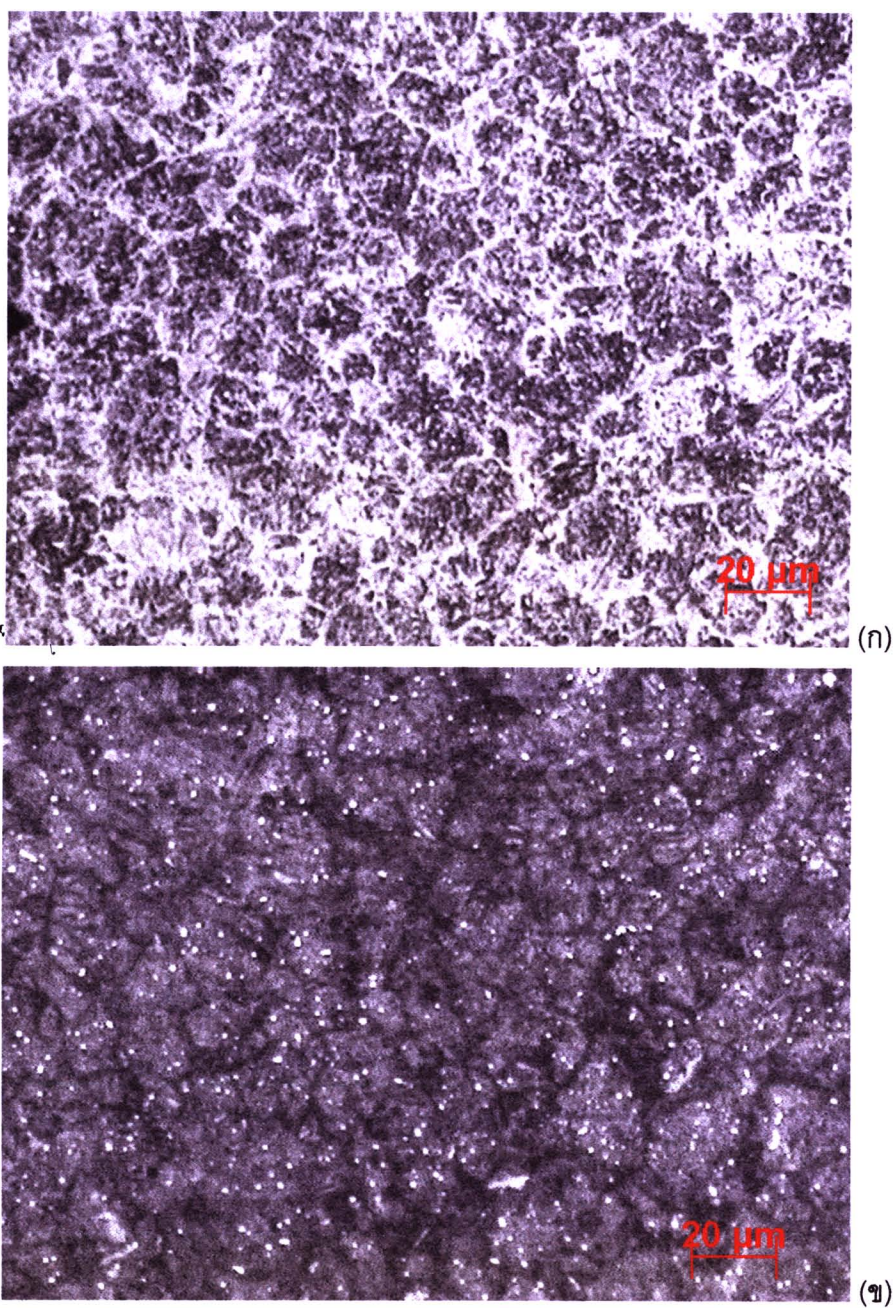
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัว (ก) กัดผิวของชิ้นงานด้วยสารละลาย nital 2%, 200x (ข) รอยแตกที่ผิวชิ้นงาน

4.2 การหาปริมาณซีเมนต์ที่ไม่ละลาย

เมื่อใช้สารละลาย Klemm กัดผิวชิ้นงานพบว่าลักษณะ ghost line ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำให้เห็นซีเมนต์ไครต์ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.5 ใช้โปรแกรม Image J หาสัดส่วนเชิงปริมาตรของซีเมนต์ไครต์ที่ไม่ละลายจากรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาค เมื่ออบเหล็กกล้าให้เป็นออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิสูง ซีเมนต์ไครต์ส่วนหนึ่งละลายในออสเทนไนต์และมีซีเมนต์ไครต์จำนวนหนึ่งไม่ละลาย ซีเมนต์ไครต์ที่ไม่ละลายมีปริมาณลดลงจาก 8.5% เป็น 2.8% ตามอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ที่เพิ่มขึ้นจาก 800-900°C ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สำหรับโครงสร้างจุลภาคเริ่มต้นเป็นซีเมนต์ไครต์กลมบนเนื้อพื้นเฟอร์ไรต์หาปริมาณซีเมนต์ไครต์ได้ 14 %



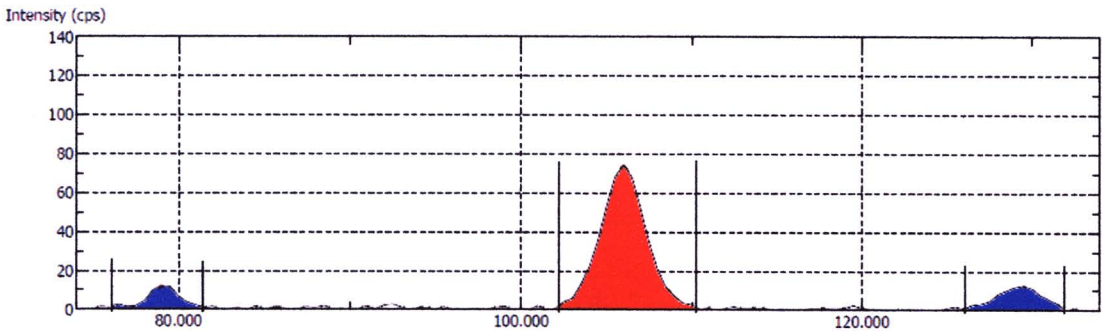
รูปที่ 4.4 ปริมาณซีเมนต์ไครต์กลมที่ไม่ละลายเมื่ออบให้เป็นออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.5 ชิ้นงานที่ถูกชุบแข็งและอบคืนตัว (200x) (ก) กัดด้วยสารละลาย nital 2%
(ข) กัดด้วยสารละลาย Klemm

4.3 การหาปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้าง

4.3.1 การหาปริมาณออสเทนไนต์ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800°C และอบคืนตัว



รูปที่ 4.6 ผลจากเครื่องรังสีเอกซ์หลังลบ background แล้ว

ของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800°C และอบคืนตัว

ตารางที่ 4.1 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800°C และอบคืนตัว

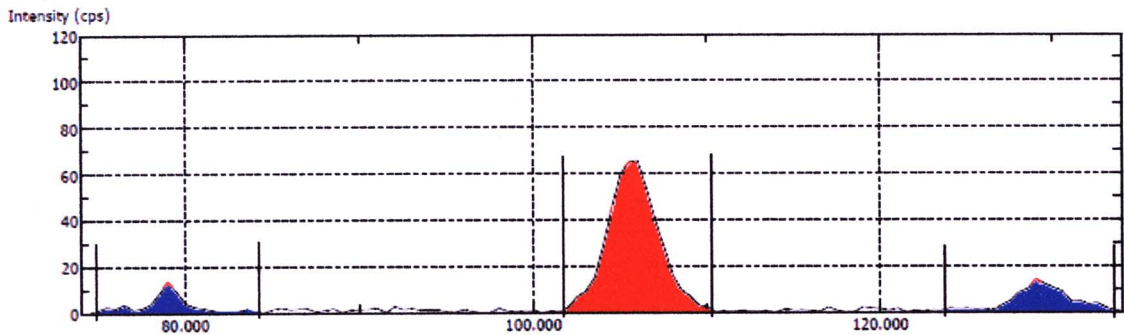
	ระนาบ (hkl)	integrated intensity	R
ออสเทนไนต์	200	415	34.78
มาร์เทนไซต์	200	4296	20.73
ออสเทนไนต์	220	647	47.88

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800°C และอบคืนตัว

ออสเทนไนต์ที่ระนาบ (hkl)	มาร์เทนไซต์ที่ระนาบ (hkl)	ปริมาณออสเทนไนต์ (%)
200	200	4.983
220	200	5.603

ปริมาณซีเมนไตต์ที่ไม่ละลาย 8.5 % ผลการคำนวณสัดส่วนระหว่าง integrated intensity austenite (220)/ integrated intensity austenite (200) มีค่า 1.56 และค่าเฉลี่ยปริมาณออสเทนไนต์มีค่า 5.3%

4.3.2 การหาปริมาณออสเทนไนต์ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 815°C และอบคืนตัว



รูปที่ 4.7 ผลจากเครื่องรังสีเอกซ์หลังลบ background แล้ว

ของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 815°C และอบคืนตัว

ตารางที่ 4.3 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 815°C และอบคืนตัว

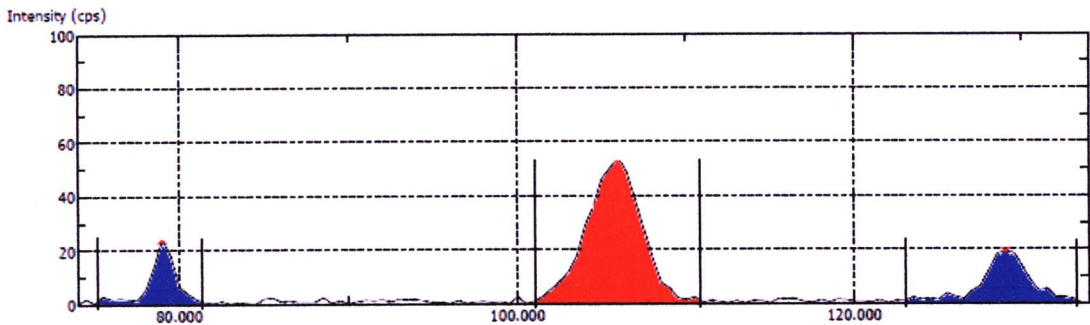
	ระนาบ (hkl)	integrated intensity	R
ออสเทนไนต์	200	346	34.78
มาร์เทนไซด์	200	3086	20.73
ออสเทนไนต์	220	593	47.88

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 815°C และอบคืนตัว

ออสเทนไนต์ที่ระนาบ (hkl)	มาร์เทนไซด์ที่ระนาบ (hkl)	ปริมาณออสเทนไนต์ (%)
200	200	5.63
220	200	6.91

ปริมาณซีเมนไตต์ที่ไม่ละลาย 7.4 % ผลการคำนวณสัดส่วนระหว่าง integrated intensity austenite (220)/ integrated intensity austenite (200) มีค่า 1.7 และค่าเฉลี่ยปริมาณออสเทนไนต์มีค่า 6.3%

4.3.3 การหาปริมาณออสเทนไนต์ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C และอบคืนตัว



รูปที่ 4.8 ผลจากเครื่องรังสีเอ็กซ์หลังลบ background แล้ว

ของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C และอบคืนตัว

ตารางที่ 4.5 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C และอบคืนตัว

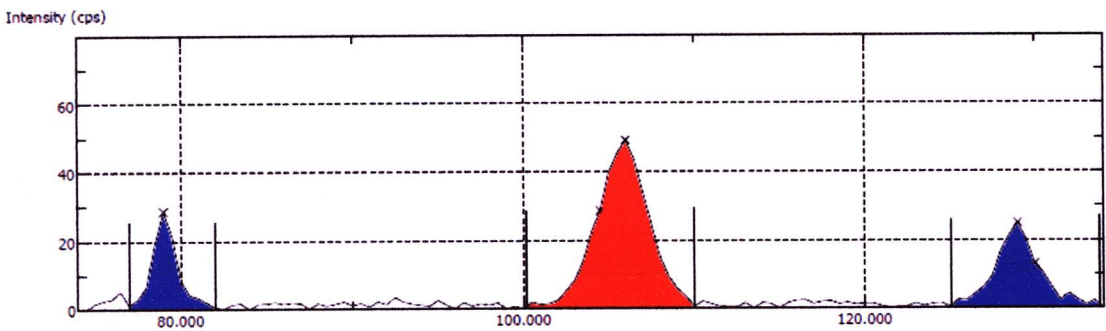
	ระนาบ (hkl)	integrated intensity	R
ออสเทนไนต์	200	588	34.78
มาร์เทนไซด์	200	3348	20.73
ออสเทนไนต์	220	989	47.88

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845°C และอบคืนตัว

ออสเทนไนต์ที่ระนาบ (hkl)	มาร์เทนไซด์ที่ระนาบ (hkl)	ปริมาณออสเทนไนต์ (%)
200	200	8.98
220	200	10.75

ปริมาณซีเมนไตต์ที่ไม่ละลาย 5.2 % ผลการคำนวณสัดส่วนระหว่าง integrated intensity austenite (220)/ integrated intensity austenite (200) มีค่า 1.7 และค่าเฉลี่ยปริมาณออสเทนไนต์มีค่า 9.9%

4.3.4 การหาปริมาณออสเทนไนต์ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 860°C และอบคืนตัว



รูปที่ 4.9 ผลจากเครื่องรังสีเอกซ์หลังลบ background แล้ว

ของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 860°C และอบคืนตัว

ตารางที่ 4.7 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 860°C และอบคืนตัว

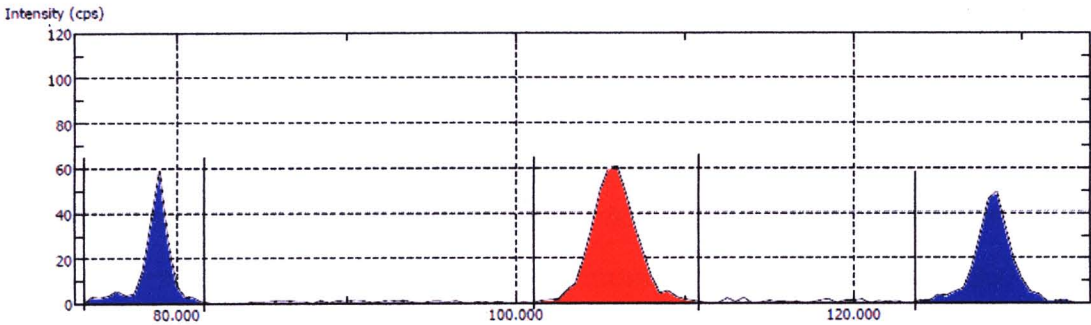
	ระนาบ (hkl)	integrated intensity	R
ออสเทนไนต์	200	1352	34.78
มาร์เทนไซด์	200	5311	20.73
ออสเทนไนต์	220	2101	47.88

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 860°C และอบคืนตัว

ออสเทนไนต์ที่ระนาบ (hkl)	มาร์เทนไซด์ที่ระนาบ (hkl)	ปริมาณออสเทนไนต์ (%)
200	200	12.43
220	200	14.12

ปริมาณซีเมนไตต์ที่ไม่ละลาย 4.1 % ผลการคำนวณสัดส่วนระหว่าง integrated intensity austenite (220)/ integrated intensity austenite (200) มีค่า 1.6 และค่าเฉลี่ยปริมาณออสเทนไนต์มีค่า 13.3%

4.3.5 การหาปริมาณออสเทนไนต์ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัว



รูปที่ 4.10 ผลจากเครื่องรังสีเอกซ์หลังลบ background แล้ว

ของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัว

ตารางที่ 4.9 ค่าในการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัว

	ระนาบ (hkl)	integrated intensity	R
ออสเทนไนต์	200	1597	34.78
มาร์เทนไซด์	200	3728	20.73
ออสเทนไนต์	220	2291	47.88

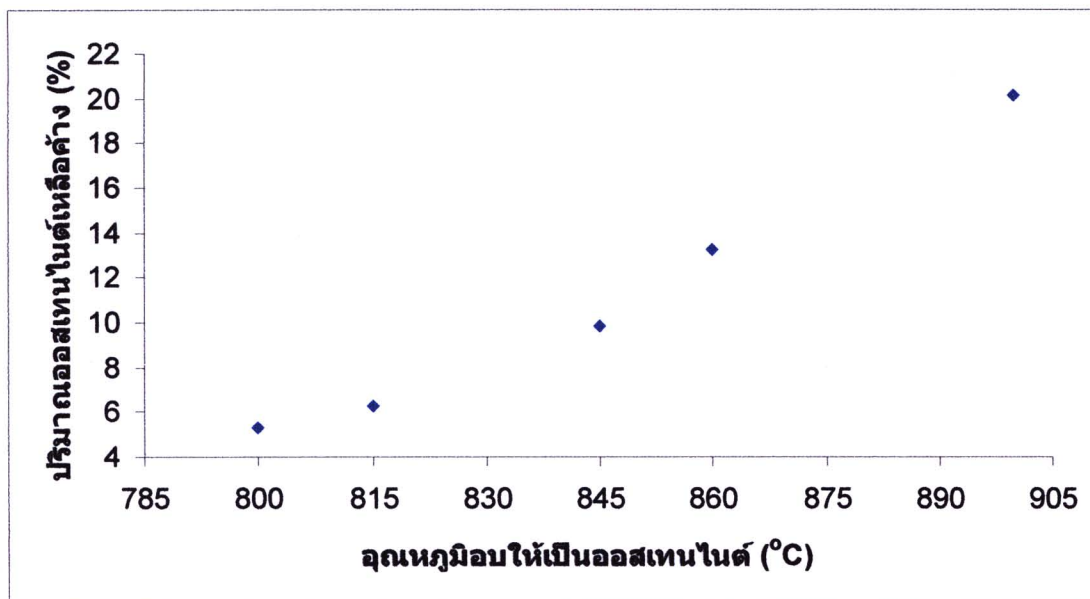
ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณของชิ้นงานใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 900°C และอบคืนตัว

ออสเทนไนต์ที่ระนาบ (hkl)	มาร์เทนไซด์ที่ระนาบ (hkl)	ปริมาณออสเทนไนต์ (%)
200	200	19.78
220	200	20.43

ปริมาณซีเมนไตต์ที่ไม่ละลาย 2.8 % ผลการคำนวณสัดส่วนระหว่าง integrated intensity austenite (220)/ integrated intensity austenite (200) มีค่า 1.4 และค่าเฉลี่ยปริมาณออสเทนไนต์มีค่า 20.1%

ผลการคำนวณสัดส่วนระหว่าง integrated intensity austenite (220)/ integrated intensity austenite (200) ในทุกชิ้นงานมีค่าไม่เกินช่วง 1.1-1.7 แสดงว่าสามารถใช้การคำนวณหาปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างด้วยวิธีนี้

เมื่อพิจารณาปริมาณซีเมนไตต์ที่ไม่ละลาย ปริมาณออสเทนไนต์และอุณหภูมิการอบให้เป็นออสเทนไนต์พบว่าความสัมพันธ์กัน ซีเมนไตต์ที่ไม่ละลายมีปริมาณลดลงจาก 8.5% เป็น 2.8% เมื่ออุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์สูงขึ้นจาก 800°C เป็น 900°C ส่วนปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.3% เป็น 20.1% เมื่ออบเหล็กให้เป็นออสเทนไนต์จาก 800 °C เป็น 900°C ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจากมีปริมาณธาตุคาร์บอนจากการละลายตัวของซีเมนไตต์ในออสเทนไนต์มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนต์และลดค่าอุณหภูมิ Ms ให้ต่ำลง จึงทำให้ภายหลังจากเย็นตัวเร็วและอบคืนตัวมีปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างมากขึ้น

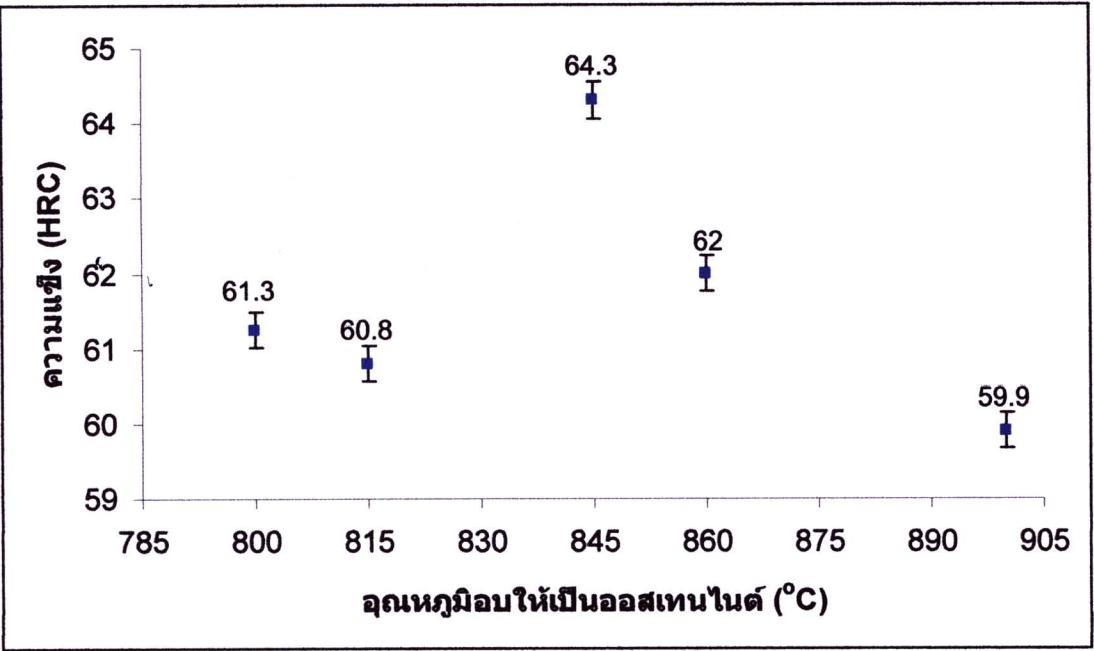


รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณหาปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้าง

เมื่ออบให้เป็นออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.4 ความแข็งแรงหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

ความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ที่ 800°C และ 815°C มีค่า 61.3 HRC และ 60.8 HRC ซึ่งแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 845°C ความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าสูงสุดที่ค่า 64.3 HRC และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นพบว่าความแข็งแรงกลับลดลงมีความแข็งแรงที่ 62 HRC และ 59.9 HRC ที่อุณหภูมิที่ 860°C และ 900°C ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความแข็งแรงเมื่ออบให้เป็นออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากกรรมวิธีทางความร้อนมีผลต่อความแข็งแรงของ เนื่องจากออสเทนไนต์มีความแข็งแรงต่ำกว่ามาร์เทนไซต์อยู่มากดังนั้นหากมีออสเทนไนต์เหลือค้างทำให้ความแข็งแรงโดยรวมของมาร์เทนไซต์ลดลง พบว่าอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ที่สูงมีปริมาณออสเทนไนต์เหลือค้างมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ในช่วง 845-900°C ลดลง

การเพิ่มความแข็งแรงในช่วงอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800-845°C ความแข็งแรงสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ที่ 845°C โดยอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์สูงขึ้นทำให้คาร์บอนจากการละลายของซีเมนไตต์ในออสเทนไนต์มากและภายหลังจากการเย็นตัวเร็วมาร์เทนไซต์ที่ได้มีการละลายอิมตัวยังยวดของคาร์บอนมากขึ้น หากพิจารณาผลของการละลายอิมตัวยังยวดของคาร์บอนในมาร์เทนไซต์ต่อความแข็งแรงดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าที่

ปริมาณมาร์เทนไซต์ 99% และความเข้มข้นของคาร์บอนที่ 0.6% คือ ความแข็งของมาร์เทนไซต์ที่มีการละลายอิมตัวยิ่งยวดของคาร์บอนที่ 0.6% มีค่า 64.3 HRC ซึ่งชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ที่ 845°C ได้ความแข็งที่ 64.3 HRC แสดงว่าชิ้นงานภายหลังจากอบให้เป็นออสเทนไนต์และเย็นตัวเร็วได้การละลายอิมตัวยิ่งยวดของคาร์บอนในมาร์เทนไซต์ที่ 0.6% เปรียบเทียบกับความแข็งของมาร์เทนไซต์ที่มีการละลายอิมตัวยิ่งยวดของคาร์บอนที่ 0.52% มีค่า 61.7 HRC ซึ่งชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ที่ 800°C ได้ความแข็งใกล้เคียงกันที่ 61.3 HRC แสดงว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ที่ 800°C ได้การละลายอิมตัวยิ่งยวดของคาร์บอนในมาร์เทนไซต์ที่ 0.52% ซึ่งการละลายอิมตัวยิ่งยวดของคาร์บอนในมาร์เทนไซต์ที่มากทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น

ดังนั้นสรุปได้ว่าที่ช่วงอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 800-845°C การละลายอิมตัวยิ่งยวดของคาร์บอนในมาร์เทนไซต์เพิ่มทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น และที่ช่วงอุณหภูมิอบให้เป็นออสเทนไนต์ 845-900°C ปริมาณออสเทนไนต์เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง

ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นของคาร์บอนและปริมาณมาร์เทนไซต์ต่อความแข็ง

โดย M คือ มาร์เทนไซต์[5]

Carbon, %	Hardness, HRC				
	99% M	95% M	90% M	80% M	50% M
0.10	38.5	32.9	30.7	27.8	26.2
0.12	39.5	34.5	32.3	29.3	27.3
0.14	40.6	36.1	33.9	30.8	28.4
0.16	41.8	37.6	35.3	32.3	29.5
0.18	42.9	39.1	36.8	33.7	30.7
0.20	44.2	40.5	38.2	35.0	31.8
0.22	45.4	41.9	39.6	36.3	33.0
0.24	46.6	43.2	40.9	37.6	34.2
0.26	47.9	44.5	42.2	38.8	35.3
0.28	49.1	45.8	43.4	40.0	36.4
0.30	50.3	47.0	44.6	41.2	37.5
0.32	51.5	48.2	45.8	42.3	38.5
0.34	52.7	49.3	46.9	43.4	39.5
0.36	53.9	50.4	47.9	44.4	40.5
0.38	55.0	51.4	49.0	45.4	41.5
0.40	56.1	52.4	50.0	46.4	42.4
0.42	57.1	53.4	50.9	47.3	43.4
0.44	58.1	54.3	51.8	48.2	44.3
0.46	59.1	55.2	52.7	49.0	45.1
0.48	60.0	56.0	53.5	49.8	46.0
0.50	60.9	56.8	54.3	50.6	46.8
0.52	61.7	57.5	55.0	51.3	47.7
0.54	62.5	58.2	55.7	52.0	48.5
0.56	63.2	58.9	56.3	52.6	49.3
0.58	63.8	59.5	57.0	53.2	50.0
0.60	64.3	60.0	57.5	53.8	50.7

M, martensite