

ผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า  
ความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ



นาย อังคาร พงษ์ไพบูลย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

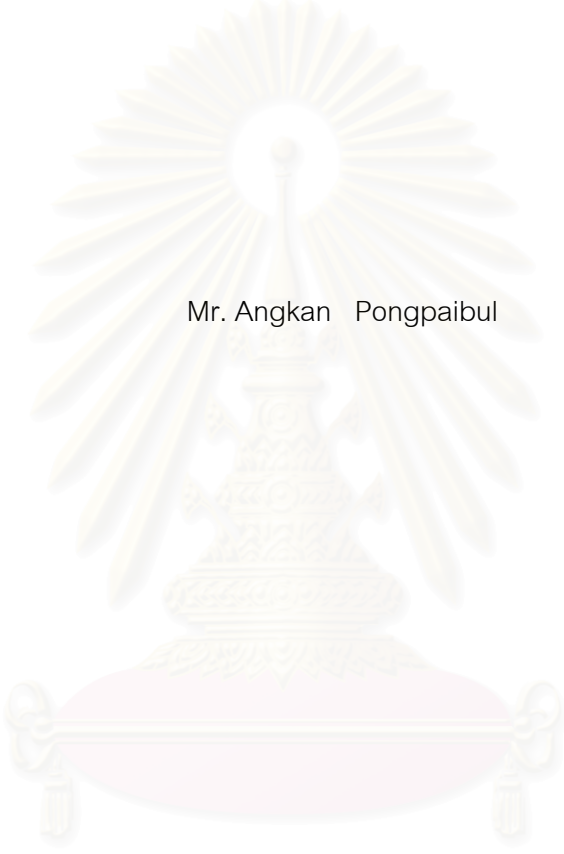
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0373-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF COLD REDUCTION AND ANNEALING TEMPERATURE ON  
MECHANICAL PROPERTIES OF THE HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL

Mr. Angkan Pongpaibul



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0373-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของปริมาณการรื้อดิน และอุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกลของ  
เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ  
โดย นาย อังคาร พงษ์ไพบูลย์  
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

อังคาร พงษ์ไพบุลย์ : ผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกล  
ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (Effects of Cold Reduction and Annealing  
Temperature on Mechanical Properties of the High-Strength Low-Alloy Steel)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ; 107 หน้า

ISBN 974-13-0373-4

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิอบอ่อน ต่อสมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาค  
ในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ โดยอบชิ้นงานให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C แล้วรีดหยาบที่  
อุณหภูมินี้ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลง แล้วรีดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 860°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ  
630°C จากนั้นนำชิ้นงานมารีดเย็น และอบอ่อน นำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบ  
แรงดึง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีความสามารถในการขึ้นรูปหลังการอบอ่อน  
สูงกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C เป็นผลจากการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ไม่เกิดการตกตะกอนของ  
อนุภาคในขณะม้วนเก็บช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ส่วนการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C มีการตกตะกอน  
ของอนุภาคในขณะม้วนเก็บทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปลดลง ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีโครงสร้าง  
สร้างเพิร์ลไลท์ขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวมากกว่า ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C มีผลทำให้ชิ้นงานที่  
ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีปริมาณการตกผลึกใหม่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ส่งผลให้ชิ้นงาน  
ที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีจุดครากสูง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C  
เมื่ออบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C ถึง 640°C ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนในช่วงอุณหภูมิ 660°C ถึง 680°C พบ  
ว่าไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณการรีด  
เย็นในช่วง 50% ถึง 70% และการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 620°C ถึง 680°C ช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2543.....

## 4170640321: Major METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS: COLD REDUCTION, ANNEALING TEMPERATURE, HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL. ANGKAN PONGPAIBUL: EFFECTS OF COLD REDUCTION AND ANNEALING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.PRASONK SRICHAROENCHAI (D.ENG) 107 p.p. ISBN 974-13-0373-4

This study investigates effects of %cold reduction and annealing temperature on mechanical properties and microstructure of high-strength low-alloy steel. Specimens were reheated at temperature of 1,150°C, roughing rolled at the same temperature, finishing rolled at 860°C and coiled between temperatures of 550°C and 630°C. Mechanical properties were examined by tensile test and microstructure was investigated by optical microscope.

Results show that specimens coiled at 550°C have better formability than those coiled at 630°C. This effect might be due to precipitation of particles during coiling temperature of 630°C while precipitation did not take place at coiling temperature of 550°C. Pearlite structure in specimens coiled at 550°C has smaller sizes and more distribution than those coiled at 630°C, as a result, specimens coiled at 550°C have lower % recrystallization than those coiled at 630°C. This effect causes specimens coiled at 550°C have higher yield strength and lower %elongation than those coiled at 630°C at annealing temperature of 620°C and 640°C while increase of annealing temperature between 660°C and 680°C have no effect on yield strength in specimens coiled at 550°C. Furthermore increase of %cold reduction from 50% to 70% and increase of annealing temperature from 620°C to 680°C results in better formability.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department .....Metallurgical Engineering..... Student's signature.....  
Field of study.....Metallurgical Engineering..... Advisor's signature.....  
Academic year.....2000.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา และช่วยชี้แนะมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ Professor Tibor Kvackaj ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมชิ้นงาน และ Professor Jozef Zrnik ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียม และทดสอบชิ้นงาน จาก Technical University of Kosice ประเทศสาธารณรัฐสโลวาเกีย

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในส่วนของเงินทุนที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาว ชองทอง จรัสสิงห์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบิดา มารดา และทุกคนที่บ้าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้กำลังใจสนับสนุน การศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการศึกษา งานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 บทบาทของธาตุผสมในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ.....	4
2.2 สภาวะการรีดร้อน.....	8
2.2.1 อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก.....	8
2.2.2 อุณหภูมิการรีดสุดท้าย และอุณหภูมิมีวนเก็บ .....	9
2.3 ปริมาณการรีดเย็น.....	12
2.4 การอบอ่อน.....	13
2.5 กลไกการคืนตัว การตกผลึกใหม่ และการโตขึ้นของเกรน .....	14
หลังการรีดเย็น และอบอ่อน	
2.5.1 การคืนตัว.....	17
2.5.2 การตกผลึกใหม่.....	17
2.5.3 การโตขึ้นของเกรนที่เกิดขึ้นใหม่.....	18
2.6 การวัดความสามารถในการขึ้นรูป.....	18
2.6.1 ค่า plastic strain ratio .....	18
2.6.2 สัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด.....	19
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	21
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2 การเตรียมชิ้นงาน.....	21

## หน้า

3.2.1 การตรวจสอบ และการจำลองสภาวะการรีดร้อนที่อุณหภูมิ.....	22
ม้วนเก็บ 550°C และ 630°C	
3.2.2 การเตรียม และการทดสอบชิ้นงานในการรีดเย็น และอบอ่อน.....	22
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	25
3.4 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	26
3.4.1 การตัด และเตรียมชิ้นงานโครงสร้างจุลภาค .....	26
3.4.2 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	27
3.4.2.1 การตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออกสเทนไนท์ .....	27
ในระหว่างกระบวนการรีดร้อน	
3.4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างเฟอไรท์หลังการม้วนเก็บ.....	28
และหลังการอบอ่อน	
3.4.2.3 การตรวจสอบการกระจายตัวของโครงสร้างเฟอไรท์.....	28
หรือ อนุภาคคาร์ไบด์หลังการม้วนเก็บ และหลังการอบอ่อน	
3.5 วิธีการวัดขนาดเกรน.....	28
3.5.1 การใช้เส้นตรง .....	29
3.5.2 การใช้วงกลม 3 วง .....	30
3.6 วิธีการวัดเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิม้วนเก็บต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล.....	32
ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของ	
ธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม	
4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในระหว่าง และหลังการรีดร้อน.....	32
4.1.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C... ..	33
และ 630°C	
4.2 ผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิอบอ่อนต่อโครงสร้างจุลภาค และ.....	38
สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณ	
น้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม	
4.2.1 สมบัติเชิงกลหลังผ่านการรีดเย็น และอบอ่อนของชิ้นงานที่.....	38
ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C	



4.2.2 โครงสร้างจุลภาคหลังการรีดเย็น และอบอ่อนของชิ้นงานที่.....	40
ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C	
บทที่ 5 การอภิปราย.....	57
5.1 ผลของอนุภาคหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ630°C ต่อ.....	57
ความสามารถในการขึ้นรูป	
5.2 ผลของขนาด และการกระจายตัวของโครงสร้างเฟิร์ลไลท์หลังการม้วน.....	58
เก็บต่อจุดครากหลังการอบอ่อน	
5.3 ผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิอบอ่อนต่อความสามารถในการขึ้นรูป....	60
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	62
รายการอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	107

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุ..... 21 ปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	
ตารางที่ 3.2 สารละลาย ส่วนผสม และการใช้งาน สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค..... 29	
ตารางที่ 4.1 ขนาดโครงสร้างจุลภาคในระหว่าง และหลังการรีดร้อน..... 33	
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C ..... 34	



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ผลของปริมาณธาตุคาร์บอนต่อค่า plastic strain ratio เฉลี่ย ( r – value ) .....	5
รูปที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของสารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรต์แต่ละชนิด.....	6
รูปที่ 2.3 อุณหภูมิที่สารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรต์สามารถเกิดขึ้นได้สัมพันธ์กับ.....	7
อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัว	
รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิม้วนเก็บ และอุณหภูมิการรีดสุดท้ายในการรีดร้อน .....	9
รูปที่ 2.5 ผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่ออัตราการตกตะกอนของ.....	10
อะลูมิเนียมไนไตรต์ในแผ่นเหล็กกล้ารีดร้อน	
รูปที่ 2.6 ผลของการเติมไนโอเบียม และไทเทเนียมต่อจุดครากของเหล็กแผ่นรีดร้อน และ.....	11
เหล็กแผ่นรีดเย็นหลังการอบอ่อน	
รูปที่ 2.7 แผนภูมิ Isothermal tranformation ของเหล็กเกรด 1080 .....	12
รูปที่ 2.8 การทำ batch annealing .....	14
รูปที่ 2.9 ลักษณะของการคืนตัว การตกผลึกใหม่ และการโตขึ้นของเกรน .....	15
รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคในกระบวนการตกผลึกใหม่ .....	16
รูปที่ 2.11 กราฟ logarithm ระหว่างความเค้น กับความเครียดจริง .....	20
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการจำลองสภาวะการรีดร้อนที่มีอุณหภูมิม้วนเก็บต่างกัน.....	23
รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิในการอบอ่อน.....	24
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M.....	26
รูปที่ 3.4 ผิวหน้าที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	27
รูปที่ 3.5 รูปแบบของลักษณะการลากเส้นทดสอบ และการใช้วงกลมทดสอบ.....	31
รูปที่ 4.1 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ .....	34
1,150°C รีดหยาบครั้งแรกด้วยปริมาณ 44.5% แล้วนำไปอบให้ร้อนขึ้นอีกที่	
อุณหภูมิ 1,150°C เป็นเวลา 15 นาที	
รูปที่ 4.2 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ .....	35
1,150°C รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ด้วยปริมาณ 49.1%	
รูปที่ 4.3 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ .....	35
1,150°C รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1%	
จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ 860°C	

รูป	หน้า
รูปที่ 4.4 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C ..... รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบ ครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีด สุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ 860°C แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C	36
รูปที่ 4.5 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C ..... รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีด สุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ 860°C แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C	36
รูปที่ 4.6 โครงสร้างเพิร์ลไลท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C รีดหยาบ..... ครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วย ปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ 860°C แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C	37
รูปที่ 4.7 โครงสร้างเพิร์ลไลท์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C รีดหยาบ..... ครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วย ปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ 860°C แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C	37
รูปที่ 4.8 จุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C.....	42
รูปที่ 4.9 จุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C .....	42
รูปที่ 4.10 ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C .....	43
รูปที่ 4.11 ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C .....	43
รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C .....	44
รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C .....	44
รูปที่ 4.14 ค่า plastic strain ratio (r-value) ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C .....	45
รูปที่ 4.15 ค่า plastic strain ratio (r-value) ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C .....	45
รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (n-value) ของชิ้นงานที่..... ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C	46
รูปที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (n-value) ของชิ้นงานที่..... ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C	46
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C.....	47
รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C.....	47
รูปที่ 4.20 ความกว้างเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C .....	48
รูปที่ 4.21 ความกว้างเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C.....	48

รูป	หน้า
รูปที่ 4.22 ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C .....	49
รูปที่ 4.23 ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C.....	49
รูปที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C .....	50
รูปที่ 4.25 ค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C.....	50
รูปที่ 4.26 ลักษณะการตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C.....	51
รูปที่ 4.27 ลักษณะการตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C.....	52
รูปที่ 4.28 อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อน ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C .....	54
และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50%	
ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%	
รูปที่ 4.29 อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อน ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C .....	56
และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50%	
ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%	

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมรถยนต์เป็นตลาดที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับเหล็กแผ่นรีดเย็น ทำให้มีการตื่นตัวอย่างมากในการพัฒนาสมบัติของเหล็กแผ่นรีดเย็นให้ดีขึ้นโดยวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นมักเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แม้ว่าจะมีการแข่งขันจากการแทนที่วัสดุด้วยอะลูมิเนียม และพลาสติกก็ตาม ซึ่งมักมีราคาแพงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำยังคงรักษาความนิยมในการนำมาใช้ทำตัวถัง และโครงสร้างของรถยนต์ เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความสามารถขึ้นรูปดี (formability) เชื่อมได้ง่าย (weldability) และราคาถูกกว่าวัสดุอื่น เหล็กกล้าธาตุผสมปริมาณน้อยมาก (micro-alloyed steel) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ (High-Strength Low-Alloy Steels; HSLA) เป็นเหล็กกล้าที่ได้รับการพัฒนาอย่างมากในทางอุตสาหกรรมจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งถูกปรับปรุงให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นพร้อมกับการพัฒนาในด้านความเหนียวและความสามารถในการเชื่อม จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นส่วนประกอบทำตัวถังรถยนต์ ทำโครงสร้างสะพาน และท่อต่างๆ การเติมธาตุผสมปริมาณน้อยมากอย่าง ไทเทเนียม ไนโอเบียม และ/หรือ วานาเดียม ลงในเหล็กกล้าธาตุผสมปริมาณน้อยมาก เพื่อให้ไปรวมตัวกับคาร์บอน และไนโตรเจนที่ละลายอยู่แล้วเกิดอนุภาคตะกอนของ คาร์ไบด์ ไนไตรด์ และคาร์โบไนไตรด์ ขนาดเล็กมากอย่างเช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN); ไนโอเบียมคาร์โบไนไตรด์ (Nb(CN)) หรือ วานาเดียมคาร์ไบด์ (VC) เป็นต้น ซึ่งช่วยในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของขอบเกรนได้เป็นอย่างดีในขณะรีดร้อน และอบอุ่นจึงทำให้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำมีโครงสร้างสุดท้ายละเอียดร่วมด้วยกับการมีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน<sup>1-4</sup>

การผลิตเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำในรูปแบบของเหล็กแผ่นรีดเย็นมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กแผ่นรีดร้อนคือ สามารถรีดได้บางกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อน และมีความหนาที่แน่นอนสม่ำเสมอ มีผิวที่เรียบ และสวยงาม นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีโดยเฉพาะความสามารถในการขึ้นรูป<sup>5</sup> การรีดเย็น (cold rolling) และอบอุ่น (annealing) เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการกำหนดความหนา และสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดเย็น เนื่องจากโดยทั่วไปจะใช้เหล็กแผ่นรีดร้อนเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น ดังนั้นกระบวนการรีดร้อนโดยกรรมวิธีเทอร์โมแมคคานิคัลอย่าง การอบเหล็กให้ร้อนขึ้นอีก

(reheating) ปริมาณ และอุณหภูมิในการรีดหยาบ (roughing) และในการรีดสุดท้าย (finishing) และการเย็นตัวหลังการรีด (cooling) รวมไปถึงอุณหภูมิม้วนเก็บ (coiling temperature) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดเย็น

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการผลิต และควบคุมสมบัติของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมเพื่อสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการผลิตเหล็กแผ่นที่มีคุณภาพต่อไป โดยมุ่งศึกษาตัวแปรในการผลิตที่น่าสนใจอันได้แก่ อุณหภูมิม้วนเก็บ ปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิอบอ่อน ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดเย็น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิม้วนเก็บในการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่เหมาะสมต่อการนำมารีดเย็นแล้วอบอ่อนเพื่อให้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียมกับไนโอเบียม มีความสามารถในการขึ้นรูปดีขึ้น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของ ปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งรวมถึงความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียมเป็นวัสดุเริ่มต้น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้อุณหภูมิม้วนเก็บ  $550^{\circ}\text{C}$  และ  $630^{\circ}\text{C}$  ต่อสมบัติของเหล็กแผ่นรีดเย็นหลังการรีดเย็น และอบอ่อน

1.3.2 แปรผันปริมาณการรีดเย็นช่วง 40% ถึง 70% และอุณหภูมิการอบอ่อนช่วง  $620^{\circ}\text{C}$  ถึง  $680^{\circ}\text{C}$  หลังการรีดร้อนของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม

1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ก่อน และหลังการม้วนเก็บ และหลังการรีดเย็นแล้วอบอ่อน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

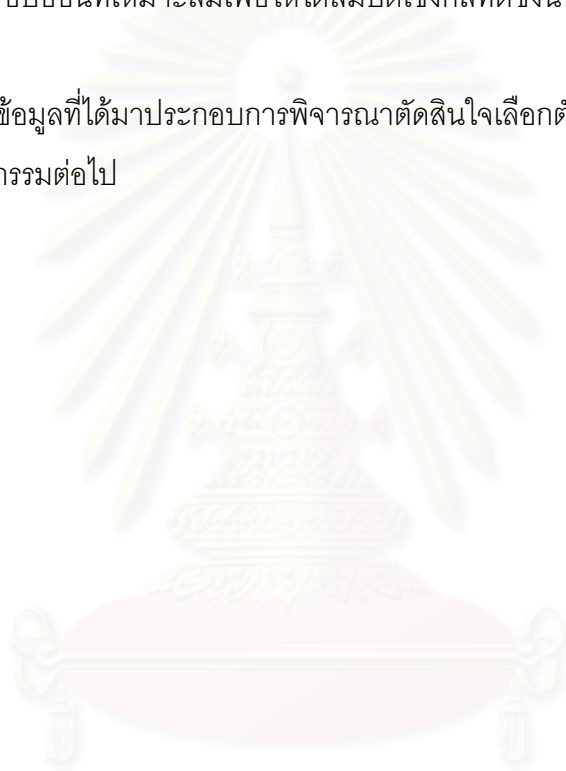
1.3.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บ และหลังการรีดเย็นแล้วอบอ่อนโดยใช้เครื่องทดสอบการดึงทิศทางเดียว

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเลือกใช้ข้อมูลภูมิคุ้มกันเก็บในการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนที่เหมาะสม ก่อนการรีดเย็น และ อบอุ่นของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียมที่ใช้ในการศึกษา

1.4.2 ทราบแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นจากการใช้ปริมาณการรีดเย็น และ อุณหภูมิการอบอุ่นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาประกอบการพิจารณาตัดสินใจเลือกตัวแปรในการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นในทางอุตสาหกรรมต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรม

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นเริ่มต้นจาก การปรับส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก (secondary steelmaking) การหล่อแบบต่อเนื่อง (continuous casting) การอบให้ร้อนขึ้นอีก (reheating) การรีดร้อน (hot rolling) การม้วนเก็บ (coiling) การนำไปล้างในกรดเพื่อขจัดผิวที่เป็นสนิมออก (pickling) การรีดเย็น (cold rolling) การอบอ่อน (annealing) การรีดเพื่อปรับสภาพผิว (temper rolling) ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดเย็นได้แก่<sup>5</sup>

1. ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก (chemical composition)
2. สภาวะการรีดร้อน หรือกรรมวิธีเทอร์โมแมคคานิคัล (hot rolling conditions or thermomechanical treatment)
3. ปริมาณการรีดเย็น (cold rolling reduction ratio)
4. สภาวะการอบอ่อน (annealing conditions)

ข้อมูลที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นที่ใช้กรรมวิธี batch annealing ในการอบอ่อนซึ่งได้รับความนิยมมากในประเทศไทยเนื่องจากลงทุนเริ่มต้นต่ำ และมีความยืดหยุ่นของกระบวนการค่อนข้างมาก วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง มาตรฐานต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม ที่เพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างจากขนาดเกรนสุดท้ายที่ละเอียดร่วมกับการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน ซึ่งผลเหล่านี้ได้มาจากการเติมธาตุผสมปริมาณน้อยมากอย่าง ไนโอเบียม, วาเนเดียม และ/หรือ ไทเทเนียม<sup>6</sup> แล้วยังเติมธาตุอะลูมิเนียม เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป

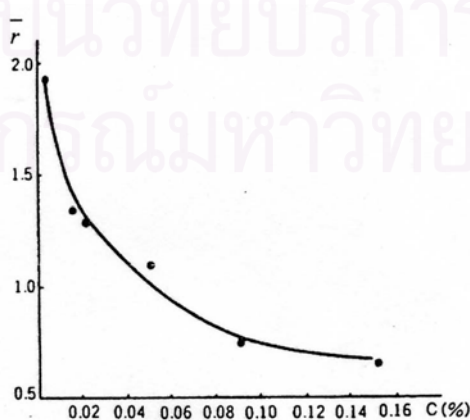
#### 2.1 บทบาทของธาตุผสมในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาตรฐานต่ำ

ส่วนผสมทางเคมีเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กแผ่นรีดเย็น<sup>5</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การลดปริมาณธาตุคาร์บอนในเหล็กแผ่นสามารถช่วยให้ค่า plastic strain ratio (r-value) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้น ปริมาณธาตุซัลเฟอร์จะต้องอยู่ในระดับที่ต่ำ เพราะว่าธาตุซัลเฟอร์ทำให้เหล็กเกิดการแตกร้าวในระหว่างการรีดร้อนได้ในขณะรีดร้อน แม้ว่าจะมีธาตุซัลเฟอร์ละลายอยู่เพียงเล็กน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมักมีการเติมธาตุแมงกานีสประมาณ 0.3% เพื่อช่วยจับตัวกับธาตุซัลเฟอร์ตกตะกอนเป็นอนุภาคแมงกานีสซัลไฟด์ ในปัจจุบันมักนิยมเติมธาตุอะลูมิเนียมประมาณ 0.015-0.080% เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโดยการตกตะกอนของอนุภาค

อะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ในระหว่างกระบวนการตกผลึกใหม่ อย่างไรก็ตามธาตุอื่นอย่างเช่น ธาตุฟอสฟอรัสก็ควรมีการควบคุมให้อย่างในระดับต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

นอกจากนี้การพัฒนามสมบัติของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำให้ได้ผลดี จำเป็น ต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของธาตุผสมปริมาณน้อยมากในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพื่อสามารถนำ ไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ประสิทธิภาพของการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนใน เหล็กกล้าธาตุผสมปริมาณน้อยมาก โดยเบื้องต้นเป็นผลกระทบจากความสามารถในการละลาย และพฤติกรรมการตกตะกอนของอนุภาคจากธาตุผสมปริมาณน้อยมาก ดังนั้นการใช้ประโยชน์จาก ธาตุผสมปริมาณน้อยมากจึงจำเป็นต้องทราบความสามารถในการละลายของสารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรด์เหล่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.2 แสดงความสามารถในการละลายของสารประกอบ คาร์ไบด์ และไนไตรด์แต่ละตัว โดยส่วนใหญ่มีความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน แต่ยกเว้น วาเนเดียมคาร์ไบด์ (VC) ที่สามารถละลายได้มาก และไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ที่สามารถละลาย ได้น้อยที่อุณหภูมิเดียวกัน ลักษณะอีกอย่างของการเติมธาตุผสมปริมาณน้อยมาก (ยกเว้นธาตุ อะลูมิเนียม) คือสารประกอบเหล่านี้อาจไม่เกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรด์แยกกัน เนื่องจากมีรูปแบบของโครงสร้าง และขนาดของผลึกใกล้เคียงกัน ดังนั้นสารประกอบคาร์ไบด์ และ ไนไตรด์เหล่านี้จึงสามารถละลายซึ่งกันและกันเกิดเป็นสารประกอบคาร์โบไนไตรด์ที่มีเสถียรภาพ มากกว่าเดิม<sup>7</sup>

ในปัจจุบันมีนักวิจัยหลายคนเสนอสูตรที่ใช้คำนวณการละลายของอนุภาคตกตะกอน สัมพันธ์กับอุณหภูมิ K.J. Irvine และคณะ<sup>8</sup> ได้เสนอสูตรในการคำนวณค่าการละลายของอนุภาค ไนโอเบียมคาร์โบไนไตรด์ (Nb(CN)) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) สัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้



รูปที่ 2.1 ผลของปริมาณธาตุคาร์บอนต่อค่า plastic strain ratio เฉลี่ย ( $\bar{r}$  - value)<sup>5</sup>

$$\log [\text{Nb}] [\text{C} + \frac{12}{14} \text{N}] = 2.26 - \frac{6770}{T} \quad \text{----- (2.1)}$$

$$\log [\text{Ti}] [\text{C}] = 2.75 - \frac{7000}{T} \quad \text{----- (2.2)}$$

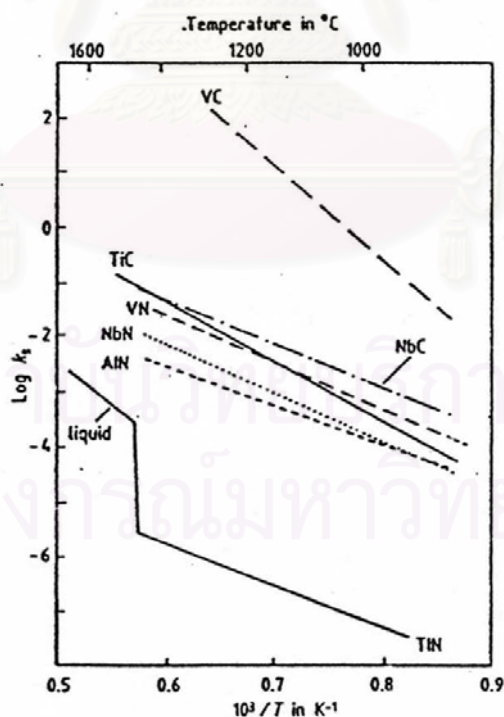
Matsuda และ Okumura ได้เสนอสูตร คำนวณค่าการละลายของอนุภาคไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) สัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้<sup>9</sup>

$$\log [\text{Ti}] [\text{N}] = 0.32 - \frac{8000}{T} \quad \text{----- (2.3)}$$

W.C. Leslie และคณะเสนอสูตรการคำนวณค่าการละลายของอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) สัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้<sup>10</sup>

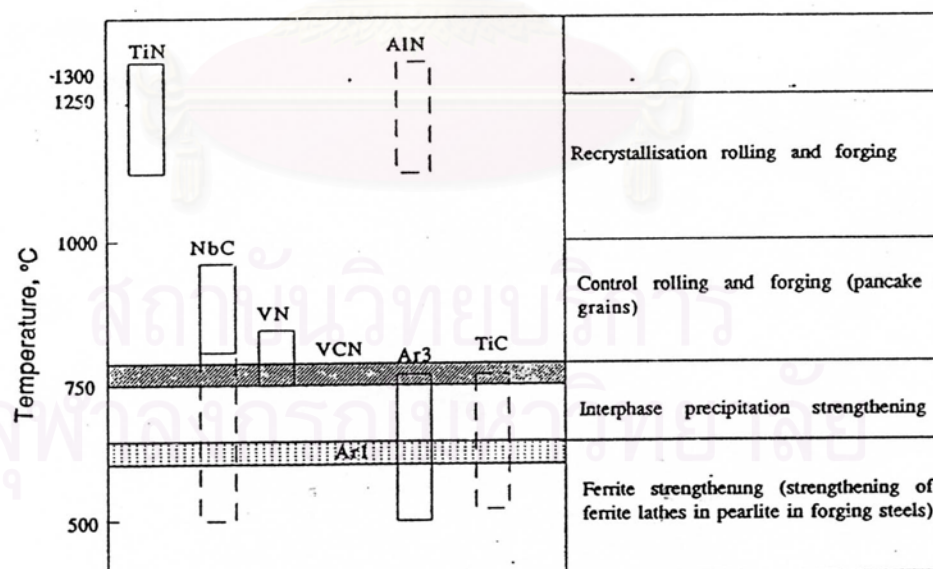
$$\log [\text{Al}] [\text{N}] = 1.03 - \frac{6770}{T} \quad \text{----- (2.4)}$$

โดยที่ [Nb] [Ti] [Al] [C] และ [N] คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของธาตุผสมที่ละลายอยู่ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการละลายมีหน่วยเป็นเคลวิน



รูปที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของสารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรด์แต่ละชนิด<sup>7</sup>

การตกตะกอนของธาตุผสมปริมาณน้อยมากขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดการตกตะกอนสัมพันธ์กับอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ และการเปลี่ยนเฟสของออสเทนไนต์ หรือเฟอร์ไรท์ โดยข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิที่สารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรด์สามารถเกิดขึ้นได้สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัวของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นข้อมูลจากสภาวะสมดุลย์ แต่ในการนำไปใช้งานจริงพบว่าถ้าใช้อัตราการเย็นตัวสูงขึ้นจะลดอุณหภูมิที่เกิดอนุภาคตกตะกอนเหล่านั้นเนื่องสารละลายมีการอิมิตัวมากขึ้น<sup>11</sup> เมื่อเติมธาตุผสมปริมาณน้อยมากกว่า 1 ธาตุที่สามารถเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรด์ได้ที่อุณหภูมิสูงมีผลกระทบต่ออัตราการตกตะกอน โดยการที่ไทเทเนียมไนไตรด์สามารถตกตะกอนออกมาเป็นตัวแรกหลังการหล่อแบบต่อเนื่อง และจะละลายกลับเข้าไปในรูปแบบของสารละลายเป็นตัวสุดท้ายในขณะอบให้ร้อนขึ้นอีก ยกตัวอย่างเช่นในเหล็กกล้าธาตุผสมปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม ที่อุณหภูมิสูงเมื่อโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ที่ไทเทเนียมสามารถแพร่ได้เร็วกว่าไนโอเบียม ดังนั้นอนุภาคที่ตกตะกอนออกมาในตอนแรกจึงมีปริมาณไทเทเนียม กับไนโตรเจนมากและมีไนโอเบียมกับคาร์บอนน้อย อย่างไรก็ตามเมื่ออนุภาคที่ตกตะกอนออกมานั้นโตขึ้น ไนโอเบียมจะกลายเป็นธาตุตัวสำคัญในการแพร่<sup>12</sup>



รูปที่ 2.3 อุณหภูมิที่สารประกอบคาร์ไบด์ และไนไตรด์สามารถเกิดขึ้นได้สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสในระหว่างการเย็นตัว<sup>11</sup>

อนุภาคตกตะกอนที่ไม่ละลายที่อุณหภูมิการอบให้ร้อนขึ้นอีกอย่างไทเทเนียมไนตรายด์สามารถยับยั้งการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์ เพื่อให้ได้ขนาดเกรนหลังการเปลี่ยนเฟสหลังการรีดมีขนาดเล็ก<sup>11</sup>

การเติมไนโอเบียม เพื่อเกิดอนุภาคไนโอเบียมคาร์ไบด์ในไตรายด์ที่มีขนาดเล็กตกตะกอนออกมาสามารถยับยั้งการตกผลึกใหม่ของเกรนออสเทนไนท์หลังการรีดสุดท้ายเพื่อให้ได้เกรนออสเทนไนท์แบบรียาว และมีแถบการแปรรูปอยู่ภายใน ซึ่งเป็นการเพิ่มบริเวณ และความหนาแน่นของการเกิดเกรนเฟอร์ไรท์หลังการเปลี่ยนเฟสทำให้ได้เกรนเฟอร์ไรท์ขนาดเล็ก<sup>11</sup>

การขัดขวางการโตขึ้นของเกรนเฟอร์ไรท์ในขณะการม้วนเก็บใช้วิธีเดียวกันกับการขัดขวางการโตขึ้นของเกรนออสเทนไนท์โดยการมีอนุภาคตกตะกอนขนาดเล็กขัดขวางการโตขึ้นของเกรนเฟอร์ไรท์ ส่วนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนในเกรนเฟอร์ไรท์เกิดจากการตกตะกอนของอนุภาคคาร์ไบด์ ขนาดเล็กในเกรนเฟอร์ไรท์ระหว่าง และหลังการเปลี่ยนเฟส ผลของการเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุผสมปริมาณน้อยมาก ที่เหลือหลังการรีดสุดท้ายก่อนเกิดการเปลี่ยนเฟส<sup>11</sup>

## 2.2 สภาวะการรีดร้อน

ตัวแปรสำคัญของกระบวนการรีดร้อนที่มีผลกระทบต่อสมบัติของเหล็กแผ่นรีดเย็น คือ อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก อุณหภูมิการรีดสุดท้าย และอุณหภูมิม้วนเก็บ

### 2.2.1 อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีก

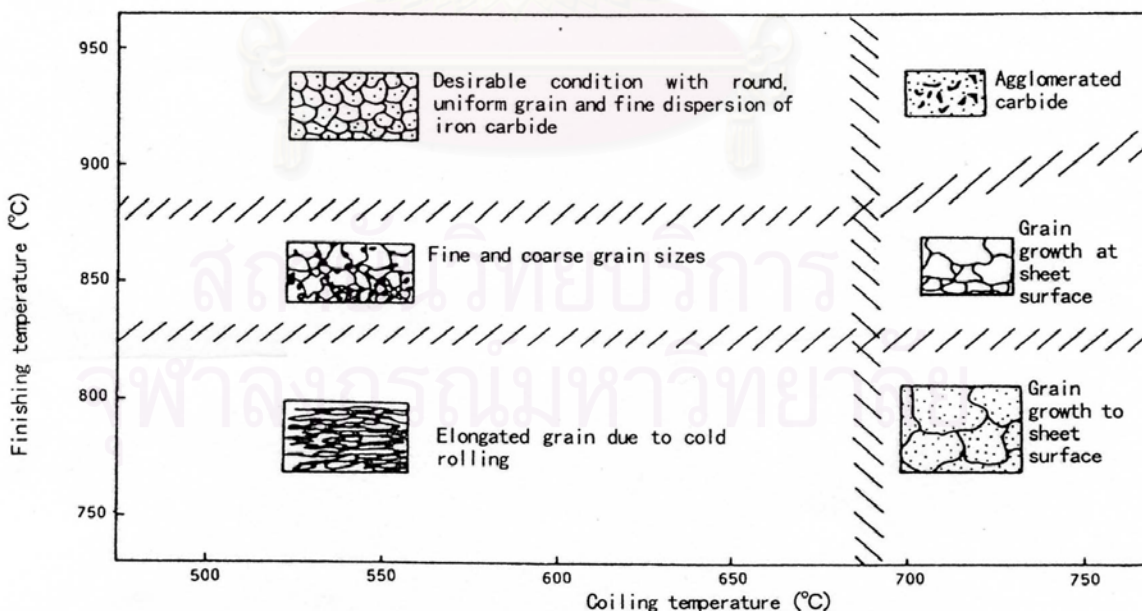
การพิจารณาเลือกใช้อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำ จะพิจารณาจากหลายปัจจัยอย่าง การทำโครงสร้างให้เป็นโครงสร้างออสเทนไนท์อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด ขนาดเกรนออสเทนไนท์เริ่มต้น การละลายของธาตุผสมให้อยู่ในรูปแบบสารละลายของแข็ง อุณหภูมิการรีดสุดท้ายที่ต้องรักษาไว้เหนือเส้นที่เกิดการเปลี่ยนเฟส ( $A_{r3}$ ) ความต้านทานการแปรรูปที่ลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นแต่ก็ต้องพิจารณาค่าเชื้อเพลิงที่ต้องใช้มากขึ้นด้วย เป็นต้น

เมื่อพิจารณาเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม ที่อุณหภูมิอบให้ร้อนขึ้นอีกประมาณ  $1,150^{\circ}\text{C}$  ขนาดเกรนออสเทนไนท์จะถูกควบคุมโดยอนุภาคตกตะกอนที่ยังไม่ละลายบางส่วน และมีขนาดเล็ก อย่างเช่น อนุภาคไนโอเบียมคาร์ไบด์ในไตรายด์ หรือ ไทเทเนียมไนตรายด์ แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีธาตุเหล่านี้บางส่วนละลายลงไปเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ<sup>13</sup> ซึ่งมีผลสำคัญ 2 ประการ คือ อย่างแรกธาตุเหล่านี้

จะขัดขวางการตกผลึกใหม่ระหว่างการรีดร้อน ซึ่งจะทำได้เกินอุณหภูมิที่รีดแล้วทำให้ได้เกรนเฟอร์ไรท์หลังการเปลี่ยนเฟสมีขนาดเล็ก อย่างที่สอง การเกิดอนุภาคคาร์ไบด์ หรือคาร์โบไนตรายด์ที่ละเอียดซึ่งตกตะกอนออกมาที่รอยต่อระหว่างออสเทนไนท์-เฟอร์ไรท์ (interphase precipitation) ในขณะที่เย็นตัวลงมาพร้อมกับการเปลี่ยนเฟส<sup>14</sup> นอกจากนี้การมีอะลูมิเนียมไนตรายด์ละลายอยู่ในรูปสารละลายของแข็งหลังการรีดร้อนก่อนนำไปม้วนเก็บก็มีความสำคัญต่อการพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปเช่นกัน<sup>15</sup>

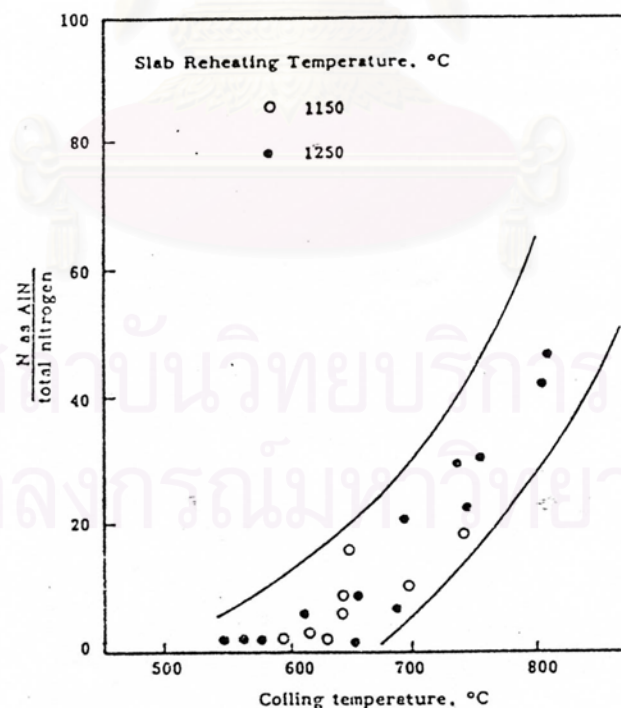
## 2.2.2 อุณหภูมิการรีดสุดท้าย และอุณหภูมิมี้วนเก็บ

อุณหภูมิการรีดสุดท้ายจะต้องรักษาให้อยู่เหนือเส้นที่เกิดการเปลี่ยนเฟส ( $A_{r3}$ ) เพื่อให้ธาตุอะลูมิเนียมกับธาตุไนโตรเจนยังละลายอยู่ในเนื้อเหล็ก รูปที่ 2.4 แสดงผลของอุณหภูมิการรีดสุดท้ายกับอุณหภูมิมี้วนเก็บ ต่อโครงสร้างจุลภาคหลังการรีดร้อน อุณหภูมิการรีดสุดท้ายที่สูงกว่าเส้น  $A_{r3}$  เพียงเล็กน้อยจะช่วยให้สามารถได้เกรนเฟอร์ไรท์หลังการเปลี่ยนเฟสที่ละเอียดขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป แต่ถ้าอุณหภูมิการรีดสุดท้ายต่ำกว่าเส้น  $A_{r3}$  จะทำให้เกิดเกรนผสมระหว่างเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ซึ่งสมควรหลีกเลี่ยงเนื่องจากจะได้ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์ที่ไม่สม่ำเสมอไปจนถึงหลังการรีดเย็นและอบอ่อน<sup>5</sup> ส่วนอุณหภูมิมี้วนเก็บสำหรับเหล็กกล้าที่จะนำมารีดเย็นและอบอ่อน



รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิมี้วนเก็บ และอุณหภูมิการรีดสุดท้ายในการรีดร้อน<sup>5</sup>

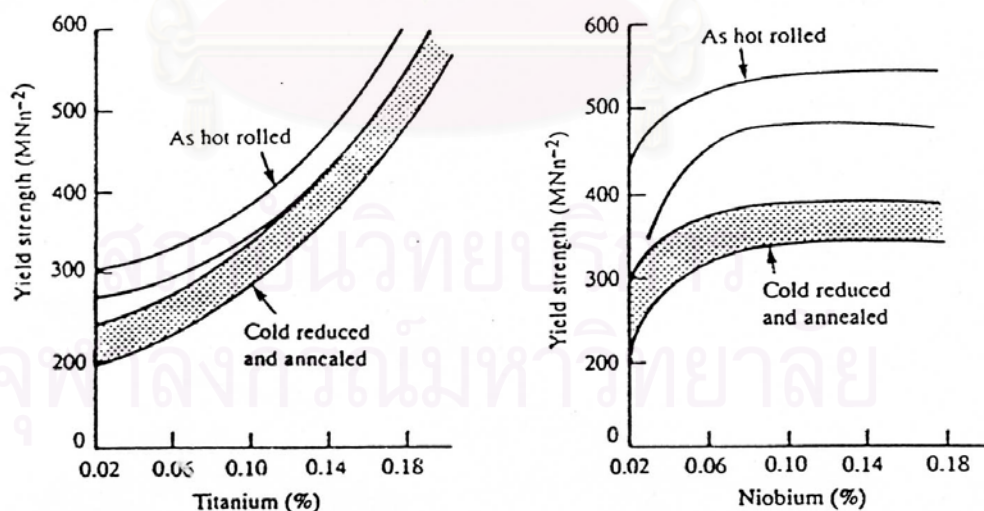
แบบ batch annealing ควรต่ำกว่า  $600^{\circ}\text{C}$  เพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยจะยังอยู่ในรูปแบบของสารละลายของแข็ง<sup>16</sup> อย่างการม้วนเก็บที่อุณหภูมิตัวอย่าง  $560^{\circ}\text{C}$  แต่ถ้าม้วนเก็บที่อุณหภูมิก่อนข้างสูง เช่น ประมาณ  $710^{\circ}\text{C}$  จากการเย็นตัวที่ช้ามากหลังการม้วนเก็บ ทำให้อะลูมิเนียมไนไตรด์สามารถตกตะกอนออกมาได้หลังการม้วนเก็บ รูปที่ 2.5 แสดงผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่ออัตราการตกตะกอนของอะลูมิเนียมไนไตรด์ในแผ่นเหล็กกล้ารีดร้อน<sup>17</sup> เมื่อเสร็จสิ้นการม้วนเก็บเหล็กแผ่นรีดร้อนจะได้รับผลดีจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรง 2 อย่างพร้อมกันคือผลจากการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน และผลจากการมีเกรนเฟอร์ไรต์สุดท้าย หลังการเปลี่ยนเฟสที่ละเอียด ปริมาณของผลเหล่านี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณของธาตุผสมแล้วยังขึ้นอยู่กับ ส่วนผสมหลัก อุณหภูมิที่ใช้อบให้ร้อนขึ้นอีก อุณหภูมิการรีดสุดท้าย อุณหภูมิการม้วน และอัตราการเย็นตัว อุณหภูมิตกตะกอนที่ละเอียดหลังผ่านการรีดร้อนจะยังรักษาความแข็งแรงที่สูงกว่าก่อนการรีดเย็นแล้วอบอ่อนไว้ได้ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเหล่านั้นโดยส่วนใหญ่ช่วยในการทำเกรนเฟอร์ไรท์ให้ละเอียดในระหว่างเกิดการตกผลึกใหม่หลังการรีดเย็น และการโตขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการอบอ่อนทำให้ผลจากการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนหมดไป ดังนั้น



รูปที่ 2.5 ผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่ออัตราการตกตะกอนของอะลูมิเนียมไนไตรด์ในแผ่นเหล็กกล้ารีดร้อน<sup>17</sup>

ความแข็งแรงของเหล็กแผ่นรีดเย็นจึงต่ำกว่าเหล็กแผ่นรีดร้อน<sup>18</sup> ผลของการเติมไนโอเบียม และไทเทเนียมต่อจุดครากของเหล็กแผ่นรีดร้อน และเหล็กแผ่นรีดเย็นหลังการอบอ่อนแสดงในรูปที่ 2.6

นอกจากนี้โครงสร้างของเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (ธาตุคาร์บอน < 0.8%) หลังการม้วนเก็บ มักเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์ ซึ่งโครงสร้างเพิร์ลไลต์ประกอบด้วยชั้นของเฟอร์ไรท์สลับกับซีเมนไตท์ โดยความกว้างของชั้นซีเมนไตท์ (interlamellar spacing) ที่ความแตกต่างกันหลังการม้วนเก็บส่วนหนึ่งอาจมีผลมาจากกระบวนการที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งการตรวจสอบโครงสร้างเพิร์ลไลต์จำเป็นต้องมีการจัดทำเป็นพิเศษเพื่อให้ระนาบของชั้นซีเมนไตท์ตั้งฉากกับระนาบที่ตรวจสอบ และอีกส่วนหนึ่งอาจมาจากโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่อุณหภูมิต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์มีมากมาย แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ การจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอมธาตุคาร์บอนในการเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างออสเทนไนท์ไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีธาตุคาร์บอนละลายอยู่น้อยกับชั้นซีเมนไตท์ที่มีธาตุคาร์บอนละลายอยู่มาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างออสเทนไนท์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างออสเทนไนท์ลดลงอย่างมากตามการลดลงของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์เกิดได้เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งอธิบายได้จากการลดความกว้างของชั้นซีเมนไตท์ลงเมื่ออุณหภูมิก่อเกิด



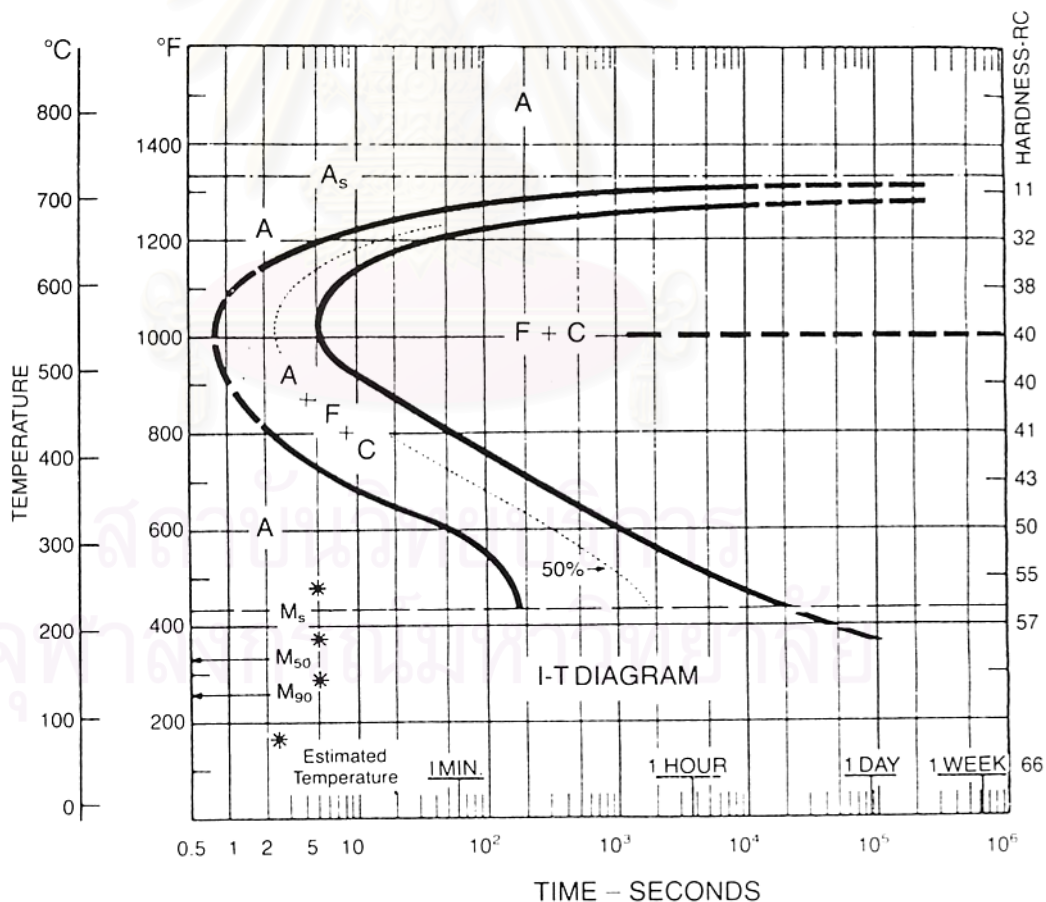
รูปที่ 2.6 ผลของการเติมไนโอเบียม และไทเทเนียมต่อจุดครากของเหล็กแผ่นรีดร้อน และเหล็กแผ่นรีดเย็นหลังการอบอ่อน<sup>18</sup>



โครงสร้างเพิร์ลไลท์ลดลง กล่าวคือโครงสร้างเพิร์ลไลท์จะละเอียดมากขึ้นเมื่อเกิดที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจากระยะทางที่ธาตุคาร์บอนจะต้องแพร่ในการรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นชั้นของเฟอร์ไรต์สลับกับซีเมนไตท์สั้นลง เพราะการแพร่เกิดได้ช้าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง<sup>19</sup>

### 2.3 ปริมาณการรีดเย็น

การเพิ่มปริมาณการรีดเย็นที่ทำให้ชิ้นงานมีค่า plastic strain ratio สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการรีดเย็นทำให้ชิ้นงานหลังการรีดเย็นมี texture {111} เพิ่มขึ้น เมื่อชิ้นงานที่ถูกรีดเย็นที่มี texture {111} นั้นเกิดการตกผลึกใหม่พร้อม หรือหลังการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์ จะช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรนออกมาเป็น texture {111} ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่า plastic strain ratio สูงขึ้น ซึ่งช่วยให้มีความสามารถในการขึ้นรูปสูงขึ้นด้วย กล่าวคือ



รูปที่ 2.7 แผนภูมิ Isothermal tranformation ของเหล็กเกรด 1080<sup>19</sup>

การเพิ่มปริมาณการรีดเย็นทำให้มีปริมาณการตกผลึกใหม่ของเกรนเป็น texture {111} มากขึ้น<sup>20</sup> นอกจากนี้ปริมาณการรีดเย็น ยังมีผลโดยตรงต่อการตกผลึกใหม่ในขณะการอบอ่อน จากงาน Burke และTurnbull<sup>21</sup> สามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

1. การเริ่มเกิดการตกผลึกใหม่จำเป็นต้องมีปริมาณการแปรรูปวิกฤติเป็นอย่างน้อย
2. เมื่อใช้ปริมาณการแปรรูปน้อยลง ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่จำเป็นในการเริ่มเกิดการตกผลึกใหม่เพิ่มขึ้น
3. ขนาดเกรนสุดท้ายจะขึ้นอยู่กับปริมาณการแปรรูปเป็นอย่างมาก และกับอุณหภูมิที่ใช้อบอ่อน คลายตัวเป็นปัจจัยรองลงมา โดยทั่วไปแล้วเกรนจะมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้ปริมาณการแปรรูปมากขึ้นและใช้อุณหภูมิการอบอ่อนคลายตัวที่ต่ำลง
4. การมีขนาดเกรนเริ่มต้นที่ใหญ่กว่าทำให้ต้องใช้ปริมาณการแปรรูปที่มากขึ้นเพื่อให้มีการใช้อุณหภูมิและเวลาในการตกผลึกเท่าเดิม

## 2.4 การอบอ่อน

ข้อดีอย่างหนึ่งของการอบอ่อนแบบ batch annealing คือการเกิด texture ที่ดีจากการตกตะกอนของอะลูมิเนียมไนไตรด์สัมพันธ์กับตกผลึกใหม่ในระหว่างการให้ความร้อนขึ้นไป ดังนั้นการเติมอะลูมิเนียมเพื่อให้มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยจำเป็นต้องให้อะลูมิเนียม และไนโตรเจนละลายอยู่อย่างอิมตัวยิ่งยวดในรูปสารละลายของแข็งก่อนการอบอ่อน<sup>17</sup> อัตราการอบให้ความร้อนขึ้นอีก และเย็นตัวลงในการอบอ่อนนั้นช้ามากจึงต้องการการอบอ่อนเป็นเวลานาน ขึ้นอยู่กับปริมาณความสามารถในการขึ้นรูปที่ต้องการ โดยเหล็กแผ่นจะถูกให้ความร้อนขึ้นไปช้าๆ จนถึงประมาณ 700°C ใกล้ Ac<sub>1</sub> การเกิดการตกผลึกใหม่หลังผ่านการรีดเย็นจะเกิดในช่วง 500 - 550°C ซึ่งในขณะที่เริ่มให้ความร้อนขึ้นไป อะลูมิเนียมไนไตรด์จะตกตะกอนออกมาที่ขอบเกรนย่อยที่ถูกแปรรูปซึ่งหนองกระบวนการตกผลึกใหม่ และขัดขวางการเกิดนิวเคลียสของเกรนใหม่ จึงทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ ในขณะที่เดียวกันถ้าเกิดการตกตะกอนของอะลูมิเนียมไนไตรด์ในช่วงก่อน หรือพร้อมกับการตกผลึกใหม่จะช่วยเหนี่ยวนำให้เกิด{111} texture และลดการเกิด{100} texture<sup>16</sup> หากอะลูมิเนียมไนไตรด์ตกตะกอนช่วงรีดร้อน หรือหลังจากเกิดการตกผลึกใหม่จะลดการเกิด {111} texture ลดค่า plastic strain ratio เหลือประมาณ 1 เท่านั้น ซึ่งผลนี้โดยหลักขึ้นอยู่กับอัตราการให้ความร้อน และปริมาณสัดส่วนของอะลูมิเนียมกับไนโตรเจนด้วย<sup>17</sup> ในระหว่างการใช้ที่อุณหภูมิอบอ่อนทำให้ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ขึ้นเป็นผลดีต่อกระบวนการดึงขึ้นรูป แม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนช่วยทำให้เกรนโตซึ่งเป็นผลดีต่อความสามารถในการขึ้นรูป<sup>5</sup> แต่ก็ไม่ควรเกิน

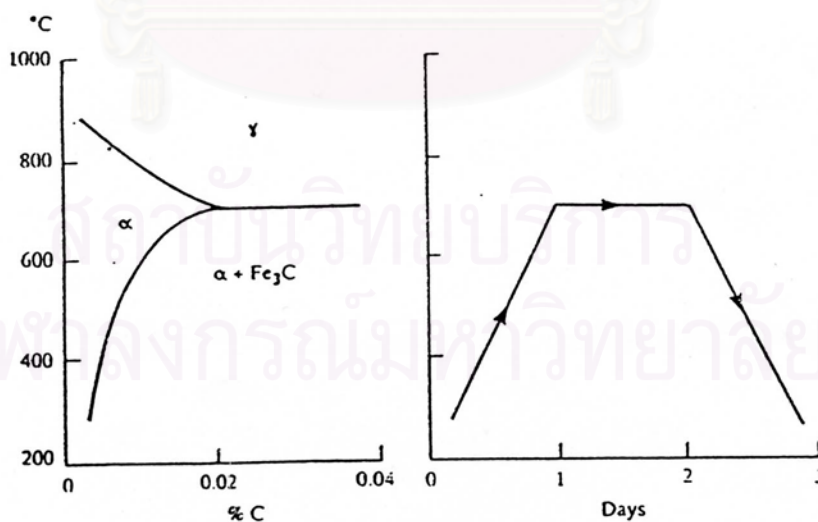
730°C เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดคาร์ไบด์หยาบซึ่งลดความสามารถในการขึ้นรูป รูปที่ 2.8 แสดงการทำ batch annealing เห็นว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์จะมีคาร์บอนละลายอยู่ในรูปสารละลายของแข็งมากที่สุดตามเฟสไดอะแกรม ที่อุณหภูมิอบอ่อนประมาณ 700°C เมื่อเย็นตัวอย่างช้าๆจากอุณหภูมินี้ทำให้คาร์บอนส่วนใหญ่ตกตะกอนออกมาขณะเย็นตัวสู่อุณหภูมิห้อง<sup>16</sup>

นอกจากนี้จากงานของ Burke และ Turnbull<sup>21</sup> ยังสามารถนำมาสรุปเกี่ยวกับการอบอ่อนได้ดังนี้

1. เวลาที่ต้องใช้ในการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกใหม่
2. การให้ความร้อนต่อไปหลังเกิดการตกผลึกใหม่สมบูรณ์จะทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้น

## 2.5 กลไกการคืนตัว การตกผลึกใหม่ และการโตขึ้นของเกรน หลังการรีดเย็นและอบอ่อน

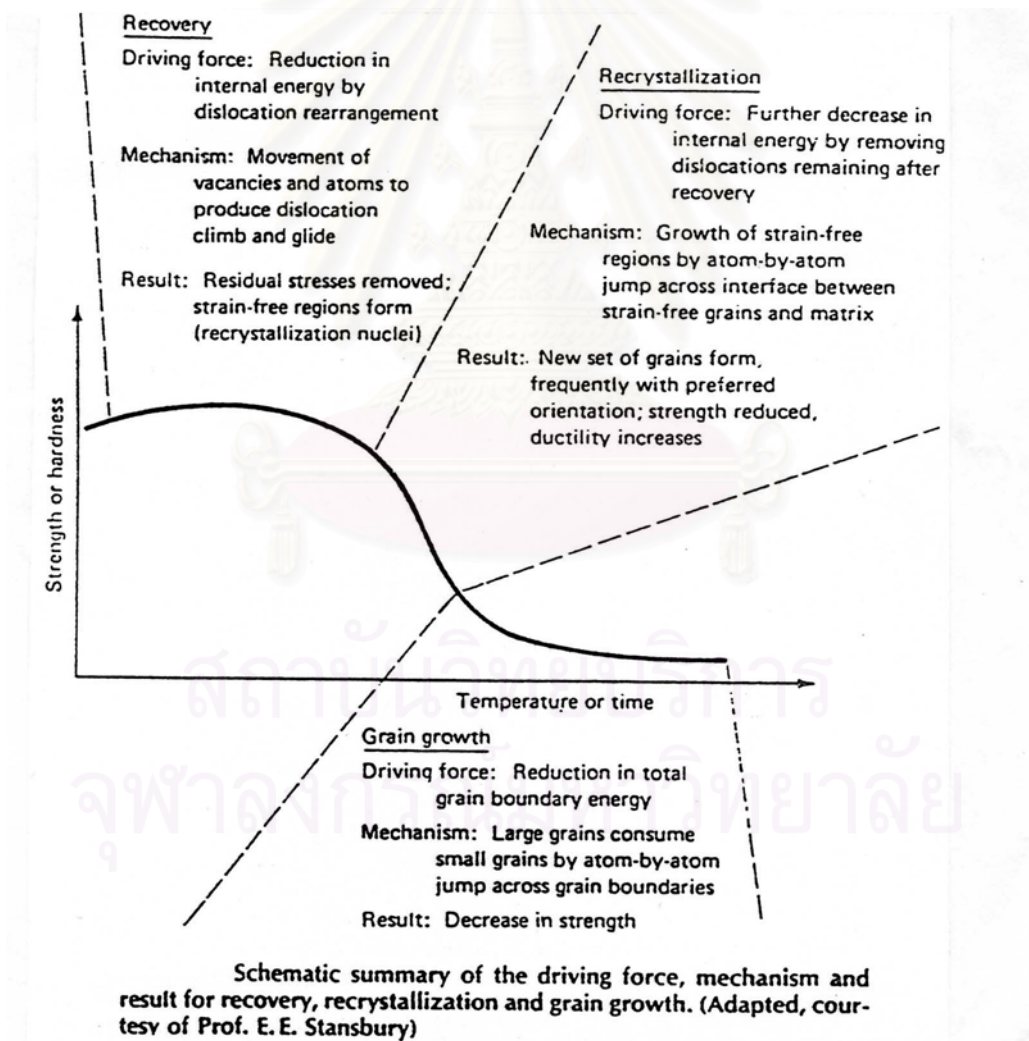
การอบอ่อนคลายตัวหลังการแปรรูปที่อุณหภูมิห้อง (การรีดเย็น) ของโลหะมีขั้นตอนหลักที่เกี่ยวข้อง 3 ขั้นตอน คือ การคืนตัว (recovery) การตกผลึกใหม่ (recrystallization) และการโตขึ้นของเกรน (grain-growth)<sup>22</sup> โดยทั่วไปในชิ้นงานมักจะมีโครงสร้างจุลภาคที่ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.8 การทำ batch annealing<sup>16</sup>

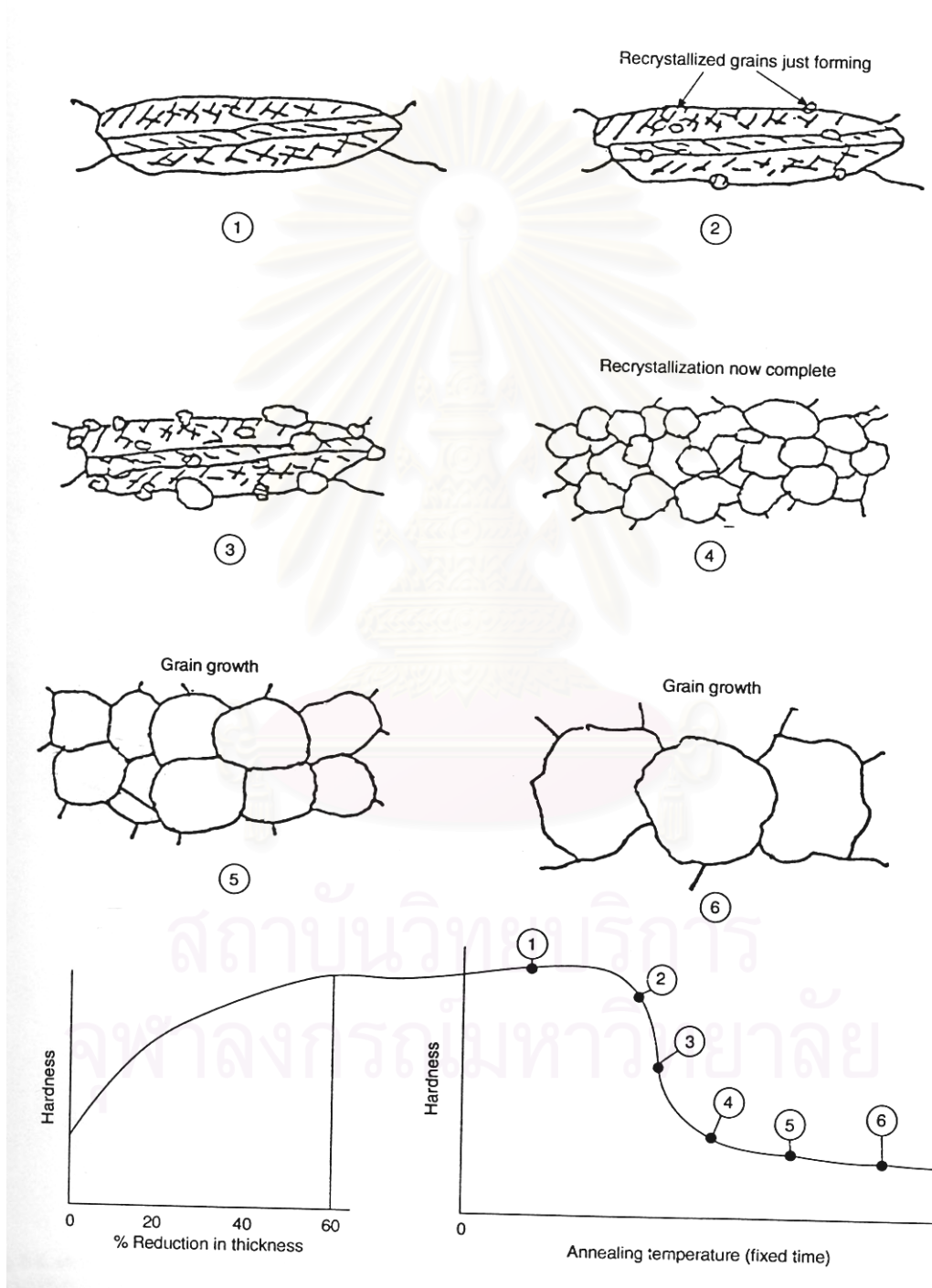
(nonhomogeneity) จึงมักเกิดการซ้อนทับกันของแต่ละชั้นตอนในขณะการอบอ่อน พฤติกรรมของการอบอ่อนคล้ายตัวของโลหะแต่ละชนิด หรือโลหะชนิดเดียวกันแต่มีความบริสุทธิ์ต่างกันมักจะแตกต่างกัน แต่หลักการพื้นฐานในแต่ละชั้นตอนจะคล้ายกัน รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของการคืนตัว การตกผลึกใหม่ และการโตขึ้นของเกรน

เมื่อแปรรูปโลหะอย่างถาวร (plastic deformation) จะมีพลังงานเชิงกลเล็กน้อยส่วนหนึ่งในการแปรรูปเก็บอยู่ในชิ้นงาน ซึ่งพลังงานนี้จะอยู่ในรูปแบบของจุดบกพร่อง (vacancies interstitial) ดิสโลเคชัน (dislocation) และ stacking faults ในหลายรูปแบบ และร่วมกันขึ้นอยู่กับตัวโลหะ ดังนั้นชิ้นงานที่ถูกแปรรูปจะเป็นสภาวะที่มีพลังงานสูงกว่าซึ่งไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิก



รูปที่ 2.9 ลักษณะของการคืนตัว การตกผลึกใหม่ และการโตขึ้นของเกรน <sup>23</sup>

เมื่อถูกกระตุ้นโดยอุณหภูมิอย่างการอบอ่อน ชิ้นงานที่ถูกแปรรูปนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะทำให้ตัวเองมีสถานะทางพลังงานต่ำลง โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคซึ่งทำให้สมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไปด้วยการรีดเย็น และการอบอ่อนนี้เป็นวิธีการสำคัญในการผลิตวัสดุให้มีสมบัติตามต้องการได้ โดยการควบคุมโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคในกระบวนการตกผลึกใหม่



รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคในกระบวนการตกผลึกใหม่<sup>23</sup>

### 2.5.1 การคืนตัว

เมื่ออบอ่อนโลหะที่ผ่านการแปรรูป การคืนตัวจะเป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของโลหะนั้น เมื่อการคืนตัวดำเนินไป ขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค คือ

1. การทำให้จุดบกพร่องที่เกาะกันอยู่คลายตัวออก
2. การสลายตัวของออก แล้วจัดเรียงตัวใหม่ของดิสโลเคชัน
3. polygonization (การเกิดแลตต์ไอซ์ของเกรนภายใน (subgrain))
4. เกิดนิวเคลียสของการตกผลึกใหม่ ซึ่งมีพลังงานพร้อมที่จะโตต่อไป

ในระหว่างการคืนตัว การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคอาจไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง แต่สามารถตรวจวัดโดยใช้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistivity ) หรือค่าสัดส่วนความแข็งขึ้นเหลือค้างจากความเครียด (fraction of residual strain-hardening) ที่เปลี่ยนไปต่อเวลาในการอบอ่อนได้ อย่างไรก็ตามการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) ทำให้สามารถสังเกตการเกิด polygonization ได้เป็นอย่างดี<sup>22</sup>

### 2.5.2 การตกผลึกใหม่

การตกผลึกใหม่เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากการคืนตัว ซึ่งเกิดจากการเกิดนิวเคลียสแลตต์ไอซ์ของเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด (strain-free) ขนาดเกรนสุดท้ายขึ้นอยู่กับความสมดุลย์กันระหว่าง การเกิดนิวเคลียสกับอัตราการโตขึ้นของเกรน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการรีดเย็น แต่อัตราการโตขึ้นของเกรนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ทฤษฎีการเกิดนิวเคลียสสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้<sup>24</sup>

1. nuclei จะเกิดได้ง่ายในบริเวณตำแหน่งที่มีระดับการถูกแปรรูปสูงสุดอย่างที่ชอบเกรน แถบการแปรรูป และสิ่งเจือปน (inclusion)
2. อัตราการเกิดนิวเคลียสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามการเพิ่มความเครียดเหนือจุดวิกฤต
3. การจัดเรียงตัวของ nuclei มีความเชื่อมโยงทางสถิติต่อการเรียงตัวของบริเวณที่ถูกแปรรูปที่เกิด nuclei ที่อัตราใด ๆ เมื่อแปรรูปด้วยปริมาณที่ไม่มากนัก
4. เนื่องจาก small-angle boundaries มีแนวโน้มที่จะมี mobility ต่ำมาก ดังนั้นนิวเคลียสจึงไม่สามารถโตขึ้น ในบริเวณที่มีการเรียงตัวคล้ายกัน

5. โดยทั่วไปจุดที่นิวเคลียสจะเกิดได้ง่าย คือบริเวณที่มีปริมาตรค่อนข้างเล็กที่มีความบิดเบี้ยวในผลึกสูง (มี curvature ของผลึกสูง) อย่างบริเวณที่มีโครงสร้างย่อยละเอียด และมีการเรียงตัวทำมุมกัน (orientation gradient) มาก

### 2.5.3 การโตขึ้นของเกรนที่เกิดขึ้นใหม่

แรงผลักดันสำหรับการตกผลึกใหม่ คือพลังงานความเครียดที่ยังเหลืออยู่ในวัสดุหลังการคืนตัว ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของดิสโลเคชันในขอบของเกรนย่อย (subgrain boundary) ซึ่งการมีขอบเกรนย่อยละเอียดจะมีปริมาณพลังงานความเครียดมากกว่าการมีขอบเกรนย่อยหยาบ ดังนั้นการมีขอบเกรนย่อยละเอียดจึงเกิดการตกผลึกใหม่ได้เร็วกว่าการมีขอบเกรนย่อยหยาบ ในขณะที่เกิดการตกผลึกใหม่ก็อาจเกิดการคืนตัวโดยการโตขึ้นของขอบเกรนย่อย ทำให้แรงผลักดันสำหรับการตกผลึกใหม่ลดลง หลังเกิดการตกผลึกใหม่สมบูรณ์แล้วขนาดเกรนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นจากการเคลื่อนที่ของขอบเกรน<sup>22</sup>

## 2.6 การวัดความสามารถในการขึ้นรูป

### 2.6.1 ค่า plastic strain ratio (r-value)

ค่า plastic strain ratio จะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการที่วัสดุนั้นทนต่อการบางลงขณะทำการดัดขึ้นรูปได้ และบางครั้งก็รู้จักกันในนามของ anisotropy factor หรือ Lankford value การมีค่า plastic strain ratio สูงแสดงว่าวัสดุจะสามารถนำไปกดขึ้นรูป (drawability) ได้ดี ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความเครียดจริงด้านกว้างต่อความเครียดจริงด้านยาวในช่วงที่เกิดการยืดตัวอย่างสม่ำเสมอก่อนเกิดคอขวดของการทดสอบแรงดึง และเมื่อถือว่าปริมาตรคงที่ให้ได้ว่า<sup>25</sup>

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(W/W_0)}{\ln(t/t_0)} = \frac{\ln(W/W_0)}{\ln(L_0W_0 / (LW))} \quad \text{-----}(2.4)$$

โดยที่	$\epsilon_w$ และ $\epsilon_t$	คือ ค่าความเครียดด้านกว้าง และความเครียดด้านยาว
	$W_0$ และ $W$	คือ ค่าความกว้างของเกจก่อน และหลังการดึงทดสอบ
	$t_0$ และ $t$	คือ ค่าความหนาของเกจก่อน และหลังการดึงทดสอบ
	$L_0$ และ $L$	คือ ค่าความยาวของเกจก่อน และหลังการดึงทดสอบ

ค่าของ plastic strain ratio มักขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวขณะที่ทำการทดสอบ โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ใช้ในการทดสอบจะนิยมตรวจสอบที่ 10, 15 หรือ 20 เปอร์เซ็นต์

โดยทั่วไปค่า plastic strain ratio จะเปลี่ยนไปตามแนวที่ทำการทดสอบ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึง มักจะใช้ค่า  $r$  เฉลี่ย (mean plastic strain ratio  $\bar{r}$ ) และค่าผลต่างจากแต่ละทิศทาง (planar anisotropy,  $\Delta r$ ) โดยที่

$$\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4 \quad \text{และ} \quad \Delta r = (r_0 + r_{90} - 2r_{45})/2 \quad \text{-----}(2.5)$$

## 2.6.2 สัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (strain-hardening exponent, n-value)

ในวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดสูงจะแสดงถึงการเพิ่มความเค้นขึ้นอย่างรวดเร็วตามความเครียด ซึ่งนี้มีแนวโน้มที่จะกระจายความเครียดต่อไปในบริเวณใกล้เคียงที่มีความเค้นและความเครียดต่ำกว่า ซึ่งต้านทานการเกิดคอขวดโดยค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดที่สูงนี้จะนำไปสู่ช่วงห่างที่แตกต่างกันมากระหว่างจุดคราก กับความแข็งแรงดึงสูงสุด ซึ่งชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีสำหรับในกระบวนการดึงขึ้นรูป (stretching)

ค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดสามารถหาได้จากความชันของกราฟ logarithm ระหว่างความเค้น กับความเครียดที่เป็นจริงในช่วงบริเวณที่มีการยืดตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จุดสองจุดที่มักใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดซึ่งให้ค่าความถูกต้องถึง  $\pm 0.02$  คือ ที่ความเครียด 10 เปอร์เซ็นต์ และที่แรงดึงสูงสุดภายในช่วงที่เกิดการยืดตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดคำนวณจาก<sup>25</sup>

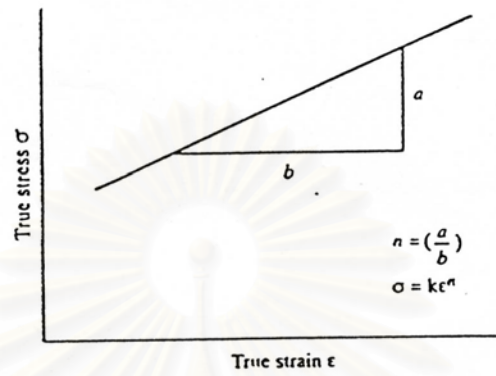
$$n = \frac{(d \ln \sigma_T)}{(d \ln \epsilon)} = \frac{(d \log \sigma_T)}{(d \log \epsilon)} \quad \text{-----}(2.6)$$

โดยที่

$\sigma_T$  คือ ค่าความเค้นจริง

$\epsilon$  คือ ค่าความเครียดจริง





รูปที่ 2.11 กราฟ logarithm ระหว่างความเค้น กับความเครียดจริง<sup>16</sup>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียมเกรด QSt E380 TM โดยผ่านกระบวนการหล่อและรีดร้อนต่อเนื่อง จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศมีความหนา 25 มิลลิเมตร มีส่วนผสมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	N
0.07	0.92	0.02	0.011	0.009	0.058	0.035	0.039	0.0076

ค่าสมบัติเชิงกลมาตรฐานสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียมเกรด QSt E380 TM สภาพหลังการรีดร้อนมีดังนี้

จุดคราก 380 MPa      ค่าแรงดึงสูงสุด 450-490 MPa      ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด 21%

#### 3.2 การเตรียมชิ้นงาน

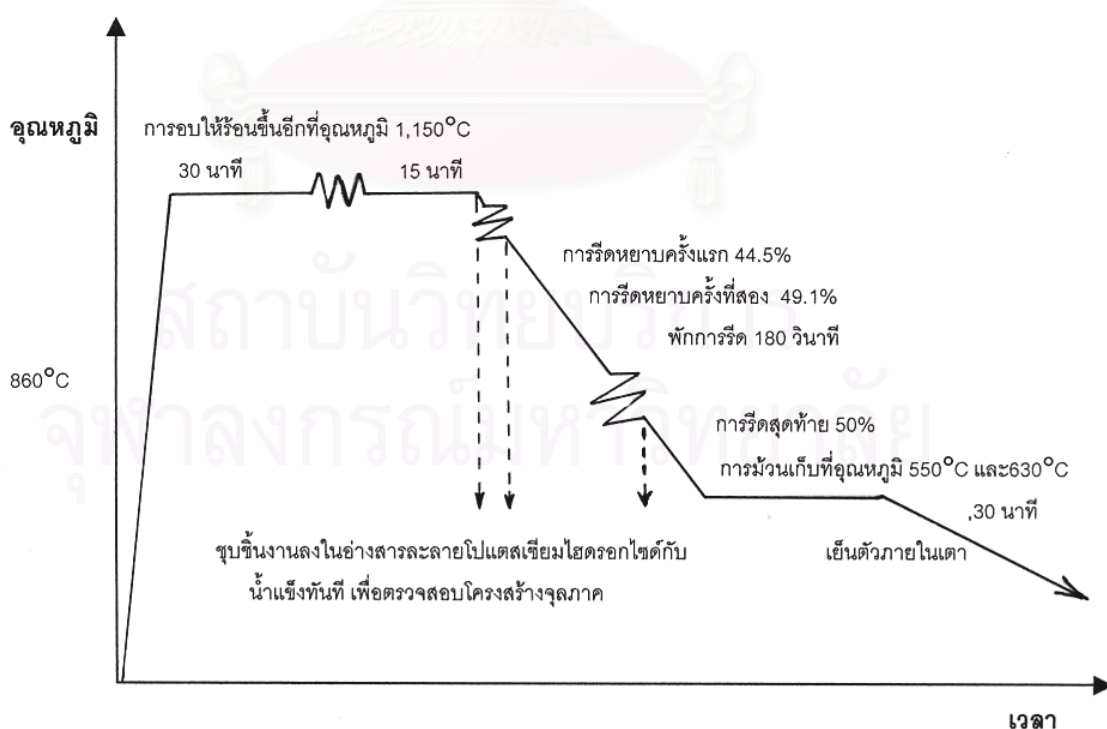
เนื่องจากข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการจำลองการรีด การเตรียมชิ้นงานในกระบวนการรีดร้อน และกระบวนการรีดเย็นทั้งหมดจึงเตรียมที่ประเทศสาธารณรัฐสโลวาเกีย โดยแบ่งเป็นการเตรียมชิ้นงานในกระบวนการรีดร้อน และการเตรียมชิ้นงานในกระบวนการรีดเย็น

### 3.2.1 การตรวจสอบ และการจำลองสภาวะการรีดร้อนที่ใช้อุณหภูมิมีวนเก็บ 550°C และ630°C

1. ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 25x25x50 มิลลิเมตรด้วยใบเลื่อยหินเจียร แล้วนำปลายข้างหนึ่งมาเจียรด้วยหินขัดให้เกิดระนาบเอียง เพื่อให้ชิ้นงานเข้าสู่เครื่องรีดจำลองได้ง่ายขึ้น จากนั้นนำชิ้นงานไปอบให้ร้อนขึ้นอีกจนมีอุณหภูมิ 1,150°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงรีดหยาบปริมาณ 44.5% โดยเครื่องรีดจำลองด้วยอัตราความเครียด 6 S<sup>-1</sup>
2. นำชิ้นงานเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 1,150°C เป็นเวลา 15 นาที
3. ตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างอสเทนไนท์ โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการศึกษาชุปลงในอ่างสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์กับน้ำแข็งทันที จากนั้นนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
4. นำชิ้นงานเข้าสู่แท่นรีดทันทีโดยรีดหยาบปริมาณ 49.1% โดยเครื่องรีดจำลองด้วยอัตราความเครียด 14 S<sup>-1</sup>
5. ตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างอสเทนไนท์ เหมือนในข้อ 3
6. จำลองการพักการรีดโดยนำชิ้นงานซึ่งผ่านการรีดเข้าเตาอบที่มีอุณหภูมิ 860°C จนชิ้นงานมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ 860°C ในขั้นตอนนี้ทำการตรวจสอบอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปอร์ดึงในชิ้นงานชิ้นหนึ่งแล้วบันทึกเวลาที่ต้องใช้ในเตา ซึ่งพบว่าใช้เวลาประมาณ 180 วินาทีในการทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับ 860°C
7. นำชิ้นงานเข้าสู่โดยเครื่องรีดจำลองต่อไปทันทีโดยใช้ปริมาณการรีดสุดท้าย 50% ด้วยอัตราความเครียด 24 S<sup>-1</sup> จากนั้นทำตามเหมือนในข้อ 3
8. จำลองสภาวะการมีวนเก็บโดยนำชิ้นงานออกจากโดยเครื่องรีดจำลองเข้าสู่เตาอบที่มีอุณหภูมิ 550°C และ630°C ทันทีแล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้ 30 นาที จากนั้นจึงปิดสวิทเตาปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง
9. นำชิ้นงานทั้งหมดออกจากเตาแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามอุณหภูมิมีวนเก็บ แล้วนำส่วนหนึ่งมาตัดให้เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง (tensile test specimen)ตามมาตรฐาน ASTM E 8M<sup>26</sup> จากนั้นจึงทำการทดสอบแรงดึง พร้อมทั้งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจำลองการมีวนเก็บ

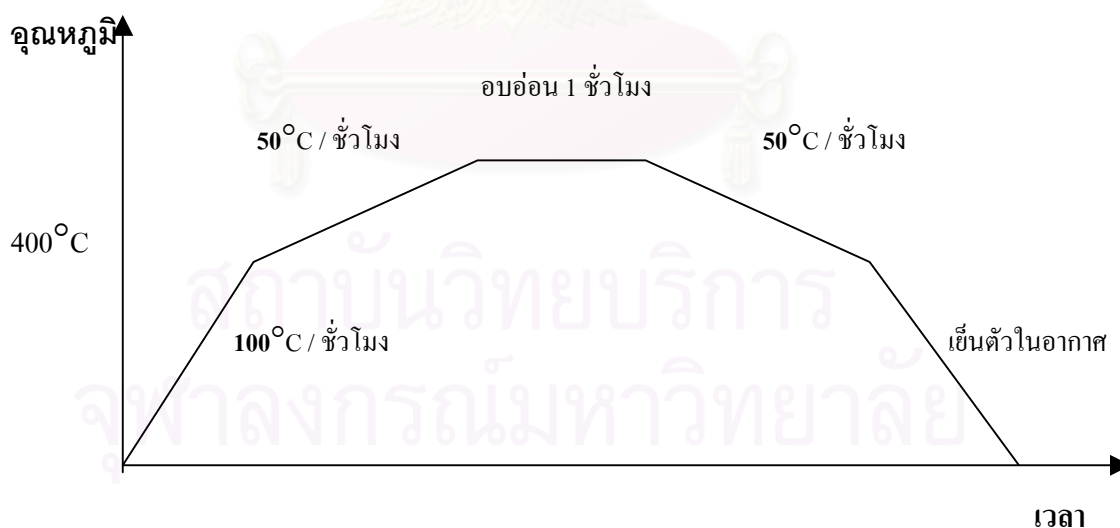
### 3.2.2 การเตรียม และการทดสอบชิ้นงานในการรีดเย็น และอบอ่อน

1. นำชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการรีดร้อนทั้งหมดมาดัดล้างด้วยกรด (pickling) เพื่อขจัดชั้นผิวที่เกิดการออกซิเดชันออกโดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เข้มข้น 70% โดยปริมาตร
2. เมื่อขจัดชั้นผิวที่เกิดการออกซิเดชันออกหมดแล้วนำไปทำให้เป็นกลาง (neutralized) โดยการนำไปชุบลงในอ่างสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ตามด้วยการล้างน้ำให้สะอาดและอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}C$  เพื่อขจัดความชื้น
3. นำชิ้นงานที่มีอุณหภูมิມ່ວນเก็บต่างกันมาผ่านการการรีดเย็นด้วยปริมาณการแปรรูป 40% 50% 60% และ 70% ด้วยเครื่องรีดจำลองโดยใช้ปริมาณการรีดเย็นในแต่ละครั้งประมาณ 10-15% ซึ่งจะรีดเย็นหลายครั้งจนกว่าจะได้ปริมาณการรีดเย็นที่ต้องการ
4. นำชิ้นงานทุกชิ้นมาตัดให้เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M<sup>26</sup>
5. วัดค่าความแข็งของชิ้นงานทุกชิ้นด้วยวิธี Vickers hardness test ใช้น้ำหนักกด 30 กิโลกรัม หัวกดแบบปิรามิดมุม  $136^{\circ}$  ทำการกดเพื่อวัดความแข็ง 5 ตำแหน่งต่อ 1 ชิ้นงาน โดยต้องขัดผิวหน้าของชิ้นงานที่จะวัดความแข็งให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220 จนผิวเรียบ และเงาวาว



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการจำลองสภาวะการรีดร้อนที่มีอุณหภูมิມ່ວນเก็บต่างกัน

6. นำชิ้นงานจากแต่ละปริมาณของการแปรรูปมาบรรจุในกระบอกลูกเหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร สูง 180 มิลลิเมตร ร่วมกับเศษชิ้นที่ปล่อยของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อลดการเกิดออกซิเดชันที่ผิวชิ้นงาน จากนั้นทำการเชื่อมปิดฝากระบอกลูกเหล็กให้สนิท
7. นำกระบอกลูกเหล็กที่มีชิ้นงานอยู่ภายในใส่ในเตาอบโดยใช้อุณหภูมิอบอ่อนที่  $620^{\circ}\text{C}$   $640^{\circ}\text{C}$   $660^{\circ}\text{C}$  และ  $680^{\circ}\text{C}$  โดยลักษณะการอบอ่อน คือ ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน  $100^{\circ}\text{C}$  ต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจึงลดอัตราการเพิ่มความร้อนเหลือ  $50^{\circ}\text{C}$  ต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ การอบอ่อนที่ต้องการ แล้วรักษาไว้ที่อุณหภูมินั้น 1 ชั่วโมง
8. ปลดปล่อยชิ้นงานในกระบอกลูกเหล็กในตัวภายในเตาโดยรักษาให้อัตราการเย็นตัวประมาณ  $50^{\circ}\text{C}$  ต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  แล้วจึงนำกระบอกลูกเหล็กออกมาเย็นตัวในอากาศ
9. นำชิ้นงานทั้งหมดออกมาวัดความแข็งอีกครั้งเหมือนในข้อ 5 พร้อมทั้งตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย
10. ทดสอบแรงดึงกับชิ้นงานทุกชิ้นเพื่อหาสมบัติเชิงกลโดยใช้ชิ้นงาน 3 ชิ้นต่อตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง 1 ชุด เพื่อยืนยันผลการทดสอบที่ได้



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับอุณหภูมิในการอบอ่อน

### 3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลประกอบด้วยการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานด้วยวิธี Vickers hardness test ใช้น้ำหนักกด 30 กิโลกรัม ดังรายละเอียดให้หัวข้อ 3.2.2 และการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (universal tensile testing machine) เพื่อหาจุดคราก (yield point) ค่าแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมด (% total elongation) ค่า plastic strain ratio (r-value) และสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (n-value)

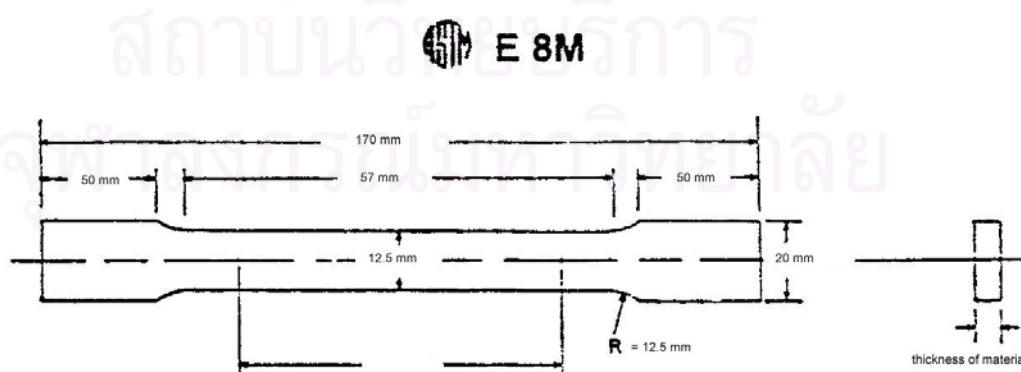
1. ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังจำลองการม้วนเก็บ และหลังการรีดเย็นแล้วอบอ่อนด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงทิศทางเดียว โดยเตรียมชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นรูปกระดูกสุนัขโดยมีแนวยาวตามทิศทางของการรีด ดังในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร และกว้าง 12.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E 8M<sup>26</sup>
2. นำชิ้นงานมาขีดด้วยเหล็กปลายแหลม เพื่อแสดงขอบเขตความยาวเกจของชิ้นงานก่อน และหลังการทดสอบ ในการขีดทำเครื่องหมายจะต้องระวังไม่ออกแรงกดเหล็กปลายแหลมมากเกินไปจนทำให้ชิ้นงานมีรอยบาก เพราะจะทำให้ค่าแรงดึงที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง
3. วัดความยาวเกจด้วยเครื่องวัดความยาวด้วยแสง (optical micrometer) ซึ่งมีค่าความผิดพลาด  $\pm 0.001$  มิลลิเมตร แล้ววัดความหนา และความกว้างของเกจอย่างละเอียดด้วยไมโครมิเตอร์ 3 แห่งโดยห่างเท่ากันภายในเกจซึ่งมีค่าความผิดพลาด  $\pm 0.001$  มิลลิเมตร ก่อนนำไปทดสอบแรงดึง
4. นำชิ้นงานมายึดติดกับหัวจับของเครื่องทดสอบแรงดึงทั้งบน และล่าง
5. นำเครื่องวัดการยืดตัว (extensometer) ติดกับชิ้นงานทดสอบในช่วงความยาวเกจแล้วปรับตั้งค่าเริ่มต้นของระยะการยืดตัวเป็นศูนย์ (calibration) เพื่อวัดปริมาณการยืดตัวของชิ้นงาน
6. เริ่มทำการทดสอบแรงดึงแบบความเครียดเพิ่มขึ้นคงที่ ด้วยความเร็วของหัวจับ 1 มิลลิเมตรต่อ 1 นาที จนกระทั่งชิ้นงานยืดตัวถึง 15% ของความยาวเกจเริ่มต้น จึงหยุดการดึงชั่วคราว
7. ปลดชิ้นงานที่ยืดตัวแล้วออกมา แล้ววัดความยาวเกจอีกครั้งด้วยเครื่องวัดความยาวด้วยแสง และวัดความกว้างด้วยไมโครมิเตอร์โดยเว้นระยะห่างเท่ากัน 3 แห่งในบริเวณความยาวเกจอย่างละเอียดอีกครั้ง
8. นำชิ้นงานกลับเข้าสู่เครื่องทดสอบแรงดึงอีกครั้ง แล้วดึงจนชิ้นงานแยกออกจากกัน
9. นำชิ้นงานที่แยกออกจากกันมาต่อเข้ากันใหม่เพื่อวัดความยาวเกจสุดท้ายแล้ววัดความกว้างและความหนาของหน้าตัดรอยแยกด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ที่มีค่าความผิดพลาด  $\pm 0.01$  มิลลิเมตร

10. นำข้อมูลที่ได้จากกราฟระหว่างแรงดึง กับระยะที่ยืดตัวโดยเครื่องทดสอบแรงดึง และขนาดของเกจที่วัดไว้ในตอนต้นมาทำการคำนวณหา จุดคราก ค่าแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมด ค่า plastic strain ratio (r-value) และสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (n-value) ตามแนวทิศทางการรีด

### 3.4 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

#### 3.4.1 การตัด และเตรียมชิ้นงานโครงสร้างจุลภาค

1. ตัดชิ้นงานที่จะนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยใบเลื่อยหินเจียรที่มีน้ำหล่อเย็นพร้อมทั้งใช้ความเร็วในการป้อนชิ้นงานเข้าสู่เครื่องตัดต่ำ (30 มิลลิเมตร/นาที) โดยผิวระนาบที่ทำการตรวจสอบจะต้องขนานกับทิศทางการรีด และตั้งฉากกับระนาบการรีด ดังในรูปที่ 3.4
2. นำชิ้นงานใส่ใน castable epoxy พร้อมทั้งใส่ฉลากละบุดัวชิ้นงานให้ชัดเจน
3. ขัดชิ้นงานบนกระดาษน้ำซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 200 220 400 จนถึง 600 แล้วล้างน้ำให้สะอาด
4. ขัดชิ้นงานด้วยผ้ากำมะหยี่ ไรยหน้าด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 0.5 ไมครอนแขวงลอยในน้ำ ขัดจนกระทั่งผิวระนาบของชิ้นงานเงาวาวคล้ายกระจก
5. ล้างด้วยน้ำให้สะอาด ล้างอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ และเป่าให้แห้งสนิทด้วยเครื่องเป่าลมร้อน



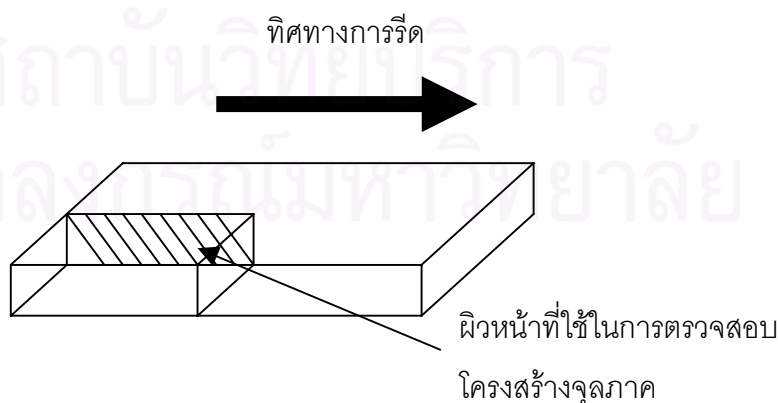
รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E 8M<sup>26</sup>

### 3.4.2 การกัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคที่ต้องการตรวจสอบในที่นี้คือ ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์ โครงสร้างเฟอร์ไรท์ และการกระจายตัวของ โครงสร้างเพิร์ลไลท์ หรืออนุภาคคาร์ไบด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้<sup>27</sup>

#### 3.4.2.1 การตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์ ในระหว่างกระบวนการรีดร้อน

- 1) ทำโดยการนำผงกรดพิคริก(picric acid) ละลายในน้ำกลั่นจนอิ่มตัว (ประมาณ 40 กรัมต่อน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นเติมสารเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (sulfonate) 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ  $\text{FeCl}_2$  2-3 หยด ต่อดังกล่าว 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผสมในบีกเกอร์ที่อุณหภูมิประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ผงกรดพิคริก ละลายอิ่มตัวในน้ำได้ง่ายขึ้น คนจนเป็นเนื้อเดียวกัน ในขั้นตอนนี้ควรระวังการ ระเบิดของกรดพิคริกเมื่อถูกให้ความร้อนจนแห้ง และการสูดดมไอระเหยจากการ ผสมสูตรข้างต้นนี้เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ
- 2) นำบีกเกอร์ใส่สารละลายพิคริกนี้ไปอุ่นบนแผ่นทำความร้อนจนมีอุณหภูมิ  $50-60^{\circ}\text{C}$
- 3) นำชิ้นงานแช่ในสารละลายพิคริกโดยหงายหน้าชิ้นงานขึ้น



รูปที่ 3.4 ผิวหน้าที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค



- 4) ใช้ไม้พันด้วยลวดลึงผิวหน้าชิ้นงานบ่อยๆ ในระหว่างการแช่ในสารละลายนี้จะช่วยให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 10-20 นาที
- 5) ล้างกรดและเศษผงจากการทำปฏิกิริยาของผิวหน้าชิ้นงานกับกรดที่ติดอยู่ด้วยน้ำประปาให้สะอาด จากนั้นล้างอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ และเป่าให้แห้งสนิทด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

#### 3.4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างเฟอร์ไรท์หลังการม้วนเก็บ และหลังการอบอ่อน

- 1) นำชิ้นงานชุบลงในสารละลายไนตอล (nital) ที่มีความเข้มข้นของ  $\text{HNO}_3$  2 % ในเอทานอล ใช้เวลาประมาณ 5-10 วินาที
- 2) ล้างกรดและเศษผงจากการทำปฏิกิริยาของผิวหน้าชิ้นงานกับกรดที่ติดอยู่ด้วยน้ำประปาให้สะอาด จากนั้นล้างอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ และเป่าให้แห้งสนิทด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

#### 3.4.2.3 การตรวจสอบการกระจายตัวของโครงสร้างเฟอไรต์ หรืออนุภาคคาร์ไบด์ หลังการม้วนเก็บ และหลังการอบอ่อน

- 1) นำชิ้นงานชุบลงในสารละลายกรดพิคริก(picral) ซึ่งเตรียมได้โดย ผสมผงกรดพิคริก 4 กรัม กับแอลกอฮอล์ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้เวลาประมาณ 3-5 วินาที
- 2) ล้างกรดและเศษผงจากการทำปฏิกิริยาของผิวหน้าชิ้นงานกับกรดที่ติดอยู่ด้วยน้ำประปาให้สะอาด จากนั้นล้างอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ และเป่าให้แห้งสนิทด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

### 3.5 วิธีการวัดขนาดเกรน

วิธีการวัดขนาดเกรนโดยการลากเส้นผ่านรูปโครงสร้างจุลภาค แล้วนับจุดตัดระหว่างเส้นทดสอบกับขอบเกรน แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบใช้เส้นตรง และแบบใช้เส้นวงกลม<sup>28</sup>

### 3.5.1 การใช้เส้นตรง (Heyn lineal intercept procedure)

ลากเส้นตรงทดสอบตัดผ่านขอบเกรนอย่างน้อย 50 เกรนต่อ 1 เส้น โดยการปรับกำลังขยาย และความยาวของเส้นทดสอบ การนับจุดตัดระหว่างเส้นทดสอบกับขอบเกรนจะนับจุดตัดระหว่างรอยต่อของ 3 เกรนเป็น 1.5 ในกรณีที่มีเกรนรูปทรงหลายเหลี่ยม (equiaxed grain) จะลากเส้นทดสอบแบบสุ่มอย่างไม่มีทิศทาง 3-5 เส้น แต่ในกรณีที่เกรนมีลักษณะรียาว การลากเส้นทดสอบสามารถแบ่งทำเป็น 2 ทิศทาง คือ ทิศทางขนานกับแนวเกรนรียาวได้ค่าความยาวเฉลี่ยของเกรน และทิศทางตั้งฉากกับแนวเกรนรียาวได้ค่าความกว้างเฉลี่ยของเกรน นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าที่คำนวณได้มาหาสัดส่วนระหว่างค่าความยาวเฉลี่ยของเกรน ต่อค่าความกว้างเฉลี่ยของเกรน (aspect ratio) เพื่อใช้ในการบรรยายรูปร่างโดยเฉลี่ยของเกรน

### ตารางที่ 3.2 สารละลาย ส่วนผสม และการใช้งาน สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

สารละลาย (etchant)	ส่วนผสม	การใช้งาน
สารละลายพิคริกอิ่มตัวกับสารเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (saturated aqueous picric acid and sulfonate)	สารเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (sulfonate) 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ $\text{FeCl}_2$ 2-3 หยด ต่อมงกรดพิคริก(picric acid) อิ่มตัวในน้ำ (ประมาณ 40 กรัมต่อน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ตรวจสอบขอบเกรนเดิมของโครงสร้างอสเทนไนท์
สารละลายไนตอล (nital)	ความเข้มข้นของ $\text{HNO}_3$ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในเอทานอล 98 ลูกบาศก์เซนติเมตร	ตรวจสอบโครงสร้างเฟอร์ไรท์
สารละลายพิคริก (picral)	ดมกรดพิคริก 4 กรัม กับ แอลกอฮอล์ 100 ลูกบาศก์ เซนติเมตร	ตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคคาร์ไบด์ หรือโครงสร้างเพิร์ลไลท์

### 3.5.2 การใช้วงกลม 3 วง (Abrams three-circle procedure)

ลากวงกลม 3 วง โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 79.58, 53.05 และ 26.53 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้มีความยาวรวมของเส้นทดสอบจากวงกลม 3 วงเป็น 500 มิลลิเมตร การนับจุดตัดระหว่างเส้นทดสอบกับขอบเกรนจะนับจุดตัดระหว่างรอยต่อของ 3 เกรนเป็น 2 โดยการเลือกตำแหน่งแบบสุ่ม 5 ตำแหน่ง รูปของวงกลมทดสอบแสดงในรูปที่ 3.5 วิธีนี้เหมาะสำหรับเกรนที่มีรูปทรงหลายเหลี่ยม สามารถช่วยลดการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากทิศทางการลากเส้นตรงทดสอบ จากวิธีการลากเส้นตรงทดสอบ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณขนาดเกรนเฉลี่ย คือ

$$\bar{L} = \frac{L_T}{PM} \quad \text{-----(3.1)}$$

$\bar{L}$  คือ ขนาดความกว้างของเกรนเฉลี่ย

$L_T$  คือ ความยาวของเส้นทดสอบ ซึ่งในกรณีของการใช้วงกลม 3 วง ค่า จะเป็น 500 มิลลิเมตร

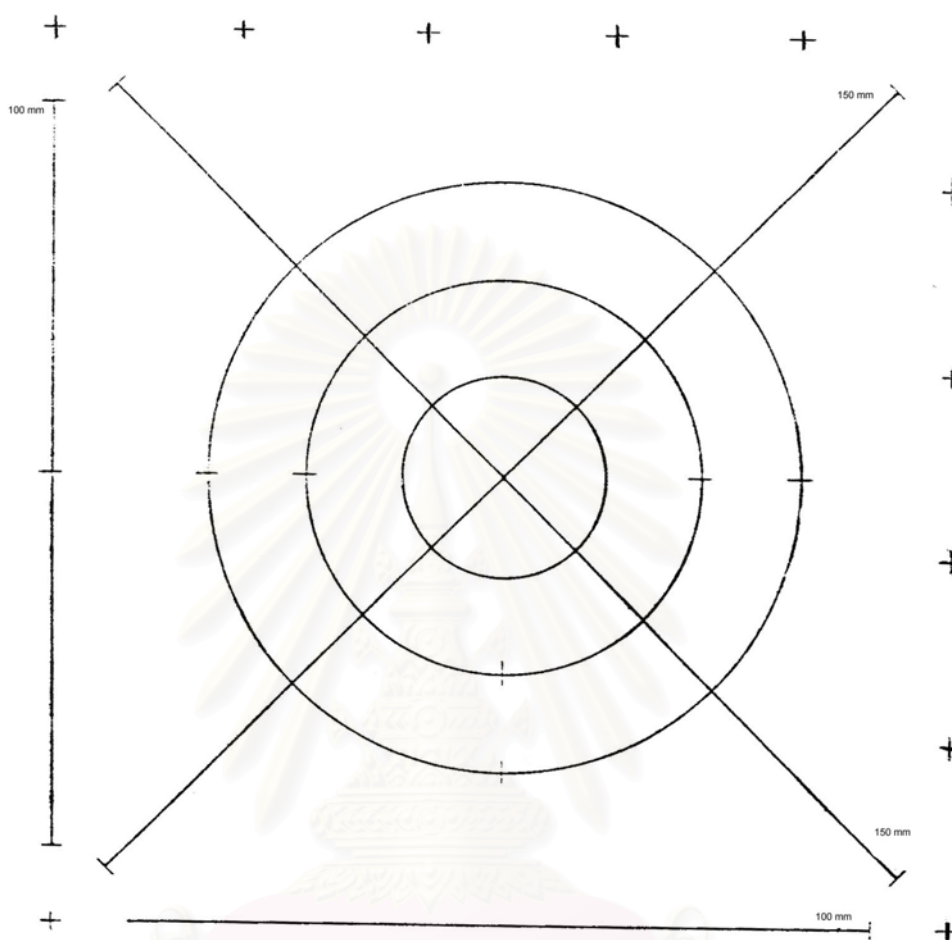
$P$  คือ จำนวนจุดตัดระหว่างเส้นทดสอบกับขอบเกรน

$M$  คือ กำลังขยาย

### 3.6 วิธีการวัดเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่

การวัดหาปริมาณการตกผลึกใหม่จากค่าความเข้มอาจไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วัดหาค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่โดยตรง ดังนั้นในการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่จึงสามารถวัดได้โดยใช้ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเป็นเกณฑ์ โดยกำหนดให้ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างระหว่าง 1.0 -1.7 เป็นเกรนที่เกิดจากการตกผลึกใหม่<sup>29</sup> จากนั้นใช้เครื่อง image analyzer คำนวณพื้นที่ที่นับว่าเป็นเกรนที่เกิดจากการตกผลึกใหม่ คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อพื้นที่ทั้งหมดที่ตรวจสอบคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของการตกผลึกใหม่

ASTM E 112



NOTE—If reproduced to make straight lines marked length:  
Straight lines total: 500 mm

Circles are:	Circumference, mm,	Diameter, mm
	250.0	79.58
	166.7	53.05
	83.3	26.53
Total	500.0	

รูปที่ 3.5 รูปแบบของลักษณะการลากเส้นทดสอบ และการใช้วงกลมทดสอบ<sup>28</sup>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ม้วนเก็บต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม

#### 4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในระหว่าง และหลังการรีดร้อน

โครงสร้างจุลภาคหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ  $1,150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที รีดหยาบครั้งแรกด้วยปริมาณ 44.5% แล้วนำไปอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ  $1,150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที แสดงในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์ขนาด 130 ไมครอน ซึ่งถือเป็นขนาดเกรนออสเทนไนท์เริ่มต้นก่อนการรีดหยาบ และการรีดสุดท้ายต่อไป จากนั้นนำชิ้นงานไปรีดหยาบครั้งที่สองด้วยปริมาณ 49.1% ที่อุณหภูมิ  $1,150^{\circ}\text{C}$  ได้โครงสร้างออสเทนไนท์หลังการตกผลึกใหม่ ดังในรูปที่ 4.2 พบว่าขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการตกผลึกใหม่มีขนาดลดลงอย่างมากเป็น 40 ไมครอน จากนั้นพักการรีดเป็นเวลา 180 วินาที จนชิ้นงานมีอุณหภูมิ  $860^{\circ}\text{C}$  แล้วรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ได้โครงสร้างออสเทนไนท์ที่ไม่เกิดการตกผลึกใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งคำนวณค่า  $S_{v(\text{gb}+\text{db})}$  ได้  $98 \text{ mm}^{-1}$  จากนั้นจำลองการม้วนเก็บโดยนำชิ้นงานเข้าเตาอบที่มีอุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  และ  $630^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาทีแล้วปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาได้โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ลไลต์ โดยมีเกรนเฟอร์ไรท์ลักษณะเป็นเกรนรูปทรงหลายเหลี่ยม (equiaxed grain) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าเกรนเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$  มีขนาดสม่ำเสมอมากกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อคำนวณขนาดเกรนเฟอร์ไรท์เฉลี่ยพบว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  มีขนาดเกรนเฟอร์ไรท์เฉลี่ยเป็น 7.4 ไมครอนซึ่งมีขนาดโตกว่า ในชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$  ที่มีขนาดเกรนเฟอร์ไรท์เฉลี่ย 7.7 ไมครอนไม่มากนัก เมื่อตรวจสอบขนาด และการกระจายตัวของโครงสร้างเพิร์ลไลต์หลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  และ  $630^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูป 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์ของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  มีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวมากกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4.1 ขนาดโครงสร้างจุลภาคในระหว่าง และหลังการรีดร้อน

ขนาดเกรนอสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีก ที่อุณหภูมิ 1,150°C เป็นเวลา 30 นาที รีดหยาบ ครั้งแรกด้วยปริมาณ 44.5% แล้วอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C เป็นเวลา 15 นาที	130 ไมครอน
ขนาดเกรนอสเทนไนท์ที่ตกผลึกใหม่หลังการรีดหยาบครั้งที่สองด้วยปริมาณ 49.1%	40 ไมครอน
เกรนอสเทนไนท์หลังการรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ 860°C	เกิดเกรนอสเทนไนท์ที่ไม่เกิดการตกผลึกใหม่แบบรียว $S_{v (gb+db)} = 98 \text{ mm}^{-1}$
ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์เฉลี่ยหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C	7.4 ไมครอน
ขนาดเกรนเฟอร์ไรท์เฉลี่ยหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C	7.7 ไมครอน

4.1.2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า จุดคราก ค่าแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมด ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C

	อุณหภูมิม้วนเก็บ	
	550°C	630°C
จุดคราก	409 MPa	369 MPa
ค่าแรงดึงสูงสุด	486 MPa	439 MPa
เปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมด	34.9 %	30.7 %



125 ไมครอน

รูปที่ 4.1 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C รีดหายครั้งแรกด้วยปริมาณ 44.5% แล้วนำไปอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C เป็นเวลา 15 นาที



50 ไมครอน

รูปที่ 4.2 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนต์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C ริดหายาครั้งแรก 44.5% และริดหายาครั้งที่ 2 ด้วยปริมาณ 49.1%



50 ไมครอน

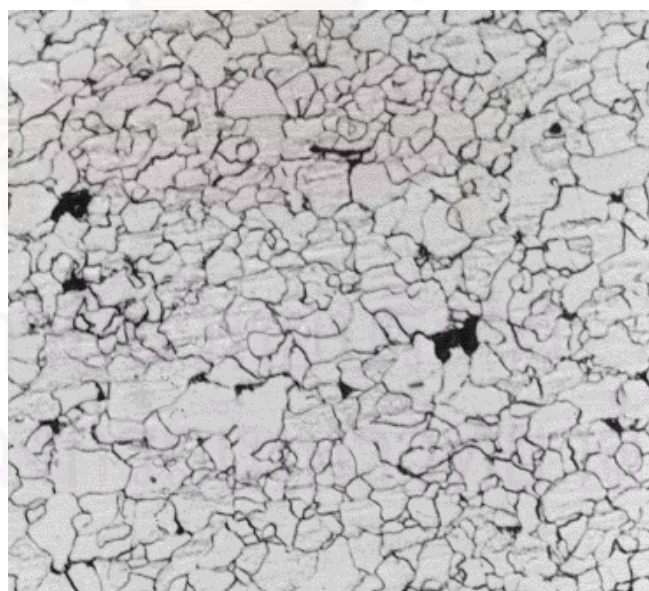
รูปที่ 4.3 ขอบเกรนเดิมของโครงสร้างออสเทนไนต์หลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C ริดหายาครั้งแรก 44.5% และริดหายาครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นริดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ 860°C





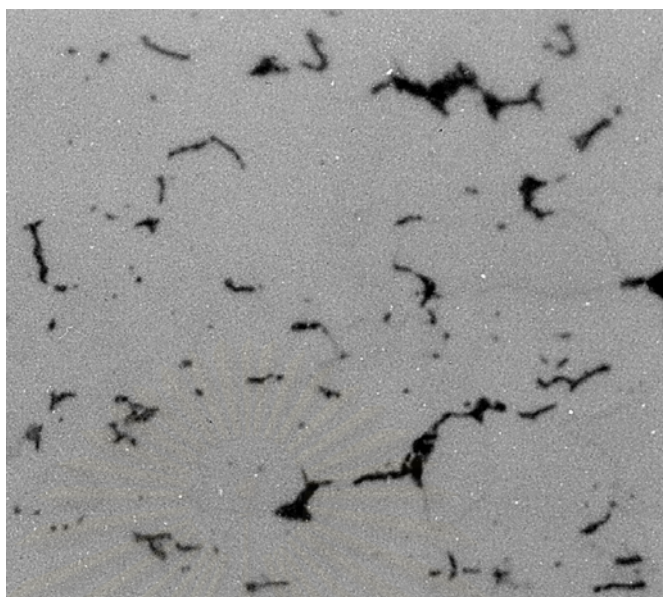
20 ไมครอน

รูปที่ 4.4 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ดไลต์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ  $1,150^{\circ}\text{C}$  รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ  $860^{\circ}\text{C}$  แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$



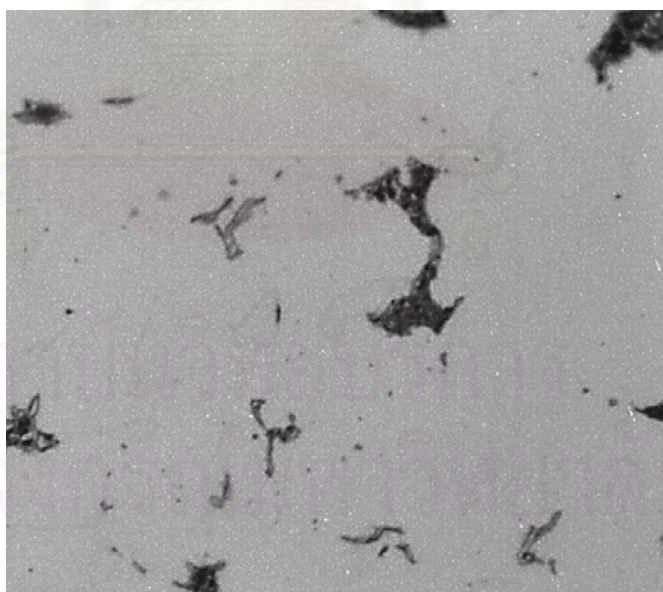
20 ไมครอน

รูปที่ 4.5 โครงสร้างเฟอร์ไรท์-เพิร์ดไลต์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ  $1,150^{\circ}\text{C}$  รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ  $860^{\circ}\text{C}$  แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$



8 ไมครอน

รูปที่ 4.6 โครงสร้างเฟอไรต์ไลต์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ  $1,150^{\circ}\text{C}$  รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ  $860^{\circ}\text{C}$  แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$



8 ไมครอน

รูปที่ 4.7 โครงสร้างเฟอไรต์ไลต์ หลังจากอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ  $1,150^{\circ}\text{C}$  รีดหยาบครั้งแรก 44.5% และรีดหยาบครั้งที่ 2 ปริมาณ 49.1% จากนั้นรีดสุดท้ายด้วยปริมาณ 50% ที่อุณหภูมิ  $860^{\circ}\text{C}$  แล้วม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$

## 4.2 ผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิอบอ่อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม

### 4.2.1 สมบัติเชิงกลหลังผ่านการรีดเย็น และอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C

จากการนำชิ้นงานหลังผ่านการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C มารีดเย็นในช่วงปริมาณ 40% ถึง 70% และอบอ่อนอุณหภูมิในช่วง 620°C ถึง 680°C แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ได้ผลดังนี้

พิจารณาจุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C แสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่าจุดครากมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อชิ้นงานมีปริมาณการรีดเย็นเพิ่มขึ้นทำให้การลดลงของจุดครากจากการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนลดลงโดยชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ ผ่านการรีดเย็น 40% แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C มีค่าจุดครากเป็น 464 MPa เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนเป็น 680°C มีจุดครากลดลงเป็น 347 MPa ส่วนชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และผ่านการรีดเย็น 70% แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C มีค่าจุดครากเป็น 383 MPa เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนเป็น 680°C มีจุดครากลดลงเป็น 364 MPa ซึ่งเห็นได้ว่าจุดครากของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 70% มีค่าลดลงจากการเพิ่มอุณหภูมิม้วนเก็บน้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 40% ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น 40% มีจุดครากค่อนข้างสูงเมื่ออบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C และ 640°C จากนั้นค่าความแข็งแรงจึงลดลงอย่างมากจาก 424 MPa ที่อุณหภูมิอบอ่อน 640°C ไปเป็น 347 MPa ที่อุณหภูมิอบอ่อน 660°C จากนั้นเปรียบเทียบจุดครากจากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C พบว่าจุดครากของชิ้นงานทั้ง 2 กลุ่มที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C และ 640°C ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีจุดครากสูงกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ส่วนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 660°C และ 680°C ทำให้จุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C มีการเปลี่ยนแปลงของจุดครากจากการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนน้อยกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C

ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C แสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะแนวโน้มคล้ายกับจุดคราก คือมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ

อุณหภูมิอบอุ่น และเป็นที่น่าสังเกตว่าในช่วงอุณหภูมิอบอุ่นที่  $660^{\circ}\text{C}$  ถึง  $680^{\circ}\text{C}$  ชีงงานที่ใช้ปริมาณการรีดเย็นในช่วง 40% ถึง 70% มีค่าแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกัน

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมดของชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  และ  $630^{\circ}\text{C}$  แสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชีงงานทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบอุ่น เมื่อนำชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  มารีดเย็นด้วยปริมาณ 40% แล้วอบอุ่นอุณหภูมิในช่วง  $620^{\circ}\text{C}$  ถึง  $640^{\circ}\text{C}$  ทำให้ชีงงานมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ในเกณฑ์ต่ำ โดยชีงงานที่รีดเย็นด้วยปริมาณ 40% แล้วอบอุ่นที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  และ  $640^{\circ}\text{C}$  มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเป็น 14.0% และ 16.6% ตามลำดับ และพบว่าโดยส่วนใหญ่ชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$  มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$

ค่า plastic strain ratio (r-value) ของชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  และ  $630^{\circ}\text{C}$  แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ พบว่าค่า plastic strain ratio มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณการรีดเย็น และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบอุ่น โดยชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  รีดเย็นด้วยปริมาณ 50% และอบอุ่นที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  มีค่า plastic strain ratio เป็น 0.78 เมื่อเพิ่มปริมาณการรีดเย็นเป็น 70% และอบอุ่นที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  มีค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นเป็น 1.10 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบอุ่นเป็น  $680^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ปริมาณการรีดเย็น 70% ทำให้ค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นเป็น 1.40 ส่วนชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$  รีดเย็นด้วยปริมาณ 50% และอบอุ่นที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  มีค่า plastic strain ratio เป็น 0.77 เมื่อเพิ่มปริมาณการรีดเย็นเป็น 70% และอบอุ่นที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  มีค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นเป็น 0.91 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบอุ่นเป็น  $680^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ปริมาณการรีดเย็น 70% ทำให้ค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นจาก 0.91 เป็น 1.09 จากนั้นเปรียบเทียบค่า plastic strain ratio ของชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  และ  $630^{\circ}\text{C}$  พบว่าชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  มีค่า plastic strain ratio สูงกว่าชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$

ค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (n-value) ของชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  และ  $630^{\circ}\text{C}$  แสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ พบว่าชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  เมื่อนำมารีดเย็นด้วยปริมาณ 40% แล้วอบอุ่นที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  และ  $640^{\circ}\text{C}$  มีค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดเป็น 0.107 และ 0.140 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับชีงงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  รีดเย็นด้วยปริมาณ 40% แล้วอบอุ่นที่อุณหภูมิ  $660^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดเป็น 0.185 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียดของ

ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากในช่วง 0.172 ถึง 0.192 จากการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 620°C ถึง 680°C โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อน คล้ายกับค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวทั้งหมด

ค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C แสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งหลังจากการรีดเย็นมีค่าลดลงอย่างมากหลังการอบอ่อนอุณหภูมิในช่วง 620°C ถึง 680°C โดยค่าความแข็งมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบอ่อนสูงขึ้น

#### 4.2.2 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการรีดเย็น และอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C

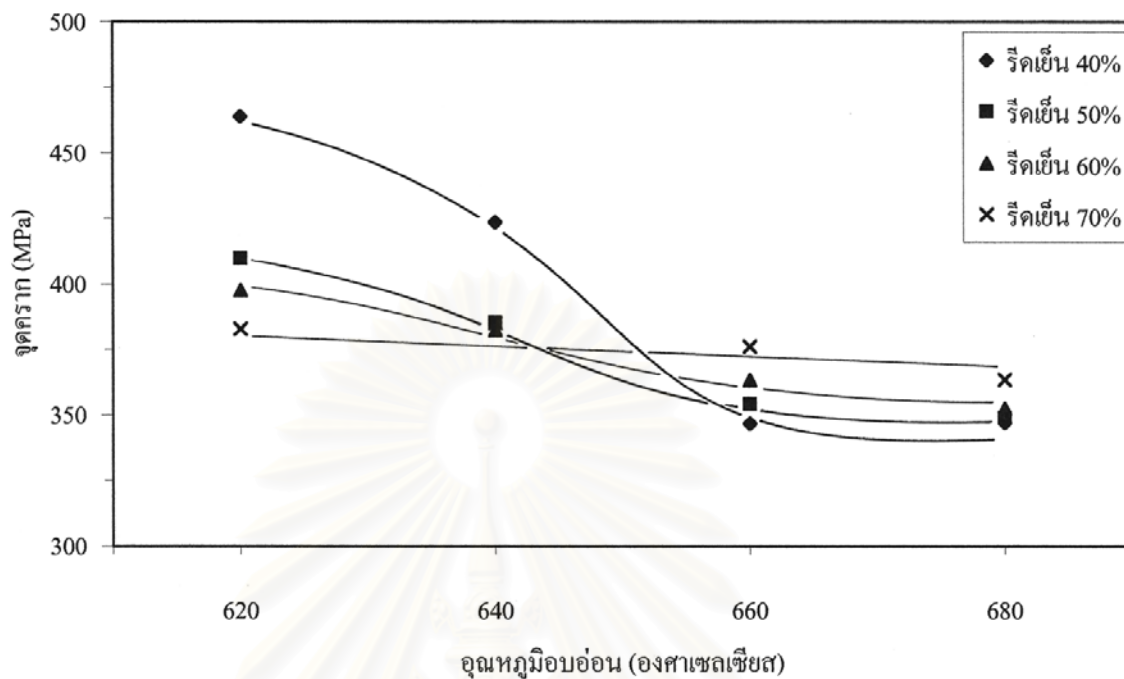
โครงสร้างเฟอร์ไรท์หลังการรีดเย็น และอบอ่อนโดยส่วนใหญ่มีเกรนลักษณะรียาว (elongated grain) ดังนั้นการวัดหาขนาดเกรนเฉลี่ยโดยใช้วิธีวงกลม 3 วงจึงไม่เหมาะสม ดังนั้นวิธีที่ใช้คือการลากเส้นตรงทดสอบ 2 ทิศทางแล้วนับจุดตัดของเส้นทดสอบกับขอบเกรน<sup>26</sup>คือ ทิศทางตั้งฉากกับแนวเกรนรียาวได้ค่าความกว้างเฉลี่ยของเกรน และทิศทางขนานกับแนวเกรนรียาวได้ค่าความยาวเฉลี่ยของเกรน รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงความกว้างเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการรีดเย็นทำให้เกรนมีความกว้างเฉลี่ยลดลง และการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนมีแนวโน้มทำให้เกรนมีความกว้างเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ยกเว้นในกรณีของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C รีดเย็นปริมาณ 40% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C และ 640°C ที่มีความกว้างเฉลี่ยของเกรนต่ำกว่าชิ้นงานที่รีดเย็นปริมาณ 50%

นำค่าความยาวเฉลี่ยของเกรนหารด้วยค่าความกว้างเฉลี่ยของเกรนได้ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C แสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณการรีดเย็นทำให้ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างสูงขึ้น แสดงว่าเกรนมีลักษณะรียาวมากขึ้น ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนทำให้ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างมีแนวโน้มลดลงแสดงว่าเกรนมีความรียาวลดลง แต่ในชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C พบว่าค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนจาก 660°C เป็น 680°C แสดงว่าเกรนโตขึ้นตามแนวขนานกับแนวเกรนรียาว (ทิศทางการรีด) ได้ดีกว่าตามแนวตั้งฉากกับแนวเกรนรียาว

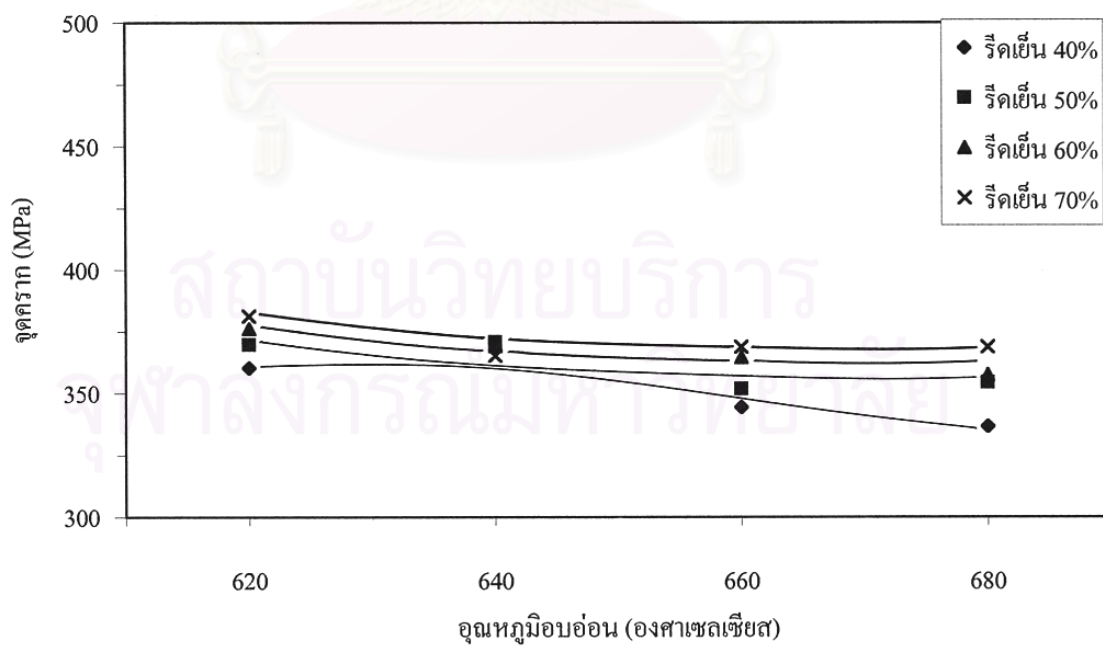
ในการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณการตกผลึกใหม่ ค่าความแข็งอาจไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วัดหาค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่โดยตรง ดังนั้นในการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่จึงสามารถวัดได้

โดยใช้ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างเป็นเกณฑ์ โดยให้ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างระหว่าง 1.0-1.7 เป็นเกณฑ์ที่เกิดจากการตกผลึกใหม่<sup>29</sup> ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 เป็นค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C ตามลำดับ รูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงลักษณะการตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C ตามลำดับ พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณการรีดเย็น และการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C กับชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C พบว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีปริมาณการตกผลึกใหม่น้อยกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

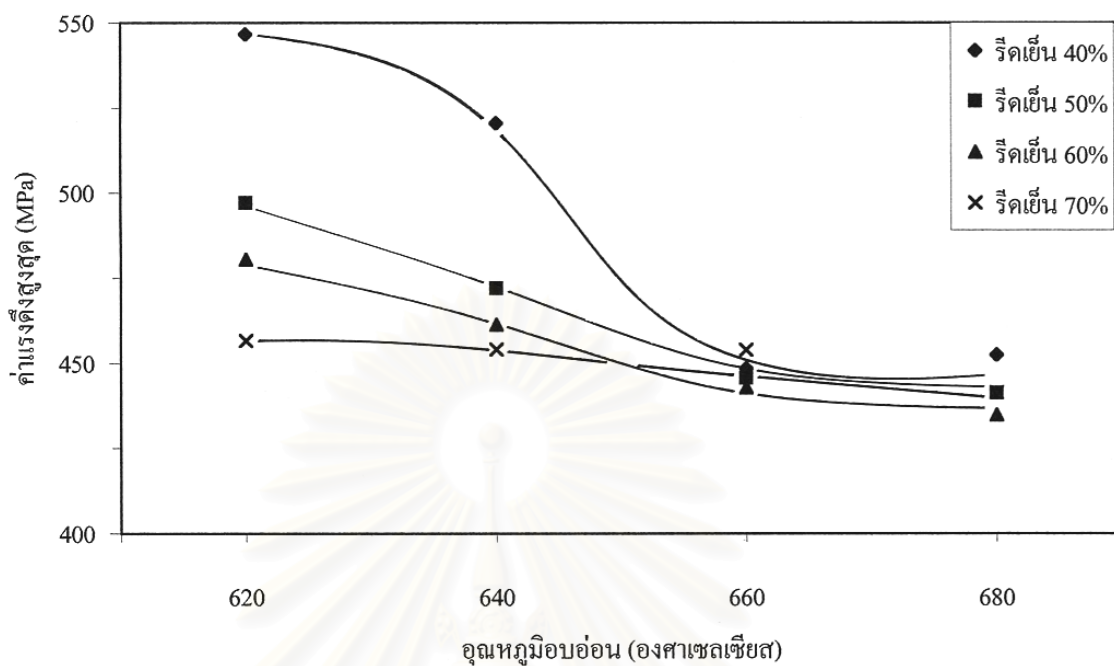
พิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อน ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ใช้ปริมาณการรีดเย็น 40% ถึง 70% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C แสดงในรูปที่ 4.28 ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ใช้ปริมาณการรีดเย็น 40% ถึง 70% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C แสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าการเพิ่มปริมาณการรีดเย็นช่วยให้อนุภาคคาร์ไบด์มีการกระจายตัวมากขึ้น และอนุภาคคาร์ไบด์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C หลังการอบอ่อน มีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มซึ่งมีการกระจายตัวน้อยกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C แสดงให้เห็นว่าเกิดจากการรีดเย็น และอบอ่อนชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ที่มีโครงสร้างเฟิร์ลไท์หยาบ และมีการกระจายตัวน้อยกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



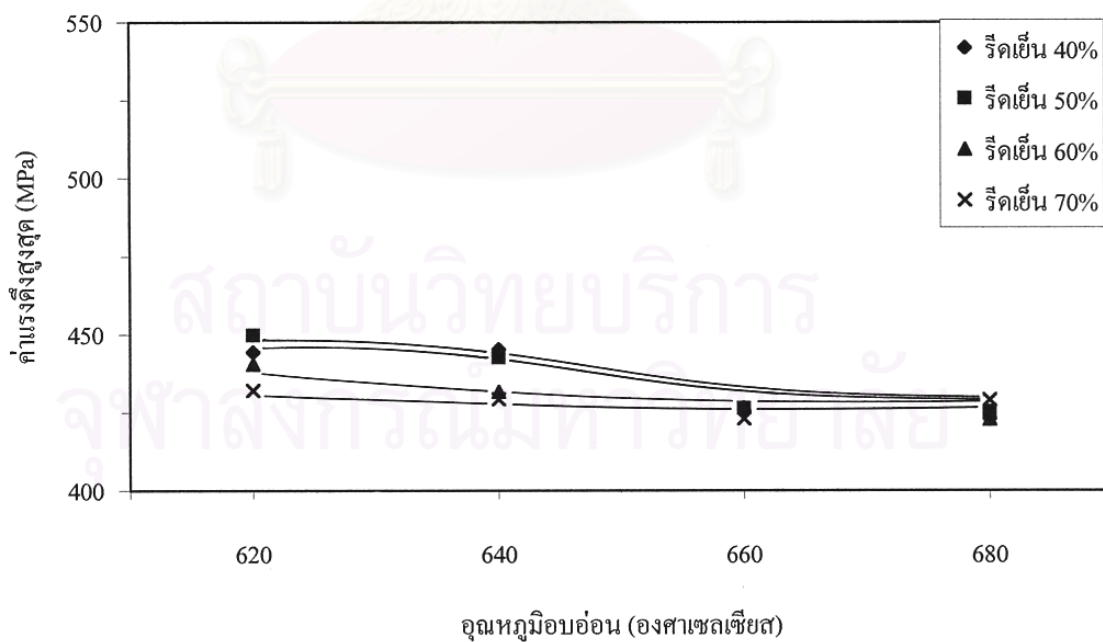
รูปที่ 4.8 จุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



รูปที่ 4.9 จุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

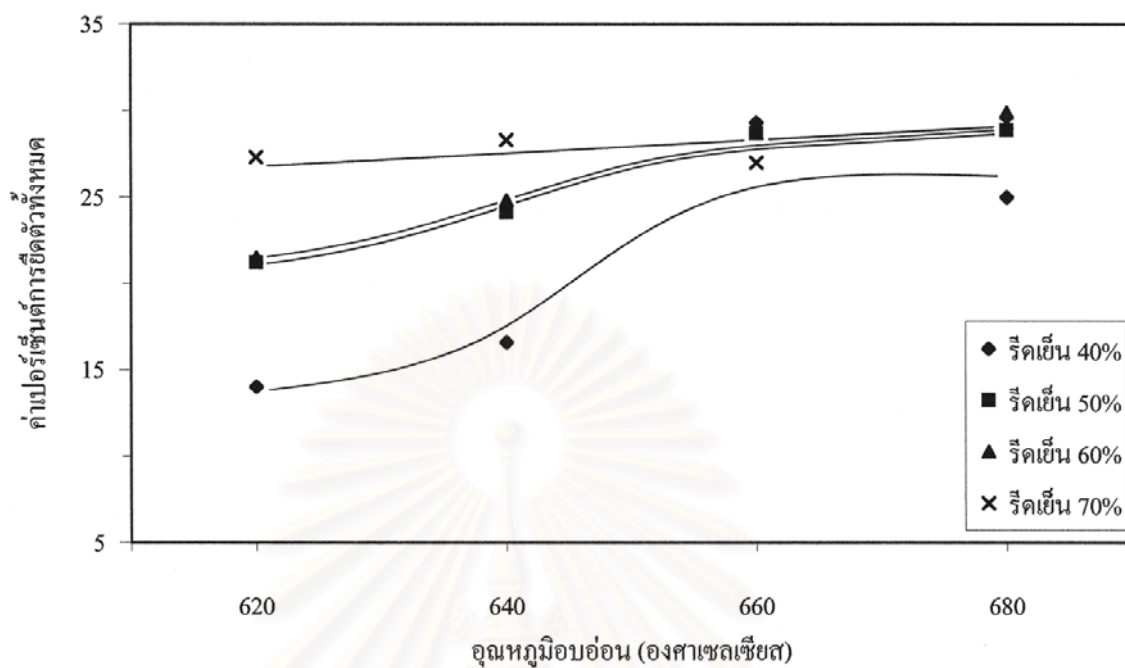


รูปที่ 4.10 ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C

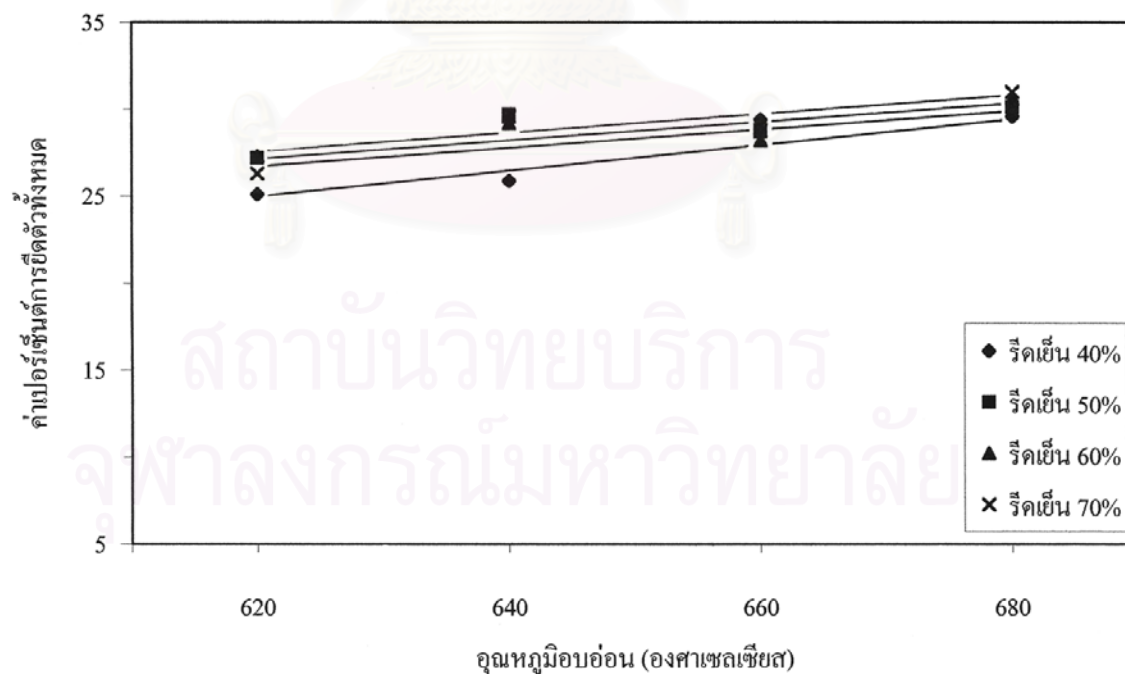


รูปที่ 4.11 ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

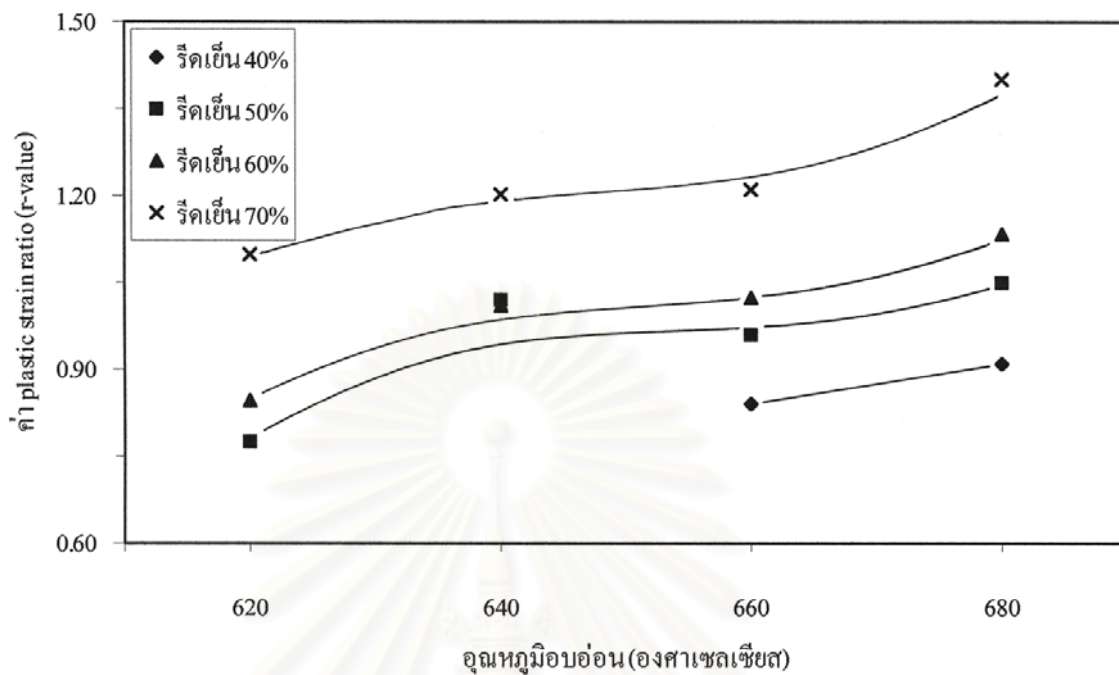




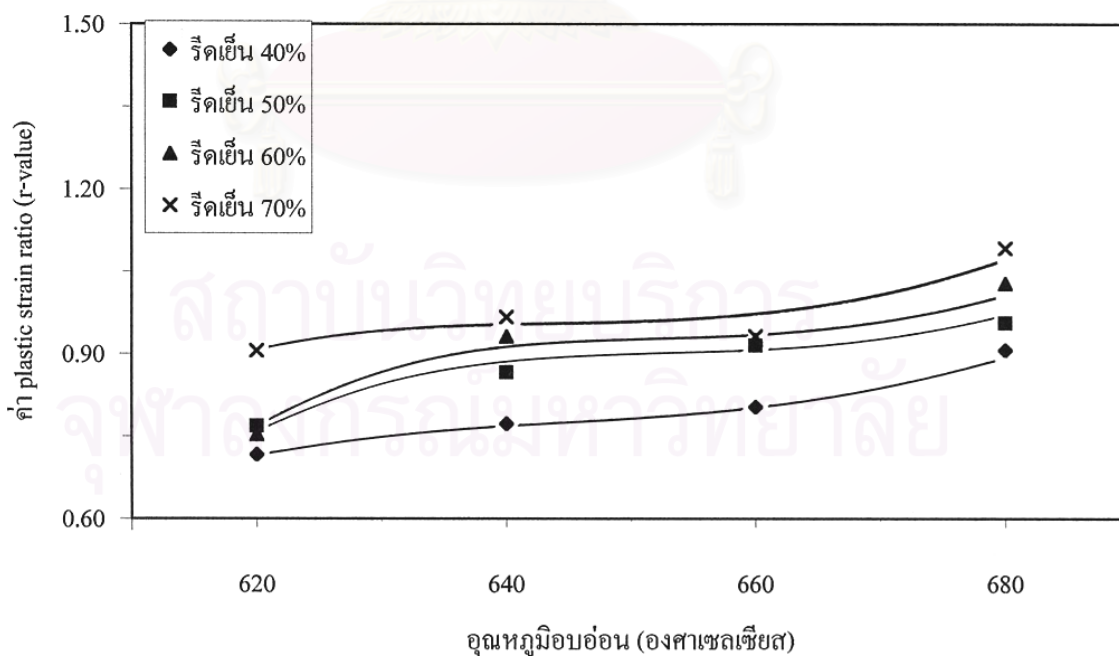
รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การขีดตัวทั้งหมดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



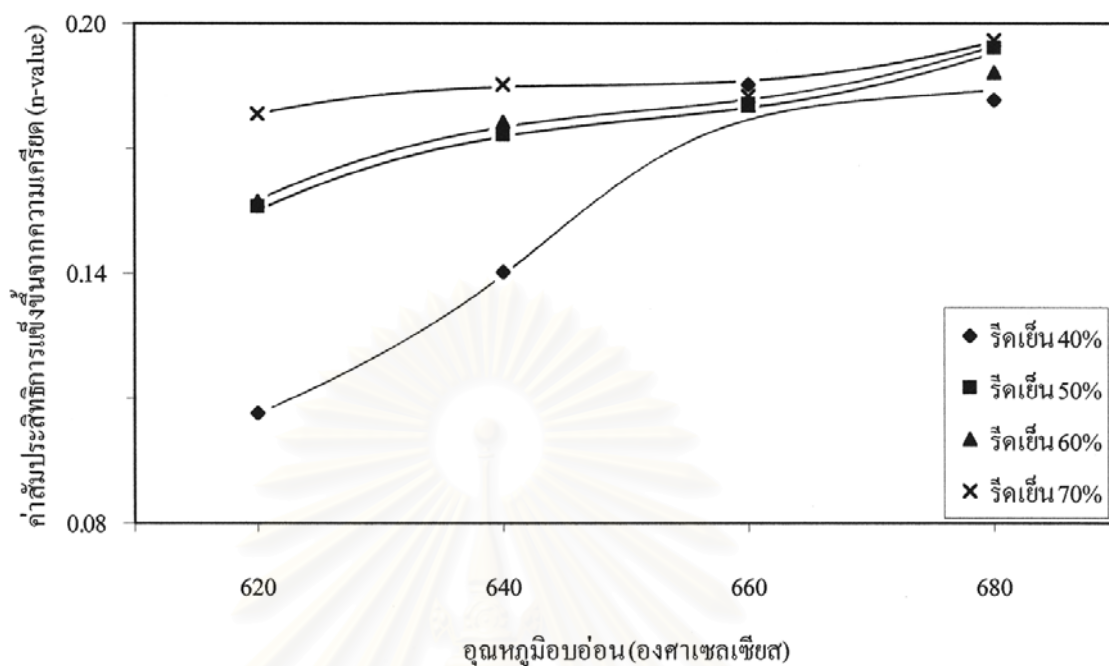
รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การขีดตัวทั้งหมดของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



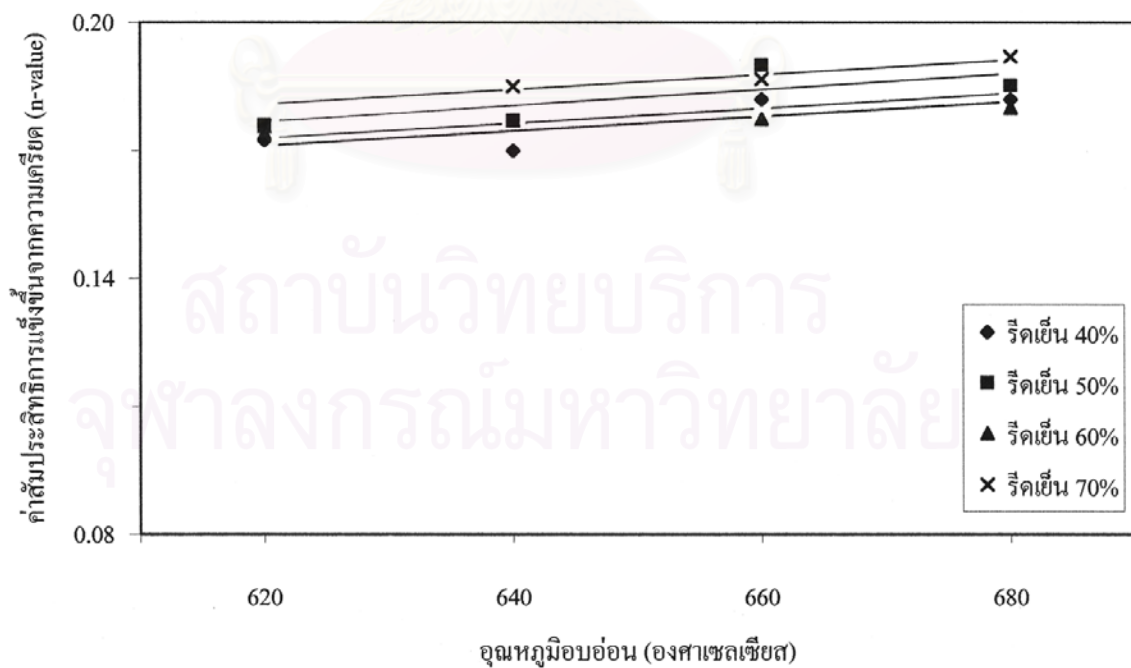
รูปที่ 4.14 ค่า plastic strain ratio (r-value) ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



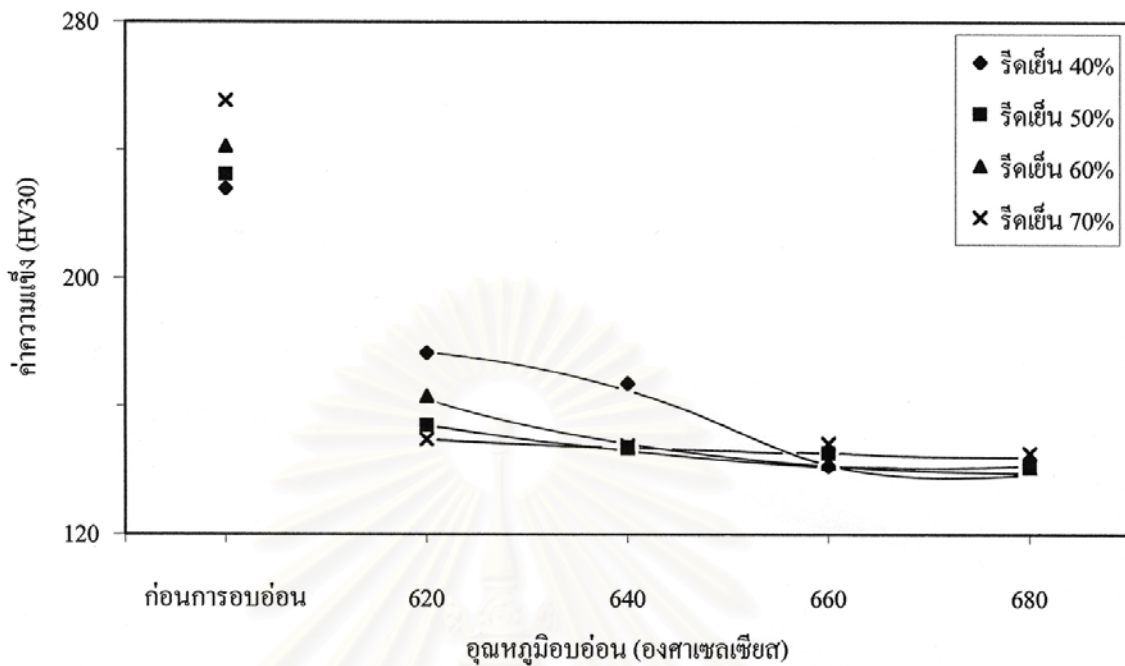
รูปที่ 4.15 ค่า plastic strain ratio (r-value) ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



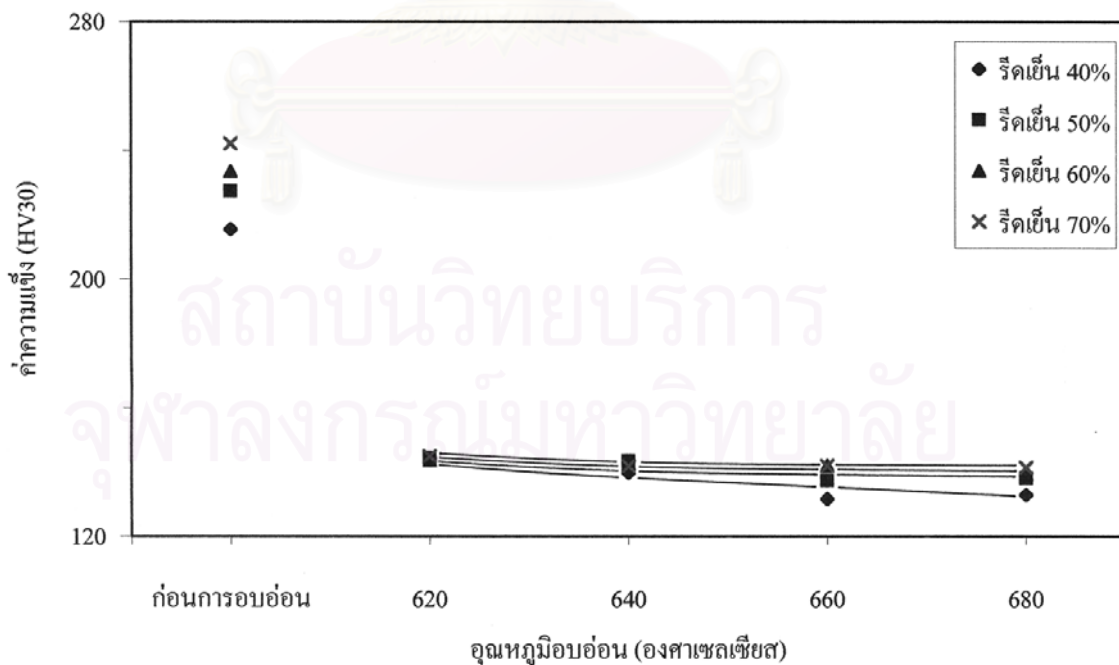
รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นจากความเครียด (n-value) ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



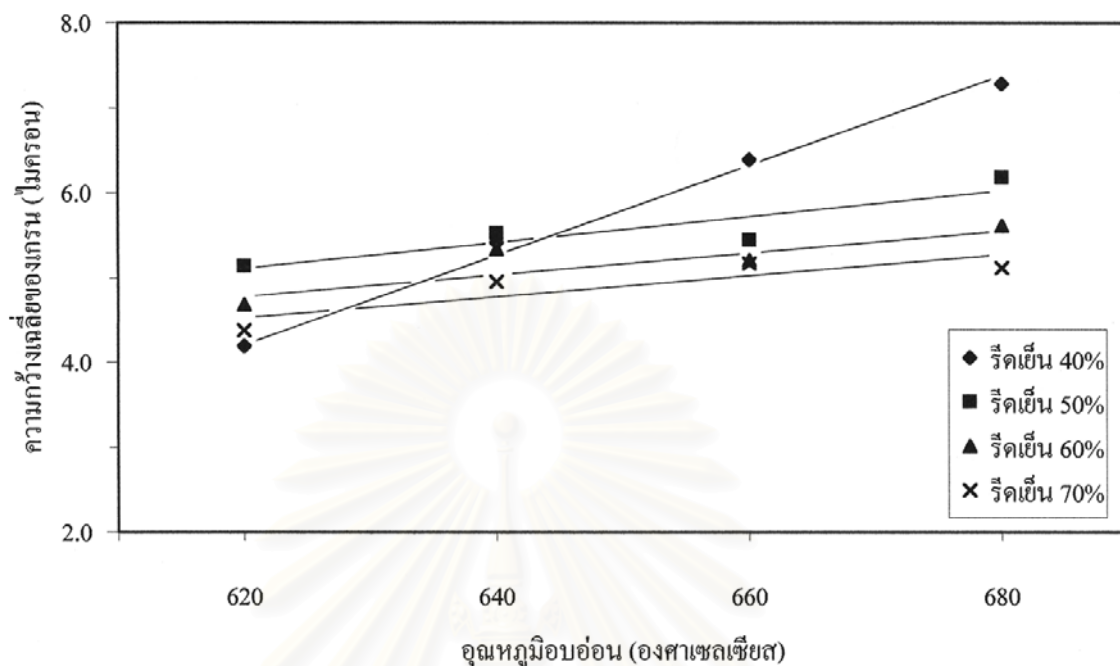
รูปที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นจากความเครียด (n-value) ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



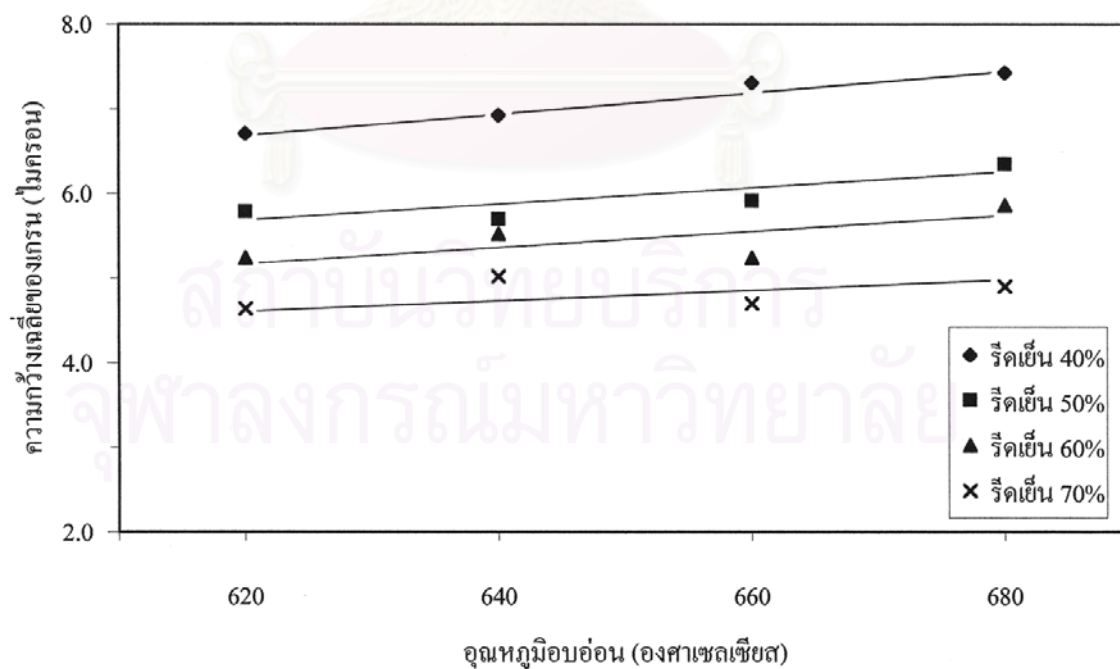
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



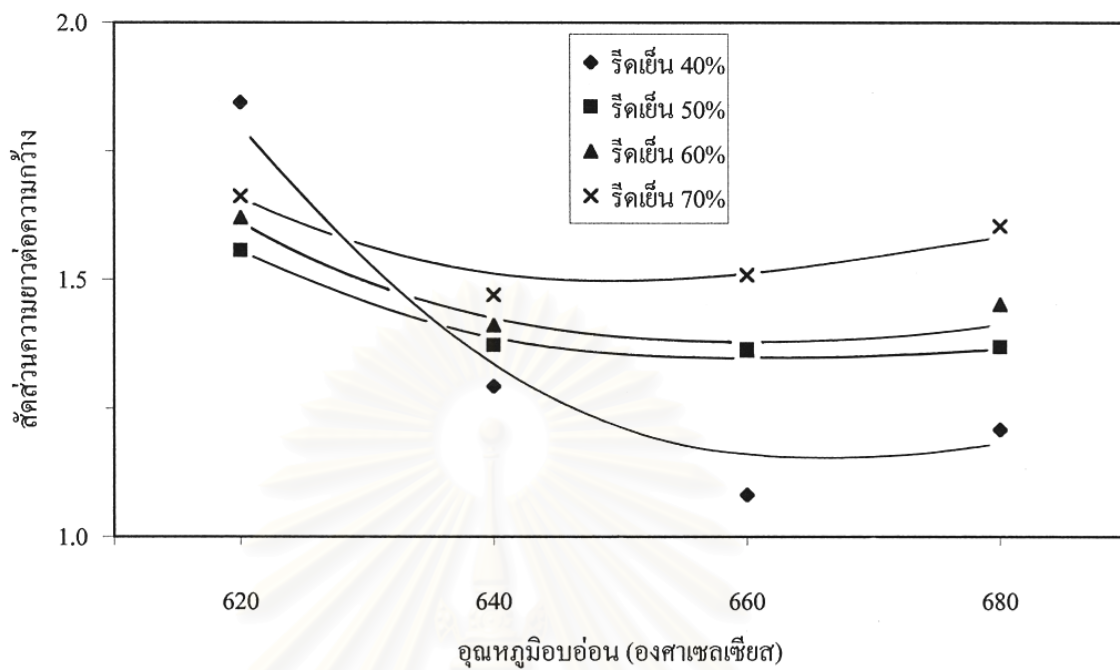
รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



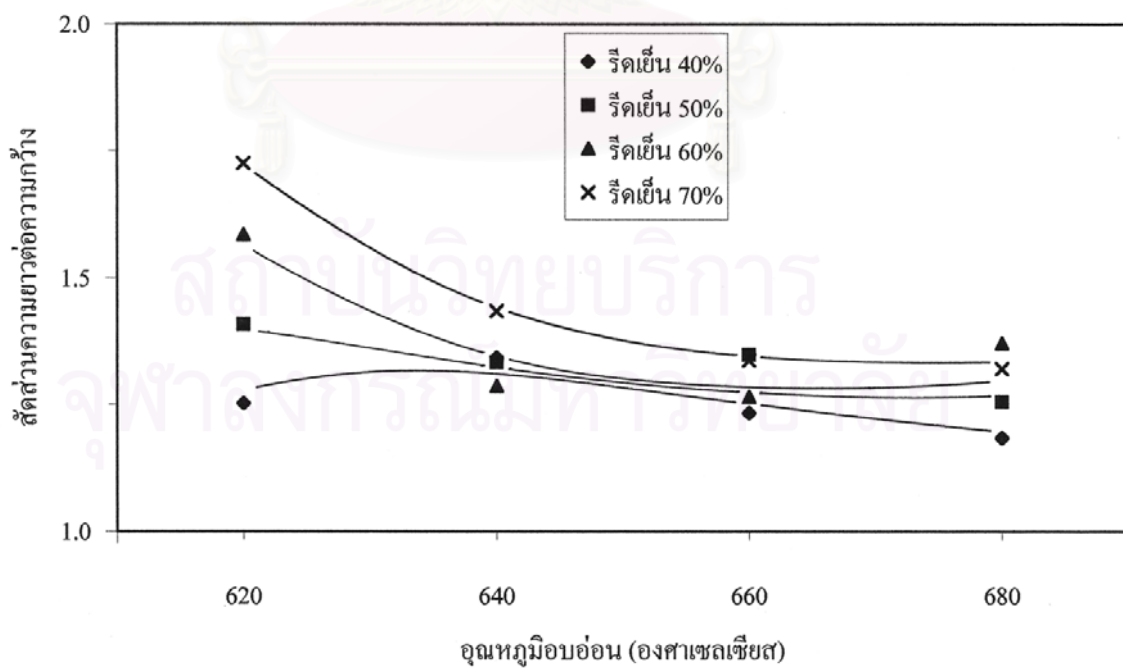
รูปที่ 4.20 ความกว้างเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



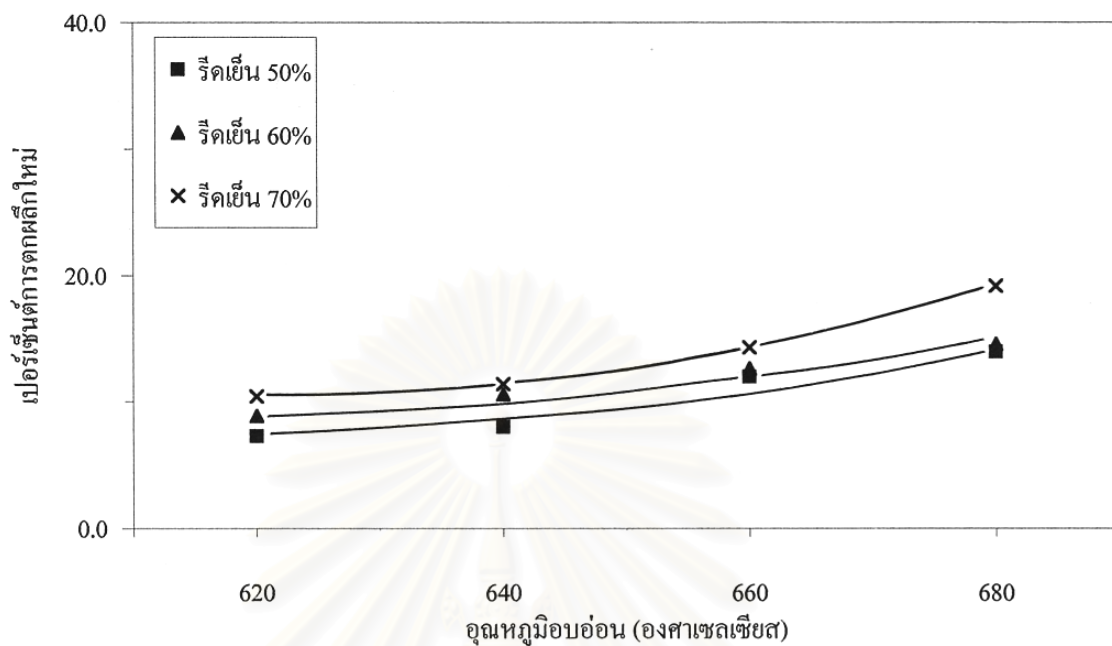
รูปที่ 4.21 ความกว้างเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



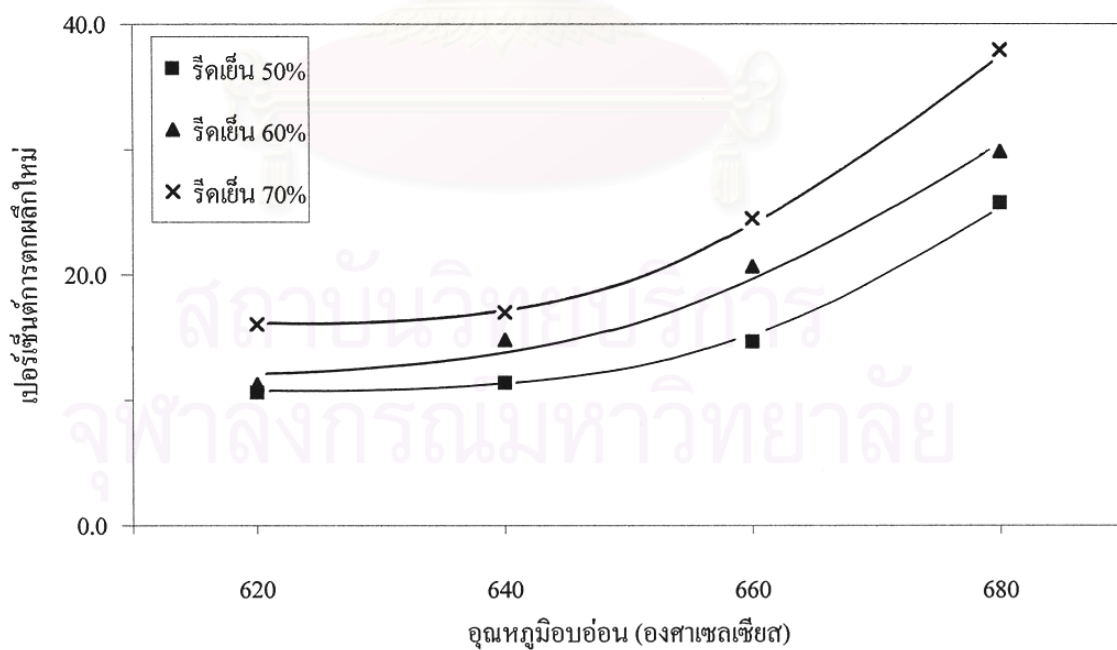
รูปที่ 4.22 ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



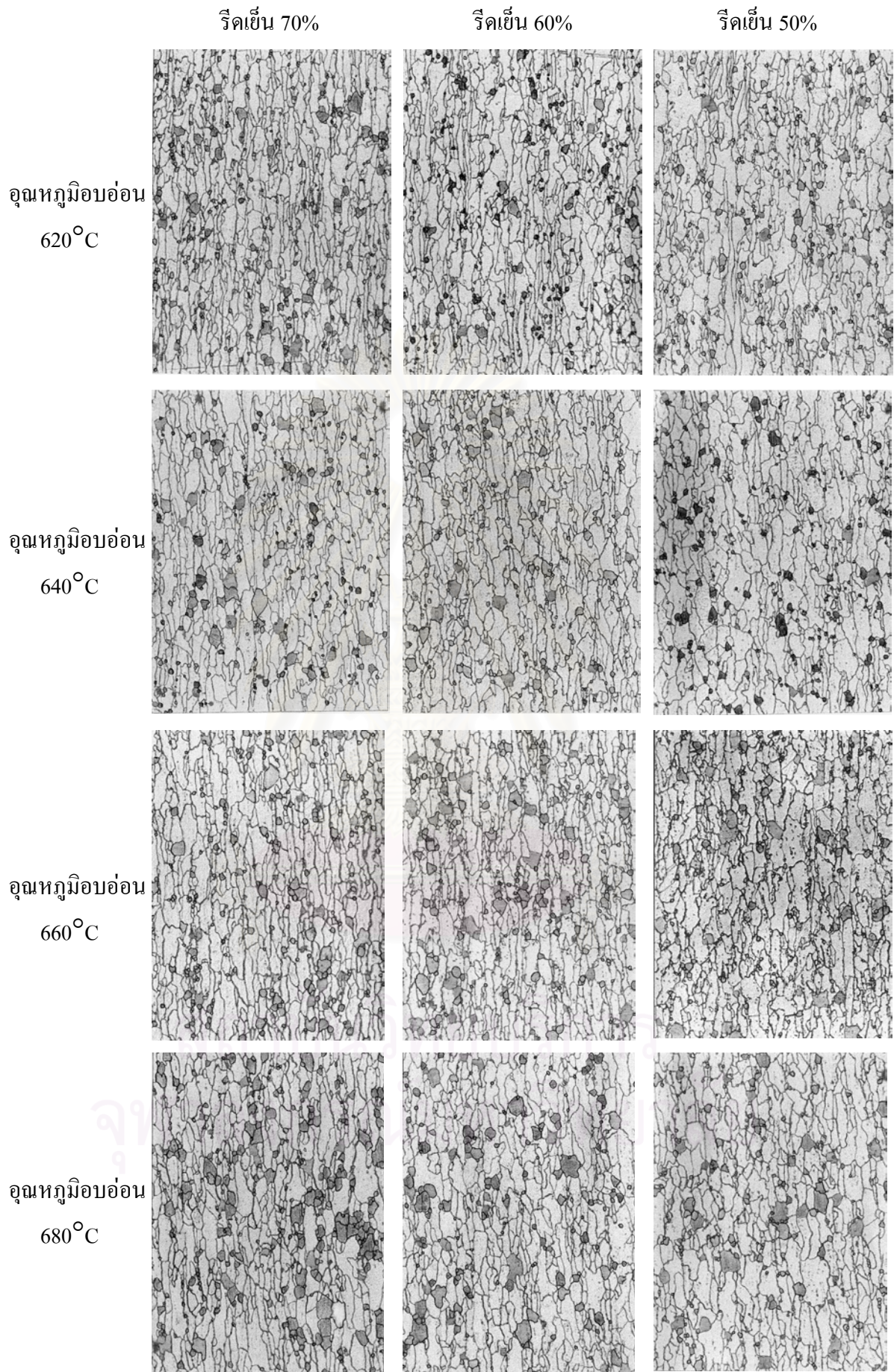
รูปที่ 4.23 ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



รูปที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C

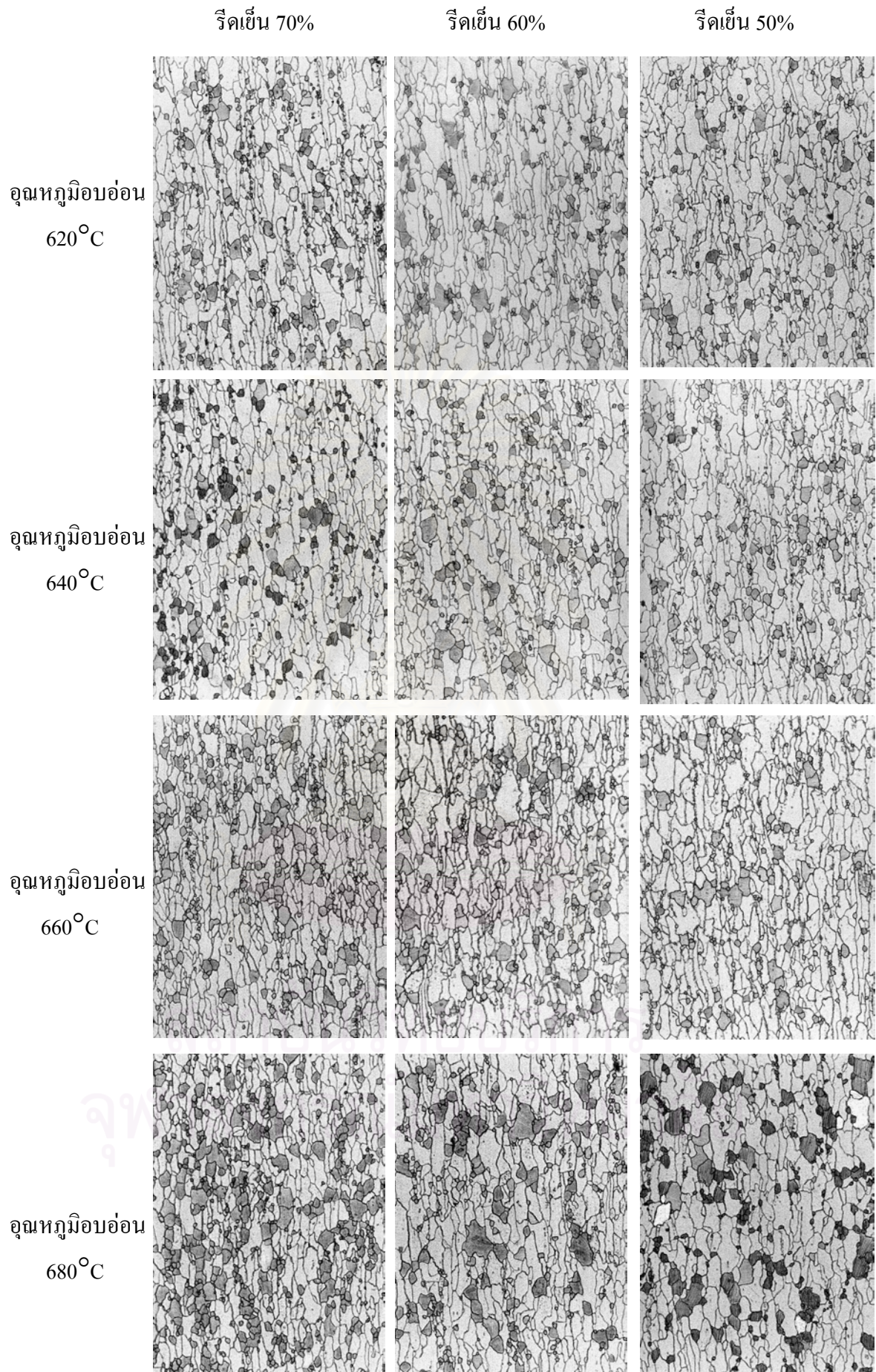


รูปที่ 4.25 ค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



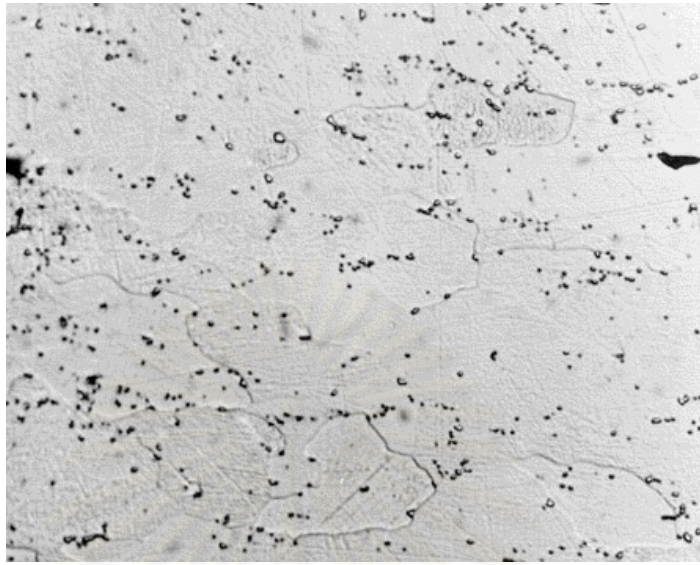
รูปที่ 4.26 ลักษณะการตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C





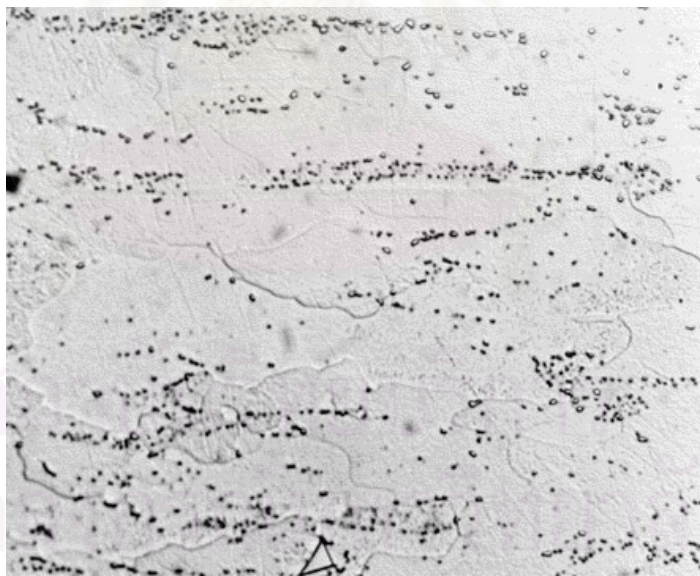
รูปที่ 4.27 ลักษณะการตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

ก)

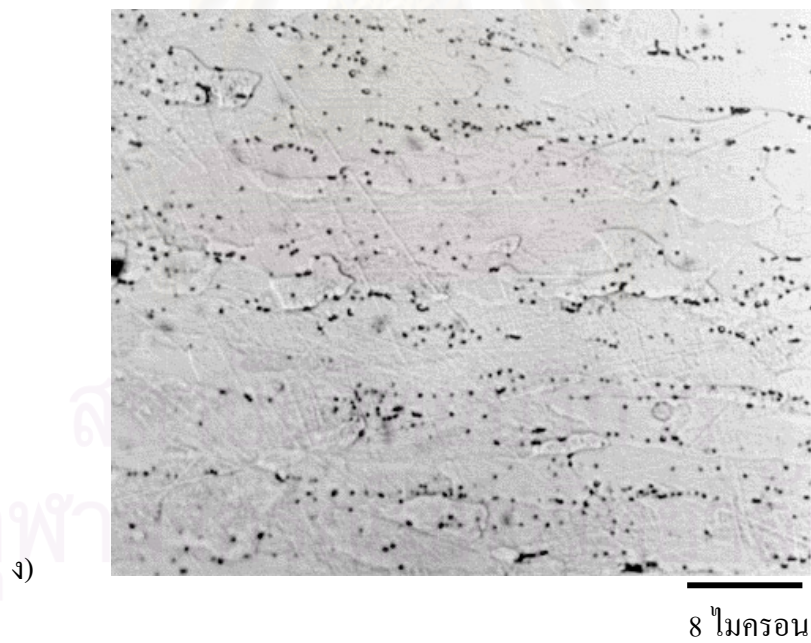
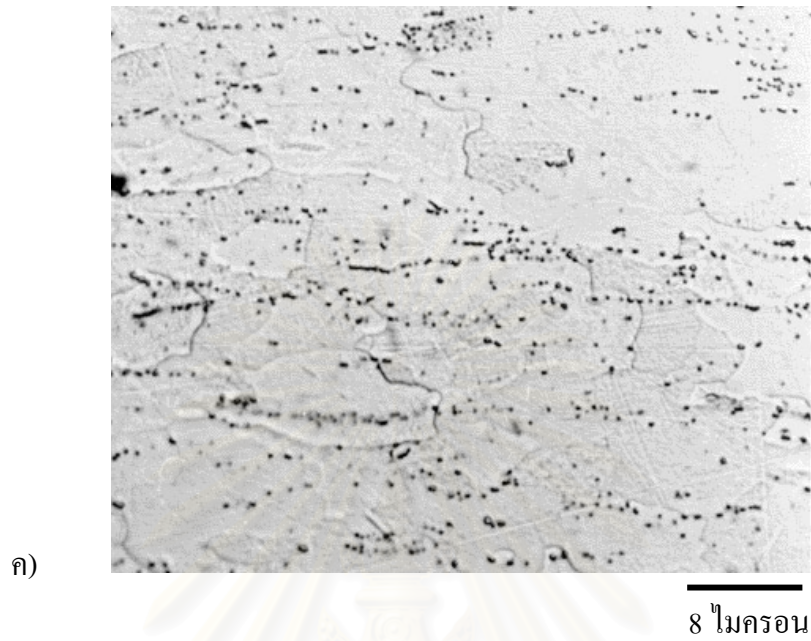


8 ไมครอน

ข)

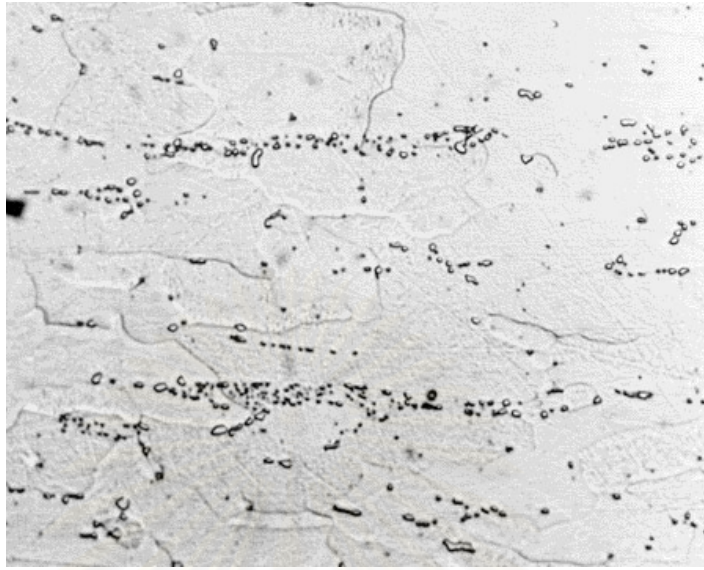


8 ไมครอน



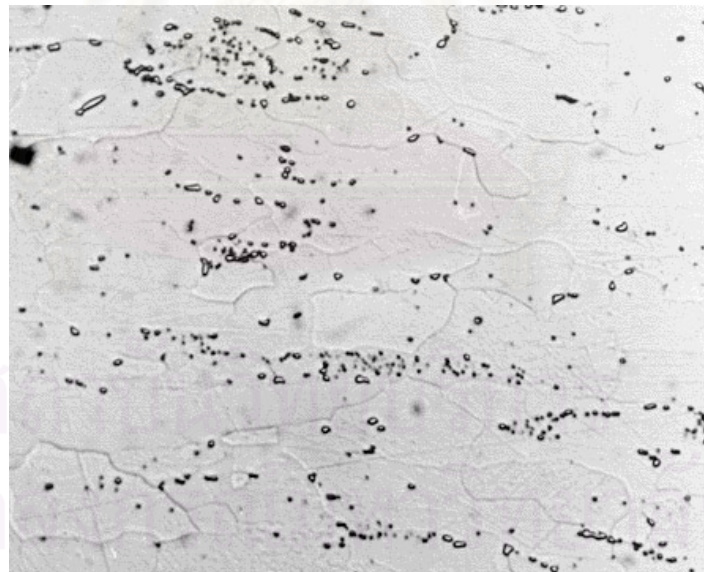
**รูปที่ 4.28** อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ  $680^{\circ}\text{C}$  ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$   
 ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

ก)

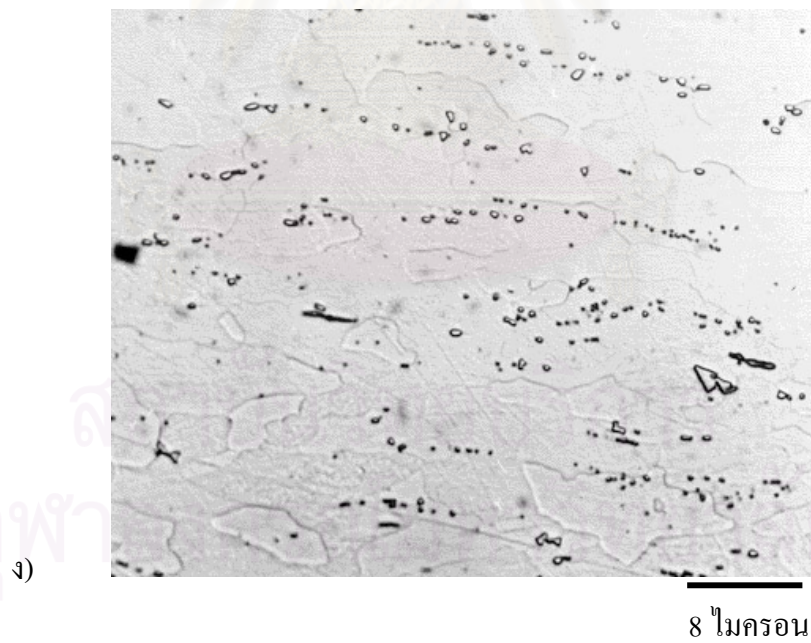
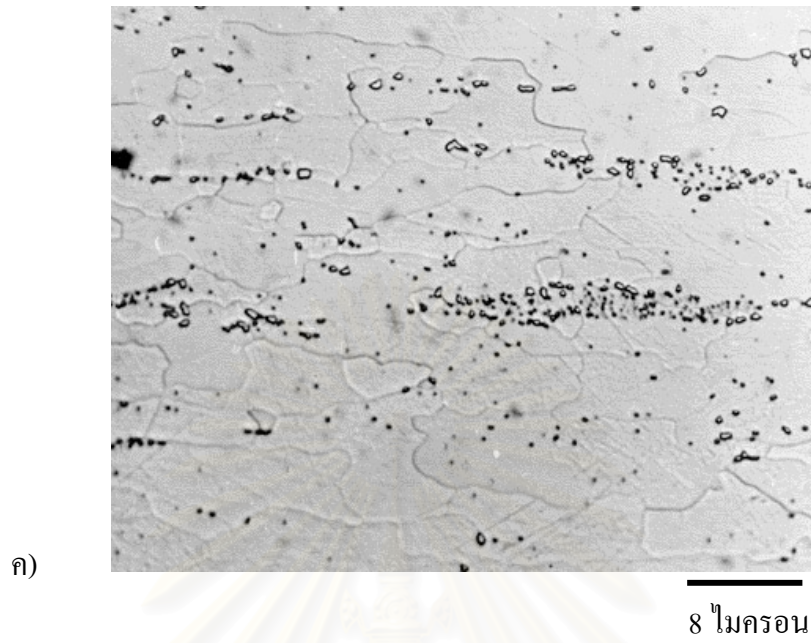


8 ไมครอน

ข)



8 ไมครอน



รูปที่ 4.29 อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ  $680^{\circ}\text{C}$  ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$   
 ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

## บทที่ 5 การอภิปราย

### 5.1 ผลของอุณหภูมิหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C ต่อความสามารถในการขึ้นรูป

การอบขึ้นงานให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C อุณหภูมิที่เหนียวในทรายดีไม่ถูกละลาย โดยยังคงสภาพเป็นอนุภาคที่หยาบหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C<sup>30</sup> วัสดุที่เหนียวมีความสามารถจับตัวรวมกับธาตุไนโตรเจนเกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาคที่เหนียวในทรายดีได้ดีกว่าธาตุอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิการอบให้ร้อนขึ้นอีก 1,150°C ทำให้ธาตุอะลูมิเนียมไม่รวมตัวกับธาตุไนโตรเจนเกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดี ทำให้ธาตุอะลูมิเนียมละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็ง ดังนั้นขึ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C จึงมีธาตุอะลูมิเนียมละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็งในขณะที่เย็นตัวหลังการอบให้ร้อนขึ้นอีก ผ่านการรีดหยาบ และการรีดสุดท้าย

ช่วงอุณหภูมิการม้วนเก็บ ธาตุอะลูมิเนียมมีความสามารถในการรวมตัวกับธาตุไนโตรเจนได้ดี ดังนั้นธาตุอะลูมิเนียมที่ละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็งก่อนการม้วนเก็บ จึงมีโอกาสรวมตัวกับธาตุไนโตรเจนที่ละลายอยู่เกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีเมื่อมีอุณหภูมิเหมาะสม โดยอุณหภูมิช่วงเกิดการเปลี่ยนเฟสระหว่างออสเทนไนท์กับเฟอไรท์ที่อุณหภูมิประมาณ 700°C ช่วยเร่งการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีได้มาก<sup>31</sup> เพราะอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีมีความสามารถในการละลายในเฟสเฟอไรท์น้อยกว่าในเฟสออสเทนไนท์ ทำให้อนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีสามารถตกตะกอนได้ง่ายขณะเกิดการเปลี่ยนเฟส กล่าวคือ อัตราการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีมีค่าสูงสุดในช่วงการเปลี่ยนเฟส เมื่ออุณหภูมิลดลงอัตราการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีในเฟสเฟอไรท์ลดลงอย่างมากจนไม่สามารถเกิดการตกตะกอนหลังการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C<sup>32</sup> ดังนั้นขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C จึงมีโอกาสเกิดการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีได้ในขณะม้วนเก็บมากกว่าขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ที่ไม่เกิดการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมในทรายดีในขณะม้วนเก็บ

การให้ความร้อนขึ้นงานในอัตราต่ำในระหว่างการอบอ่อน ขึ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างช้าๆ ในอัตรา 50°C ต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิลบอ่อน ทำให้ธาตุอะลูมิเนียมที่ละลายอยู่ในเนื้อเหล็ก

ในรูปแบบสารละลายของแข็งสามารถรวมตัวกับธาตุไนโตรเจนที่ละลายอยู่เกิดการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์บนขอบเกรนย่อยที่ถูกแปรรูปสามารถหน่วงการเกิดนิวเคลียสของเกรนใหม่ และในขณะเดียวกันก็ช่วยเหนี่ยวนำให้เกิด texture {111} ที่สัมพันธ์กับค่า plastic strain ratio ที่สูงขึ้น กรณีที่ชิ้นงานมีอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์ส่วนหนึ่งตกตะกอนออกมาในระหว่างกระบวนการรีดร้อนจะลดการควบคุมให้เกิด texture {111} ทำให้ plastic strain ratio มีค่าต่ำ

จากผลการวัดหาค่า plastic strain ratio ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C โดยแปรผันค่าปริมาณการรีดเย็นในช่วง 40% ถึง 70% และอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 620°C ถึง 680°C ดังในรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C รีดเย็นด้วยปริมาณ 70% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C วัดค่า plastic strain ratio ได้ 1.40 ส่วนชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C รีดเย็นด้วยปริมาณ 70% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C วัดค่า plastic strain ratio ได้ 1.09 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีค่า plastic strain ratio สูงกว่ากว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C เมื่อใช้ปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิอบอ่อนเดียวกัน ซึ่งอธิบายได้ว่า ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีปริมาณธาตุอะลูมิเนียมละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในรูปแบบสารละลายของแข็งก่อนการรีดเย็นมากกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C โดยสามารถรวมตัวกับธาตุไนโตรเจนที่ละลายอยู่เกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์ออกมาก่อน หรือพร้อมกับการเกิดการตกผลึกใหม่ในขณะอบอ่อน ช่วยเหนี่ยวนำให้เกิด texture {111} ที่สัมพันธ์กับค่า plastic strain ratio ที่สูงขึ้น ส่วนชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ที่มีอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์ส่วนหนึ่งตกตะกอนออกมาในระหว่างการม้วนเก็บ จะลดการควบคุมให้เกิด texture {111} ทำให้ค่า plastic strain ratio ลดลง<sup>16</sup> การมีค่า plastic strain ratio สูงสัมพันธ์กับการเกิด texture {111} ที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถนำเหล็กแผ่นดึงขึ้นรูปทรงลึก (deep-drawing forming) ได้ดียิ่งขึ้น

## 5.2 ผลของขนาด และการกระจายตัวของโครงสร้างเฟิร์ลไลท์หลังการม้วนเก็บต่อจุดครากหลังการอบอ่อน

อุณหภูมิการม้วนเก็บที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C นอกจากมีผลกระทบต่อ การตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์ดังอภิปรายในหัวข้อ 5.1 แล้วยังมีผลต่อความละเอียดของโครงสร้างเฟิร์ลไลท์ด้วย กล่าวคือปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งต่อการเกิดโครงสร้างเฟิร์ลไลท์คือ อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส เพราะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างออสเทนไนท์ขณะเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นโครงสร้างเฟิร์ลไลท์ซึ่งมีชั้นเฟอร์ไรต์สลับกับชั้น

ซีเมนไตท์มีค่าลดลงอย่างมากตามการลดลงของอุณหภูมิทำให้ระยะทางที่ธาตุคาร์บอนจะสามารถแพร่ในเนื้อเหล็กในการรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดขึ้นของเฟอร์ไรท์และซีเมนไตท์ลดลง กล่าวคือทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นซีเมนไตท์ (interlamellar spacing) แคบลง เป็นผลให้โครงสร้างเพิร์ลไลต์ละเอียดมากขึ้น และเกิดได้เร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสต่ำลง<sup>19</sup> ดังผลจากการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C พบว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ขนาดเล็ก และกระจายตัวดีกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

ในขั้นตอนการอบอ่อนหลังการรีดเย็นทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่ถูกรีดเย็นส่วนหนึ่งเกิดการตกผลึกใหม่กลายเป็นเกรนเฟอร์ไรท์รูปหลายเหลี่ยม (equiaxed grain) และปราศจากความเครียด (strain-free) ส่วนในโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่ถูกรีดเย็นชั้นซีเมนไตท์จะแตกตัวออกตามแนวการรีด<sup>19</sup> และในขณะอบอ่อนชั้นซีเมนไตท์ที่แตกตัวจะละลายให้ธาตุคาร์บอนออกมาจำนวนหนึ่งเข้าไปในเนื้อเหล็กในรูปสารละลายของแข็งตามแผนภูมิการละลายระหว่างเหล็กกับธาตุคาร์บอน<sup>16</sup> ซึ่งชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่ละเอียด และมีการกระจายตัวมากกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C จึงมีโอกาสทำให้ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีอัตราการละลายของชั้นซีเมนไตท์ให้ธาตุคาร์บอนเข้าไปในเนื้อเหล็กสูงกว่าในชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ทำให้ปริมาณการตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ลดลงจากการละลายของธาตุคาร์บอนที่ไปห่วงเหนี่ยวการเกิดเกรนใหม่จากการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน และสามารถหน่วงอัตราการโตของเกรนเฟอร์ไรท์จากผลของ solute drag<sup>33</sup>

เมื่อพิจารณาผลจากการวัดหาเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C โดยแปรผันค่าปริมาณการรีดเย็นในช่วง 50% ถึง 70% และอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 620°C ถึง 680°C ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C รีดเย็นด้วยปริมาณ 70% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C วัดเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ได้ 19.2% ส่วนชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C รีดเย็นด้วยปริมาณ 70% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C วัดเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ได้ 37.9% แสดงให้เห็นว่าการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ทำให้ชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ต่ำกว่าการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C เมื่อใช้ปริมาณการรีดเย็นและอุณหภูมิอบอ่อนเดียวกัน จึงอ้างผลจากโครงสร้างเพิร์ลไลต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ที่ละเอียด และมีการกระจายตัวมากกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ว่ามีผลต่อการเพิ่มอัตราการละลายของธาตุคาร์บอนออกจากชั้นซีเมนไตท์ ทำให้ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีปริมาณการตกผลึกใหม่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C



การอบอ่อนทำให้เกรนเฟอร์ไรท์ที่ถูกรีดเย็นมีความเครียดภายในเกรนลดลง จากกลไกการคืนตัว และการตกผลึกใหม่ ซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อมีปริมาณการตกผลึกใหม่สูงขึ้นจากอุณหภูมิอบอ่อนที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจุดครากจากการใช้ปริมาณการรีดเย็นในช่วง 40% ถึง 70% และอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 620°C ถึง 680°C ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณการรีดเย็นเท่ากัน และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C ถึง 640°C ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีจุดครากสูง และมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่ออบอ่อนในช่วงอุณหภูมิ 620°C ถึง 640°C ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ที่มีอัตราการละลายของธาตุคาร์บอนในเนื้อเหล็กสูงกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C มีผลทำให้ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีปริมาณการตกผลึกใหม่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ส่งผลให้ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีจุดครากสูง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำกว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนในช่วงอุณหภูมิ 660°C ถึง 680°C พบว่าไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุดครากของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C

### 5.3 ผลของปริมาณการรีดเย็น และอุณหภูมิอบอ่อนต่อความสามารถในการขึ้นรูป

การเพิ่มปริมาณการรีดเย็นทำให้ชิ้นงานหลังการรีดเย็นมีปริมาณ texture {111} เพิ่มขึ้นเมื่ออบอ่อนชิ้นงานที่ถูกรีดเย็นที่มี texture {111} นั้นจะเกิดการตกผลึกใหม่พร้อม หรือหลังการตกตะกอนของอนุภาคอะลูมิเนียมไนไตรด์ ช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรนออกมาเป็น texture {111}<sup>20</sup>

จากผลการเพิ่มปริมาณรีดเย็นจาก 50% เป็น 70% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นจาก 1.02 เป็น 1.40 ส่วนชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C เมื่อเพิ่มปริมาณรีดเย็นจาก 50% เป็น 70% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C มีค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นจาก 0.96 เป็น 1.09 จึงกล่าวอ้างผลจากการเพิ่มปริมาณการรีดเย็นในช่วง 50% ถึง 70% ทำให้ค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้น จากการตกผลึกใหม่เป็น texture {111} เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้ชิ้นงานมีความสามารถในการขึ้นรูปสูงขึ้น

ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนช่วยทำให้เกรนเฟอร์ไรท์มีขนาดโตขึ้น ดังผลจากการวัดความกว้างเฉลี่ยของเกรนเฟอร์ไรท์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนจาก 620°C เป็น 680°C และใช้

ปริมาณการรีดเย็น 70% ทำให้ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีความกว้างเฉลี่ยของเกรนเพิ่มขึ้นจาก 4.38 ไมครอน เป็น 5.12 ไมครอน ส่วนในชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนจาก 620°C เป็น 680°C และใช้ปริมาณการรีดเย็น 70% ทำให้มีความกว้างเฉลี่ยของเกรนเพิ่มขึ้นจาก 4.64 ไมครอน เป็น 4.90 ไมครอน ดังในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับการเพิ่มขึ้นของค่า plastic strain ratio เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อน ดังผลจากการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนจาก 620°C เป็น 680°C และใช้ปริมาณการรีดเย็น 70% ทำให้ชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นจาก 0.88 เป็น 1.40 ส่วนในชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนจาก 620°C เป็น 680°C และใช้ปริมาณการรีดเย็น 70% ทำให้ค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นจาก 0.91 เป็น 1.09 จึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนทำให้เกรนเฟอร์ไรต์มีขนาดโตขึ้นซึ่งช่วยส่งเสริม texture {111} ทำให้ค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้น<sup>5,16</sup> ช่วยให้ความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C รีดเย็นด้วยปริมาณ 40% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C มีค่า plastic strain ratio เพียง 0.91 แม้ว่าจะมีความกว้างเฉลี่ยของเกรนเป็น 7.28 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C รีดเย็นด้วยปริมาณ 50% และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C ที่มีค่า plastic strain ratio เป็น 1.05 ซึ่งมีความกว้างของเกรนเฉลี่ยเป็น 6.18 ไมครอน แสดงว่าการใช้ปริมาณการรีดเย็นต่ำไม่สามารถเพิ่มค่า plastic strain ratio ให้สูงได้แม้ว่าแม้ชิ้นงานจะมีค่าความกว้างเฉลี่ยของเกรนสูงก็ตาม

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองแปรผันปริมาณการรีดเย็นในช่วง 40% ถึง 70% และอุณหภูมิอบอ่อนในช่วง 620°C ถึง 680°C ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงธาตุผสมต่ำที่ผสมธาตุปริมาณน้อยมากของธาตุไทเทเนียม กับไนโอเบียม โดยอบขึ้นงานให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C แล้วรีดหยาบที่อุณหภูมินี้ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลง แล้วรีดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 860°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และ 630°C มีดังนี้

1. ขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีความสามารถในการขึ้นรูปหลังการอบอ่อน สูงกว่าขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C เป็นผลจากการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C ไม่เกิดการตกตะกอนของอนุภาคในขณะการม้วนเก็บช่วยเหนียวน้ำให้เกิด texture {111} เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป ส่วนการม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C มีการตกตะกอนของอนุภาคในขณะการม้วนเก็บ ลดการควบคุมให้เกิด texture {111} ทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปลดลง
2. ขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวมากกว่า ขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C มีผลทำให้ขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีปริมาณการตกผลึกใหม่ต่ำกว่าขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ส่งผลให้เมื่ออบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C ถึง 640°C ขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C มีจุดครากสูง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำกว่าขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิตอบอ่อนในช่วงอุณหภูมิ 660°C ถึง 680°C พบว่าไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุดครากของขึ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C
3. การเพิ่มปริมาณการรีดเย็นในช่วง 50% ถึง 70% และการเพิ่มอุณหภูมิตอบอ่อนในช่วง 620°C ถึง 680°C ช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป เพราะการเพิ่มปริมาณการรีดเย็นทำให้ค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้นจากการตกผลึกใหม่เป็น texture {111} เพิ่มขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิตอบอ่อนทำให้เกรนเฟอร์ไรต์โตขึ้นซึ่งช่วยส่งเสริม texture {111} ทำให้ค่า plastic strain ratio เพิ่มขึ้น มีความสามารถในการขึ้นรูปสูงขึ้น

## รายการอ้างอิง

1. J. A. Jacobs, T. F. Kilduff. Engineering Materials Technology Second Edition, Prentice Hall, 1994: 236.
2. R. A. Higgins. Properties of Engineering Materials Second Edition, Edward Arnold 1994: 236-237.
3. R.A. Flinn, P.K. Trojan. Engineering Materials and Their Applications Fourth Edition, Houghton Mifflin 1990: 405-406.
4. James F. Shackelford. Introduction to Materials Science for Engineers Third Edition, Macmillan 1992: 314.
5. Cold Rolled Steel Sheets – Technology and Products in Japan – Edited by Cold Strip Committee, Technical Society, Imagineer Corp, 2000: 93-98.
6. T. Tanaka. "Controlled Rolling of Steel Plate and Strip", Int. Metals Reviews, No.4, 1981 : 185-212.
7. T. Gladman. "Physical Metallurgy in HSLA Steels Theory and Practice", HSLA Proceeding Conference, 1995: 67.
8. K. J. Irvine, F. B. Pickering and T. Gladman, J. Iron Steel Institute, 1967: 161-162.
9. S. Matsuda and N. Okumura , Trans ISIJ 18 (1978): 198.
10. W.C. Leslie, R.L. Rickett, C.L. Dotson and C.S. Walton : Trans. ASM, 1954, Vol.46 :1470-1497
11. A.M. Sage. "An Overview of the Use of Microalloys in HSLA Steels with Particular Reference to Vanadium and Titanium", HSLA Steels: Proc. Prop. And App., 1992: 51-57.
12. H. Zou and J.S. Kirkaldy. "Carbonitride Precipitation Growth in Titanium/Niobium Microalloyed Steels", Met. Trans. Vol. 22A, July, 1991: 1511-1518.
13. E. J. Palmiere, C. I. Garcia and A. J. DeArdo. "Static Recrystallization and Precipitation during the Hot Deformation of Austenite", Proceedings of the Int. Conf. on HSLA'91 Edited by A. J. DeArdo, AIME 1992: 117 .

14. R.W.K.Honeycombe. "Carbide Precipitation in Ferrite in Phase Transformation in Ferrous Alloys" Edited by A.Marder and J.Goldstein, TMS-AIME Warrendale, PA, 1984: 259.
15. F. G. Wilson and T. Gladman: Int. Mater. Rev., 1988, vol.33, No.5: 274.
16. D.T. Llewellyn, Steels: Metallurgy and Applications Second Edition, Butterworth 1994 : 19-22, 26-27.
17. P.J.P. Bordignon, K. Hulka, and B.L. Jones, "High Strength Steels for Automotive Applications", Niobium Tech. Report NbTR-06/84, Dec,1984.
18. N. Takahashi, M. Shibata, Y. Furuno, H. Hayakawa, K. Katuta and K. Yamamoto, "Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel", (ed. B.L. Bramfitt and P.L. Mangonon): 133-153.
19. G. Krauss. Steels: Heat Treatment and Processing Principles, ASM Int.,1995 : 21-23, 118-125
20. Q. Li, Z. Weihai and G. Chunyang. "Relationship of the Cold Rolling Texture and Dispersed Particles to the Annealing Texture in Low Alloy Deep-Drawing Steel Sheet", HSLA Proc. Conf.'95: 185-189.
21. J.E. Burke and D. Turnbull. Prog. Met. Phys. 3 (1952): 220.
22. H. Hu. "Recovery, Recrystallization and Grain-Growth Structures", Metal Handbook Vol.9 Metallography and Microstructures, ASM 9 edition: 692-698.
23. C.R. Brooks. Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels, "Heat Treatment of Plain Carbon & Low Alloy Steels", ASM Int, 1996 : 265-269.
24. R. W. Cahn. Recovery and Recrystallization, Physical Metallurgy 4 edition, Vol. 3, North-Holland, 1996: 2400-2492.
25. B. Taylor. "Sheet Formability Testing", Metal Handbook Vol.8 Mechanical Testing, ASM 9 edition: 547-568.
26. "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", E 8M, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01 ASTM, Philadelphia, 1996: 76-96.
27. A. O. Benscoter. "Carbon and Alloy Steels", Metal Handbook Vol.9 Metallography and Microstructures, ASM 9 edition: 165-174.

28. "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", E 112, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.03 ASTM, Philadelphia, 1995: 226-247.
29. J.S. Rege, C.I. Garcia and A.J. DeArdo, The Segregation Behavior of Phosphorus and the Role in the Cold Work Embrittlement and Annealing Behavior of Ti-stabilized Interstitial-free Steels, 39<sup>th</sup> MWSP CONF. PROC., ISS, Vol.35, 1998 :149-158.
30. S. Satoh et al. Kawasaki Steel Technical Report, No. 12, July, 1985: 36-44.
31. T. Gladman and F.B. Pickering, J. Iron Steel Inst. Jps, 1972, Vol. 12 : 429-434.
32. P. Konig, W. Scholz and H. Ulmer, Arch. Eisenhüttenwes, 1961, Vol.32(8) : 541-550.
33. H. Abe, T. Suzuki and K. Takagi. "Effect of the Size and Morphology of Cementite Particles on the Annealing Texture in Low-Carbon Aluminium-killed Steel", Trans ISIJ, Vol. 21, 1981: 100-108.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก1 จุดครากของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C (หน่วยเป็น MPa)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	464	424	347	347
รีดเย็น 50%	410	385	354	349
รีดเย็น 60%	398	382	363	352
รีดเย็น 70%	383	385	376	364

ตาราง ก2 ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C (หน่วยเป็น MPa)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	547	521	449	453
รีดเย็น 50%	497	472	446	441
รีดเย็น 60%	481	461	443	435
รีดเย็น 70%	457	454	454	441



ตาราง ก3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวทั้งหมดของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

	อุณหภูมิอบก่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
ยืดเย็น 40%	14.0	16.6	29.3	25.0
ยืดเย็น 50%	21.2	24.1	28.7	28.9
ยืดเย็น 60%	21.5	24.8	28.7	29.9
ยืดเย็น 70%	27.3	28.3	27.0	29.3

ตาราง ก4 ค่า plastic strain ratio (r-value) ของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C

	อุณหภูมิอบก่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
ยืดเย็น 40%	na.	na.	0.84	0.91
ยืดเย็น 50%	0.78	1.02	0.96	1.05
ยืดเย็น 60%	0.85	1.01	1.02	1.13
ยืดเย็น 70%	1.10	1.20	1.21	1.40

ตาราง ก5 ค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (n-value) ของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	0.107	0.140	0.185	0.182
รีดเย็น 50%	0.156	0.173	0.181	0.194
รีดเย็น 60%	0.157	0.176	0.180	0.188
รีดเย็น 70%	0.178	0.185	0.183	0.196

ตาราง ก6 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และอุณหภูมิ 550°C (หน่วยเป็น HV30)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)				
	ก่อนการอบอ่อน	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	228	177	167	142	144
รีดเย็น 50%	233	154	147	145	141
รีดเย็น 60%	241	163	147	142	141
รีดเย็น 70%	255	150	148	149	146

ตาราง ก7 ความกว้างเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C (หน่วยเป็นไมครอน)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	4.20	5.42	6.40	7.28
รีดเย็น 50%	5.14	5.53	5.45	6.18
รีดเย็น 60%	4.68	5.34	5.21	5.61
รีดเย็น 70%	4.38	4.95	5.17	5.12

ตาราง ก8 ความยาวเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C (หน่วยเป็นไมครอน)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	7.75	7.01	6.92	8.80
รีดเย็น 50%	8.00	7.59	7.43	8.46
รีดเย็น 60%	7.59	7.53	7.10	8.15
รีดเย็น 70%	7.28	7.28	7.80	8.21

ตาราง ก9 ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	1.85	1.29	1.08	1.21
รีดเย็น 50%	1.56	1.37	1.36	1.37
รีดเย็น 60%	1.62	1.41	1.36	1.45
รีดเย็น 70%	1.66	1.47	1.51	1.60

ตาราง ก10 ค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 50%	7.3	8.0	12.0	14.0
รีดเย็น 60%	8.9	10.6	12.7	14.6
รีดเย็น 70%	10.4	11.4	14.3	19.2

ตาราง ก11 จุดครากของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C (หน่วยเป็น MPa)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	360	368	345	337
รีดเย็น 50%	370	371	352	355
รีดเย็น 60%	376	369	365	358
รีดเย็น 70%	381	365	369	369

ตาราง ก12 ค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C (หน่วยเป็น MPa)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	444	445	426	423
รีดเย็น 50%	450	443	427	425
รีดเย็น 60%	440	432	427	423
รีดเย็น 70%	432	429	423	429

ตาราง ก13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวทั้งหมดของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	25.1	25.9	29.4	29.6
รีดเย็น 50%	27.2	29.7	28.7	30.1
รีดเย็น 60%	27.3	29.2	28.2	30.6
รีดเย็น 70%	26.3	29.6	28.8	31.0

ตาราง ก14 ค่า plastic strain ratio (r-value) ของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	0.72	0.77	0.80	0.89
รีดเย็น 50%	0.77	0.87	0.92	0.96
รีดเย็น 60%	0.75	0.93	0.93	1.03
รีดเย็น 70%	0.91	0.97	0.93	1.09

ตาราง ก15 ค่าสัมประสิทธิ์การแข็งขึ้นจากความเครียด (n-value) ของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่ อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	0.172	0.170	0.182	0.182
รีดเย็น 50%	0.176	0.177	0.190	0.185
รีดเย็น 60%	0.174	0.177	0.177	0.180
รีดเย็น 70%	0.176	0.185	0.187	0.192

ตาราง ก16 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และอุณหภูมิ 630°C (หน่วยเป็น HV30)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)				
	ก่อนการอบอ่อน	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	216	145	140	132	133
รีดเย็น 50%	227	144	144	137	138
รีดเย็น 60%	234	144	143	142	139
รีดเย็น 70%	242	145	142	142	142

ตาราง ก17 ความกว้างเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C (หน่วยเป็น ไมครอน)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	6.71	6.93	7.31	7.43
รีดเย็น 50%	5.79	5.70	5.91	6.35
รีดเย็น 60%	5.24	5.52	5.24	5.86
รีดเย็น 70%	4.64	5.02	4.70	4.90

ตาราง ก18 ความยาวเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C (หน่วยเป็น ไมครอน)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	8.40	9.30	9.02	8.80
รีดเย็น 50%	8.15	7.60	7.97	7.97
รีดเย็น 60%	8.30	7.10	6.63	8.03
รีดเย็น 70%	8.01	7.20	6.29	6.47

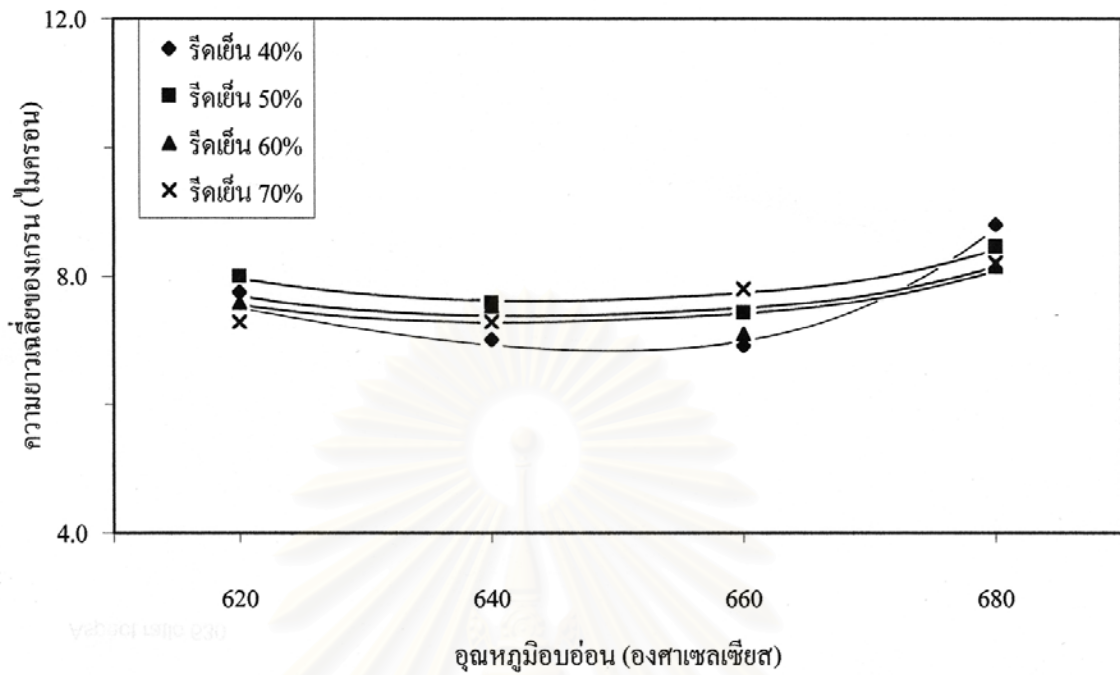


ตาราง ก19 ค่าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และ  
ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

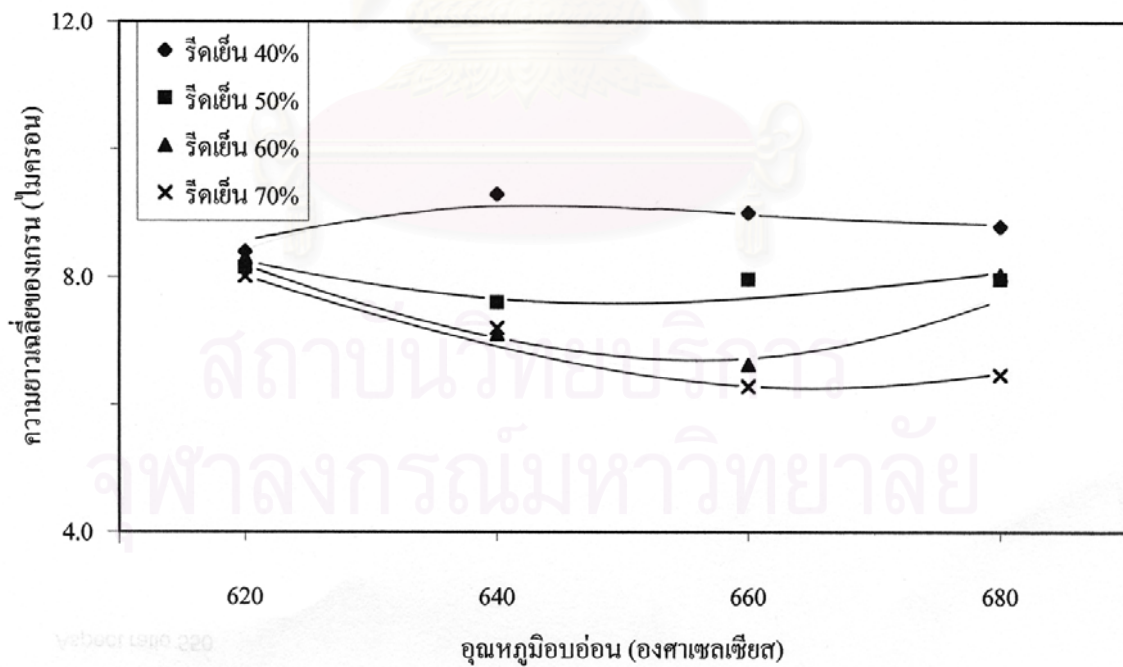
	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 40%	1.25	1.34	1.23	1.18
รีดเย็น 50%	1.41	1.33	1.35	1.26
รีดเย็น 60%	1.58	1.29	1.27	1.37
รีดเย็น 70%	1.73	1.43	1.34	1.32

ตาราง ก20 ค่าเปอร์เซ็นต์การตกผลึกใหม่ของชิ้นงานที่อบให้ร้อนขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 1,150°C และม้วน  
เก็บที่อุณหภูมิ 630°C (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)

	อุณหภูมิอบอ่อน (องศาเซลเซียส)			
	620	640	660	680
รีดเย็น 50%	10.6	11.4	14.7	25.8
รีดเย็น 60%	11.3	14.8	20.7	29.8
รีดเย็น 70%	16.1	17.0	24.5	37.9



รูปที่ ก1 ความยาวเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C



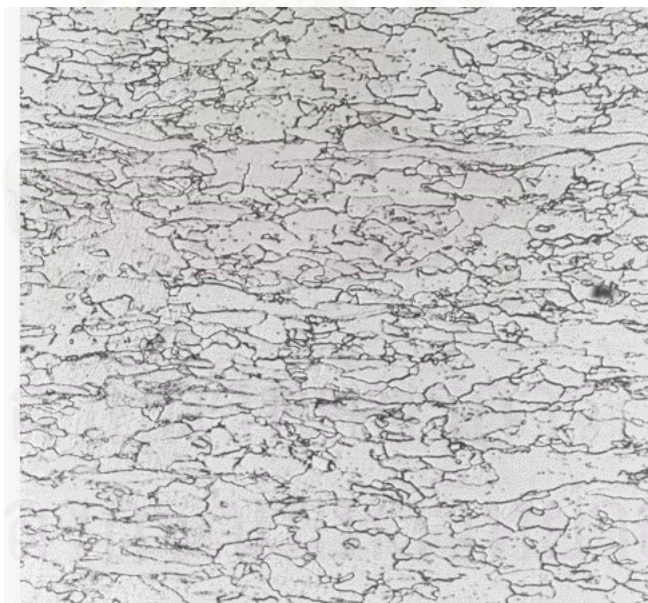
รูปที่ ก2 ความยาวเฉลี่ยของเกรนที่วัดได้จากชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C

ก)



20 ไมครอน

ข)



20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

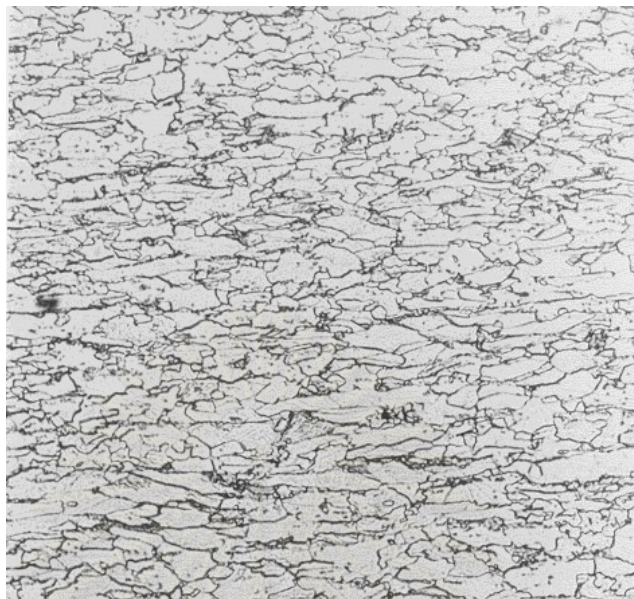
ง)



20 ไมครอน

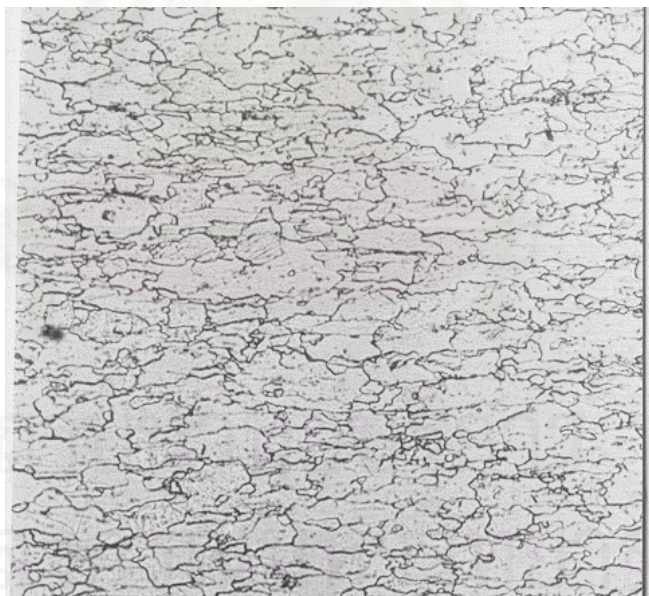
รูปที่ ก3 โครงสร้างเฟอไรต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C  
ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

ก)



20 ไมครอน

ข)



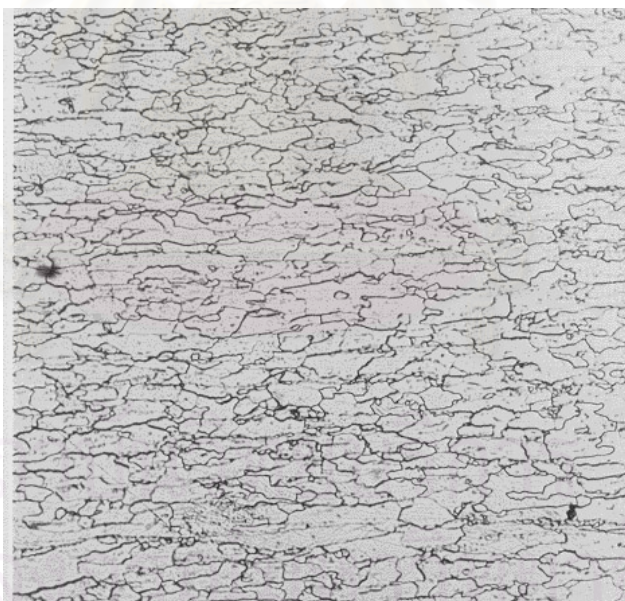
20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

ง)



20 ไมครอน

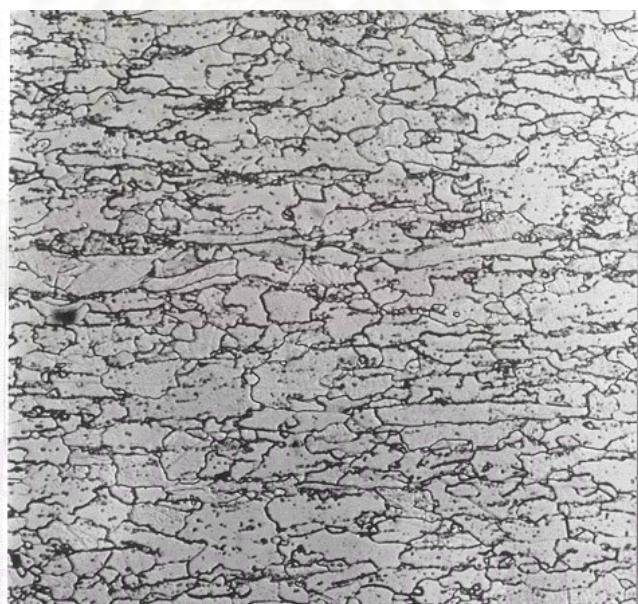
รูปที่ ๓4 โครงสร้างเฟอไรต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 640°C  
ก) ริดเย็น 40% ข) ริดเย็น 50% ค) ริดเย็น 60% และ ง) ริดเย็น 70%

ก)



20 ไมครอน

ข)



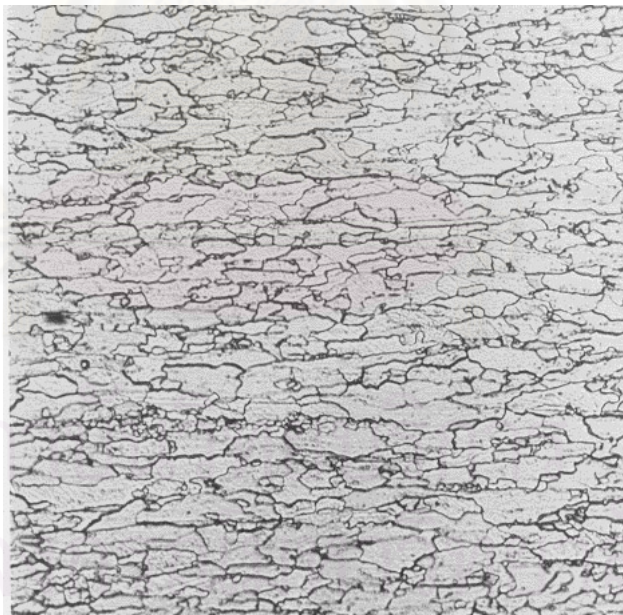
20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

ง)



20 ไมครอน

รูปที่ ๓5 โครงสร้างเฟอไรต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 660°C  
 ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

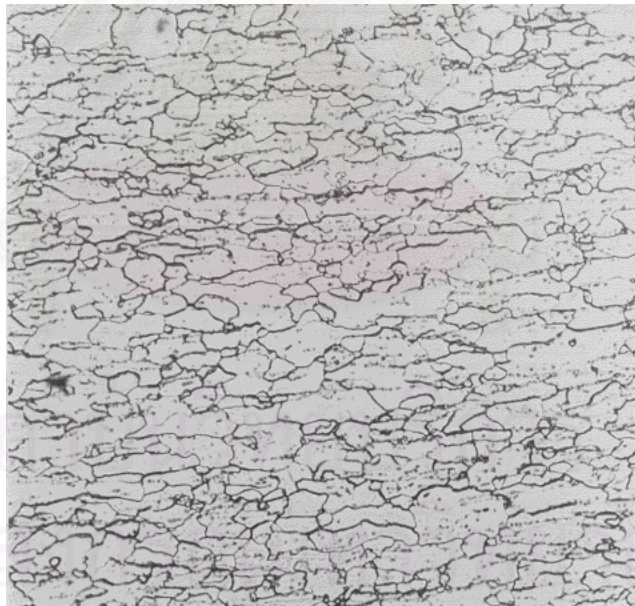


ก)



20 ไมครอน

ข)



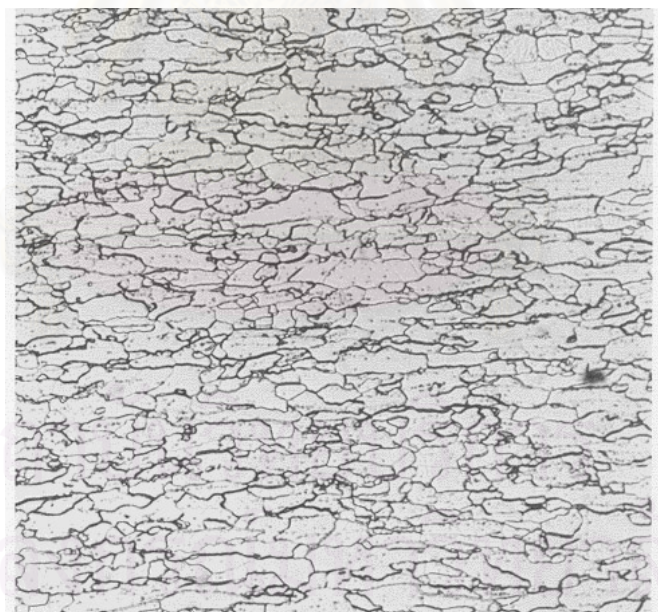
20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

ง)



20 ไมครอน

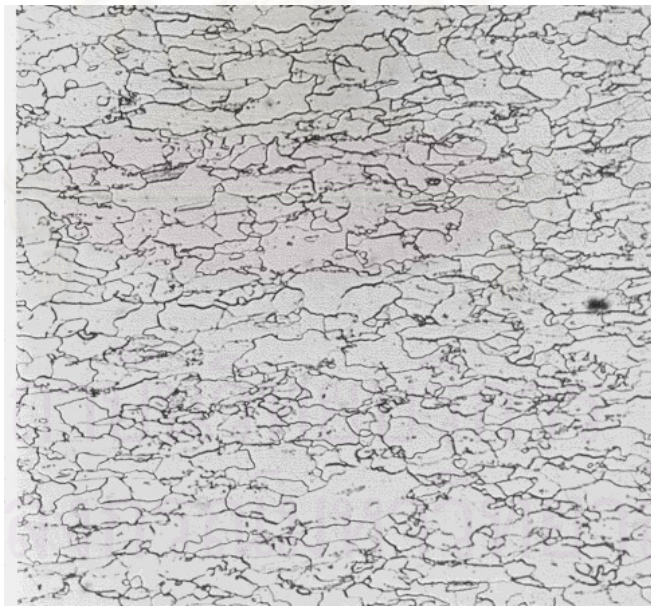
รูปที่ 6 โครงสร้างเฟอไรท์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 680°C  
ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

ก)



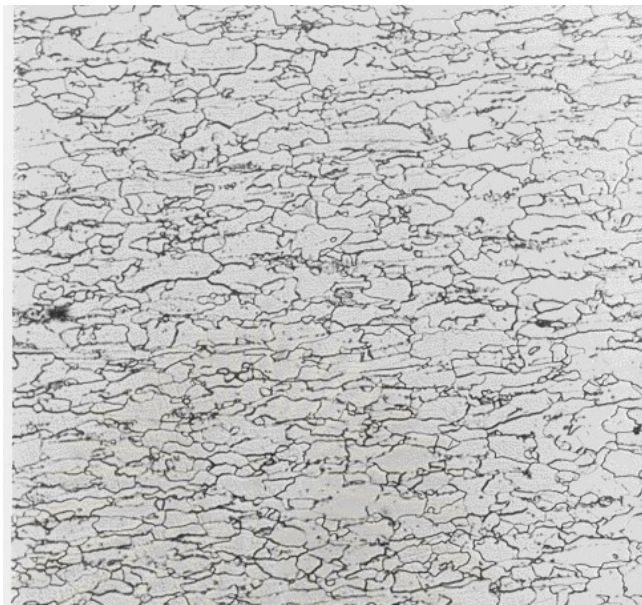
20 ไมครอน

ข)



20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

ง)



20 ไมครอน

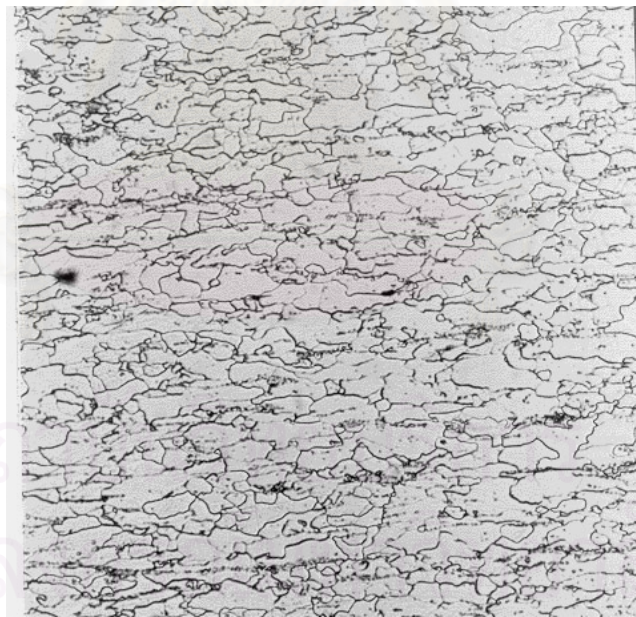
รูปที่ ๓7 โครงสร้างเฟอไรต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 620°C  
ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

ก)



20 ไมครอน

ข)



20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

ง)



20 ไมครอน

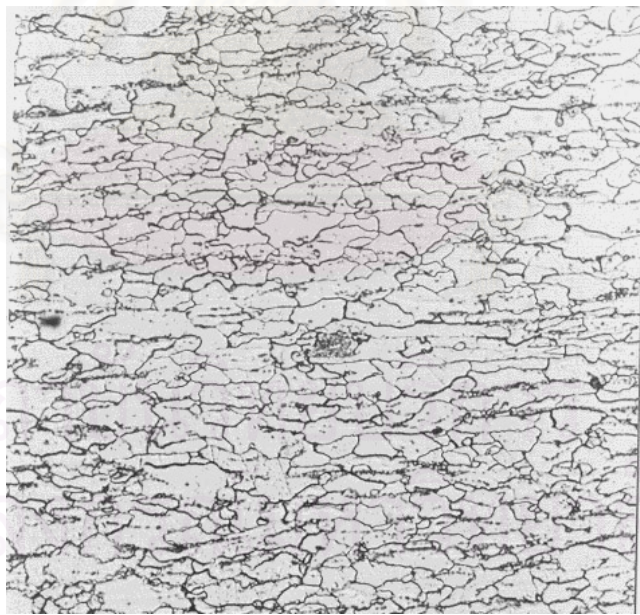
รูปที่ ก8 โครงสร้างเฟอไรต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 640°C  
 ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

ก)



20 ไมครอน

ข)



20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

ง)



20 ไมครอน

รูปที่ ๓๑ โครงสร้างเฟอไรต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 660°C  
ก) ริดเย็น 40% ข) ริดเย็น 50% ค) ริดเย็น 60% และ ง) ริดเย็น 70%

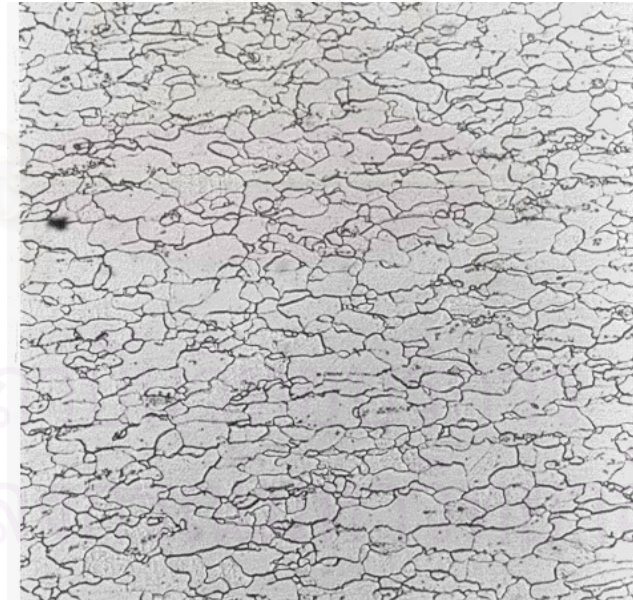


ก)



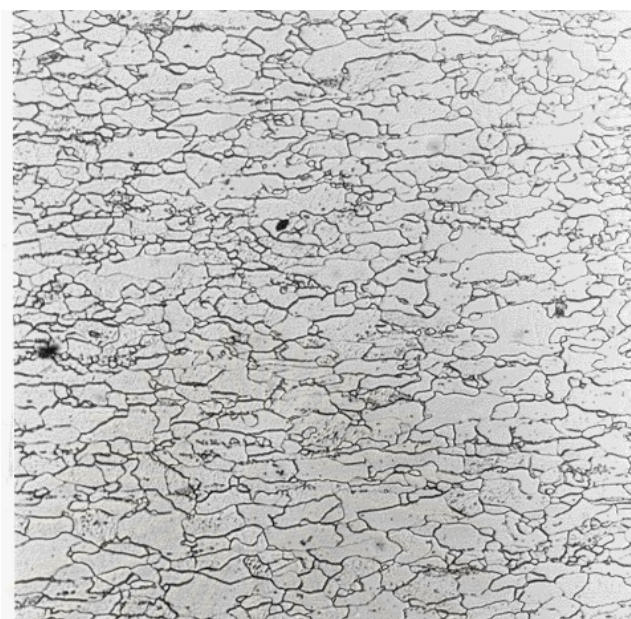
20 ไมครอน

ข)



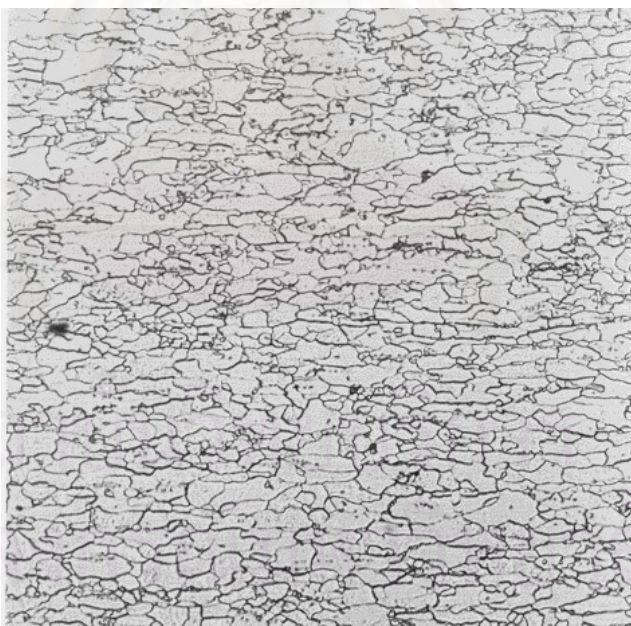
20 ไมครอน

ค)



20 ไมครอน

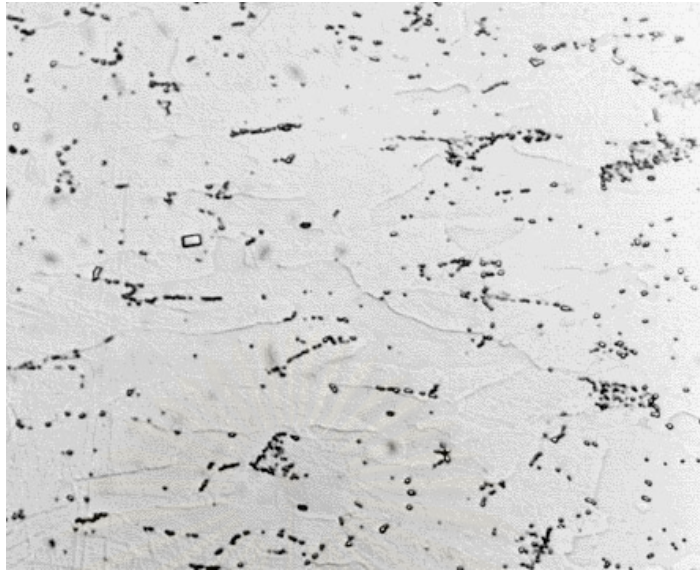
ง)



20 ไมครอน

รูปที่ 10 โครงสร้างเฟอร์ไรต์ของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$  และอบอ่อนที่อุณหภูมิ  $680^{\circ}\text{C}$

ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%



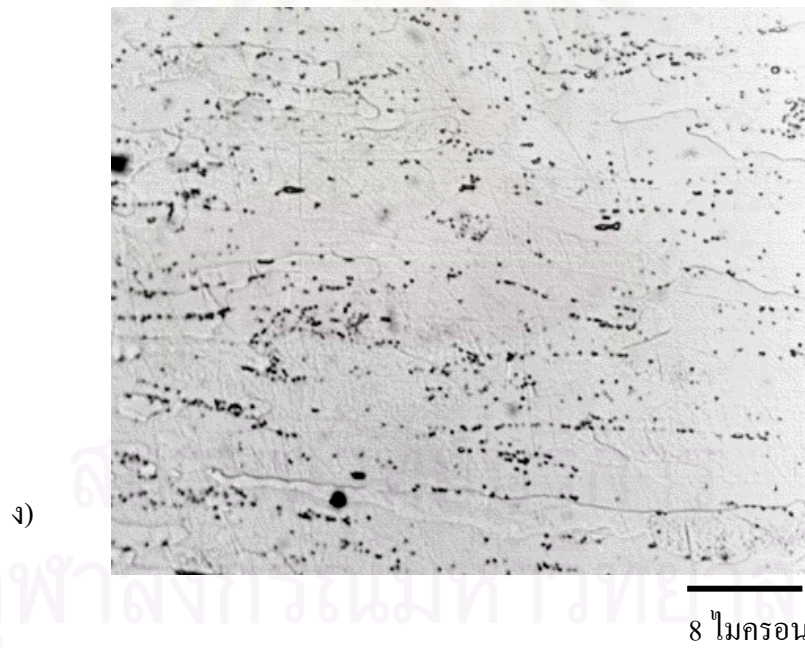
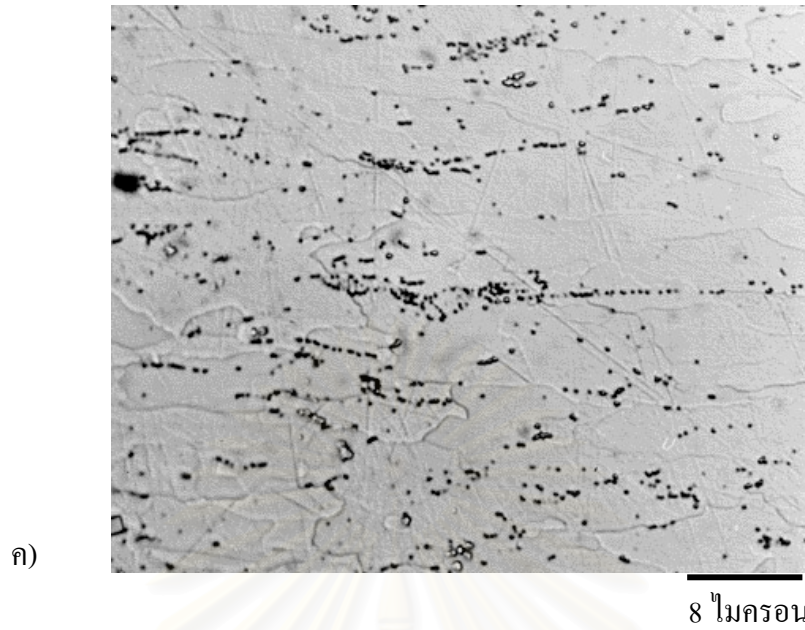
ก)

8 ไมครอน

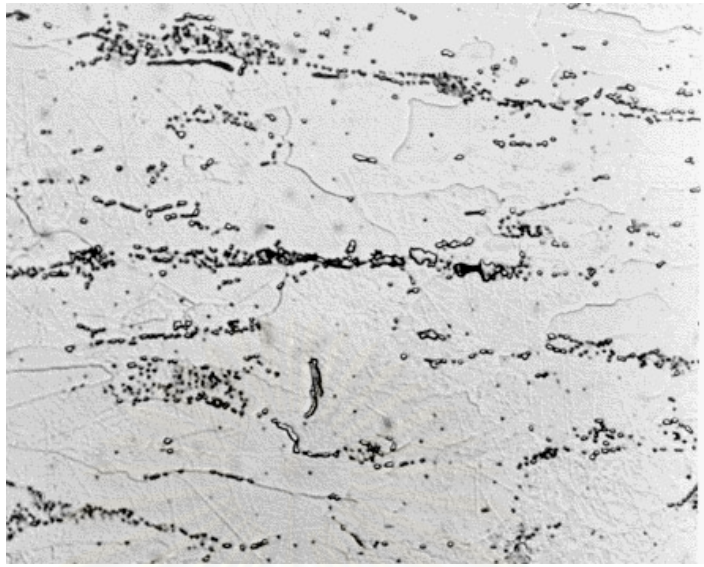


ข)

8 ไมครอน



**รูปที่ ก11** อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $550^{\circ}\text{C}$  และอบอ่อนที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%



ก)

8 ไมครอน



ข)

8 ไมครอน

ค)



8 ไมครอน

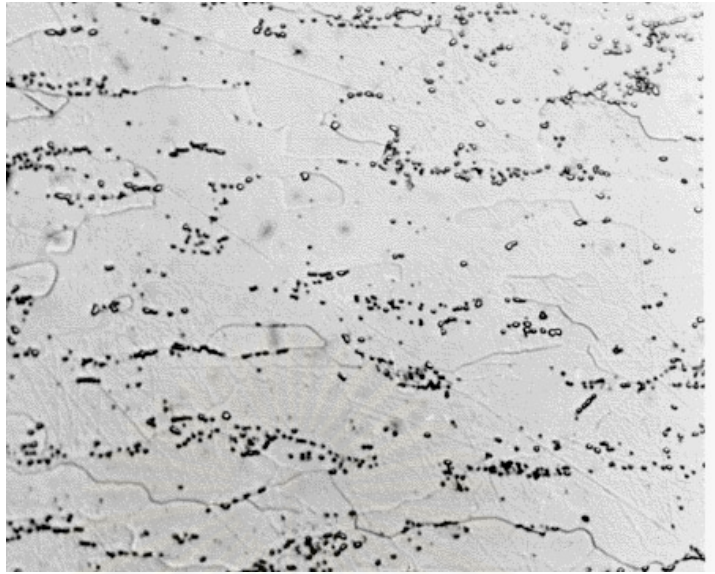
ง)



8 ไมครอน

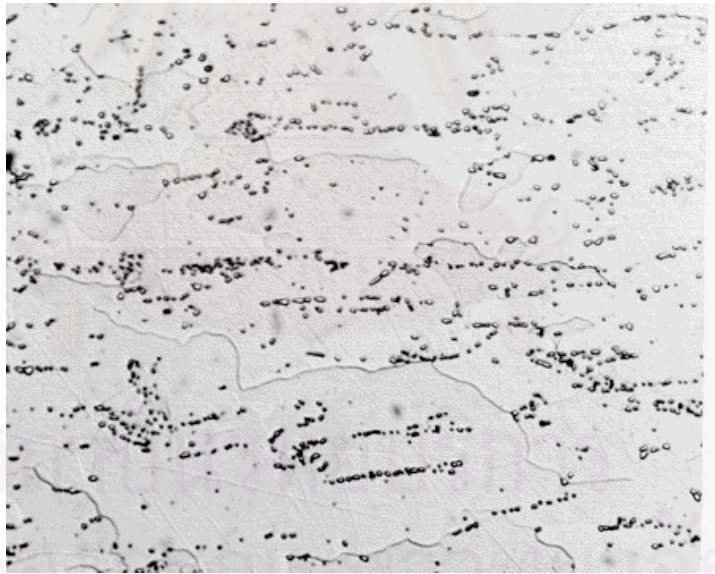
**รูปที่ 12** อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 640°C ก) ริดเย็น 40% ข) ริดเย็น 50% ค) ริดเย็น 60% และ ง) ริดเย็น 70%

ก)

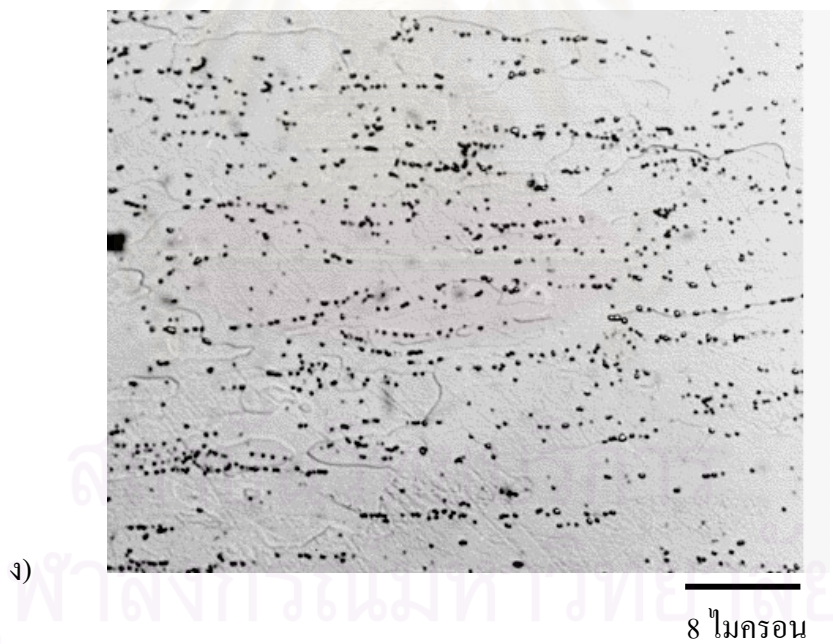
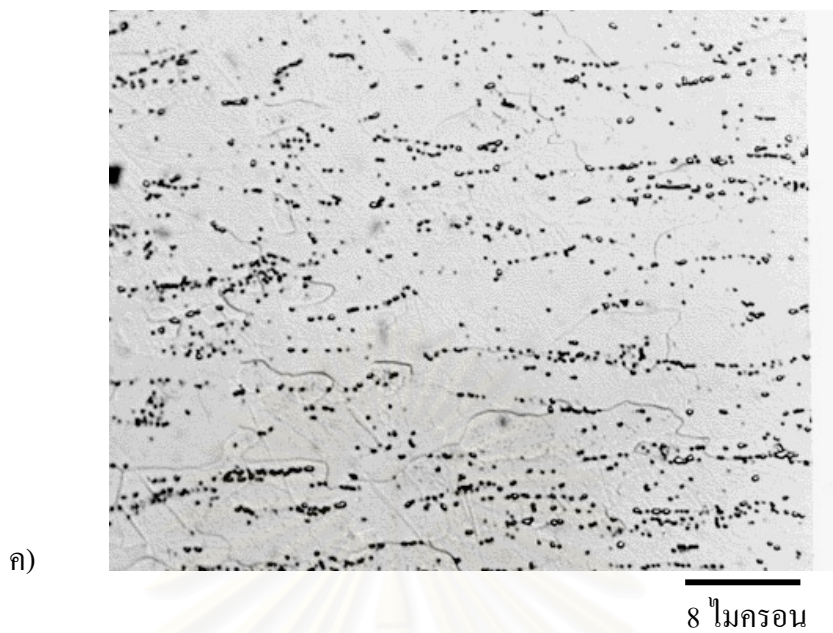


8 ไมครอน

ข)



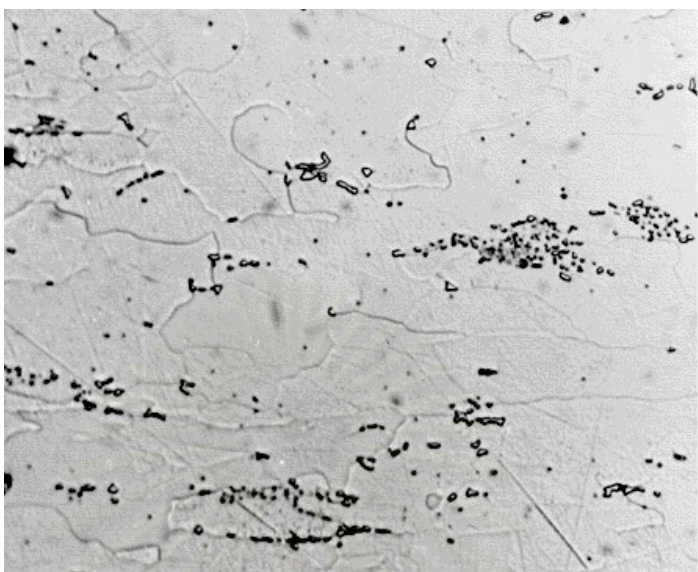
8 ไมครอน



รูปที่ 13 อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 550°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 660°C ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%



ก)



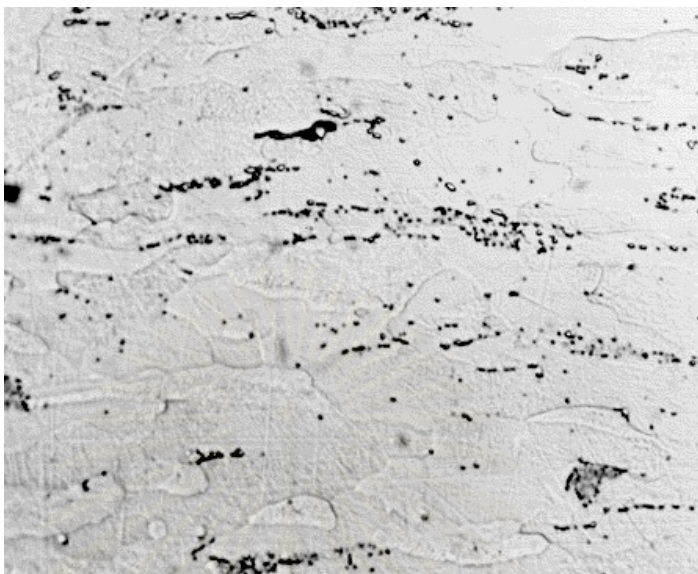
8 ไมครอน

ข)



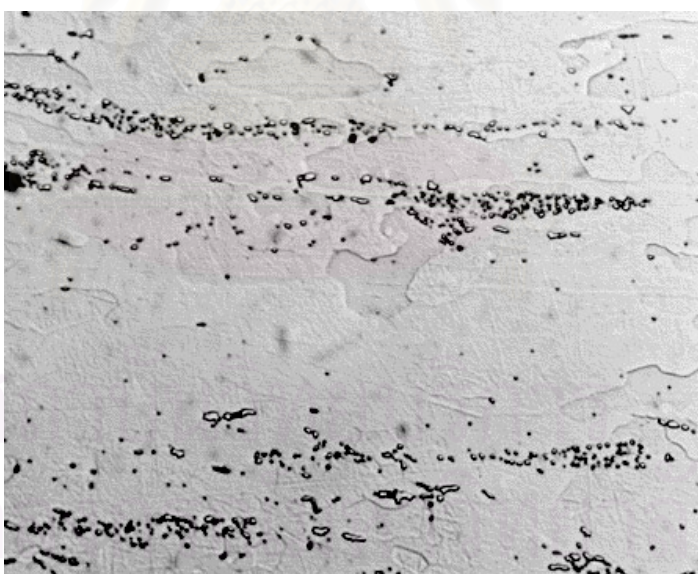
8 ไมครอน

ค)



8 ไมครอน

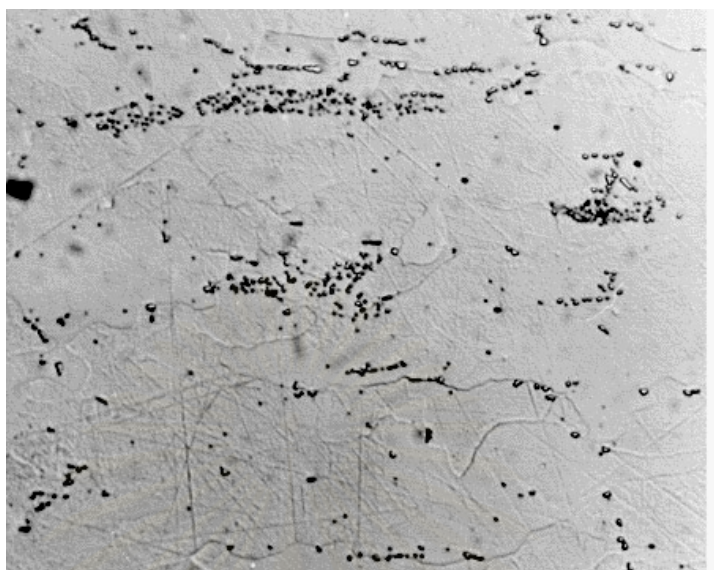
ง)



8 ไมครอน

รูปที่ 14 อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ  $630^{\circ}\text{C}$  และอบอ่อนที่อุณหภูมิ  $620^{\circ}\text{C}$  ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

ก)

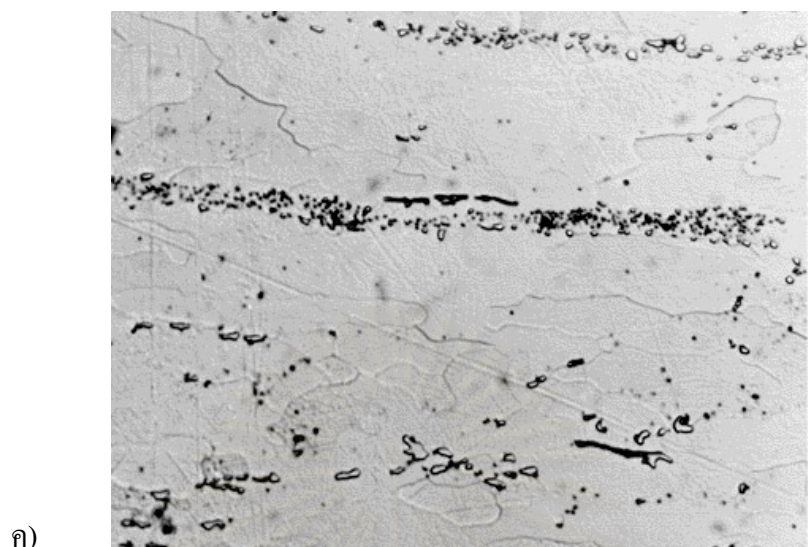


8 ไมครอน

ข)



8 ไมครอน



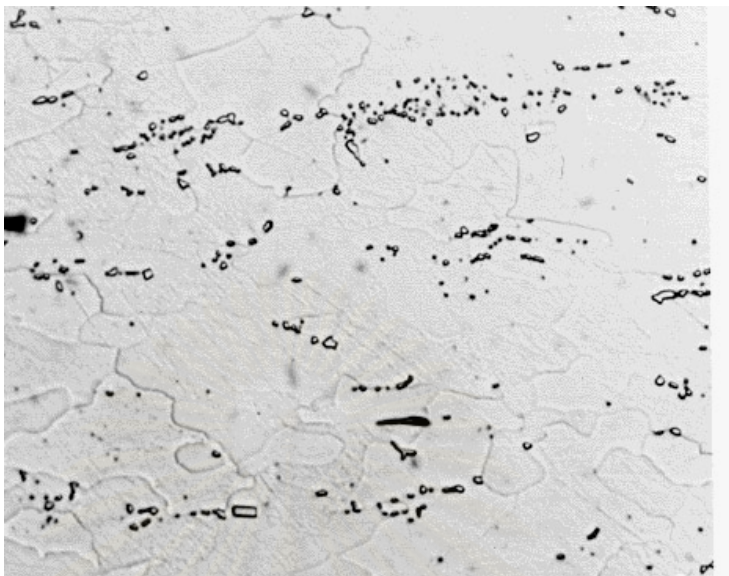
8 ไมครอน



8 ไมครอน

รูปที่ 15 อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 640°C ก) ริดเย็น 40% ข) ริดเย็น 50% ค) ริดเย็น 60% และ ง) ริดเย็น 70%

ก)

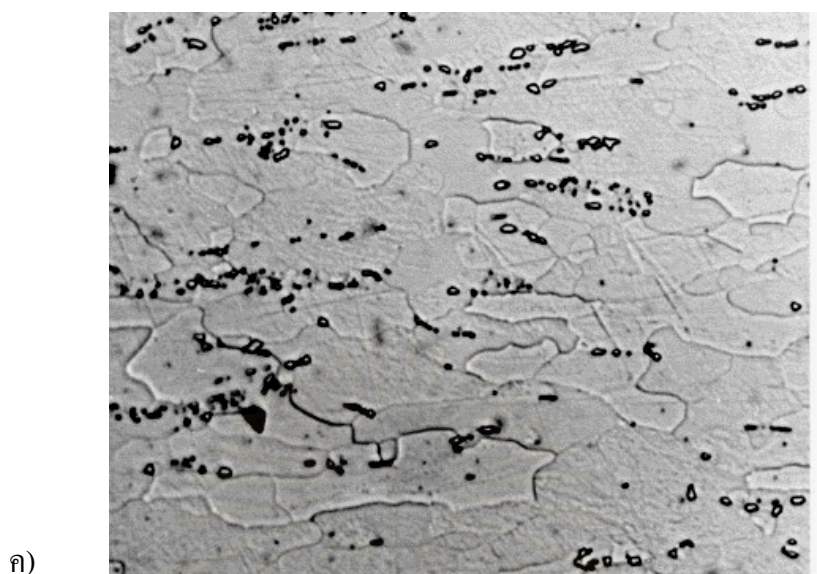


8 ไมครอน

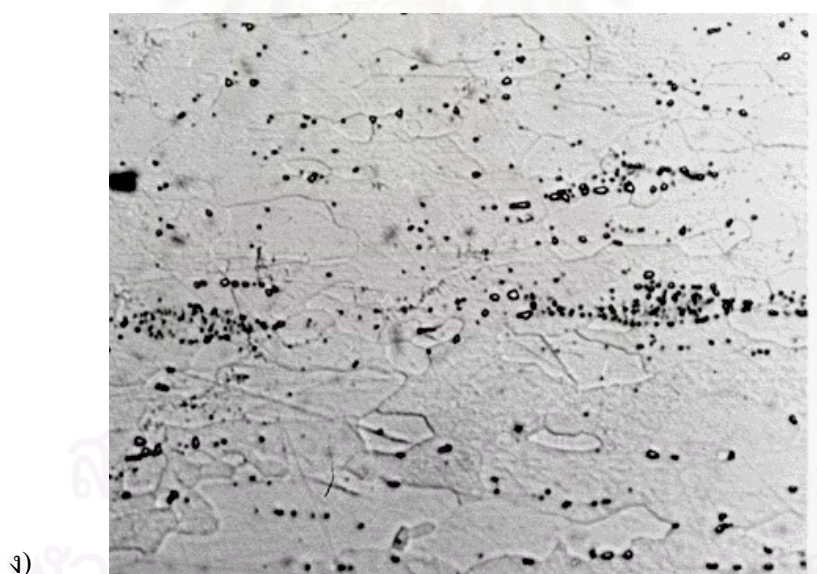
ข)



8 ไมครอน



8 ไมครอน



8 ไมครอน

รูปที่ 16 อนุภาคคาร์ไบด์หลังการอบอ่อนของชิ้นงานที่ม้วนเก็บที่อุณหภูมิ 630°C และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 660°C ก) รีดเย็น 40% ข) รีดเย็น 50% ค) รีดเย็น 60% และ ง) รีดเย็น 70%

### การคำนวณหาค่า Effective nucleation area (Sv)

ค่า Effective nucleation area คือ ค่าที่ใช้แสดงบริเวณที่พร้อมสำหรับเกิดนิวเคลียสของเกรนใหม่ในการเปลี่ยนเฟสในเชิงของปริมาณ มีหน่วยเป็นพื้นที่ ( $\text{mm}^2$ ) ต่อปริมาตร ( $1 \text{ mm}^3$ ) ในกรณีที่ใช้คำนวณในการทดลองนี้ คือ เกรนอสเทนไนท์ที่ไม่เกิดการตกผลึกใหม่แบบปริยายซึ่งมีแถบการแปรรูป (deformation band) อยู่ภายในเกรน สูตรการคำนวณข้างล่างนี้ถือว่า ขอบเกรน และแถบการแปรรูปเป็นบริเวณที่พร้อมสำหรับเกิดนิวเคลียสของเกรนใหม่ในการเปลี่ยนเฟส

$$Sv_{(gb+db)} = 0.429 \left( \frac{N \cdot M}{L} \right) + 1.571 \left( \frac{N_{\perp} \cdot M}{L_{\perp}} \right) \quad \text{mm}^{-1}$$

N คือ จำนวนจุดตัดระหว่างเส้นทดสอบกับขอบเกรน แนวขนานกับเกรน

$N_{\perp}$  คือ จำนวนจุดตัดระหว่างเส้นทดสอบกับขอบเกรน แนวตั้งฉากกับเกรน

L คือ ความยาวเส้นทดสอบ แนวขนานกับเกรน (มิลลิเมตร)

$L_{\perp}$  คือ ความยาวเส้นทดสอบ แนวตั้งฉากกับเกรน (มิลลิเมตร)

M คือ กำลังขยาย

### Texture หรือ Preferred orientation

Texture คือแนวการเรียงตัวของผลึกในเกรน ซึ่งไม่สามารถวัดได้จากรูปร่างของเกรน การรีดเย็นทำให้ผลึกมีการหมุนตัว และการเลื่อนไหลของผลึก (slip) ในทิศทางที่สามารถเกิดได้ง่าย (preferred orientation) เกิดเป็น texture ดังนั้น texture ที่ถูกรีดจะขึ้นอยู่กับแนวการเรียงตัวของผลึกเริ่มต้น เมื่อนำ texture ที่ถูกรีดไปอบอ่อน การคืนตัวมีผลต่อ texture น้อยส่วนการตกผลึกใหม่ช่วยในการเปลี่ยนแปลง texture แต่มีความสัมพันธ์กับ texture เดิม

Sheet texture ที่เกิดจากการรีดนิยมใช้ดัชนีสองตัวในการระบุ texture คือ ระนาบที่ขนานกับระนาบการรีด และทิศทางที่ขนานกับทิศทางการรีด เช่น texture  $\{111\}\langle 110 \rangle$  คือ texture ที่มีการเรียงตัวของผลึกมีระนาบ plane (111) ขนานกับ ระนาบการรีด และมีทิศทาง  $\langle 110 \rangle$  ซึ่งขนานกับแนวการรีด

## ประวัติผู้เขียน

นาย อังคาร พงษ์ไพบูลย์ เกิดวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ.2519 ที่โรงพยาบาลแมคคอมมิค จังหวัด  
 เชียงใหม่ จบการศึกษาระดับ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ)  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2540 จากนั้นเข้าศึกษาต่อระดับ  
 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย