



ผลของขนาดเกรนของเหล็ก AISI 1010 ที่มีต่อลักษณะความเสียหายจากแรงดึง

EFFECT OF GRAIN SIZE ON AISI 1010 TENSION

FRACTURE FORM

นายธีรกริช ศรีใหญ่ รหัส 48365231

นายวิศรุตย์ ภาคภูมิ รหัส 48365286

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 13 ก.ค. 2553
เลขทะเบียน..... /5059628
เลขเรียกหนังสือ..... มร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร B621 ๗ 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของขนาดเกรนของเหล็ก AISI 1010 ที่มีต่อลักษณะความ
เสียหายจากแรงดึง
ผู้ดำเนินโครงการ นายธีรกริช ศรีใหญ่ รหัส 48365231
นายวิสรุทธิ์ ภาคภูมิ รหัส 48365286
ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ชูลิพรีย์ ป่าไร่
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(อาจารย์ชูลิพรีย์ ป่าไร่)

.....กรรมการ

(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)

.....กรรมการ

(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ศรिताญจน์ จันทัมฤทธิ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ผลของขนาดเกรนของเหล็ก AISI 1010 ที่มีต่อลักษณะความเสียหายจากแรงดึง	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายธีรกริช ศรีใหญ่	รหัส 48365231
	นายวิสรุทธ์ ภาคภูมิ	รหัส 48365286
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ชูลิพรย์ ปาไร่	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2552	

บทคัดย่อ

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงของโลหะคือขนาดเกรน ขนาดเกรนที่ต่างกันย่อมจะส่งผลให้โลหะมีความแข็งแรงที่แตกต่างกัน และอาจให้ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด AISI 1010 ที่มีคุณสมบัติอ่อนเหนียว และไม่แข็งมากนัก สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย จึงมีนิยมในการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น ไปใช้ในงานเหล็กโครงสร้างในงานก่อสร้างทุกชนิด เหล็กในงานเชื่อมโลหะ เหล็กเส้น นำไปรีดเป็นเหล็กแผ่นใช้ทำถังบรรจุของเหลว ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าทั้งการขึ้นรูปและการใช้งานโลหะจะต้องรับแรงกระทำในรูปแบบของแรงดึง

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีความสนใจศึกษาลักษณะความเสียหายจากแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด 1010 ที่มีขนาดเกรนต่างกันจากการอบอ่อน เพื่อที่จะนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการเลือกใช้และปรับปรุง โครงสร้างจุลภาคให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน โดยทำการทดสอบแรงดึงและตรวจสอบลักษณะความเสียหายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

พบว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 และ 65 μm มีการแตกหักแบบเหนียว แต่ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) บริเวณกลางรอยขาด (Center crack) ส่วนชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm บริเวณกลางรอยขาดมีลักษณะของไมโครวอยด์เป็นแบบหลุมกลม (Equiaxed shape) แสดงว่ามีการรับแรงแบบตั้งฉากกับชิ้นงาน และสำหรับบริเวณขอบรอยขาด (Shear lip) ของชิ้นงานทั้งสองพบไมโครวอยด์ที่มีลักษณะบิดเบี้ยวเช่นเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์สุสิทธิ์ ปาไร่ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำโครงการมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน รวมถึงครูช่างในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ครูช่างภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้คำปรึกษาในการทำโครงการ ช่วยให้แนวทางในการทำทดลองที่ ถูกต้องพร้อมทั้งชี้แนะแนวทางแก้ไขและอนุเคราะห์ในการให้อุปกรณ์เครื่องมือในการดำเนิน โครงการตลอด

นอกจากนี้ยังมีศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความช่วยเหลือใน เรื่องการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเพื่อนๆ สาขาวิศวกรรมวัสดุ และทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจ ให้แก่ผู้วิจัยในการทำโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายธีรกริช ศรีใหญ่

นายวิสูตรย์ ภาคภูมิ

กุมภาพันธ์ 2553

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart)	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 การอบอ่อน (Annealing)	4
2.2 การหาขนาดเกรน	15
2.3 การทดสอบแรงดึง (Tension test).....	16
2.4 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel).....	22
2.5 ประเภทของการแตกหักในโลหะ (Types of fracture in metals).....	24
2.6 เทคนิคการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก (Fractography technique).....	30
2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness test).....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 สำรวงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	35
3.2 การเตรียมชิ้นงาน.....	35
3.3 การอบอ่อน.....	35
3.4 การตรวจสอบขนาดของเกรน (Grain size).....	36
3.5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	37
3.6 การตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
4.1 ผลการตรวจสอบขนาดของเกรน (Grain size).....	38
4.2 ผลการทดสอบความแข็ง.....	39
4.3 ผลการทดสอบแรงดึง.....	40
4.4 ผลการตรวจลักษณะความเสียหายจากแรงดึง.....	44
บทที่ 5 สรุปผลโครงการ.....	50
ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก ก	53
ภาคผนวก ข	58
ภาคผนวก ค	60
ภาคผนวก ง	62
ประวัติผู้แต่ง	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงอุณหภูมิการอบอ่อนแบบ (Stress-relief anneal) จากแผนภูมิสมมูลเหล็กคาร์บอน	5
2.2 แสดงแสดงอุณหภูมิการอบอ่อนคาร์ไบด์ก้อนกลม (Spheroidising anneal) จากแผนภูมิสมมูลเหล็กคาร์บอน	6
2.3 แสดงการเกิดผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นด้วยความต้านทานแรงดึง, ความแข็ง, ความเหนียว และขนาดเกรน	8
2.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 75X โดยแสดงให้เห็นสภาพต่างๆ ของการเกิดผลึกใหม่และการ โตของขนาดเกรนของทองเหลือง (ก) ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา 33%, (ข) เริ่มเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็น ระยะเวลา 3 วินาที จะเห็นเกรนขนาดเล็กเกิดขึ้น, (ค) การเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วินาที, (ง) การเกิดผลึกใหม่โดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วินาที, (จ) การ โตของขนาดเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส, (ฉ) การ โตของขนาดเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	9
2.5 อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบอ่อนที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึง และการขีดตัวของทองเหลืองผสม และขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลง ไปเมื่อเกิดการเรียงตัวใหม่การเกิดผลึกใหม่และการ โตของขนาดเกรน	10
2.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่กับเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็น แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็นต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดผลึกใหม่	11
2.7 แสดงการเกิดการโตของขอบเกรนโดยการแพร่ของอะตอม	13
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขนาดเกรนและระยะเวลาในการเกิดการ โต ของขนาดเกรนของทองเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ	14
2.9 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield point)	17

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.10 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	18
2.11 เปรียบเทียบเส้น โค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะ และวัสดุพลาสติก	19
2.12 แผนภาพสมดุลเหล็ก – คาร์บอน	23
2.13 ก) การแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture), ข) การแตกหักแบบผ่าเกรน (Trangranular cleavage fracture)	25
2.14 แสดงพื้นผิวการแตกหัก ก) แบบเสมือนของเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ และ ข) แบบกิ่งเสมือนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้าง แบบเทมเปอรัลไรซ์ไซด์	25
2.15 การเกิด River line pattern ที่พบในพื้นที่ผิวการแตกหักแบบเปราะ	26
2.16 การแตกหักแบบ Cup and cone	27
2.17 พื้นผิวการแตกหักตามขอบเกรน (ก) แบบเกาะตัวของไมโครรอยด์ และ (ข) แบบไม่เกาะตัวของไมโครรอยด์	29
2.18 การใช้เครื่องมือในการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักในช่วงกำลังขยายต่างๆ	31
2.19 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล	32
2.20 ขนาดของแรงกดที่กระทำต่อผิวทดสอบ	33
3.1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ใช้ทดสอบแรงดึง (อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM – A370)	35
4.1 ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 600 เท่า (ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที และ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 240 นาที	38
4.2 แผนภูมิแสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน	
(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ	
(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	41
4.4 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)	
ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ	
ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	42
4.5 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงาน	
ที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	43
4.6 แผนภูมิแสดงค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm	
และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	44
4.7 ภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบหลังทดสอบแรงดึง	
(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ	
(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	45
4.8 ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักบริเวณโดยรวมของรอยขาด (Over all)	
ที่กำลังขยาย 100X จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ	
(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	47
4.9 ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักบริเวณบริเวณกลางรอยขาด (Center crack)	
ที่กำลังขยาย 5000X จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ	
(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	48
4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักบริเวณขอบรอยขาด (Shear lip)	
ที่กำลังขยาย 5000X จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ	
(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	49
ก.1 ภาพกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ก.2 ภาพกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	56
ข.1 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักบริเวณกลางรอยขาด (Center crack) ที่กำลังขยาย 200 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm	60
ข.2 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักบริเวณกลางรอยขาด (Center crack) ที่กำลังขยาย 200 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	60



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart) ทุก 2 อาทิตย์	3
2.1 แสดงค่าการเกิดผลึกใหม่และอุณหภูมิในการหลอมตัว (Recrystallization and melting temperature for various metals and alloys)	12
2.2 แสดงค่าขนาดเกรนมาตรฐาน ASTM Standard E112	16
2.3 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่างๆ	21
2.4 การเลือกใช้แรงกดที่เหมาะสมกับหัวกดและโลหะที่ต้องการทดสอบ	34
4.1 ตารางแสดงค่าขนาดของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ 240 นาที	39
5.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็งและผลการทดสอบแรงดึง	50
5.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะความเสียหายจากแรงดึงของชิ้นงานที่มี ขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	51
ก.1 แสดงค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	57
ก.2 แสดงค่าระยะการยืดของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	57
ก.3 ตารางแสดงค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงาน ที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	57
ก.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation) ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	58
ก.5 ตารางแสดงค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	58
ค.1 ตารางแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงของโลหะคือขนาดเกรน ขนาดเกรนที่ต่างกันย่อมจะส่งผลให้โลหะมีความแข็งแรงที่แตกต่างกัน และอาจให้ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด AISI 1010 เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ 0.082 – 0.13% มีโครงสร้างทางจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ และมีคุณสมบัติ อ่อน เหนียว และ ไม่แข็งมากนัก สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด AISI 1010 ซึ่งจากสมบัติที่กล่าวมาจึงมีนิยมนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น ไปใช้ในงานเหล็กโครงสร้างในงานก่อสร้างทุกชนิด เหล็กในงานเชื่อมโลหะ เหล็กเส้น นำไปรีดเป็นเหล็กแผ่นใช้ทำถังบรรจุของเหลว ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ เป็นต้น [1] จะเห็นได้ว่าทั้งการขึ้นรูปและการใช้งานโลหะจะต้องรับแรงกระทำในรูปแบบของแรงดึง

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีความสนใจศึกษาลักษณะความเสียหายจากแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด 1010 ที่มีขนาดเกรนต่างกันซึ่งได้จากการอบอ่อนแบบไม่สมบูรณ์ในระยะเวลาที่ต่างกัน เพื่อที่จะนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการเลือกใช้และปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาผลของขนาดเกรนที่มีต่อลักษณะความเสียหายจากแรงดึง

1.3 เกณฑ์วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1010 ที่มีขนาดเกรนต่างกัน

1.3.2 ลักษณะความเสียหายที่เกิดจากแรงดึง

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลที่มีต่อขนาดเกรนที่ได้จากการอบอ่อน

1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับผลของขนาดเกรนที่มีต่อลักษณะความเสียหายอันเนื่อง

มาจากแรงดึงในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1010

1.4.3 สามารถวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดึงในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1010 ที่มีขนาดของเกรนที่แตกต่างกัน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ใช้เหล็ก AISI 1010 ในการทดลอง

1.5.2 ทำการอบอ่อนแบบไม่สมบูรณ์ (Stress relief anneal) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 240 นาที

1.5.3 ทำการทดสอบจะทดสอบแรงดึง ที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

1.6.1 ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.2 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.3 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

เดือนกรกฎาคม 2551- เดือนเมษายน 2552

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart)

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart) ทุก 2 อาทิตย์

[illegible]

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การอบอ่อน (Annealing)

เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold working) หรือการหล่อมา มักจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น และไม่สม่ำเสมอ ทำให้การกลึงหรือไสได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำลายความแข็งของเหล็กเพื่อกลึงไสได้สะดวก มีสอง 2 วิธี คือ

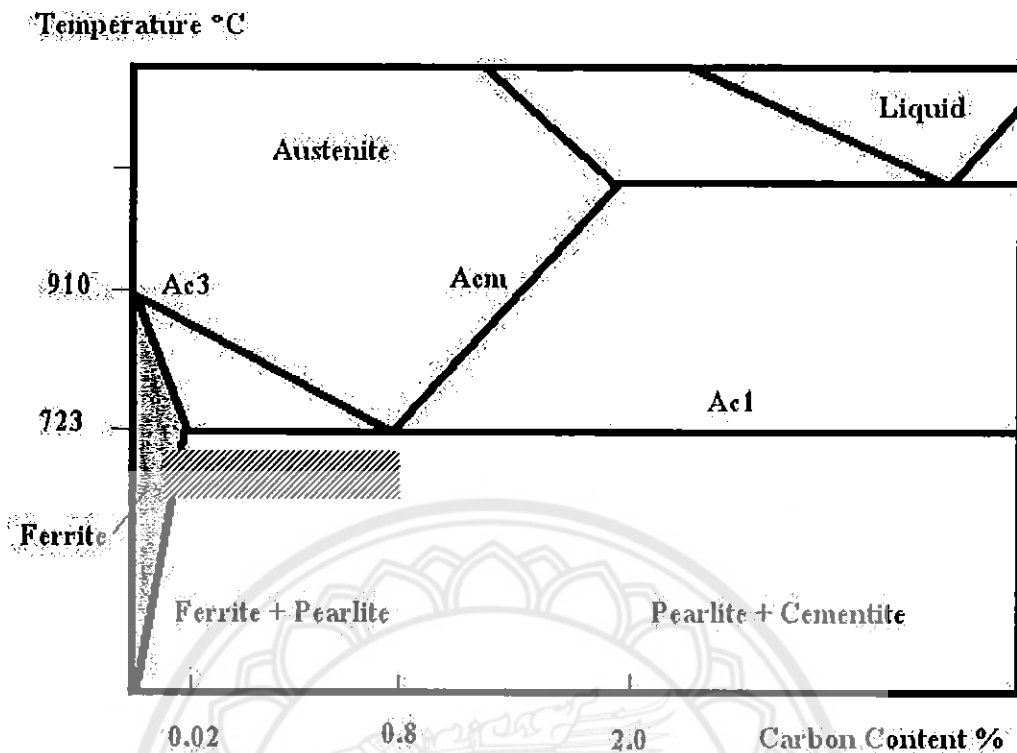
2.1.1 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full annealing)

สำหรับเหล็ก โสโปยูเทคคอยด์ เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส และสำหรับเหล็ก ไฮเปอร์ยูเทคคอยด์ เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac_1 ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตา ให้เป็น austenite ทั้งหมด ปล่อยให้เย็นในเตาที่ปิดฝาสนิท (ถ้าเป็นเตาไฟฟ้า ก็เพียงแต่ถอดปลั๊กออก) เมื่อเหล็กถูกปล่อยให้เย็นช้าๆ การเปลี่ยนโครงสร้างภายใน ก็จะกลับสู่สภาพใกล้เคียงสมดุล โครงสร้างที่เป็นอยู่เดิม นั่นคือ มาร์เทนไซด์หรือเบนไนต์ จะกลับมาเป็นเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ ทำให้ความแข็งลดลงกลายเป็นเหล็กอ่อนนุ่ม มีความนุ่มนวลเพื่อให้เหล็กอ่อนลงเพื่อสะดวกในการกลึงไส

2.1.2 การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (Process annealing)

2.1.2.1 การอบอ่อนลดความเค้น (Stress - relief anneal)

เผาเหล็กให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าเส้น Ac_1 เล็กน้อย (500-700 องศาเซลเซียส) เมื่อต้องการขจัดความเค้น (Stress-relief) แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตาไว้นานพอสมควรเพื่อให้เหล็กร้อนทั่วถึงกัน (ให้มีอุณหภูมิเท่ากันถึงภายใน) ปล่อยให้เย็นในอากาศ วิธีนี้ความแข็งของเหล็กจะลดลงเล็กน้อย เพราะ โครงสร้างของเหล็กแต่เดิมไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ความเครียดที่มีอยู่จะถูกทำลายหมดไป มีความนุ่มนวล เพื่อทำลายความเครียดภายในให้หมดไป เช่น เหล็กที่ถูกรีดหรือตีขึ้นรูปมาต้องผ่านการอบอ่อน เพื่อให้ความต้านทานแรงกระทำน้อยลง

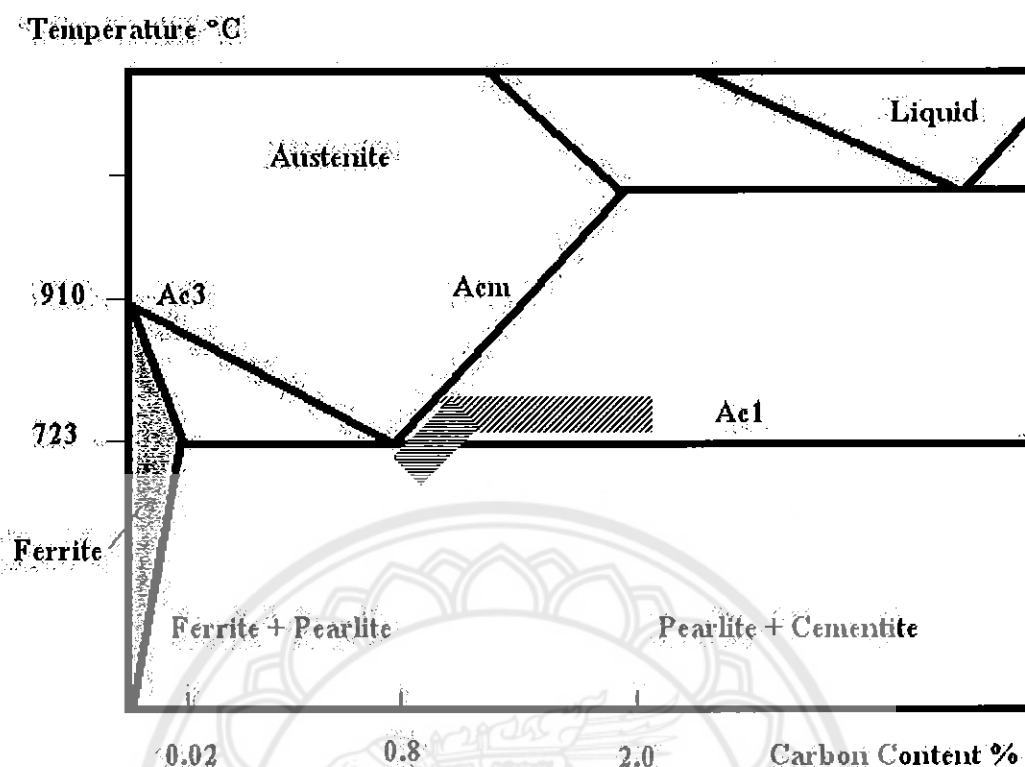


รูปที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิการอบอ่อนลดความเค้น (Stress-relief anneal) จาก
แผนภูมิสมดุลเหล็กคาร์บอน

ที่มา: มนัส สติรจินดา.วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยกรุงเทพ, 2533

2.1.2.2 การอบคาร์ไบด์ก้อนกลม (Spheroidising anneal)

สำหรับเหล็ก 0.7-0.8%C เฝ้าให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า Ac1 และเผาสลับกับสูงกว่า Ac1 เพื่อให้อ่อนตัวสูง สำหรับเหล็กที่มากกว่า 0.8%C เฝ้าให้มีอุณหภูมิสูงกว่าเส้น Ac1 เล็กน้อย เพื่อให้อ่อนตัวสูง แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตาไว้เวลานานพอสมควรปล่อยให้เย็นในอากาศ วิธีนี้ทำให้เหล็กมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ลดความเปราะลง เนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้าง เช่น มีดกึ่งสามารถกลึงได้ผิวที่เรียบขึ้น มีความมุ่งหมายเพื่อให้โปรยเทกตอยด์ซีเมนไทด์ขาดเป็นช่วงๆ และซีเมนไทด์ ใน เฟอร์ไรต์ ซึ่งเป็นแถบบางๆ (Lamella) มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆ (Spheroid) [1]



รูปที่ 2.2 แสดงอุณหภูมิการอบอ่อนคาร์ไบด์ก่อนกลม (Spheroidising anneal)

จากแผนภูมิสมดุลเหล็กคาร์บอน

ที่มา: มนัส สติรจินดา, วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ, 2533

โลหะที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold work) จะทำให้ขนาดของเกรน (Grain) มีความละเอียดมากขึ้น มีการเพิ่มจำนวนของดิสโลเคชัน ส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเป็นไปอย่างยากลำบากมากขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำดิสโลเคชัน เคลื่อนที่ เป็นผลให้โลหะมีความแข็งแรงสูงขึ้น (Tensile strength และ Yield strength เพิ่มขึ้น) และมีความยืดตัว (Elongation) ลดลง แต่ถ้าหากทำการขึ้นรูปเย็นต่อเนื่องโดยไม่มีกระบวนการทางความร้อนใดๆ มาช่วยให้โลหะมีความอ่อนลงเลย จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเปราะและแตกหักในที่สุด เพราะฉะนั้น การขึ้นรูปเย็นหลายๆ ครั้ง ต้องมีกระบวนการทางความร้อนมาช่วยทำให้โลหะนั้นอ่อนลงและสามารถขึ้นรูปต่อไปได้ โดยเรียกกระบวนการที่ทำให้โลหะมีความอ่อนลงว่าการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการประกอบไปด้วยกระบวนการเกิด การจัดเรียงตัวใหม่ (Recovery), การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และการโตขึ้นของขนาดเกรน (Grain growth)

การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการขึ้นรูปเย็นของโลหะที่มีหลายผลึก (Polycrystalline) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของโลหะชนิดนั้น จะทำให้โครงสร้างและสมบัติของโลหะนั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรน การเกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจาก

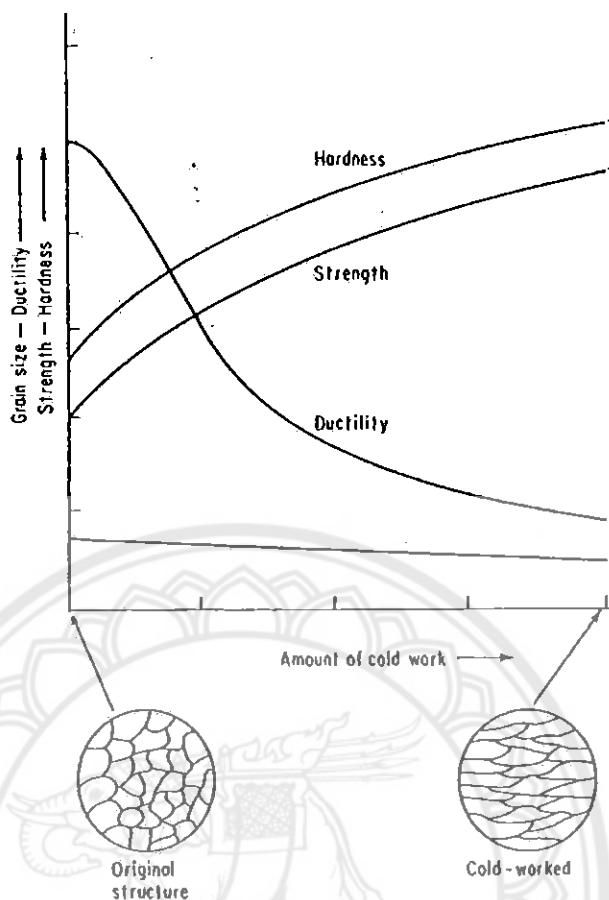
ความเครียด (Strain hardening) และจำนวนของดิสโลเคชัน มีความหนาแน่นมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้โลหะมีความเครียด (Strain) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อแรงดึง แรงอัด แรงเฉือน บริเวณโดยรอบของดิสโลเคชัน ที่เกิดขึ้นมาใหม่นอกจากนี้ คุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความสามารถในการต้านทานไฟฟ้า ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน ก็จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลมาจากการขึ้นรูปเย็น

คุณสมบัติต่างๆ และโครงสร้างที่เปลี่ยนไปภายหลังการขึ้นรูปเย็นสามารถทำให้กลับคืนสู่สภาพก่อนการขึ้นรูปเย็น (Precold work states) ได้ โดยให้ผ่านกระบวนการทางความร้อน ที่เรียกว่า Annealing ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติและ โครงสร้างของโลหะกลับคืนสู่สภาพเดิมโดยการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ะตอมในโลหะจะเกิดการเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งที่สมดุล ซึ่งจะส่งผลให้ความเครียดในโลหะลดลง รวมถึงทำให้ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรง (Hardness) ลดลงอีกด้วย

การอบอ่อนนั้น แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Recovery) การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และการโตขึ้นของขนาดเกรน (Grain growth) ใหม่ซึ่งโดยทั่วไป เป็นคุณสมบัติที่เราไม่ต้องการ เพราะจะทำให้ความแข็งแรงลดลง

1. การจัดเรียงตัวใหม่ (Recovery)

ในช่วงการเกิดการจัดเรียงตัวใหม่นั้น จะเกิดอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ความเครียดภายในโลหะ จะถูกทำให้ลดลงบางส่วน โดยการจัดเรียงตัวของดิสโลเคชันเป็นผลให้ดิสโลเคชัน มีจำนวนลดลง ทำให้ความเครียดลดลงไปบางส่วน และมีผลให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างเช่น สมบัติทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยจะถูกเปลี่ยนกลับไปเหมือนสภาพก่อนทำการขึ้นรูปเย็น แต่ความแข็งแรง และความแข็งแรงยังคงมีค่าเท่าเดิม ซึ่งยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้

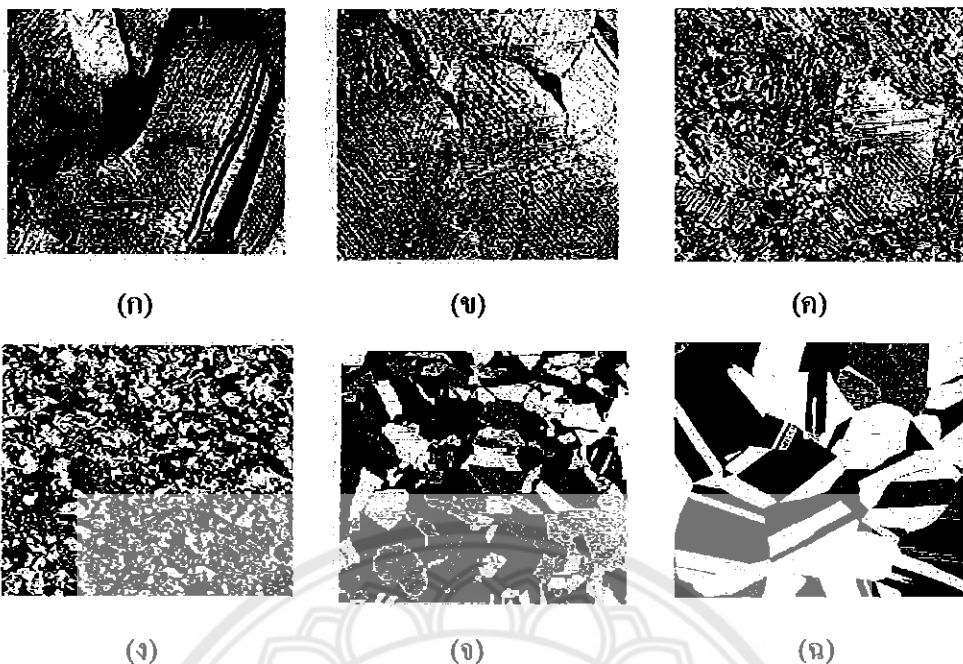


รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นด้วยความต้านทานแรงดึง, ความแข็ง, ความเหนียว และขนาดเกรน

ที่มา: <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>

2. การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization)

หลังจากเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เสร็จสิ้นลงเกรนของโลหะยังคงอยู่ในสภาพที่มีความเครียดสูงอยู่ การเกิดผลึกใหม่นั้นจะเกิดอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้เกิดเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด (Strain-free) ขึ้นมา ซึ่งจะมีจำนวนดิสโลเคชั่นที่น้อย มีคุณสมบัติเหมือนกับสภาพก่อนทำการขึ้นรูปเย็น (Precold work) เกรนที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะเกิดจาก นิวเคลียสขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นที่บริเวณที่มีพลังงานศักย์ (Potential energy) สูง เช่น ที่บริเวณของขอบเกรน เป็นต้น ซึ่งจะเริ่มขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ จนแทนที่เกรนเดิมจนหมด ดังจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.4 (ก) ถึง 2.4 (ข)

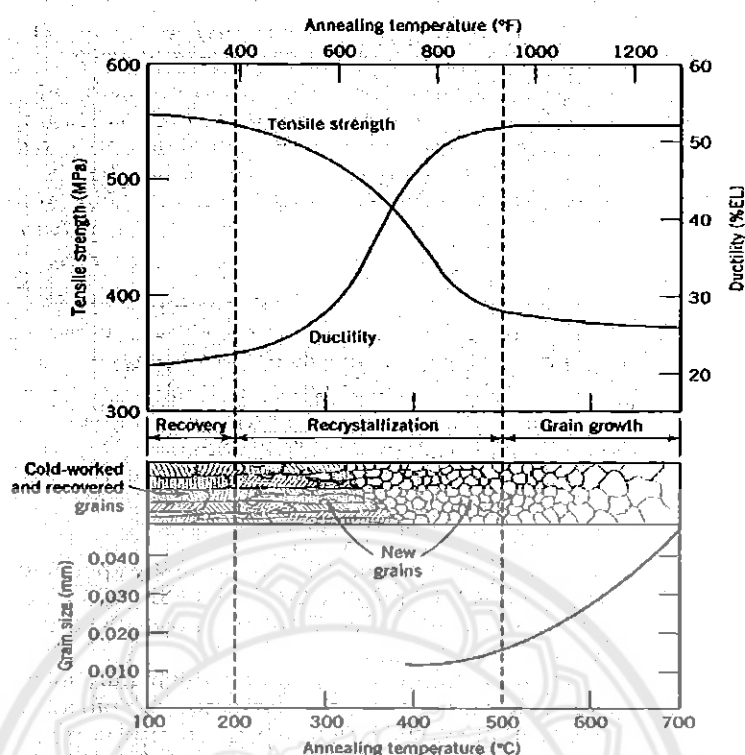


รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 75X โดยแสดงให้เห็นสภาพต่างๆ

ของการเกิดผลึกใหม่และการโตของขนาดเกรนของทองเหลือง, (ก) ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา 33%, (ข) เริ่มเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วินาที จะเห็นเกรนขนาดเล็กเกิดขึ้น, (ค) การเกิดผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 วินาที, (ง) การเกิดผลึกใหม่โดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8 วินาที, (จ) การโตของขนาดเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส, (ฉ) การโตของขนาดเกรนเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ที่มา: <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>

หลังจากการเกิดผลึกใหม่แล้ว คุณสมบัติทางกลที่ได้จากการขึ้นรูปเย็นจะเปลี่ยนไปโดยจะมีคุณสมบัติเหมือนกับที่ยังไม่ได้ทำการขึ้นรูปเย็นซึ่งจะมีความอ่อน และมีการยืดตัว (Ductility) ที่สูงขึ้น ความแข็งและความแข็งแรงลดลงกระบวนการการเกิดผลึกใหม่จะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอัตราการเกิดผลึกใหม่จะสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.4 (ก) ถึง 2.4 (ง)

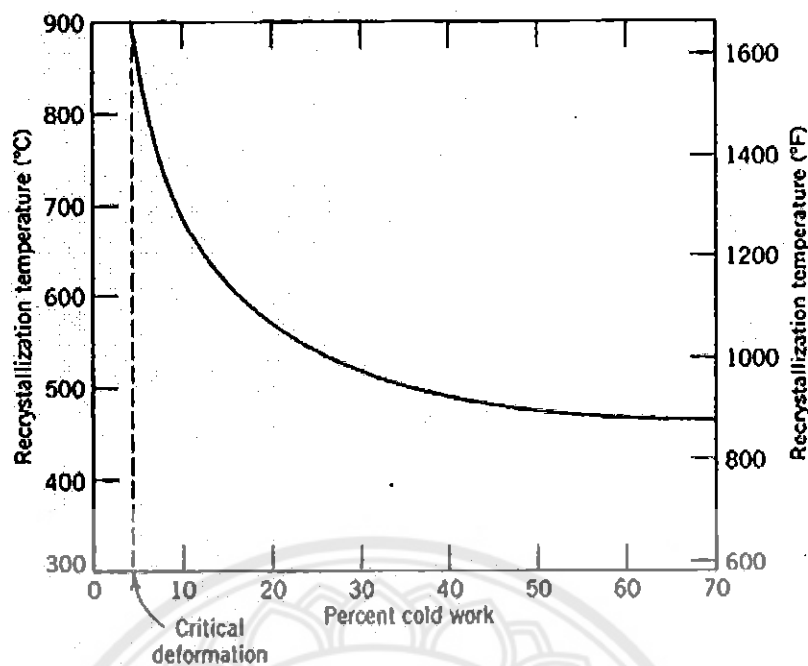


รูปที่ 2.5 อิทธิพลของอุณหภูมิในการอบอ่อนที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงและ
การยืดตัวของทองเหลืองผสม และขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป
เมื่อเกิดการเรียงตัวใหม่ การเกิดผลึกใหม่ และการโตของขนาดเกรน

ที่มา: <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>

ผลจากอุณหภูมิแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและการยืดตัวของอุณหภูมิห้องของทองเหลืองผสม โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรง และการยืดตัว เมื่ออุณหภูมิในการอบเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งใช้เวลาในการอบ 1 ชั่วโมง

การเกิดผลึกใหม่ของโลหะใดๆ จะมีอุณหภูมิที่ใช้แตกต่างกันไป โดยอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เกิดผลึกใหม่เรียกว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดกระบวนการการเกิดผลึกใหม่ภายใน 1 ชั่วโมง ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง $1/3 - 1/2$ เท่าของอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะชนิดนั้นๆ แต่ก็ยังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัยด้วยกัน รวมถึงจำนวนครั้งในการขึ้นรูปเย็น (Cold work), ความบริสุทธิ์ของโลหะผสม, การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็น (Percentage of cold work) ก็มีผลต่ออัตราการเกิดผลึกใหม่ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ที่ต่ำลง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 สำหรับเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปที่ต่ำเกินไปก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิด ผลึกใหม่ได้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่กับเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็น
แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ในการขึ้นรูปเย็นต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดผลึกใหม่

ที่มา: <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>

การเกิดผลึกใหม่โลหะบริสุทธิ์จะเกิดได้เร็วกว่าโลหะผสม ดังนั้นการเติมธาตุผสมเข้าไปจึงทำให้ต้องเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่สำหรับอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ที่ใช้กับโลหะบริสุทธิ์จะมีค่าประมาณ $0.3T_m$ และโลหะผสมบางชนิดอาจสูงถึง $0.7T_m$ เมื่อ T_m คืออุณหภูมิในการหลอมตัวของโลหะชนิดนั้นๆ โดยจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการเกิดผลึกใหม่และอุณหภูมิในการหลอมตัว (Recrystallization and Melting Temperature for Various Metals and Alloys)

Metal	Recrystallization Temperature		Melting Temperature	
	°C	°F	°C	°F
Lead	-4	25	327	620
Tin	-4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu-40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.999 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

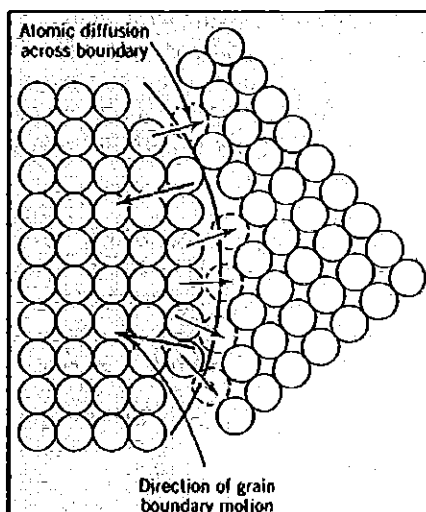
ที่มา: <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>

สำหรับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดผลึกใหม่เราเรียกกระบวนการนี้ว่าการขึ้นรูปร้อน (Hot working) ซึ่งสมบัติต่างๆ เช่น การยืดตัว ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการขึ้นรูป เพราะไม่เกิดความเครียด (Strain hardening)

3. การโตของขนาดเกรน (Grain growth)

หลังจากการเกิดผลึกใหม่เสร็จสิ้นลงเกรนที่เกิดขึ้นมาใหม่จะมีสภาพที่ปราศจากความเครียด (Strain-free grain) เมื่อให้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization Temperature) จะทำให้เกรนที่เกิดขึ้นมาใหม่มีการขยายขนาดให้โตขึ้น โดยปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่าการโตของขนาดเกรน

การโตของขนาดเกรนไม่จำเป็นต้องเกิดภายหลังจากการเกิด การเรียงตัวใหม่ การเกิดผลึกใหม่และการโตของขนาดเกรน อาจจะเกิดขึ้นได้กับโลหะที่เป็นพหุผลึก (Polycrystalline) ทุกชนิด และเซรามิกส์ด้วย



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดการโตของขอบเกรนโดยการแพร่ของอะตอม

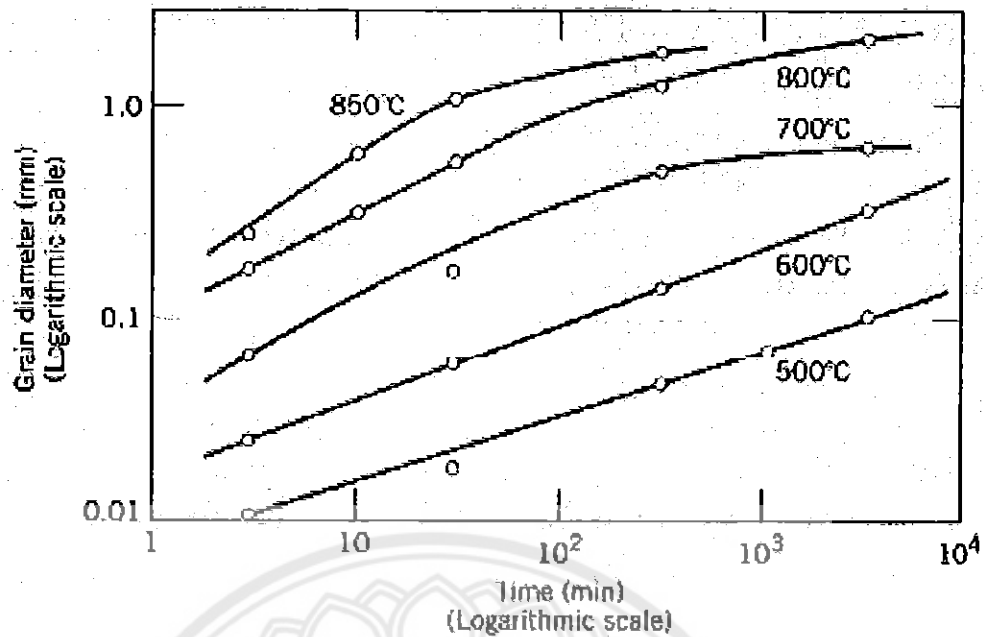
ที่มา: <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>

การโตของขนาดเกรนเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนตัวของขอบเกรนออกไป ไม่เพียงแต่เกรนจะสามารถขยายใหญ่ขึ้นได้เองแล้ว ยังสามารถไปรวมกับเกรนข้างๆ ทำให้เกิดเกรนที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นไปอีก โดยขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอบนานขึ้น การเคลื่อนที่ของขอบเกรนที่ขยายออกมา สามารถเกิดขึ้นได้โดยการแพร่ของอะตอมจากขอบเกรนหนึ่งสู่อีกขอบเกรนหนึ่ง โดยทิศทางของการเคลื่อนที่ของขอบเกรนจะตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ขนาดของเกรนที่เพิ่มขึ้นในเวลาหนึ่งๆ นั้นสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$d^n - d_0^n = Kt \quad (2.1)$$

เมื่อ d_0 คือขนาดเกรนเดิม (ที่เวลา $t=0$), d คือขนาดเกรน (Grain) เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น, n และ K เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับการอบ โดยทั่วไปค่าของ n จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

ขนาดของเกรนจะขึ้นอยู่กับการอบและอุณหภูมิในการอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อขนาดเกรนของทองเหลืองผสม โดยสังเกตได้ว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง การเกิดการโตของขนาดเกรนจะเกิดได้อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้น ทำให้อัตราการแพร่สูงขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากกราฟจะโค้งสูงขึ้น [2]



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขนาดเกรนและระยะเวลาในการเกิด
การโตของขนาดเกรนของทองเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: <http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/met205/coldwork.jpg>

คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเกรนที่มีความละเอียดจะมีความแข็งแรงที่สูงกว่าเกรนที่หยาบกว่า สามารถอธิบายได้จากทฤษฎีของดิสโลเคชันเพราะขอบเกรน (Grain boundary) จะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนไถล (Slip) ของดิสโลเคชันทำให้เกิดการทับถมของดิสโลเคชันบนระนาบการเคลื่อน (Slip plan) ใกล้เคียง ขอบเกรน ถ้าจะทำให้เกิดการเคลื่อนไถล (Slip) ต่อไปก็ต้องใช้แรงมากขึ้น ถ้าโลหะมีขนาดของเกรนเล็กนั่นคือมีขอบเกรนมาก ก็จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันยากขึ้น หรือต้องใช้ความเค้นสูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้นโลหะที่มีเกรนละเอียดก็จะมีค่าแข็งแรงสูงกว่าเกรนที่หยาบกว่า [3]

2.2 การหาขนาดเกรน

การหาขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากวิธี Mean linear intercept [4] จากสมการ

$$G = -10.00 - 6.60 \log L_j \quad (2.2)$$

$$L_j = L_T / PM \quad (2.3)$$

เมื่อ L_T คือ ขนาดของเส้นรอบวงที่นำมาหาจุดตัดขอบเกรน

P คือ จำนวนจุดตัด

M คือ กำลังขยายของภาพ

L_j คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของจุดตัด

G คือ หมายเลขขนาดของเกรน

ซึ่งสามารถเทียบได้จากตารางที่ 2.2 ตามมาตรฐาน ASTM Standard E112 เพื่อหาขนาดเกรน

เฉลี่ย



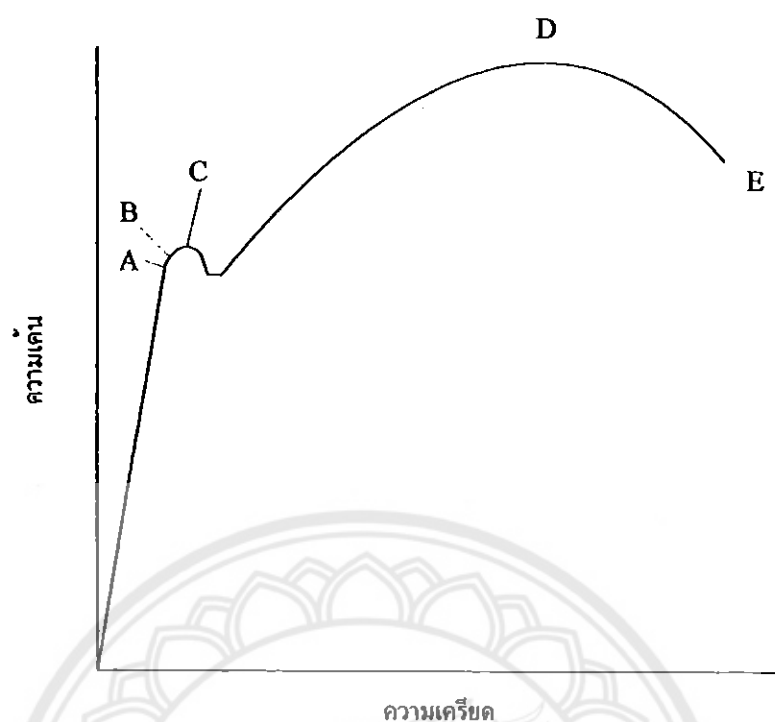
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าขนาดเกรนมาตรฐาน ASTM Standard E112

ASTM No.	Grain/mm. ²	Grain/mm. ³	Average Grain Diameter (mm.)
-1	3.9	6.1	0.45
0	7.8	17.3	0.36
1	15.5	49.0	0.25
2	31.0	138	0.18
3	62.0	391	0.125
4	124	1105	0.090
5	248	3126	0.065
6	496	8842	0.045
7	992	25010	0.032
8	1980	70700	0.022
9	3970	200000	0.016
10	7940	566000	0.011
11	15870	1600000	0.008
12	31700	4527000	0.006

ที่มา: เอกสารประกอบการเรียนวิชา PRE 257 Metallurgy Laboratory II ภาควิชาวิศวกรรม
อุตสาหกรร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2.3 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.10 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย [5]



รูปที่ 2.9 เส้น โ้้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve)
แบบมีจุดคราก (Yield point)

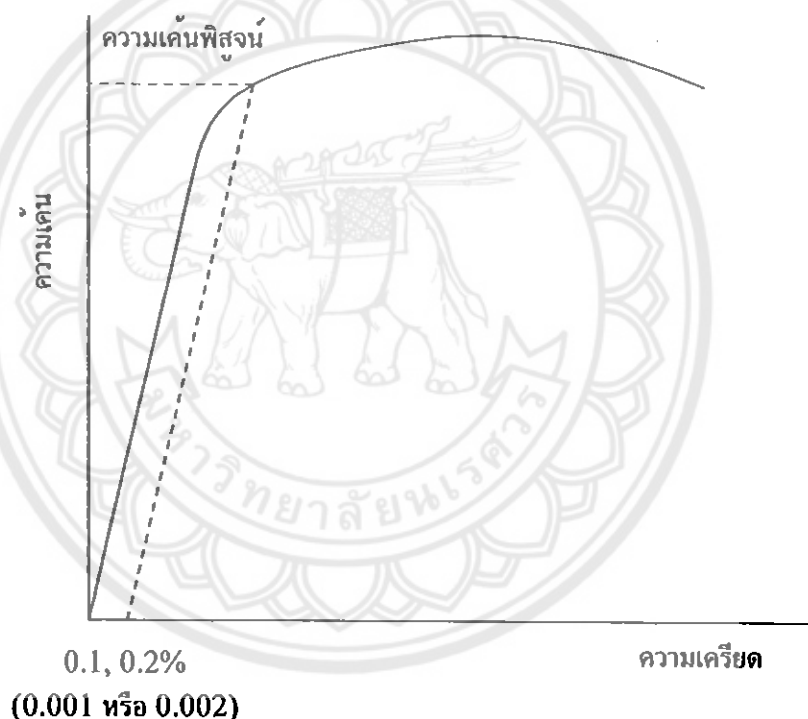
ที่มา: http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chapter_6/tension_test.

จากการศึกษาเส้น โ้้งความเค้น-ความเครียด เราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โ้้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่าพิสัยยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent deformation or offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield point)

และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือ (Yield strength) ค่าความเค้นจุดครากนี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original gage length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.11 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในรูปที่ 2.11



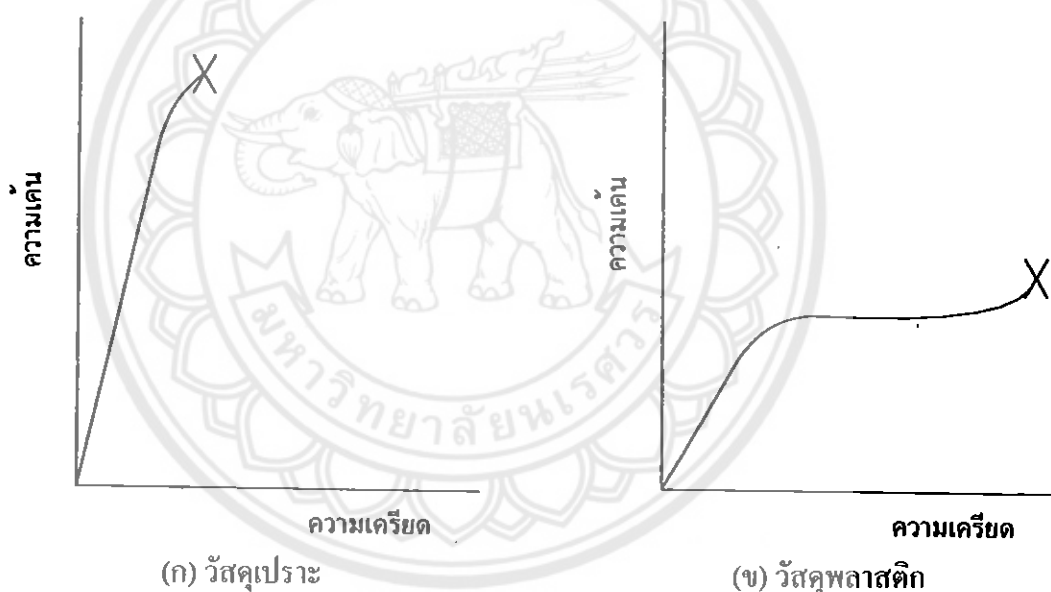
รูปที่ 2.10 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

ที่มา: http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chapter_6/tension_test.

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความต้านทานสูงสุด (Ultimate strength) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็น

ดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าความแข็งแรง ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุ นั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกันสำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 2.12 (ก) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่อัตราการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.12 (ข)



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

ที่มา: http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chapter_6/tension_test.

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่างๆ ได้อีกดังนี้ คือ

2.3.1 ความเหนียว (Ductility)

ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%EI)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} 100\% \quad (2.4)$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด
 L_o = ความยาวของเกจเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} 100\% \quad (2.5)$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงจนขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุจะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูปเช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2.3.2 โมดูลัสของความยืดหยุ่น หรือ ความแข็งตึง (Stiffness)

ภายใต้พิภคสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น (E) หรือ โมดูลัสของยัง หรือ ความแข็งตึง (Stiffness)

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L} \quad (2.6)$$

มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น)

ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า เชียร์โมดูลัส (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa} \quad (2.7)$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่างๆ ตารางที่ 2.3 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุต่างๆ ไว้

2.3.3 ความเค้นดึง (Tensile stress)

ความเค้นดึงเกิดจากแรงดึงที่พยายามทำให้วัตถุยืดออกกำหนดให้

$$\sigma = F / A \quad (2.8)$$

เมื่อ σ = ความเค้นดึง (N/mm^2)
 F = แรงดึง (N)
 A = พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดึง (mm^2)

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	Modulus of elasticity 10^6 psi	Shear Modulus 10^6 psi
Aluminium alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (plain carbon and low alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

ที่มา: http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chapter_6/tension_test.

ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) และค่าขนาดเกรน (Grain size)
 ดังสมการ 2.9

$$\sigma_0 = \sigma_i + kD^{-1/2} \quad (2.9)$$

เมื่อ σ_0 = ความเค้นจุดคราก

σ_i = ค่าจุดตัดแกนความสัมพันธ์ (Friction Stress)

k = ค่าที่ได้จากความชันของความสัมพันธ์ของความเค้นที่จุดครากและกับ
 รากที่สองของขนาดเกรน

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดเกรน

2.4 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จัดได้ว่าเป็นเหล็กที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อเหล็กน้อยที่สุด คือ มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.10-0.03 % โดยน้ำหนักกำหนดตามมาตรฐานอเมริกัน คือ AISI 1010 – 1030 กำหนดมาตรฐานเยอรมัน คือ S37 เนื่องจากมีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่น้อย ทำให้มีความแข็งแรงต่ำไม่สามารถนำไปทำการชุบแข็งได้ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก เช่นนำไปรีดเป็นแผ่น ทำถังบรรจุของเหลว นำไปทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง

สมบัติต่างๆของเหล็ก AISI 1010

AISI TYPE	: 1010
Tensile strength	: 47000 – 53000 psi
Yield strength	: 26000 – 44000 psi
% Elongation	: 20 – 28
Hardness, Brinell	: 95 - 105

ส่วนประกอบของเหล็ก

C	: 0.08 – 0.13 %
Mn	: 0.30 - 0.60 %
Pmax	: 0.04 %
Smax	: 0.05 %



ที่มา: มนัส สติรจินดา.วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยกรุงเทพ, 2533

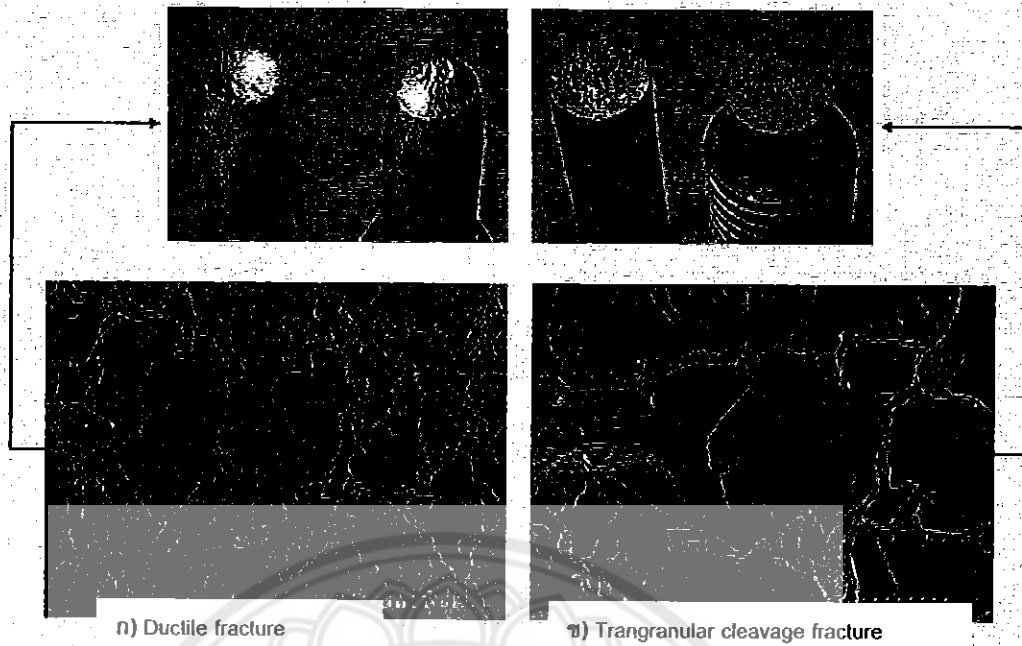
2.5 ประเภทของการแตกหักในโลหะ (Types of fracture in metals)

ประเภทของความเสียหายหรือการแตกหักที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) และการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) โดยการแตกหักแบบเปราะนั้นจะได้รับความสนใจมากเนื่องจาก การแตกหักดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ที่น้อยมาก จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว และมีผลกระทบอย่างรุนแรงและทำให้ป้องกันหรือหลีกเลี่ยงได้ยาก ดังนั้นการศึกษารื่องการแตกหักแบบเหนียวจึงได้รับความสนใจน้อยกว่าการแตกหักแบบเปราะ อย่างไรก็ตามเราควรทำความเข้าใจถึงลักษณะสาเหตุการแตกหักและปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับการแตกหักแต่ละรูปแบบเพื่อใช้เป็นแนวทางในการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น และสามารถนำมาประกอบการพิจารณาเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับประเภทการใช้งานประเภทของการแตกหักแบ่งได้ดังนี้

2.5.1 การแตกหักแบบผ่าแกรน (Transgranular fracture) สามารถแบ่งออกเป็น

2.5.1.1 การแตกหักแบบเปราะ (Brittle cleavage fracture)

การแตกแบบเปราะเป็นการแตกแบบผ่าแกรน (Transgranular cleavage fracture) ชนิดหนึ่งโดยทั่วไปจะแสดงพื้นผิวของการแตกหักที่ค่อนข้างเรียบส่งผลให้มีพื้นที่ผิวการแตกหักน้อย ทำให้ใช้พลังงานการแตกหักต่ำ พลังงานที่วานี้คือพลังงานพื้นผิว ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้สร้างพื้นที่ผิวใหม่ 2 พื้นที่ผิว หากเราตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักแบบเปราะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่กำลังขยายสูงจะพบว่า มีลักษณะเป็นกลุ่มของโครงสร้างที่เรียกว่า แฟกเซต ซึ่งเกิดจากการที่รอยแตกเดินทางผ่าแกรนของโลหะ โดยขนาดของแต่ละแฟกเซต นั้นจะมีขนาดโดยประมาณเท่ากับแกรนของโลหะนั้น การแตกแบบผ่าแกรนนี้มีความคล้ายคลึงกับผิวรอยแตกของหินหรือแก้วซึ่งจะมีลักษณะผิวที่ค่อนข้างเรียบโดยทั่วไปแล้วการแตกแบบผ่าแกรนจะเกิดการแตกไปตามระนาบของโครงสร้างผลึก (Crystallographic plane) ซึ่งมีพลังงานระหว่างระนาบโครงสร้างผลึกที่ต่ำ จึงทำให้เกิดการแยกหรือแตกออกได้ง่าย ในบางกรณีพื้นผิวการแตกหักไม่ได้เป็นแบบผ่าแกรนทั้งหมด โดยอาจจะมีบางบริเวณที่เกิดพื้นผิวแตกหักแบบเหนียว ซึ่งสามารถสังเกตได้จากบริเวณที่มีหลุมเล็กๆ (Ductile dimple) โดยเราจะมองเห็นเป็นรูปหลุมหรือถ้วยเล็กๆ ปรากฏอยู่เมื่อส่องดูด้วยกล้องกำลังขยายสูง ในกรณีนี้เราเรียกว่า การแตกหักแบบกึ่งแยก (Quasi-cleavage fracture)



รูปที่ 2.13 ก) การแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) และ ข) การแตกหักแบบผ่าเกรน (Transgranular cleavage fracture)

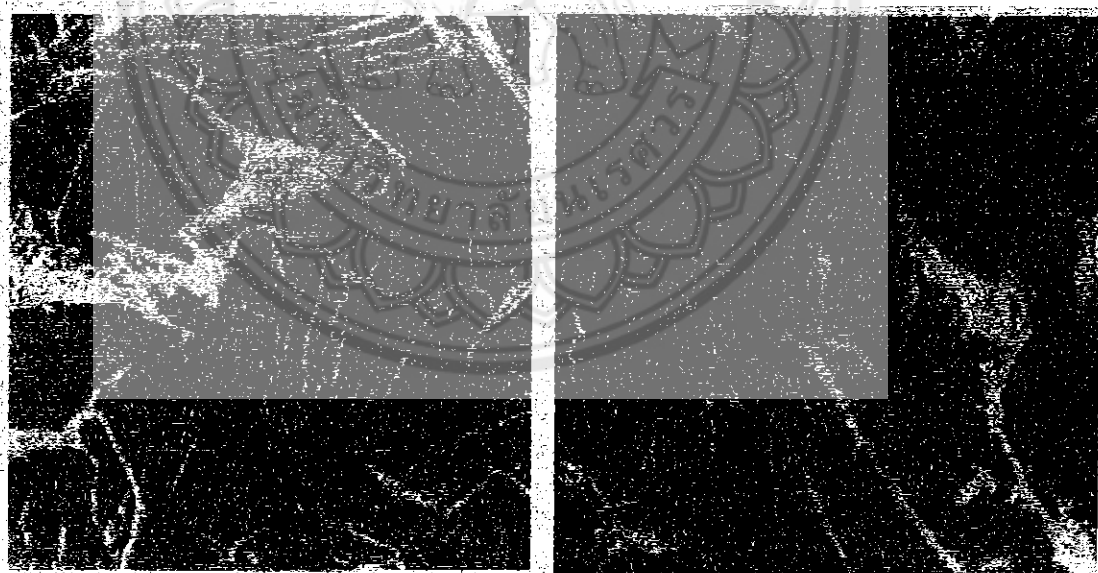
ที่มา: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/Th/08_Fractography_th.

15059628

พ.ร.

562/a

2552



ก) Cleavage facets of ferrite

ข) Quasi cleavage facets of tempered martensite

รูปที่ 2.14 แสดงพื้นผิวการแตกหัก ก) แบบเสมือนของเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้า

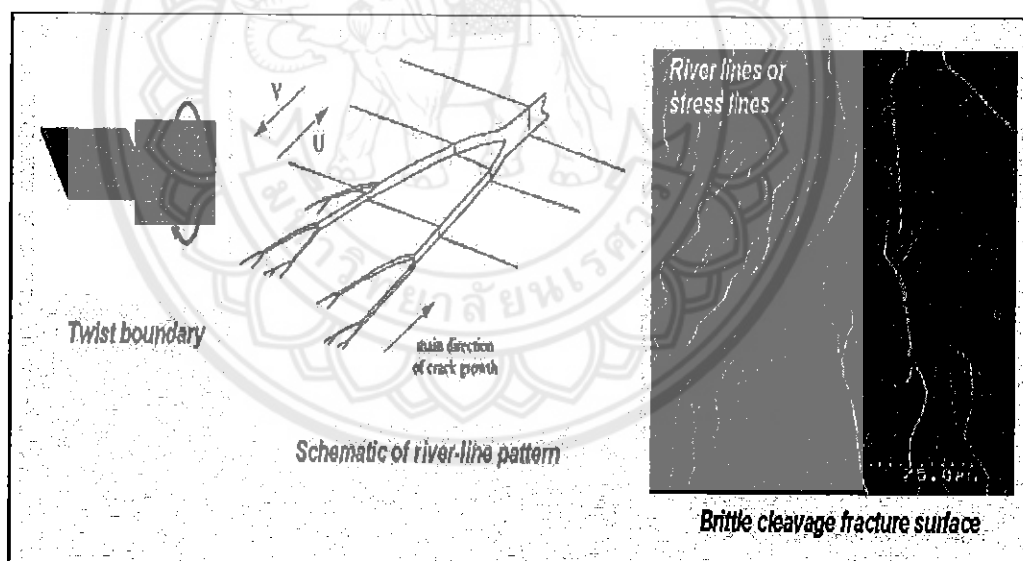
คาร์บอนต่ำ และ ข) แบบกึ่งเสมือนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้าง

แบบเทมเปอร์มาร์เทนไซด์

ที่มา: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/Th/08_Fractography_th

การเกิดแบบสายน้ำ (River line pattern) นั้นโดยทั่วไปแล้วระนาบของอะตอมของวัสดุอาจมีการเรียงตัวที่เอียงกันเล็กน้อย เมื่อรอยแตกเกิดการเติบโตโดยขยายขนาดเข้ามาในบริเวณระนาบอะตอมดังกล่าว รอยแตกจะเลือกเติบโตในระนาบที่ใช้พลังงานที่น้อยที่สุด ดังนั้นระนาบเสมียน (Cleavage) ทั้งสองที่มีพลังงานพื้นผิวต่ำจึงถูกทำให้แตกออก แต่เนื่องจากระนาบเสมียน (Cleavage) ดังกล่าวอยู่เอียงกันเล็กน้อยจึงทำให้เกิดเป็นขั้นบันได (Steps) ตรงบริเวณรอยต่อของระนาบเสมียน (Cleavage) เป็นผลทำให้เกิดเป็นแบบสายน้ำ (River line pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

การแตกหักแบบเปราะหรือแบบผ่ากรนนั้นมักมีสาเหตุมาจากการสะสมของความเค้น (Stress concentration) ตรงบริเวณที่มีข้อบกพร่อง (Defects) หากเราต้องการให้วัสดุมีความต้านทานต่อการแตกหักมากขึ้น เราควรจะทำให้วัสดุมีข้อบกพร่องที่น้อยที่สุดเพื่อเป็นการลดจุดที่จะสะสมความเค้น ซึ่งอาจทำได้โดยการควบคุมกระบวนการผลิตชิ้นงานโดยเริ่มตั้งแต่การผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อ การขึ้นรูปด้วยวิธีการทางกลอื่นๆ การตกแต่ง เชื่อมหรือประกอบชิ้นงานขั้นสุดท้าย

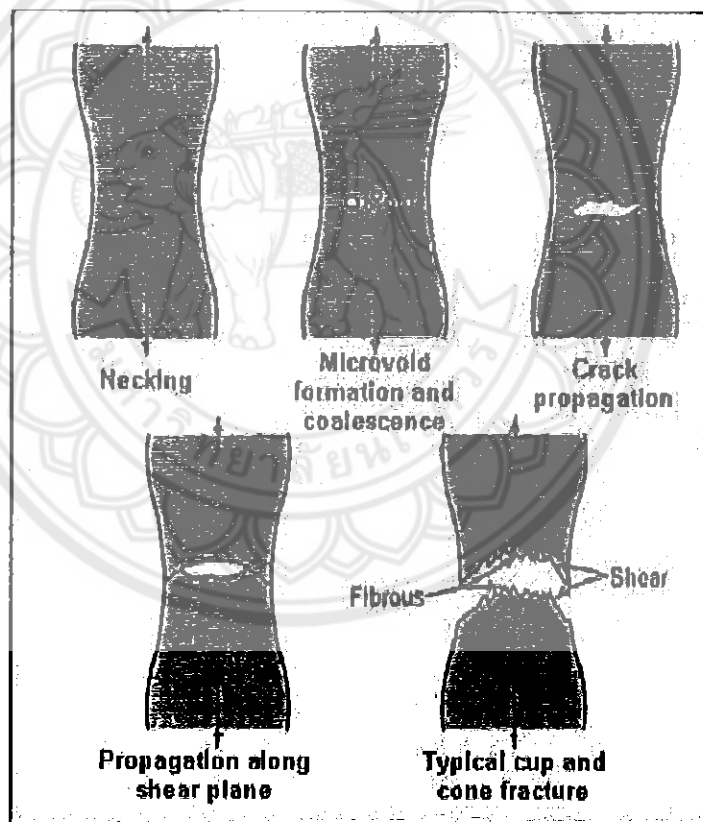


รูปที่ 2.15 การเกิด River line pattern ที่พบในพื้นที่ผิวการแตกหักแบบเปราะ

ที่มา: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/Th/08_Fractography_th.

2.5.1.2 การแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture)

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึง และมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียวจะเห็นว่าเมื่อชิ้นงานถูกดึงผ่านจุดความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) แล้วจะเกิดการลดลงของชิ้นงานที่เรียกว่า เนคกิง ภายในบริเวณดังกล่าวจะเกิดการฟอร์มตัวของช่องว่างเล็กๆซึ่งจะมารวมตัวกันเกิดเป็นรอยแตกที่ใหญ่ขึ้น รอยแตกนี้จะมีทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงที่มากระทำ และเมื่อรอยแตกขยายตัวจนถึงขอบของชิ้นงานจะเกิดการฟอร์มตัวของระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ซึ่งมีระนาบทำมุมประมาณ 45 องศา โดยประมาณกับทิศทางของแรงที่มากระทำระนาบแรงเฉือนดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อกับรอยแตกดังกล่าวที่เกิด อันแรกจนทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานในที่สุด ดังนั้น พื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานจะแสดงรูปแบบของถ้วยและกรวย (Cup and cone) ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.16 การแตกหักแบบ Cup and cone

ที่มา: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/Th/08_Fractography_th.

เนื่องจากวัสดุที่มีความเหนียวจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ที่ค่อนข้างมาก ระหว่างการแตกหักผิวรอยแตกที่ขรุขระจะมีปริมาณพื้นที่ผิวที่มากกว่าผิวรอยแตกที่เรียบ ดังนั้นการแตกหักแบบเหนียวจึงต้องใช้พลังงานในการแตกหักหรือพลังงานที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวใหม่ 2 พื้นที่ผิวมากกว่าการแตกหักแบบเปราะซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวการแตกหักในวัสดุที่มีความเหนียวสูงโดยใช้กล้องกำลังขยายสูง จะพบว่าพื้นผิวแตกหักประกอบด้วยช่องว่างหรือหลุมเล็กๆ จำนวนมากที่เรียกว่า Ductile dimple หรือ ไมโครรอยด์ กลไกการเกิดไมโครรอยด์นั้นเริ่มต้นจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโลหะพื้น (Matrix) กับ (Inclusion) หรือ (second phase particle) หรือ เรียกว่าการเกิด ดีโคชชั่น และแรงภายนอกที่มากระทำจะทำให้เกิดเป็นช่องว่างเล็กๆหรือไมโครรอยด์ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยจะมีสิ่งเจือปน (Second phase particle) อยู่ตรงกลาง เมื่อวัสดุได้รับแรงอย่างต่อเนื่อง ไมโครรอยด์เหล่านี้จะขยายขนาดใหญ่มากขึ้นจนมาบรรจบกันที่บริเวณขอบเรียกว่าการเกิด Microvoid coalescence เป็นผลทำให้รอยแตกขยายขนาดใหญ่มากขึ้นภายใน โครงสร้างจนทำให้เกิดการแตกหักในที่สุด พื้นผิวการแตกหักแบบเหนียวนี้จะพบในวัสดุที่มีความเหนียวมาก

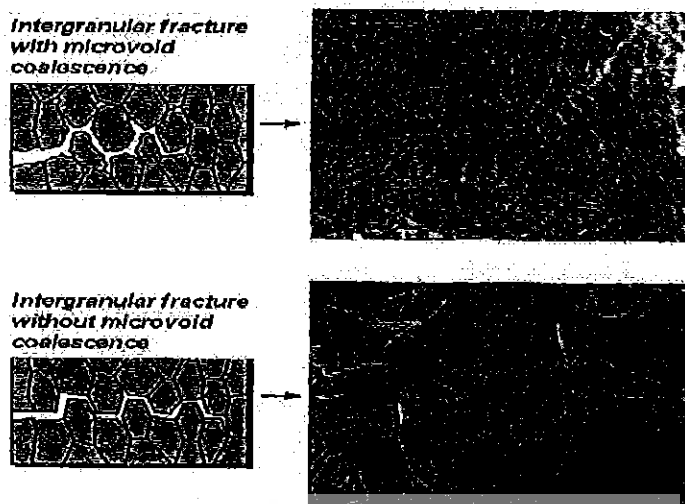
ลักษณะรูปทรงของไมโครรอยด์ ที่ตรวจสอบได้จากภาพถ่ายจาก SEM สามารถบอกถึงลักษณะแรงที่มากระทำกับชิ้นงานได้ด้วย หากรูปทรงของไมโครรอยด์ ที่เกิดขึ้นบนผิวการแตกหักทั้งสองด้านมีลักษณะเป็นหลุมกลมหรือ อีกริแอกซ์เซป แสดงว่าแรงที่มากระทำนั้นเป็นแรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับชิ้นงาน

2.5.2 การแตกตามขอบเกรน (Intergranular fracture)

การแตกตามขอบเกรนนี้นมักจะพบในชิ้นงานที่อยู่ในสภาพเสี่ยงต่อการกัดกร่อน การใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือทำให้เกิดการตกผลึกของเฟสที่สองบริเวณขอบเกรน การแตกหักตามขอบเกรนซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- 1) การแตกหักตามขอบเกรนที่มีไมโครรอยด์ ปรากฏอยู่ที่ผิวรอยแตก
- 2) การแตกหักตามขอบเกรนที่ไม่มีไมโครรอยด์ ปรากฏอยู่ที่ผิวรอยแตก

แม้ว่าพื้นผิวการแตกหักที่เกิดขึ้นจะปรากฏลักษณะของไมโครรอยด์ที่พื้นผิว แต่พลังงานที่ใช้ในการแตกหักนั้นจะไม่สูงมากเท่าการแตกหักแบบเหนียว เนื่องจากไมโครรอยด์ดังกล่าวเกิดจากอนุภาคที่ตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน และมีการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเองกับโลหะพื้นที่ค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะในกรณีที่อนุภาคเหล่านี้เรียงตัวต่อเนื่องกันเป็นตาข่าย ก็จะทำให้สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างขอบเกรนได้ง่าย ทำให้พลังงานระหว่างระหว่างพื้นผิวลดลงอย่างมาก รอยแตกจะเดินทางได้ง่ายขึ้น



Intergranular fracture with and without microvoid coalescence

รูปที่ 2.17 พื้นผิวการแตกหักตามขอบเกรน (ก) แบบเกาะตัวของไมโครวอยด์ และ (ข) แบบไม่เกาะตัวของไมโครวอยด์

ที่มา: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/Th/08_Fractography_th.

นอกจากนี้แล้ว อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งมีผลทำให้เกิด การแตกตาม ขอบเกรนได้ง่ายขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นนอกจากจะมีผลทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic deformation) ได้ง่ายขึ้นแล้ว ยังมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาได้อีกด้วย โดยหากเฟสที่เกิดขึ้นใหม่นั้นมีแรงยึดเหนี่ยวกับโลหะพื้นต่ำ ก็จะทำให้มีอิทธิพลต่อการรับแรง กระทำภายนอกและมีผลต่อลักษณะการแตกหักของชิ้นงานในที่สุด และเนื่องจากบรรยากาศการ แตกหักที่อุณหภูมิสูงนั้นมักมีออกซิเจนร่วมอยู่ด้วย จึงทำให้เกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ได้ง่ายหรือ ในบางกรณีเกิดการเผาไหม้ (Combustion) ได้ง่ายขึ้นอีกด้วย เช่น ในกรณีการใช้งานใบพัดใน เครื่องยนต์ของเครื่องบิน (Turbine blade) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังกล่าวจะทำให้เกิด Oxide scale ที่มีความเปราะและส่วนใหญ่จะก่อตัวอย่างไม่สม่ำเสมอบริเวณผิวของชิ้นงาน เป็นผลทำให้เกิดเป็นจุดที่สะสมความเค้น (Stress concentration) และเป็นต้นกำเนิดของรอยแตกในที่สุด และ หากมีรอยแตกเกิดขึ้นในขณะที่วัสดุหรือชิ้นงานยังได้รับแรงกระทำอยู่ พื้นผิวของรอยแตกที่จะเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอีกทำให้วัสดุเกิดความอ่อนแออย่างรวดเร็ว โดยอาจทำให้เกิดออกซิเดชัน ก่อตัวอย่างต่อเนื่องบริเวณขอบเกรนหรือภายในเกรน วัสดุจึงมีความเปราะขึ้นและมีความยืดหยุ่น ลดลงหรือเรียกว่าการแตกเปราะ (Embrittlement) และหากออกซิเดชันก่อตัวที่บริเวณขอบเกรน จะยังทำให้พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างขอบเกรนแย่งจึงมักเกิดการแตกตามขอบเกรน ในกรณีนี้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า แม้ว่าการแตกหักที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการแตกหักแบบเหนียว (Transgranular ductile fracture) เนื่องจากเกิด การเปลี่ยนรูปร่างถาวรได้ง่ายแต่การเปลี่ยนแปลง ทางโลหะวิทยาหรือการเกิดการแตกเปราะ (Embrittlement) ที่ขอบเกรนดังที่ได้กล่าวมาแล้วผลทำให้

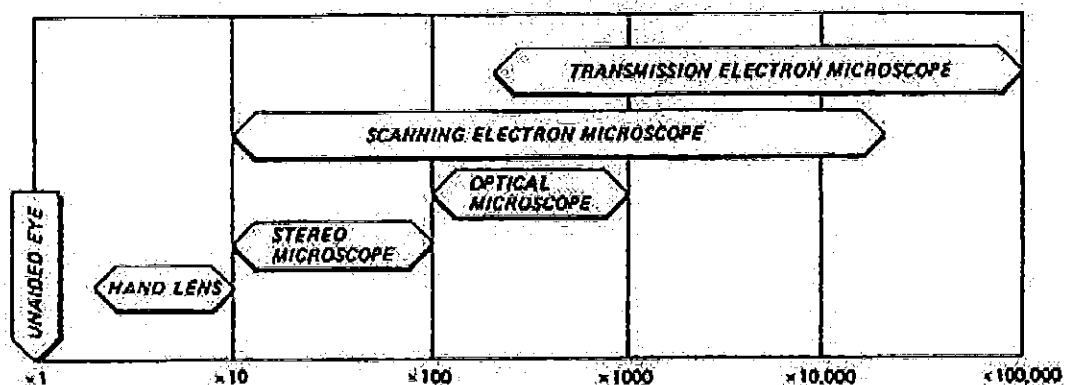
พลังงานพื้นผิวที่ขอบเกรนลดลงอย่างมาก จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและความเหนียวลดลงอย่างมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องอยู่ในภาวะที่มีอุณหภูมิการใช้งานสูงและเกิดออกซิเดชันได้ง่ายก็จะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน การเลือกวัสดุเพื่อการใช้งานที่ถูกต้องจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เช่น นิกเกิลอัลลอย เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและมีบรรยากาศที่เกิดออกซิเดชัน เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว การใช้งานของโลหะที่ต้องอยู่ในสภาวะการกัดกร่อนสูงก็มีโอกาสเกิดการแตกหักตามขอบเกรนได้เช่นเดียวกัน หากเกิดการผุกร่อนที่บริเวณขอบเกรน [6]

2.6 เทคนิคการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหัก (Fractography technique)

กระบวนการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักในวัสดุจำพวกโลหะนั้น นิยมใช้กล้องกำลังขยายขนาดต่างๆ สำหรับการตรวจสอบชิ้นงาน โดยเริ่มคั้นนั้นเราต้องเก็บรักษาชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบไม่ให้เกิดสนิมหรือเกิดออกไซด์ที่ผิว อีกทั้งระมัดระวังไม่ให้ผิวชิ้นงานที่แตกหักเกิดการกระทบกระแทกกันเพราะจะทำให้ข้อมูลที่ตรวจสอบได้ผิดพลาดจากความเป็นจริง เราควรทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอุปกรณ์ทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaning) จากนั้นล้างด้วยอะซิโตน แล้วเป่าให้แห้งเพื่อทำการตรวจสอบในขั้นต่างๆต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักนั้น มีความละเอียดแตกต่างกันตามกำลังขยายที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.19 การตรวจสอบผิวการแตกหักที่หยาบหรือมีขนาดใหญ่จะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือเราอาจใช้แว่นขยายหรือกล้องสเตอริโอเพื่อช่วยในการตรวจสอบในขั้นต้นได้ ส่วนการตรวจสอบในระดับจุลภาคนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope: OM) เพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่มีกำลังขยายสูงเพื่อตรวจสอบสภาพพื้นผิวการแตกหักโดยสามารถตรวจสอบประเภทของการแตกหักจากลักษณะรอยแตกในระดับจุลภาค ซึ่งจะสามารถเชื่อมโยงกับโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานนั้นๆ และหากต้องการความละเอียดในการวิเคราะห์มากขึ้น เช่น การเรียงตัวของโครงสร้างผลึก ขนาดความยาวของโครงสร้างผลึก

การใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) จะสามารถให้ข้อมูลที่ละเอียดได้ แต่จะมีความยุ่งยากในการเตรียมชิ้นงานและในขั้นตอนการตรวจสอบพอสมควร [6]



รูปที่ 2.18 การใช้เครื่องมือในการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักในช่วงกำลังขยายต่างๆ

ที่มา: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/MechmetLab/Th/08_Fractography_th.

2.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

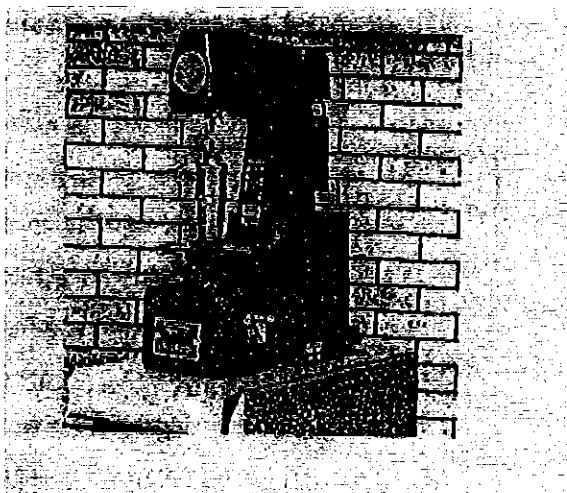
เป็นการวัดความต่อต้านของโลหะที่จะต้องเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) การทดสอบความแข็งของวัสดุนั้นใช้วิธีกดวัตถุที่มีลักษณะแข็งกว่า เช่น เหล็กแข็ง ทังสเตนคาไบด์ เพชร เป็นต้น โดยทำเป็นรูปต่างๆกัน เช่น ทำเป็นรูปกลม พีระมิด โค่น หรือกรวย เมื่อกดตัวกด (Indenter) ลงไปในวัสดุที่ทดสอบเป็นมุม 90 องศา ลงไปอย่างช้าๆแล้ววัดรอยกดที่เกิดขึ้น โดยการเลือกหัวกดนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างหัวกดและน้ำหนักที่ใช้ ความแข็งของโลหะจะมีค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุนั้น [7]

การวัดหาความแข็งเป็นการทดสอบที่ง่ายและผู้ทดสอบไม่ต้องมีความชำนาญมากนักเพราะเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความแข็งจะช่วยให้ได้มากและจะทราบผลได้อย่างรวดเร็ว

การตรวจสอบความแข็งมีหลายวิธี เช่น

1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness test)
2. การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell hardness test)
3. การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker hardness test)
4. การทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore hardness test)

แต่ในที่นี้จะขอก้าวโดยละเอียดเฉพาะการทดสอบแบบร็อกเวล (Rockwell hardness test)



รูปที่ 2.19 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล

ที่มา: ขวลิต เชียงกุล . (2547). โลหะวิทยา. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)

การทดสอบแบบร็อกเวลนี้วัดได้จากความลึกที่ปรากฏบนผิวทดสอบ อันเกิดจากการกดของหัวกด (Indenter) มาตรฐาน และวัดความแข็งของชิ้นงานได้หลายสเกล เช่น สเกล A, B, C, D, E, F, G, H, K และ L เป็นต้น แต่มีการวัดบางสเกลเท่านั้นที่นิยมใช้ ซึ่งสเกลเหล่านั้น คือ สเกล C และ สเกล B

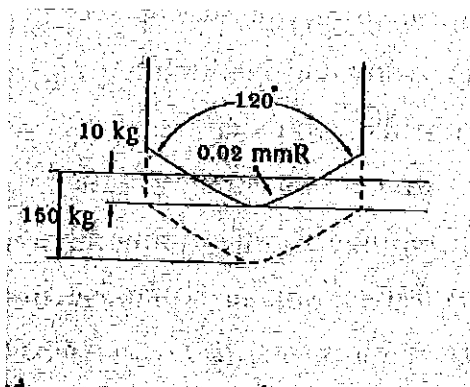
1) การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล C (HRC) ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็ง โดยการใช้หัวกดรูปทรงกรวยทำด้วยเพชรมีมุมยอดเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส

2) การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล B (HRB) ใช้วัดความแข็งของเหล็กกล้าทั่วไปโดยใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 และ 1/2 นิ้ว

สำหรับแรงกดที่ใช้ในการกดหัวนั้นจะประกอบด้วยแรง 2 แรงคือ แรงกดนำ (Minor Load) และแรงกดตาม (Major load)

แรงกดนำ หมายถึง แรงที่ใช้กดให้หัวกดสัมผัสผิวทดสอบ แรงกดนำนี้จะมีขนาดไม่มากนัก โดยจะมีขนาดผิวเพียง 10 กิโลกรัม เท่านั้น

แต่สำหรับแรงกดตามนั้นหมายถึง แรงที่ใช้ในการกดหัวกดเพื่อให้เกิดรอยกดบนผิวทดสอบจะมีขนาดเท่ากับ 140 กิโลกรัม ขนาดของแรงกดนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 2.20 ขนาดของแรงกดที่กระทำต่อผิวทดสอบ

ที่มา: ขวลิขิต เชียงกุล . (2547). โลหะวิทยา. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)

ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล การทดสอบความแข็งวิธีนี้มีขั้นตอนการปฏิบัติที่ไม่ซับซ้อนสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย ดังนี้

- 1) วางชิ้นงานลงบนแป้นทดสอบกดหัวลูกบอลลงบนผิวทดสอบด้วยแรงกดนำ 10 กิโลกรัม จากนั้นตั้งนาฬิกาที่เครื่องไปที่เลขศูนย์
- 2) ตั้งแรงกดตามชนิดของโลหะที่ทำการทดสอบ โดยการดูจากตารางแรงกดแล้วลบด้วยแรงกดนำ ซึ่งแรงกดเพิ่มนี้จะทำให้หัวลูกบอลกดบนชิ้นงานทดสอบ
- 3) นำแรงกดเพิ่มออกทำให้เหลือแรงกดนำแต่เพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นเข็มนาฬิกายกกลับและหยุด เราจึงอ่านค่าความแข็งที่ตำแหน่งเข็มนาฬิกานั้นหยุดอยู่ ซึ่งอ่านได้อ่านค่าดังนี้ เช่น 40 HRC หมายถึงความแข็งแบบร็อกเวล 40 ด้วยสเกล C และ 85 HRB หมายถึง ความแข็งแบบร็อกเวล 85 ด้วย สเกล B

การทดสอบความแข็งวิธีนี้มีหลักการทดสอบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

- 1) ควรตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องด้วยแท่งทดสอบ (Test block) ทุกครั้งก่อนการทำงาน
- 2) ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรทำความสะอาดและขนานกันสองด้าน
- 3) รอคคบนผิวทดสอบควรห่างกันอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร
- 4) ควรวัดค่าความแข็งอย่างน้อย 3 จุด แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย จะได้เป็นค่าความ แข็ง ที่ถูกต้อง
- 5) ค่าความแข็งที่อ่านได้บนสเกลเป็นค่าที่นำไปใช้ได้เลยจึงมีความรวดเร็วในการทดสอบ
- 6) ชิ้นงานที่ทำการทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของรอยกดบนผิวทดสอบ

ตารางที่ 2.4 การเลือกใช้แรงกดที่เหมาะสมกับหัวกดและโลหะที่ต้องการทดสอบ

สเกล	แรงกดตาม	ชนิดของหัวกด	ชนิดของวัสดุที่ต้องการทดสอบ
A	60	หัวเพชร	โลหะคาร์ไบด์ต่างๆ และวัสดุที่มีความแข็งสูง
B	100	1/16" ลูกบอล	เหล็กกล้าคาร์บอน, ทองเหลือง และวัสดุที่ความแข็งปานกลาง
C	100	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็ง และโลหะผสมที่ผ่านการชุบแข็ง
D	100	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งผิว
E	100	1/8" ลูกบอล	เหล็กหล่อ, อะลูมิเนียมผสมและแมกนีเซียมผสม
F	60	1/16" ลูกบอล	ทองเหลืองและทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน
G	150	1/16" ลูกบอล	เบรลล์ผสมทองแดง, บรอนซ์
H	60	1/8" ลูกบอล	อะลูมิเนียมแผ่น
K	150	1/8" ลูกบอล	เหล็กหล่อ, อะลูมิเนียมผสม
L	60	1/4" ลูกบอล	ตะกั่ว, พลาสติก, วัสดุอ่อนอื่นๆ
M	100	1/4" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
P	150	1/4" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
R	60	1/2" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
S	100	1/2" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L
V	150	1/2" ลูกบอล	เหมือนกับสเกล L

ที่มา: ขวาลิต เชียงกุล . (2547). โลหะวิทยา. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 ลำรวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

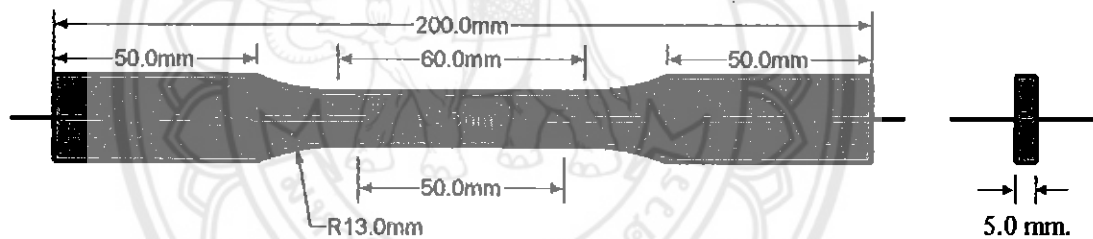
- 3.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาค และการศึกษาโครงสร้างจุลภาค
- 3.1.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับมาตรฐานการทดสอบแรงดึง
- 3.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการอบอ่อน

3.2 การเตรียมชิ้นงาน

ในการทดสอบจะใช้เหล็ก AISI 1010

- เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM – A370 ดังรูปที่ 3.1

จำนวน 12 ชิ้น



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่ใช้ทดสอบแรงดึง
ที่มา: มาตรฐาน ASTM - A370

3.3 การอบอ่อน

แบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 6 ชิ้น

- กลุ่มที่ 1 ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- กลุ่มที่ 2 ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 240 นาที

3.4 การตรวจสอบขนาดของเกรน (Grain size)

ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

3.4.1 เตรียมชิ้นงานโดยการนำชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 กลุ่มละ 1 ชิ้น ตัดด้วยเลื่อยตัดเหล็กให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร

3.4.2 นำชิ้นงานทั้ง 2 กลุ่ม ที่ตัดแล้วมาหล่อเรซิน

3.4.3 จัดให้ผิวของชิ้นงานมีความเรียบ เป็นมันโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.4.4 นำชิ้นงานทดสอบมาขัดด้วยอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน

3.4.5 นำชิ้นงานมากัดกรดด้วยสารละลายไนตอล ความเข้มข้น 3% เป็นเวลา 10-15 วินาที จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาด และเป่าให้แห้งทันที

3.4.6 นำชิ้นงานทดสอบไปตรวจดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

3.4.7 ถ่ายรูปและบันทึกข้อมูล

3.4.8 นำรูปถ่ายที่ได้ไปคำนวณหาขนาดเกรนเฉลี่ยโดยใช้วิธี Mean Linear Intercept

3.4.9 จากภาพถ่ายเราจะสามารถนำไปคำนวณหาขนาดเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไม่สมบูรณ์ในแต่ละช่วงเวลา (30 นาที และ 240 นาที) ได้จากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ตามลำดับ

$$G = -10.00 - 6.60 \log L_3$$

$$L_3 = L_T / PM$$

เมื่อ L_T คือ ขนาดของเส้นรอบวงที่นำมาหาจุดตัดขอบเกรน

P คือ จำนวนจุดตัด

M คือ กำลังขยายของภาพ

L_3 คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของจุดตัด

G คือ หมายเลขขนาดของเกรน

3.4.10 ทำวงกลมบนรูปถ่ายขนาดเกรนที่ได้จากการทดลอง นับจุดตัดที่เส้นขอบวงกลมตัดกับขนาดเกรน วัดขนาดของเส้นรอบวงที่ใช้ในการนับขนาดเกรน

3.4.11 นำค่าต่างๆ ไปคำนวณเพื่อให้ได้ค่า G ซึ่งสามารถนำไปเทียบค่าได้จากตารางที่ 2.2 ตามมาตรฐาน ASTM Standard E112 เพื่อหาขนาดเกรนเฉลี่ย

3.5 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

3.5.1 การทดสอบแรงดึง

นำชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 กลุ่มละ 5 ชิ้น ทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine ที่ความเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที ค้างขั้นตอนต่อไปนี

3.5.1.1 หาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ

3.5.1.2 ทำเครื่องหมายชิ้นงานค่อจากตำแหน่งหัวจับเป็นระยะทุกๆ 6 มิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางชิ้นงาน

3.5.1.3 เตรียมจับหัวจับให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ยึดปลายชิ้นงานทดสอบกับหัวจับให้แน่นทั้งสองด้าน พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดส่วนยืด

3.5.1.4 เดินเครื่องออกแรงดึงจนกระทั่งการยืดตัวถึงจุดครากให้นำเครื่องมือวัดส่วนยืดออกจากชิ้นงานตัวอย่าง (ที่จุดครากจะมีเสียงเตือนที่เครื่องมือทดสอบ) และเดินเครื่องจนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน

3.5.1.5 นำชิ้นงานที่ขาดออกจากกันมาต่อให้แนบสนิท แล้ววัดระยะยืด โดยทำการวัดระยะความยาวพิคคที่ทำการขยายไว้

3.5.2 การทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 กลุ่มละ 1 ชิ้น ทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลสเกล B ค้างขั้นตอนต่อไปนี

3.5.2.1 วางชิ้นงานลงบนแท่นรองรับชิ้นงานแล้วเคลื่อนชิ้นงานให้สัมผัสกับหัวกด

3.5.2.2 กำหนดน้ำหนักแรงกดที่หัวกดแล้วทำการกดนานประมาณ 10 วินาที

3.5.2.3 นำชิ้นงานออกจากหัวกด

3.5.2.4 นำชิ้นงานที่ผ่านการกดแล้วไปวัดรอยกด เมื่อได้ขนาดแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณ

3.5.2.5 การหาค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ละชิ้นจะต้องทำทดสอบความแข็งขึ้นละ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยทำการวัดค่าที่บริเวณผิวชิ้นงาน

3.6 การตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ที่ผ่านการทดสอบแรงดึงกลุ่มละ 1 ชิ้น มาทำการตรวจสอบลักษณะความเสียหายบริเวณรอยขาด

บทที่ 4

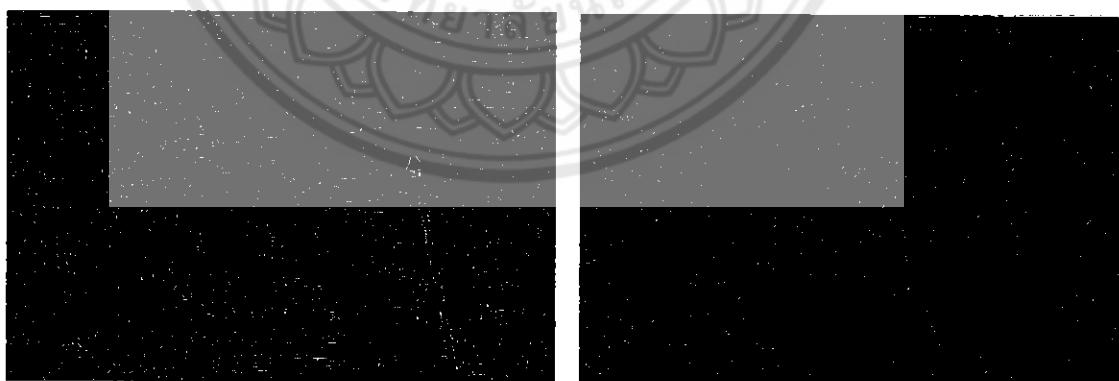
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อนำเหล็กกล้า AISI 1010 ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที สำหรับชิ้นงานกลุ่มที่ 1 จำนวน 6 ชิ้น และ 240 นาที สำหรับชิ้นงานกลุ่มที่ 2 จำนวน 6 ชิ้น จากนั้นทำการตรวจสอบชิ้นงาน ซึ่งมีผลการตรวจสอบดังนี้

- 1) ผลการตรวจสอบขนาดของเกรน (Grain size) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง
- 2) ผลการทดสอบความแข็ง
- 3) ผลการทดสอบแรงดึง
- 4) ผลการตรวจลักษณะความเสียหายจากแรงดึงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1 ผลการตรวจสอบขนาดของเกรน (Grain size)

เมื่อทำการตรวจสอบเหล็กคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1010 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงเพื่อทำการตรวจสอบขนาดเกรนที่ได้จากการอบอ่อน ที่ระยะเวลาต่างกัน ผลการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที และ 240 นาที เป็นดังรูปที่ 4.1 (ก) และ รูปที่ 4.2 (ข) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าชิ้นงานทั้ง 2 มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไรต์



(ก)

เฟอร์ไรต์

(ข)

เฟอร์ไรต์

รูปที่ 4.1 ภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 500 เท่า

(ก) ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที และ

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 240 นาที

จากภาพถ่ายเราจะสามารถนำไปคำนวณหาขนาดเกรนของในแต่ละช่วงเวลา (30 นาที และ 240 นาที) ได้จากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ตามลำดับ

$$G = -10.00 - 6.60 \log L_3$$

$$L_3 = L_T / PM$$

ซึ่งจะได้ค่าขนาดเกรนดังตารางที่ 4.1 โดยแสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ง.

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าขนาดของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ 240 นาที

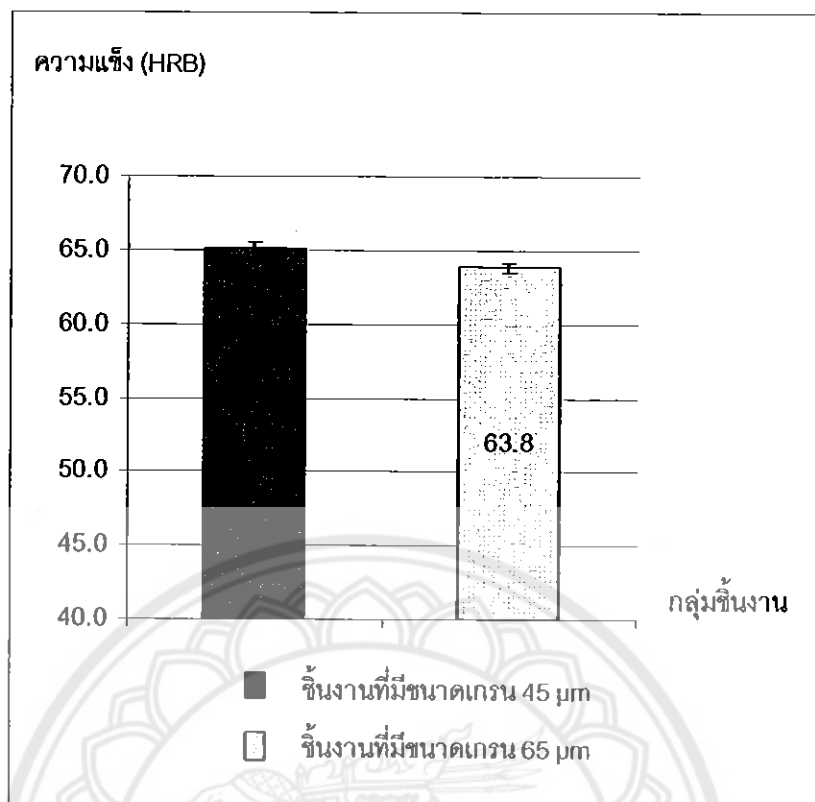
ช่วงเวลาในการอบ (นาที)	ASTM No.	Grain/mm. ²	Grain/mm. ³	Average grain Diameter (μm)
30	6	496	8842	45
240	5	248	3126	65

จากตารางที่ 4.1 ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาทีจะมีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 240 นาที ซึ่งมีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm จะเห็นว่าขนาดเกรนชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเป็นเวลา 240 นาที เป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากันชิ้นงานที่ใช้เวลาการอบที่นานกว่าจึงทำให้เกรนมีขนาดโตกว่า [4]

4.2 ผลการทดสอบความแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งของเหล็กคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1010 ที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ 65 μm ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm มีค่าความแข็งเฉลี่ย 65.2 HRB ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 63.8 HRB

สอดคล้องตามทฤษฎี นั่นคือ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเล็กกว่าจะมีค่าความแข็งที่มากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนใหญ่กว่า [3]



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

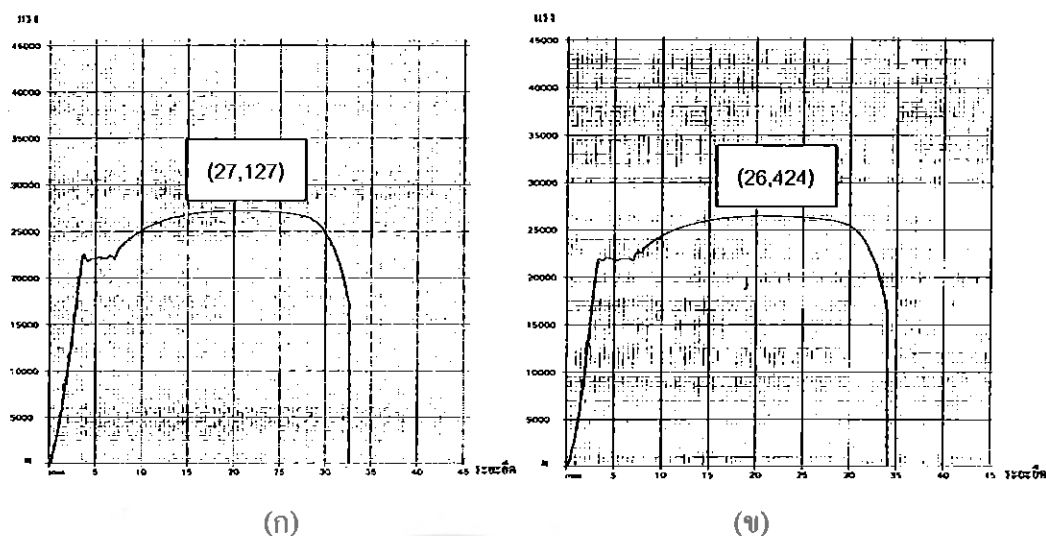
4.3 ผลการทดสอบแรงดึง

จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1010 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทดสอบทั้งหมดจำนวน 10 ชิ้น แบ่งเป็น 2 กลุ่มตามขนาดเกรน ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm จำนวน 5 ชิ้น

กลุ่มที่ 2 ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm จำนวน 5 ชิ้น

ตัวอย่างผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะ ได้ค่าแรงดึงสูงสุดและค่าระยะยืดของชิ้นงาน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อน

(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ

(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

จากกราฟจะได้ค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum tensile force) ของแต่ละกลุ่มแสดงดังตาราง ข.1 ในภาคผนวก ข. ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm มีค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดที่ทนได้เท่ากับ 27,127 นิวตัน และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm มีค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดที่ทนได้เท่ากับ 26,424 นิวตัน

และค่าเฉลี่ยระยะการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบ แสดงดังตาราง ข.2 ในภาคผนวก ข. ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm มีค่าเฉลี่ยระยะการยืดตัวของชิ้นงานเท่ากับ 32.24 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm ที่มีค่าเฉลี่ยระยะการยืดตัวของชิ้นงานเท่ากับ 31.42 มิลลิเมตร

ค่าแรงดึงสูงสุดและระยะการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากกราฟจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength), ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) และค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ได้ดังนี้

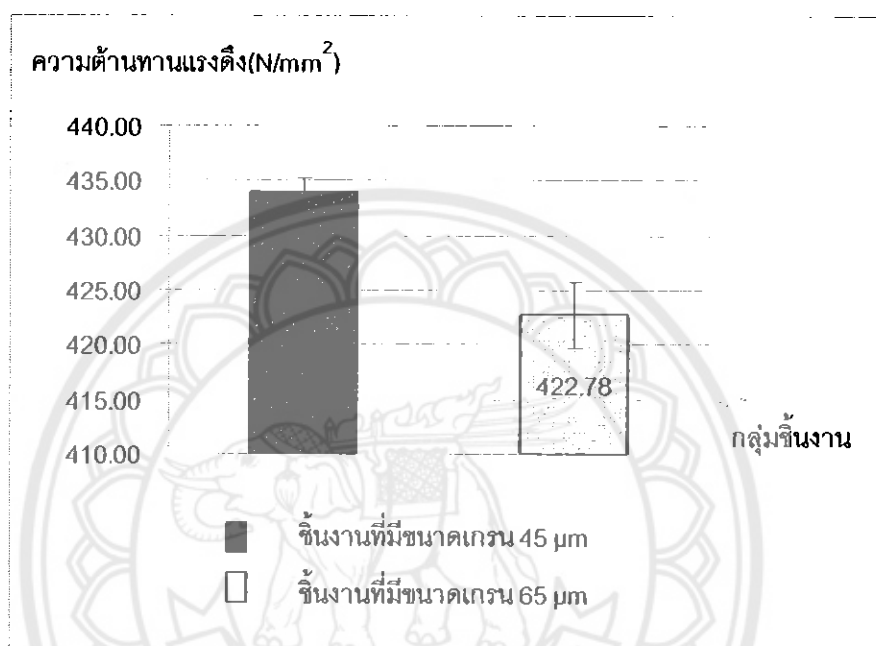
4.3.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

- ค่าความต้านทานแรงดึงหาได้จากการนำค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด มาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึง ตามสมการที่ 2.8

$$\sigma = F / A$$

ได้ค่าความต้านทานแรงดึงแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm จะมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 434.03 N/mm^2 มากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 422.78 N/mm^2

แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm มีค่าความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm



รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

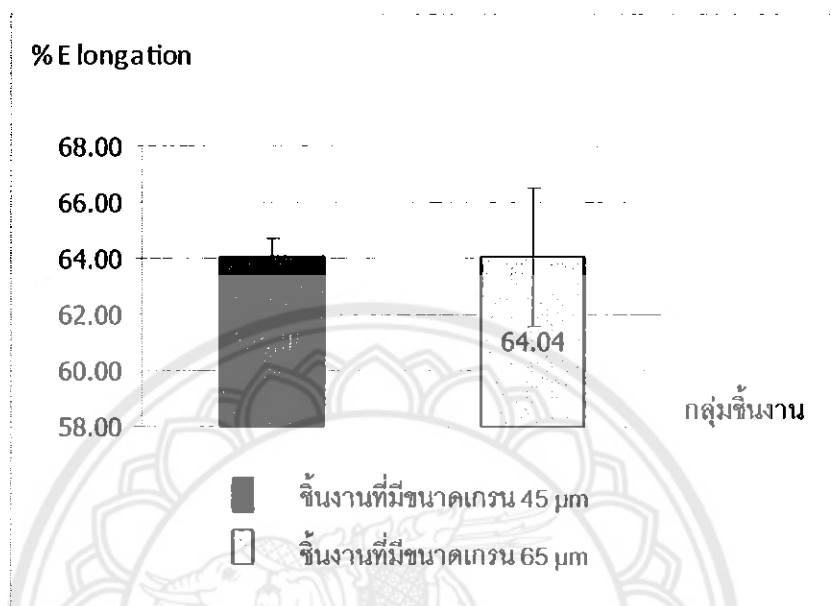
4.3.2 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation: % El)

- เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation) ของวัสดุ สามารถคำนวณค่าได้จากสมการที่ 2.4

$$\%El = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\%$$

ค่าที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.5 ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ย 64.08 ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ย 64.04 เล็กน้อยในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน เปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (Percentage elongation) สูง ก็สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย [5]

จากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ได้ สรุปได้ว่าชิ้นงานทั้งสองช่วงเวลาคัดสอบมีค่าความเหนียวที่ดี แต่ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm มีค่าความเหนียวที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

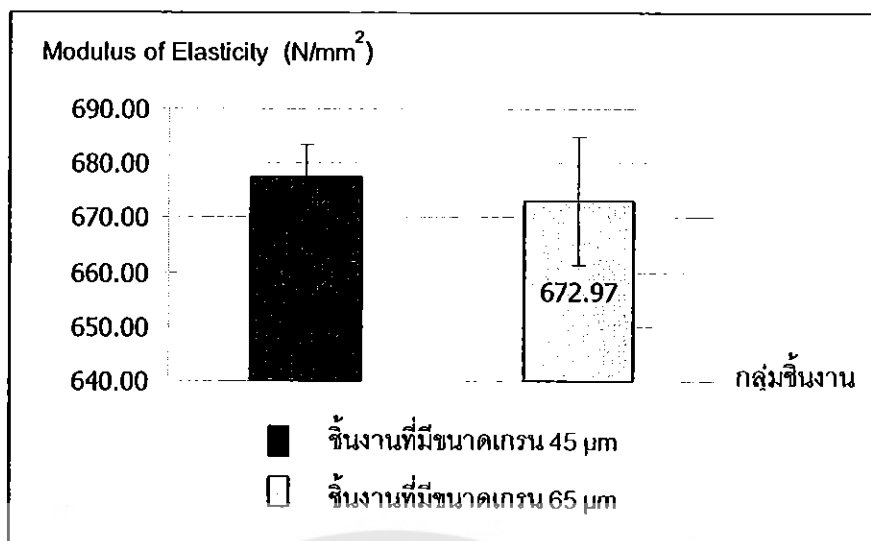
4.3.3 โมดูลัสของความยืดหยุ่น (E) หรือ โมดูลัสของยัง หรือ ความตึง (Stiffness)

- ค่า Modulus of elasticity สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L}$$

ค่าที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm จะมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ย 677.33 N/mm^2 มากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm ที่มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ย 672.97 N/mm^2

แสดงถึงความสามารถในการคงรูปของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm มีค่าความสามารถคงรูปใกล้เคียงกับชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 µm และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 µm

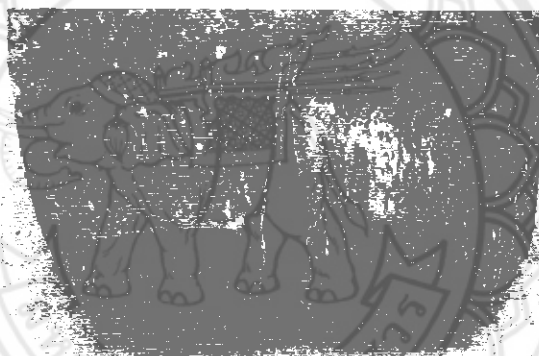
จากค่าแรงดึงสูงสุดและค่าระยะยืดตัวของชิ้นงานทั้งสองกลุ่มซึ่งมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองแตกต่างกันไม่มากนัก อาจเนื่องมาจากขนาดเกรนที่ได้จากการทดลองทั้งสองกลุ่มทดสอบ มีค่าแตกต่างกันไม่มากพอที่จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเกิดความแตกต่างกันอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 µm จะมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 µm เล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายตามทฤษฎีได้ว่าเกรนที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความแข็งแรงมากกว่าเกรนที่มีขนาดใหญ่ เพราะขอบเกรน (Grain boundary) จะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนตัวของดิสโลเคชัน ทำให้เกิดการทับถมของดิสโลเคชันบนระนาบการเลื่อน (slip plan) ใกล้เคียงกับขอบเกรน (Grain boundary) ถ้าจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ต่อไปก็ต้องใช้แรงมากขึ้น ถ้าโลหะมีขนาดของเกรนเล็ก นั่นคือมีขอบเกรน (Grain boundary) มาก ก็จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันยากขึ้น หรือต้องใช้ความเค้นสูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้น โลหะที่มีเกรนละเอียดก็就会有ความแข็งแรงสูงกว่าเกรนที่หยาบกว่า [3]

4.4 ผลการตรวจลักษณะความเสียหายจากแรงดึง

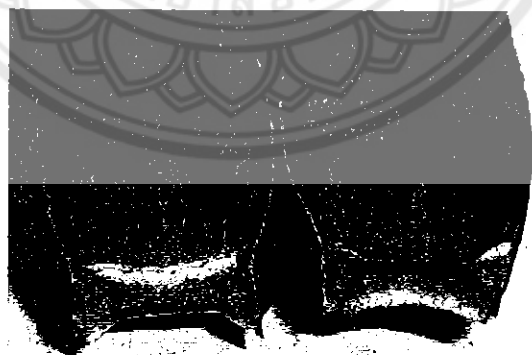
ผลการตรวจสอบเหล็ก AISI 1010 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทั้งหมดจำนวน 2 ชิ้น คือ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

4.4.1 ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนต่างกันทั้งสองชิ้น แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยภาพ 4.7 (ก) เป็นภาพถ่ายชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ 4.7 (ข) เป็นภาพถ่ายชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm จากภาพการแตกหักเกิดบริเวณความยาวกำหนด (Gage length) พบว่าลักษณะการแตกหักที่เกิดขึ้นของชิ้นงานทดสอบทั้งสองกลุ่มมีการแตกหักเป็นแบบถ้วยและกรวย (cup and cone) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบหลังทดสอบแรงดึง

(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ

(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

4.4.2 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

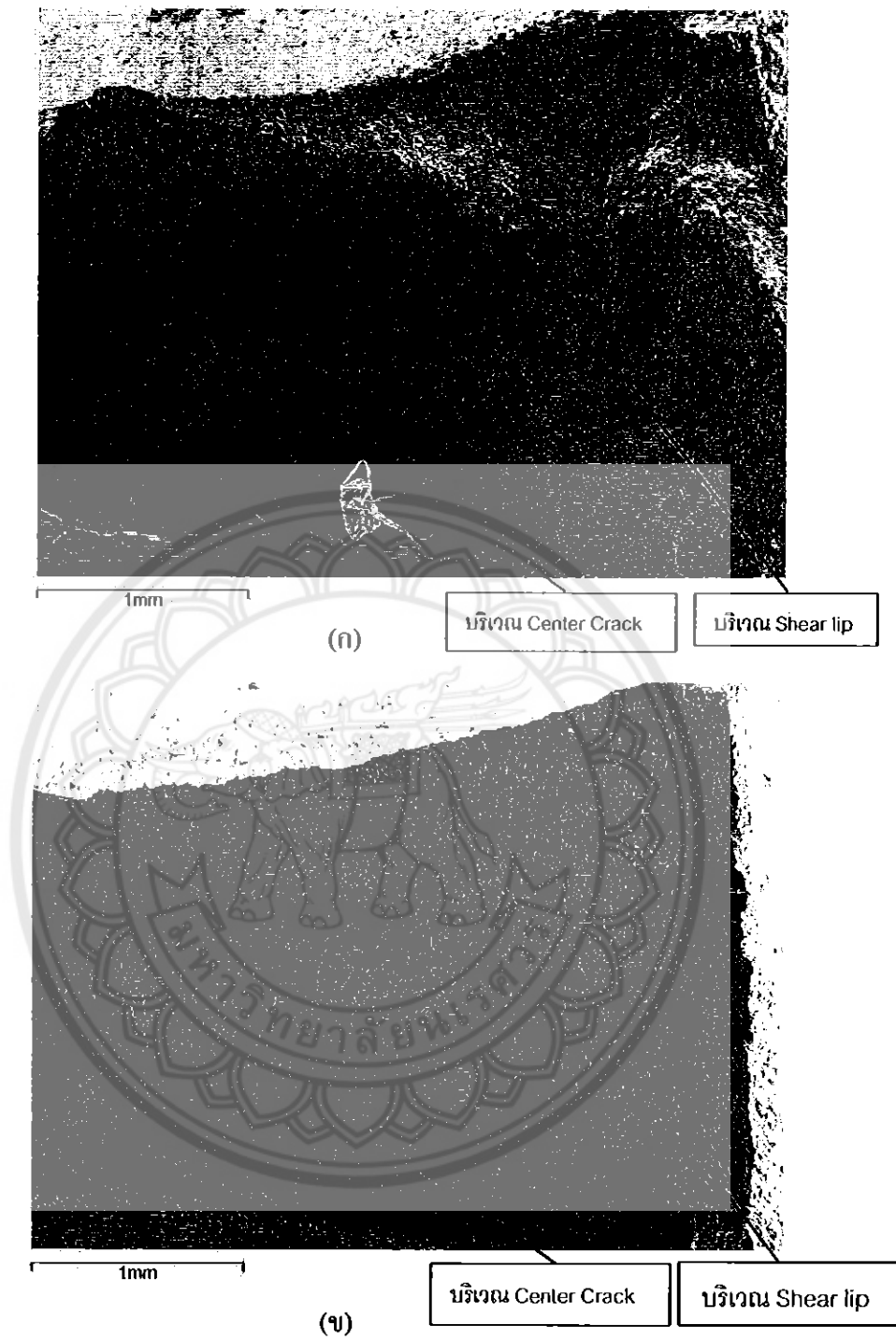
เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากรูปที่ 4.8 - 4.10 ซึ่งเป็นภาพถ่ายแสดงบริเวณโดยรวมของรอยขาด (Over all), บริเวณกลางรอยขาด (Center crack) และบริเวณขอบรอยขาด (Shear lip) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.8 (ก) และ (ข) เป็นภาพบริเวณโดยรวมของรอยขาด (Over all) ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ 65 μm

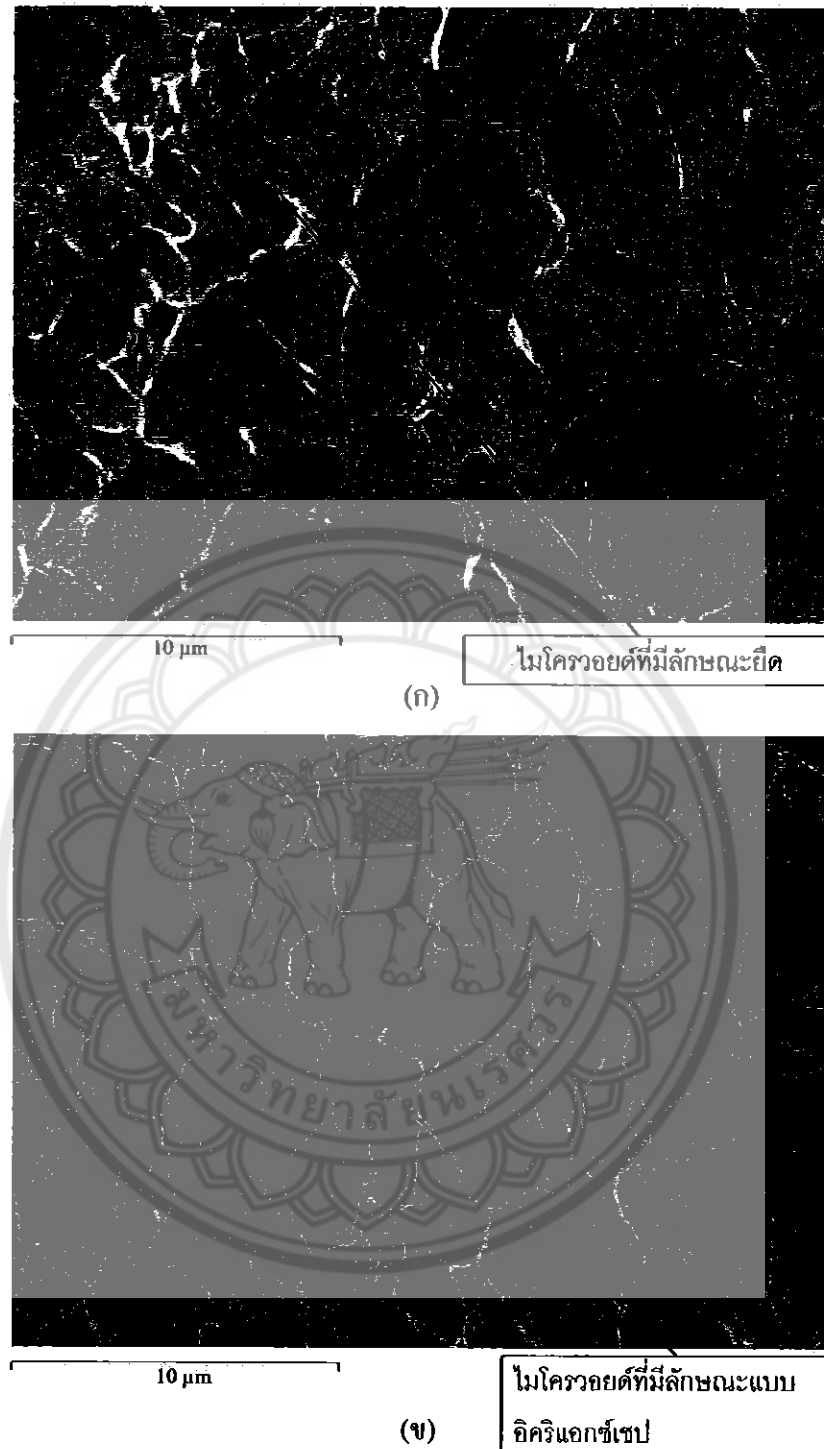
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นรูปถ่ายแสดงลักษณะความเสียหายที่เกิดจากแรงดึงบริเวณกลางรอยขาด (Center crack) พบว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm ส่วนใหญ่จะมีลักษณะไมโครรอยด์ลักษณะบิดเบี้ยวคละกัน และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm ลักษณะไมโครรอยด์ส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะกลมๆ เรียกว่า อีกริแอคชั่นเซป ทำการเปรียบเทียบภาพทั้งสองพบว่า ขอบไมโครรอยด์ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm จะมีการขีดตัวมากกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะของการเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ที่ดีกว่า

จากทฤษฎี ชิ้นงานที่พบไมโครรอยด์ที่มีลักษณะแบบหลุมกลมในผิวรอยแตกหักเป็นชิ้นงานที่ผ่านการรับแรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับชิ้นงาน [6] ทำให้คาดได้ว่าชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm มีการรับแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับชิ้นงาน และชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm จะมีทิศทางการรับแรงที่ไม่ตั้งฉากกับชิ้นงาน

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.10 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นรูปถ่ายแสดงลักษณะความเสียหายที่เกิดจากแรงดึงบริเวณขอบรอยขาด (Shear lip) ทำการเปรียบเทียบภาพทั้งสองพบว่า ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ 65 μm มีลักษณะไมโครรอยด์บิดเบี้ยวคละกันไปเช่นเดียวกัน เป็นผลมาจากลักษณะแรงของรอยแตกจากบริเวณกลางรอยขาด (Center crack) ขยายตัวจนถึงบริเวณขอบรอยขาด (Shear lip) จนเกิดการฟอร์มตัวของระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ซึ่งมีระนาบทำมุมกับทิศทางของแรงที่มากระทำประมาณ 45 องศา โดยประมาณ รอยแตกนี้เชื่อมต่อกันจนทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักในที่สุด แสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้มีการขีดตัวของชิ้นงานสูง เป็นไปตามทฤษฎีการแตกหักแบบเหนียว [6]



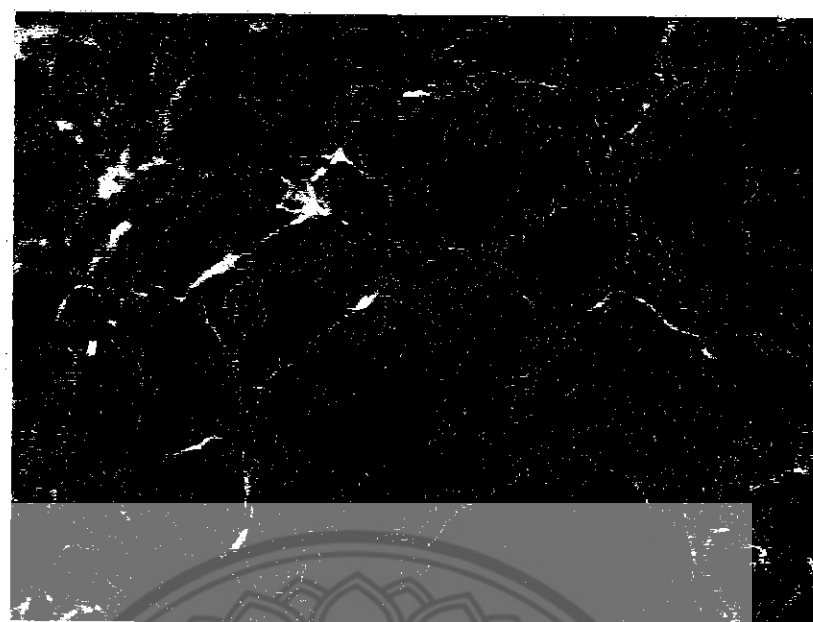
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักบริเวณโดยรวมของรอยขาด (Over all)
 ที่กำลังขยาย 100 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 (ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ
 (ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักบริเวณกลางรอยขาด (Center crack) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ

(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

10 μm

อินคลูชันในปริมาณที่สูง

(ก)

10 μm

(ข)

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวการแตกหักบริเวณขอบรอยขาด (Shear lip)

ที่กำลังขยาย 5000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ

(ข) ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

บทที่ 5

สรุปผลโครงการ

จากการศึกษาเรื่อง ผลของขนาดเกรนของเหล็ก AISI 1010 ที่มีต่อลักษณะความเสียหายจากแรงดึง ทำให้สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าเกรด AISI 1010 ไปอบอ่อนแบบไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ 240 นาที เพื่อสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเกรนที่ต่างกัน จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่อบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที ได้ขนาดเกรนเฉลี่ย $45\ \mu\text{m}$ และชิ้นงานที่อบอ่อนเป็นเวลา 240 นาที ได้ขนาดเกรนเฉลี่ย $65\ \mu\text{m}$

เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งและแรงดึง จะได้ผลการทดสอบสรุปได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย $45\ \mu\text{m}$ และ $65\ \mu\text{m}$ มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดเกรนที่ได้ยังมีความแตกต่างกันไม่มากพอ

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็งและผลการทดสอบแรงดึง

การทดสอบ	ค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดสอบ	
	ขนาดเกรนเฉลี่ย $45\ \mu\text{m}$	ขนาดเกรนเฉลี่ย $65\ \mu\text{m}$
ความแข็ง (HRB)	65.2	63.8
ความต้านทานแรงดึง (N/mm^2)	434.03	422.78
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว	64.08	64.04
โมดูลัสของความยืดหยุ่น	677.33	672.97

สำหรับการตรวจสอบลักษณะความเสียหายจากแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะได้ผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าบริเวณกลางรอยขาดชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm ขอบของไมโครรอยด์ (Microvoid) จะมีการยึดตัว จากทฤษฎีทำให้คาดได้ว่าแรงที่มากระทำบริเวณไมโครรอยด์เป็นแรงดึงที่กระทำในทิศทางที่ไม่ตั้งฉากกับชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm ซึ่งมีลักษณะไมโครรอยด์เป็นหลุมกลมๆ หรือ อิกรีแอคซ์เซปแรงที่มากระทำนั้นเป็นแรงดึงที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับชิ้นงาน และบริเวณขอบรอยขาดชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ 65 μm ขอบไมโครรอยด์จะมีการยึดตัวมากเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะความเสียหายจากแรงดึงของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ลักษณะความเสียหาย	
	บริเวณกลางรอยขาด (Center crack)	บริเวณขอบรอยขาด (Shear lip)
45	ขอบไมโครรอยด์มีการยึดตัว	ขอบไมโครรอยด์มีการยึดตัวมาก
65	ไมโครรอยด์ส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะกลมๆ	ขอบไมโครรอยด์มีการยึดตัวมาก

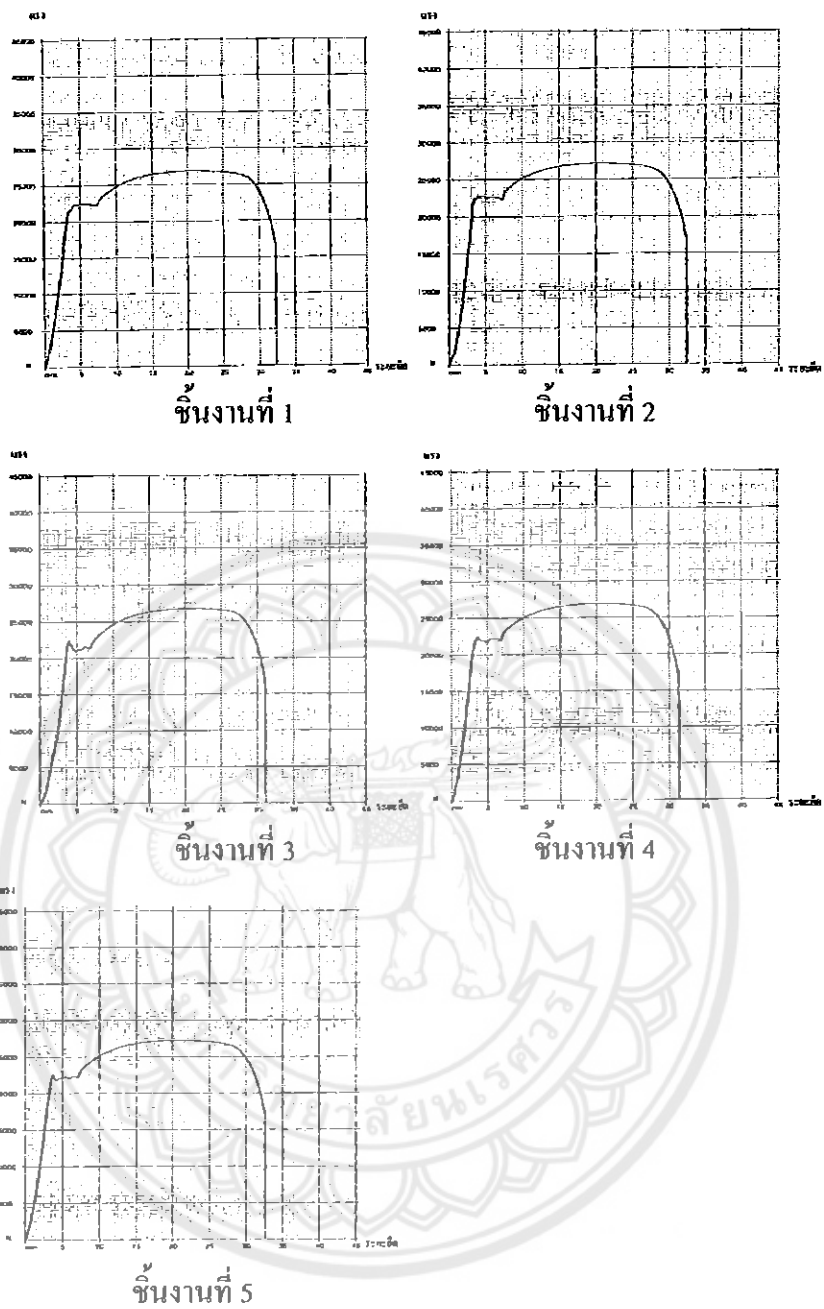
ปัญหาและแนวทางแก้ไข

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองยังไม่ชัดเจน เช่น ผลการทดสอบแรงดึงซึ่งเป็นปัญหาที่เนื่องมาจากความสามารถของเครื่องมือทดสอบ จึงไม่สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ N.Tsuchida¹, 2007. Effect of ferrite grain size on tensile deformation behavior of a ferrite-cementite low carbon steel. [8] และ Zhongyun Fan.1994. The grain size dependence of ductile fracture toughness of Polycrystalline metals and alloys. [9] ได้ หากมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้อาจทำให้สรุปผลการทดลองได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

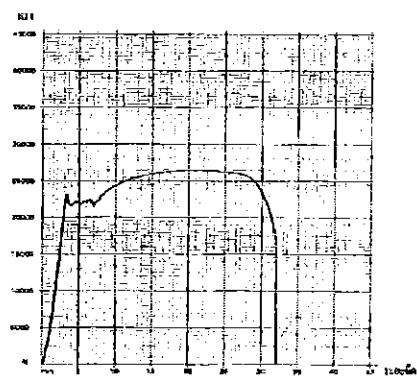
เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สติรจินดา.วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ, 2533
- [2] Effect of cold working on tensile strength, hardness, ductility and grain size.
สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2551, จาก [http://images.google.co.th/
imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/mct205/coldwork.jpg](http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://info.lu.farmingdale.edu/depts/met/mct205/coldwork.jpg)
- [3] เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชา Physical Metallurgy I, “ The grain size ” , ภาควิชา
วิศวกรรมโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] เอกสารประกอบการเรียนวิชา PRE 257 Metallurgy Laboratory II ปีการศึกษา 1/2546,
“การทดลองที่ 6 Grain Size Affect ” , ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] การทดสอบแรงดึง. สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2551, จาก [http://www.elecnet.chandra.ac.th/
learn/courses/5513101/chapter_6/tension_test.doc](http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/chapter_6/tension_test.doc)
- [6] การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก. สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2551, จาก [http://www.sut.ac.th/
engineering/metal/pdf/Mechmet\(Lab/Th/08_Fractography_th.pdf](http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/Mechmet(Lab/Th/08_Fractography_th.pdf)
- [7] ขวลิศ เชียงกุล . (พิมพ์ครั้งที่ 5). (2547). โลหะวิทยา. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี
(ไทย-ญี่ปุ่น)
- [8] N.Tsuchida^a ,2007.Effect of ferrite grain size on tensile deformation behavior of a
ferrite-cementite low carbon steel.Thesis,Ms.E., School of engineer, University of
Hyogo,2167 Shosha. Retrieved November 9, 2007. Material Science and Engineering
A 488(2008)446-452, www.elsevier.com/locate/msea .
- [9] Zhongyun Fan.1994.The grain size dependence of ductile fracture toughness of
Polycrystalline metals and alloys.Thesis, Ms.E., University of Surrey, Guildford.
Retrieved September 15, 2009. Material Science and Engineering ,
A 191(1995)73-83, www.elsevier.com/locate/msea .
- [10] ประกอบ บุญยงค์. (2524), โลหะวิทยา1. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์
ประกอบเมโทร

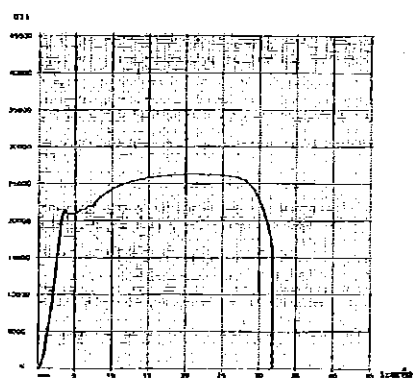




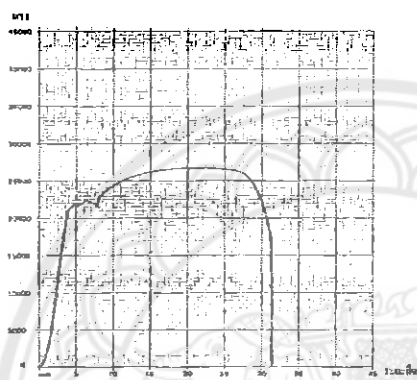
รูปที่ ก.1 ภาพกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย $45 \mu\text{m}$



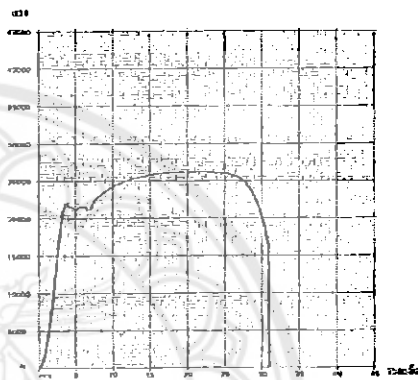
ชั้นงานที่ 1



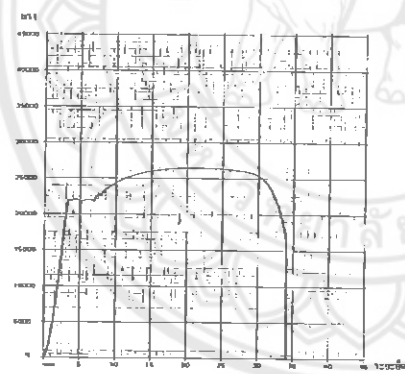
ชั้นงานที่ 2



ชั้นงานที่ 3



ชั้นงานที่ 4



ชั้นงานที่ 5

รูปที่ ก.2 ภาพกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ค่าแรงดึงสูงสุดของแต่ละชิ้นงาน (N)					เฉลี่ย	SD
	1	2	3	4	5		
45	27225	27103	27051	27195	27061	27127	78.96
65	26470	26433	26268	26711	26238	26424	189.41

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าระยะการยืดของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ระยะการยืดของชิ้นงาน (mm.)					เฉลี่ย	SD
	1	2	3	4	5		
45	32.42	32.23	31.99	31.55	32.02	32.23	0.33
65	34.04	30.89	32.05	31.81	31.30	30.89	1.22

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	ค่าความต้านทานแรงดึงแต่ละชิ้นงาน (N/mm^2)					เฉลี่ย	SD
	1	2	3	4	5		
45	435.60	433.65	432.82	435.12	432.97	434.03	1.26
65	423.52	422.93	420.29	427.38	419.81	422.78	3.03

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation) ของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)	%Elongation					เฉลี่ย	SD
	1	2	3	4	5		
45	64.84	63.98	63.10	64.04	64.46	64.08	0.65
65	68.08	64.10	63.62	62.60	61.78	64.04	2.43

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย
45 μm และ ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

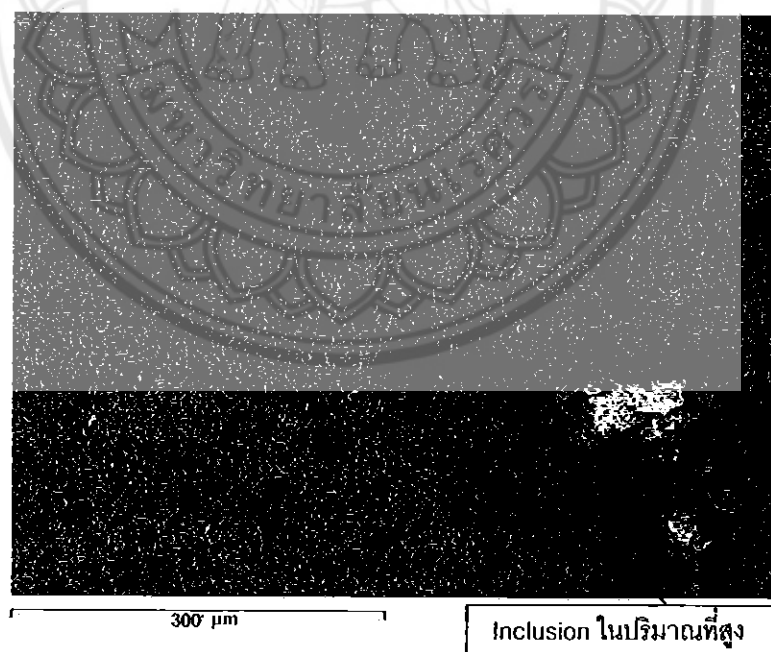
ขนาดเกรน เฉลี่ย (μm)	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (N/mm^2)					เฉลี่ย	SD
	1	2	3	4	5		
45	671.81	677.79	685.92	679.45	671.70	677.33	5.93
65	682.22	659.79	660.62	682.71	679.52	672.97	11.72







รูปที่ ข.1 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักบริเวณกลางรอยขาด (Center crack) ที่กำลังขยาย 200 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่มี ขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm



รูปที่ ข.2 แสดงพื้นที่ผิวการแตกหักบริเวณกลางรอยขาด (Center crack) ที่กำลังขยาย 200 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่มี ขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm



ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 45 μm และ
ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย 65 μm

ขนาดเกรน เฉลี่ย (μm)	ค่าความแข็งในแต่ละจุด (HRB)			เฉลี่ย	SD
	1	2	3		
45	65	65	65.5	65.2	0.28
65	64	63.5	64	63.8	0.28





การหาขนาดเกรนโดยวิธี Mean Linear Intercept

การหาขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากวิธี Mean Linear Intercept จากสมการ

$$G = -10.00 - 6.60 \log L_3 \quad (2.2)$$

$$L_3 = L_T / PM \quad (2.3)$$

เมื่อ L_T คือ ขนาดของเส้นรอบวงที่นำมาหาจุดตัดขอบเกรน
 P คือ จำนวนจุดตัด
 M คือ กำลังขยายของภาพ
 L_3 คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของจุดตัด
 G คือ หมายเลขขนาดของเกรน (ASTM No.)

- ที่ช่วงเวลาในการอบอ่อน 30 นาที

เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม(D) = 7.5 เซนติเมตร

จำนวนจุดตัด (P) = 14 จุด

กำลังขยายของภาพ (M) = 500 เท่า

$$\begin{aligned} L_3 &= (\pi D) / PM \\ &= \pi 7.5 / (14 \times 500) \\ &= 0.0034 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G &= -10.00 - 6.60 \log L_3 \\ &= -10.00 - [6.60 \log (0.0034)] \\ &= 6.32 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ ASTM No. = 6

- ที่ช่วงเวลาในการอบอ่อน 240 นาที

เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม (D) = 7.5 เซนติเมตร

จำนวนจุดตัด (P) = 10 จุด

กำลังขยายของภาพ (M) = 500 เท่า

$$\begin{aligned} L_3 &= (\pi D) / PM \\ &= \pi 7.5 / (10 \times 500) \\ &= 0.0047 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G &= -10.00 - 6.60 \log L_3 \\ &= -10.00 - [6.60 \log (0.0047)] \\ &= 5.37 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ ASTM No. = 5

