

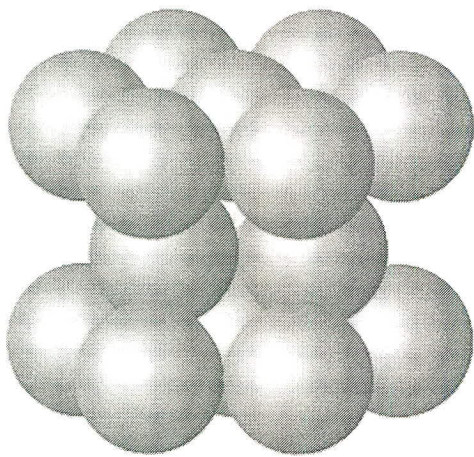
1. บทนำ

ในปี 1975 ได้มีการค้นพบธาตุไททาเนียม ซึ่งมีสมบัติเป็นโลหะ และพัฒนาธาตุดังกล่าว เพื่อนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม ไททาเนียมเป็นโลหะที่จัดอยู่ในประเภทโลหะเบา และถูกจัดอยู่ในกลุ่ม Non-ferrous โดยประมาณได้ว่ามีอยู่ถึง 0.6% ของปริมาณแร่ธาตุทุกชนิดในโลก และถือได้ว่าเป็นธาตุโลหะที่มีมากเป็นอันดับ 4 รองจาก Aluminium, Iron และ Magnesium ซึ่งในธรรมชาติเราจะพบไททาเนียมในรูปของสินแร่ 2 ชนิดคือ Ilmenite (FeTiO_3) และ Rutile (TiO_2) ซึ่งการจะแยกไททาเนียมบริสุทธิ์ออกมาจากสินแร่เหล่านี้ จำเป็นจะต้องผ่านกรรมวิธีการถลุงในรูปแบบต่างๆ โดยวิธีที่นิยมที่สุดคือกรรมวิธีที่เรียกว่า Kroll process ซึ่งใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมีในการแยกไททาเนียมออกจากวัตถุดิบ

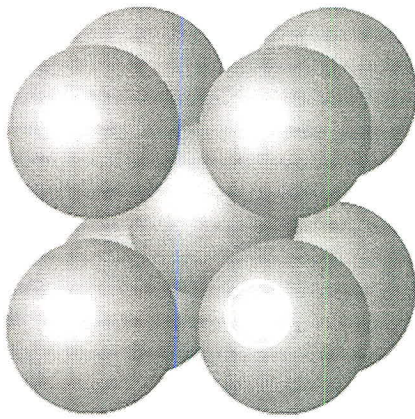
ข้อดีของโลหะไททาเนียมคือ มีความแข็งแรงสูง (High Strength) และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี (good corrosion resistance) จากสมบัติดังกล่าว ในปัจจุบันมีการนำโลหะผสมไททาเนียมมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เพิ่มขึ้นคือ

- อุตสาหกรรมในการผลิตวัสดุที่ใช้ทางการแพทย์ เช่น วัสดุฝังในของสะโพก (Hip implant) หัวเข่า (Knee Implant) และ รากฟันเทียม (Dental implant)
- อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น สปริง (Spring) แหนบ (Leaf spring) ถังน้ำมัน (Oil Tank) และระบบท่อพักไอเสีย (exhaust gas system)
- อุตสาหกรรมผลิตวัสดุอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรมอากาศยานและยานอวกาศ
- แท่นขุดเจาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาตินอกชายฝั่งทะเล (Off shore Technology)

โดยทั่วไป ไททาเนียมจะมีโครงสร้างจุลภาคแบบ Hexagonal closed pack (hcp) หรือเรียกว่า α -phase titanium และ ไททาเนียมที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบ Body centered cubic (bcc) หรือเรียกว่า β -phase titanium ตามรูปที่ 1



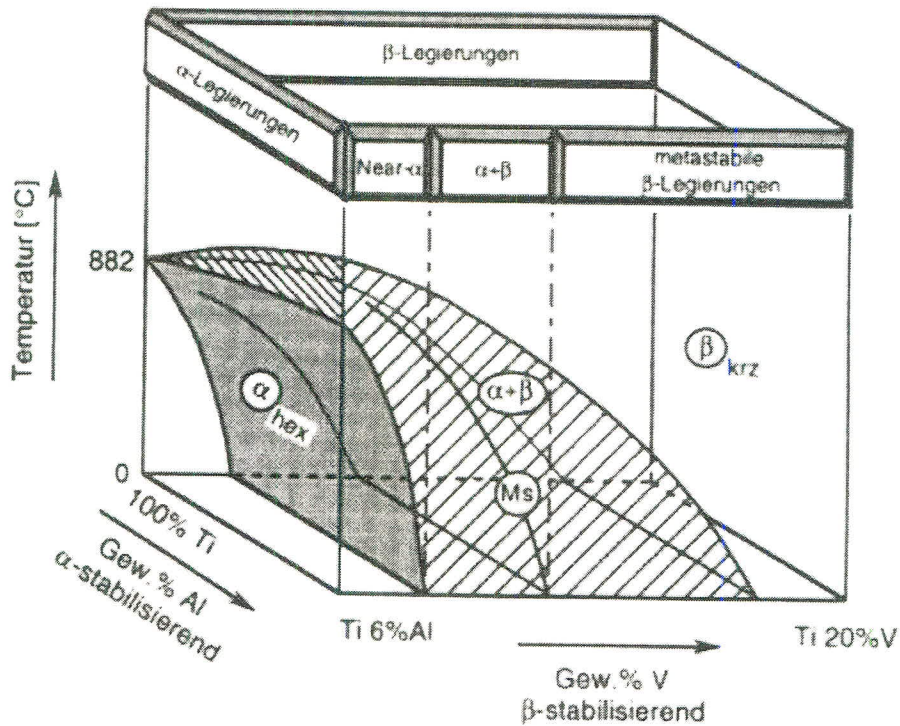
a) α -phase Titanium (hcp)



b) β -phase Titanium (bcc)

รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะไททาเนียม [1]

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ไททาเนียมจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคจากโครงสร้างแบบ α -phase titanium ไปเป็น β - phase titanium เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 882 °C เรียกการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า allotropic transition และเรียกอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสว่า Transus Temperature ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เฟสไดอะแกรมของโลหะไททาเนียม TiAl6V4 [2]

การที่โลหะไททาเนียมมีโครงสร้างทางจุลภาคดังที่กล่าวมาแล้วกล่าว จึงทำให้โลหะไททาเนียมน่าสนใจในเชิงการผลิต เพราะความสามารถในการขึ้นรูปตลอดจน ความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาคเป็นสำคัญ นอกจากลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาค (grain morphology) แล้ว ขนาดจึงมีผลสำคัญต่อสมบัติของโลหะไททาเนียมด้วย (grain size) ตามสมการของ Hall- Petch [3]

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}}$$

โดยที่ σ_y คือ Yield stress after heat treatment

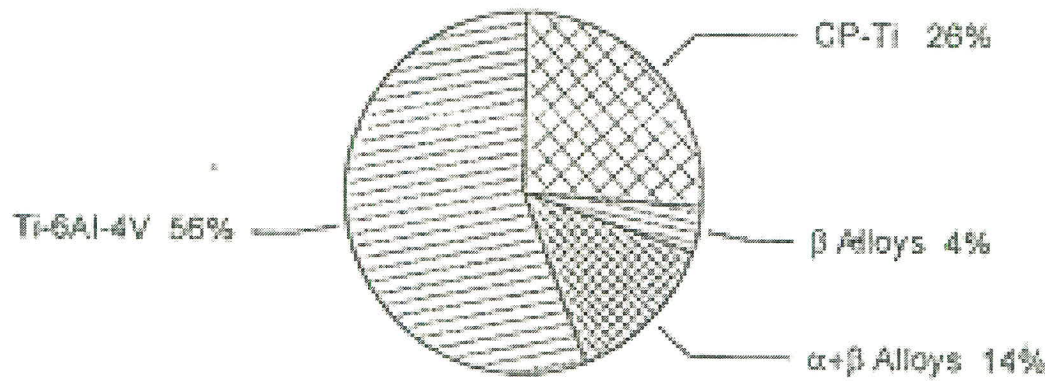
σ_0 คือ Yield stress before heat treatment

K คือ ค่าคงที่

d คือขนาดเกรน

โลหะไททาเนียมที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทออกตามลักษณะความเสถียรของเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องได้ดังนี้

- 1. CP Titanium (commercial pure) เป็นไททาเนียมที่มีส่วนผสมของอัลลอยด์น้อยมากจนเกือบบริสุทธิ์ มีโครงสร้างอะตอมแบบ Hexagonal Closed Packed (HCP) และลักษณะของเฟสจะเป็น α เฟสที่อุณหภูมิห้อง CP Titanium นิยมใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรและอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมเคมี เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ทนต่อ Corrosion ได้สูง
- 2. $\alpha + \beta$ Titanium เป็นไททาเนียมอัลลอยด์ที่มีโครงสร้างอะตอมแบบ Hexagonal Closed Pack (HCP) และลักษณะของเฟสจะเป็น $\alpha + \beta$ เฟสที่อุณหภูมิห้อง ไททาเนียมชนิดนี้มีความนิยมนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีความสมดุลในด้านคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งจะพบการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในขอบเขตของงานชิ้นส่วนอากาศยาน และอุปกรณ์ทางการแพทย์
- 3. β Titanium เป็นไททาเนียมอัลลอยด์ที่จัดอยู่ในประเภท Super alloy เนื่องจากโครงสร้าง β phase ทำให้สามารถคงคุณสมบัติในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงอย่างมากได้ ไททาเนียมอัลลอยด์ชนิดนี้จะมีโครงสร้างอะตอมแบบ Face Center Cubic (FCC) ที่อุณหภูมิห้อง โดยไททาเนียมเกรดนี้มักจะถูกใช้งานเฉพาะทาง และมีสัดส่วนการนำมาใช้งานไม่มากนัก ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ปริมาณการใช้งานของไททาเนียมอัลลอยด์ประเภทต่าง ๆ

โลหะไททาเนียมที่นิยมใช้มากที่สุดในงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ คือ Ti-6Al-4V เนื่องจาก มีความแข็งแรงสูง สามารถต้านทานการเกิดการกัดกร่อนได้ดี และสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนได้ ในโครงการวิจัยนี้จะศึกษาถึงขนาดและรูปร่างของโครงสร้างทางจุลภาค ที่เกิดจากการกระบวนการปรับปรุงสมบัติโลหะไททาเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Solid solution and annealing) อันจะมีผลต่อสมบัติทางกล และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อทดแทนวัสดุประเภทโลหะหนักเช่น เหล็กกล้าต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อน (Solid solution and annealing) ของโลหะผสมไททาเนียม TiAl6V4 ต่อคุณสมบัติทางกล (Mechanical) และทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical)

2.2 เพื่อศึกษากระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของโลหะไททาเนียมที่เกิดจากกรรมวิธีทางความร้อน (Solid solution and annealing)

2.3 เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมเช่น การเชื่อม (Welding)

3. การทบทวนวรรณกรรม

ในกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อนของโลหะไททาเนียม สามารถแบ่งกลไกการเปลี่ยนเฟสได้ 2 ประเภท คือ กระบวนการแพร่ (Diffusion) และกระบวนการที่ไม่ได้เกิดการแพร่ (Diffusionless) การควบคุมปัจจัยและเงื่อนไข ในขั้นตอนของกรรมวิธีทางความร้อน ตลอดจนการควบคุมปริมาณของเฟสในโลหะไททาเนียม ส่งผลให้สามารถนำชิ้นงานภายหลังกรรมวิธีทางความร้อนไปใช้ได้หลากหลาย [4,5]

สมบัติทางกลของโลหะไททาเนียมสำคัญอย่างยิ่ง ในการนำมาใช้งานด้านวิศวกรรมยานอวกาศ (Aerospace Engineering) และวิศวกรรมชีวเวชศาสตร์ (Biomedical Engineering) โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะไททาเนียมมีอิทธิพลต่อ สมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile Properties) การต้านทานความล้า (Fatigue Strength) และการต้านทานการแตกหัก (Fracture Toughness) [6-10]

สมบัติและพฤติกรรมของโลหะไททาเนียมสามารถที่จะปรับปรุงและขยายออกไปได้อย่างกว้างขวาง ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะไททาเนียมสามารถเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบกลม (Equiaxial) เป็นแบบผสม (Bi-modal) และเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบเส้นอย่างสมบูรณ์ (fully Lamellar) [9- 12]

โครงสร้างแบบผสม (Bi- modal) มีผลดีต่อทำสมบัติทางกล (Yield stress, tensile stress, ductility และ fatigue stress) ในขณะที่ โครงสร้างแบบเส้นอย่างสมบูรณ์ (fully Laminar) มีผลดีต่อสมบัติในการต้านทานการเติบโตของรอยแตก (high fatigue crack propagation resistance) และมีความต้านทานการแตกหักสูง (high fracture toughness) ปัจจัยที่สำคัญของโครงสร้างแบบเส้นต่อสมบัติทางกลของโลหะไททาเนียมคือ ขนาดของ α -เฟส และ ขนาดของ β -เฟส (ความหนาและความยาวของเส้น) อัตราการเย็นตัวของโลหะมีผลต่อการเกิดและการโตของเฟส จาก α -เฟส เป็น β -เฟส ไททาเนียม หากอัตราการเย็นตัวสูงจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ใน β -เฟส ไททาเนียม [13-14]

4. การออกแบบการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ ลวดไททาเนียมหน้าตัดกลม เกรด TiAl6V4

2. การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเริ่มต้น ได้แก่

- Light microscope ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและขนาดของเกรน
- Energy Dispersive Spectroscopy Analysis (EDS) ตรวจสอบองค์ประกอบเคมีของวัสดุ
- X ray diffraction Analysis (XDA) ตรวจสอบโครงสร้างของผลึก

3. ทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุเริ่มต้น ลวดไททาเนียม

- Tensile test ทดสอบแรงดึง เพื่อหาสมบัติทางกลของลวดไททาเนียม
- Micro Hardness Test หาค่าความแข็งของลวด

4. ทดสอบสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion test) ของวัสดุเริ่มต้น ลวดไททาเนียม

5. ทดสอบสมบัติในงานเชิงอุตสาหกรรมเช่น Machining, Rolling และ Welding

6. ทดลองกรรมวิธีทางความร้อนของลวดไททาเนียม ด้วยกระบวนการ

- Heating ที่อุณหภูมิ 950 °C (สูงกว่า Transus Temperature) นาน 2 ชั่วโมง, oil quenching นาน 1.5 ชั่วโมง และ aging ที่อุณหภูมิ 350 °C นาน 5 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง
- Heating ที่อุณหภูมิ 840 °C (ต่ำกว่า Transus Temperature) นาน 2 ชั่วโมง, oil quenching นาน 1.5 ชั่วโมง และ aging ที่อุณหภูมิ 350 °C นาน 5 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง
- Heating ที่อุณหภูมิ 950 °C (สูงกว่า Transus Temperature) นาน 2 ชั่วโมง, oil quenching นาน 1.5 ชั่วโมง และ aging ที่อุณหภูมิ 450 °C นาน 5 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง
- Heating ที่อุณหภูมิ 840 °C (ต่ำกว่า Transus Temperature) นาน 2 ชั่วโมง, oil quenching นาน 1.5 ชั่วโมง และ aging ที่อุณหภูมิ 450 °C นาน 5 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง
- Heating ที่อุณหภูมิ 950 °C (สูงกว่า Transus Temperature) นาน 2 ชั่วโมง, oil quenching นาน 1.5 ชั่วโมง และ aging ที่อุณหภูมิ 550 °C นาน 5 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง
- Heating ที่อุณหภูมิ 840 °C (ต่ำกว่า Transus Temperature) นาน 2 ชั่วโมง, oil quenching นาน 1.5 ชั่วโมง และ aging ที่อุณหภูมิ 550 °C นาน 5 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง
- ขึ้นงานทุกชิ้นหลังผ่านกระบวนการ aging แล้ว ปล่อยให้เย็นตัวลง ณ อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศปกติ

7. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล สมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ และทดสอบในงานเชิงอุตสาหกรรมหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

5. ขอบเขตการวิจัย

- 5.1 เลือกศึกษาวัสดุ Ti-6Al-4V เกรด ASTM F136 ELI
- 5.2 ทำการทดสอบกรรมวิธีทางความร้อนกับชิ้นทดสอบด้วยเตาอบไฟฟ้า โดยกำหนดอุณหภูมิในช่วง 450⁰C ถึง 1030⁰C
- 5.3 ระยะเวลาการ Aging จะกำหนดให้ไม่เกิน 8 ชั่วโมง
- 5.4 ทำการทดสอบดึงภายใต้มาตรฐานควบคุม ASTM E8
- 5.5 ทำการทดสอบหาค่าอัตราการกัดกร่อนด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเคมีในแบบ Potentiodynamic
- 5.6 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายใต้วิธี Point Counting and Interception Method

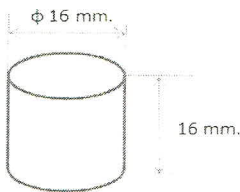
6. ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology)

- 6.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
 - 6.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย
 - วัตถุดิบที่ใช้คือ โลหะผสมทาทาเนียม Ti-6Al-4V เกรด ELI (ASTM F136) บริษัท LOTUS HITEMP METAL CO.,LTD ลักษณะชิ้นงานตั้งต้นเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด 16 mm และมีความยาว 4,000 mm โดยส่วนผสมทางเคมีที่ระบุไว้ในใบรับรองคุณภาพวัตถุดิบแสดงไว้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงอัตราส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน As Received

Element		N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
Chemical Component (%)	STD.	max 0.05	max 0.08	max 0.12	max 0.25	max 0.13	5.5-6.5	3.5-4.5	balance
	Actual	0.021	0.079	0.009	0.140	0.126	6.030	3.990	balance

เตรียมชิ้นงานเพื่อนำมาใช้ในการทำความร้อนและทดสอบการกัดกร่อนดังที่แสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงขนาดชิ้นงานที่จะนำเข้ากระบวนการทางความร้อนเพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง

6.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

6.1.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกรรมวิธีทางความร้อน

ก) เตาดอบไฟฟ้ายี่ห้อ LENTON กำลังไฟ 6,000 Watt อุณหภูมิที่ให้ความร้อนสูงสุด $1,200^{\circ}\text{C}$

ข) Thermometer แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ SOMOS รุ่น F3659

6.1.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

ก) เครื่องขัดกระดาษทรายสายพาน

ข) เครื่องขัดชิ้นงานยี่ห้อ Struer รุ่น Knuth Rotor และรุ่น DAP-V

ง) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสะท้อนยี่ห้อ Olympus รุ่น DP-12

จ) เครื่องดึงทดสอบ พิกัดกำลัง 200 ตัน โมเดล 400 HVL ผลิตโดยบริษัท SATEC Co. Ltd .

ฉ) เครื่องมือทดสอบเคมีไฟฟ้ารุ่น VMP multichannel และโปรแกรม EC-Lab

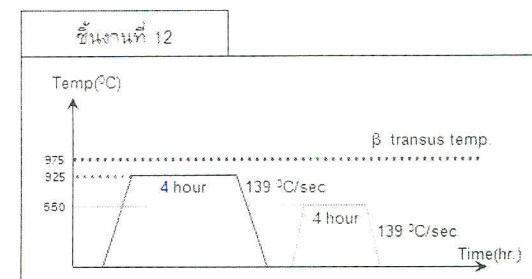
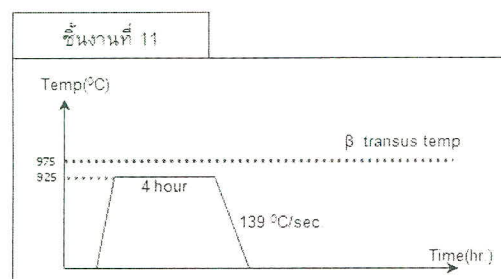
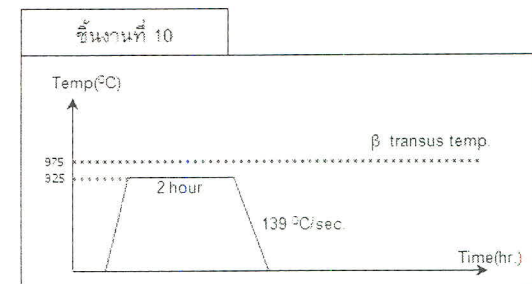
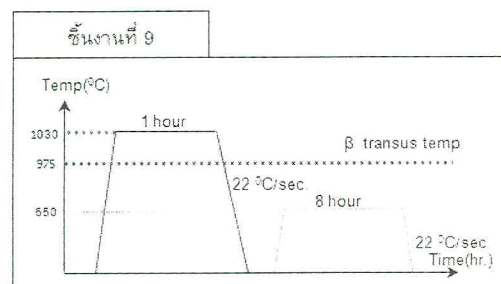
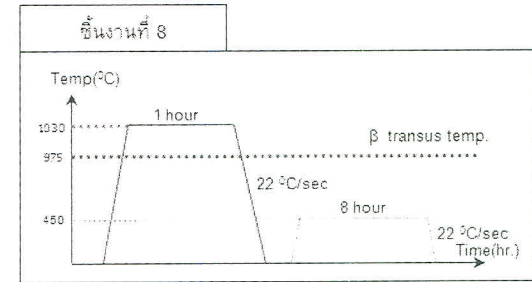
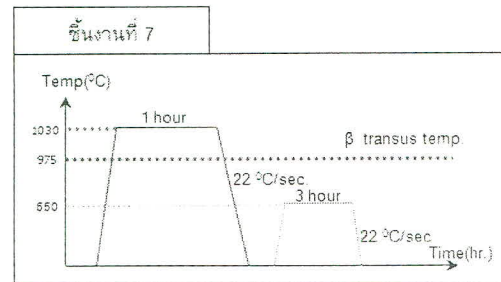
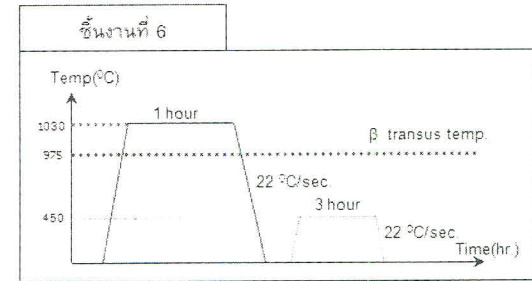
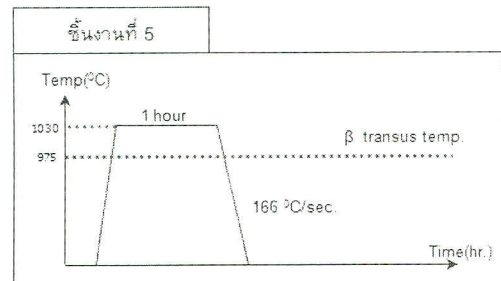
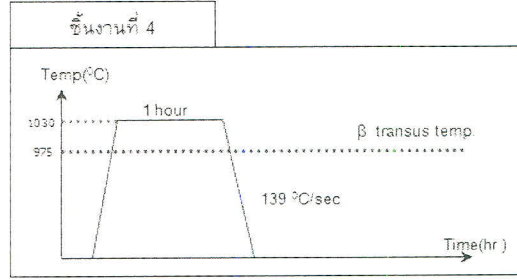
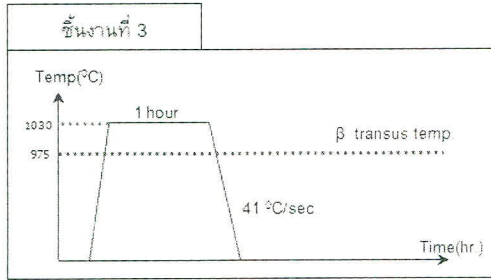
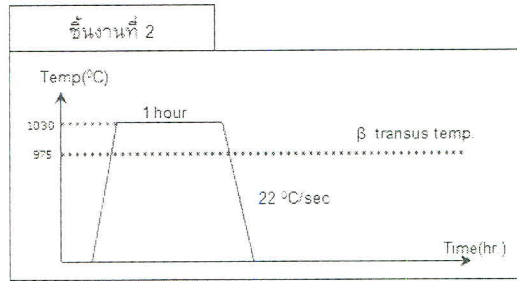
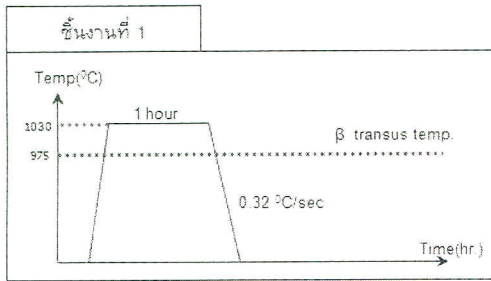
ช) เครื่องวัดความแข็ง WILLSON รุ่น 500RA

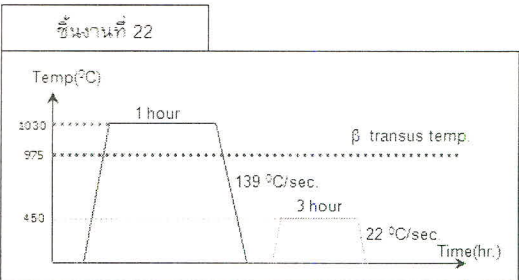
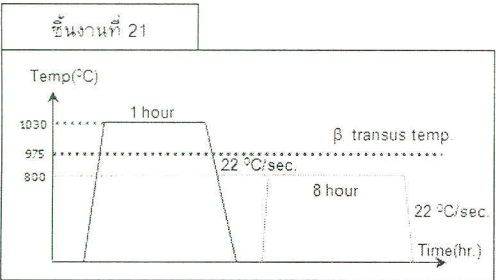
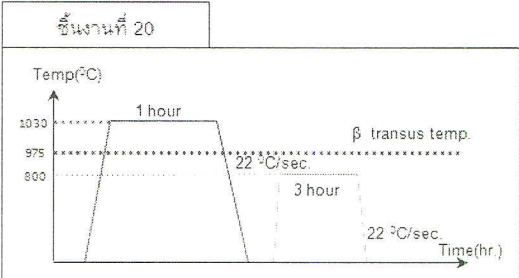
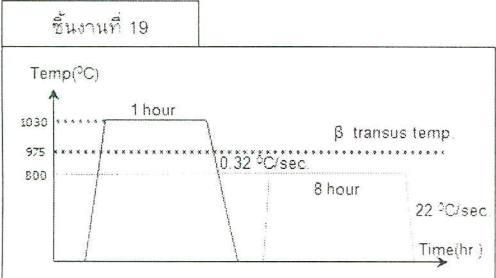
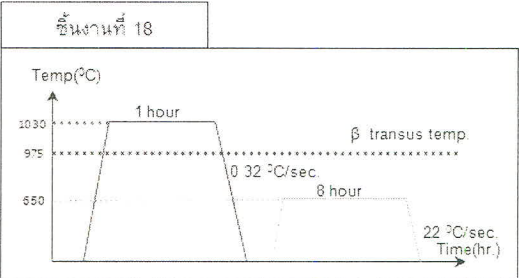
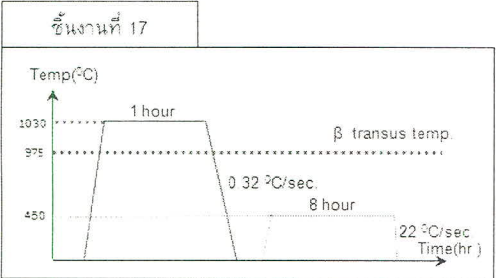
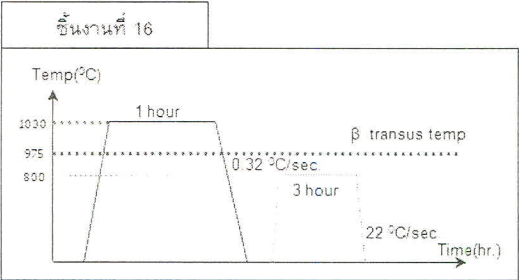
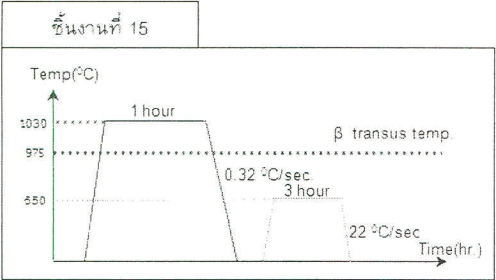
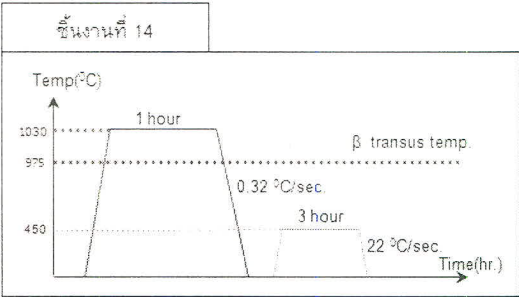
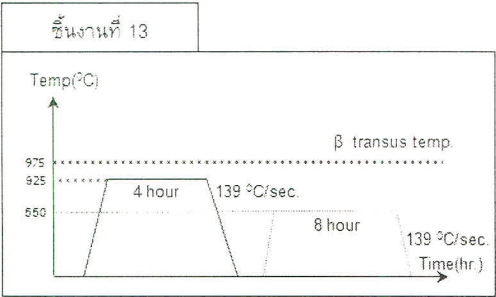
6.2 ขั้นตอนของกรรมวิธีทางความร้อน

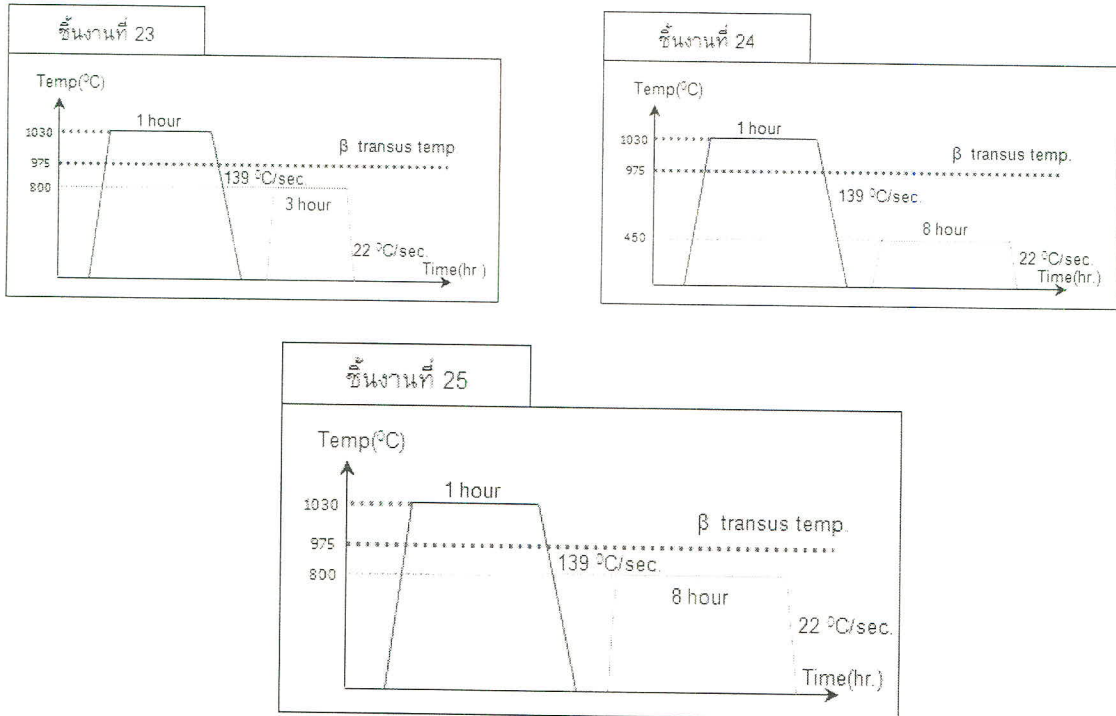
นำชิ้นงานแช่ในเตาดอบไว้ก่อนหนึ่งชั่วโมงเพื่อให้ความร้อนกระจายทั่วถึง ในงานวิจัยนี้ เงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนทั้งหมดในงานวิจัยมีเงื่อนไขในการทำกรรมวิธีทางความร้อนดังต่อไปนี้

1. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา
2. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
3. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในบริเวณที่มีพัดลมอุตสาหกรรมทำงาน
4. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจุ่มให้เย็นตัวในน้ำ
5. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจุ่มให้เย็นตัวในน้ำอุณหภูมิต่ำกว่า 10°C
6. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แล้วทำการอบต่อที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนจะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
7. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แล้วทำการอบต่อที่ 650°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนจะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
8. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แล้วทำการอบต่อที่ 450°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงก่อนจะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
9. อบที่ 1030°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ แล้วทำการอบต่อที่ 650°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงก่อนจะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
10. อบที่ 925°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วจุ่มให้เย็นตัวในน้ำ
11. อบที่ 925°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วจุ่มให้เย็นตัวในน้ำ
12. อบที่ 925°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วจุ่มให้เย็นตัวในน้ำแล้วทำการอบต่อที่ 550°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงก่อนจะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

กระบวนการให้ความร้อนของแต่ละเงื่อนไขสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ตามรูปที่ 6.2







รูปที่ 6.2 ภาพแสดงเงื่อนไข 25 รูปแบบของกรรมวิธีทางความร้อนของขึ้นทดสอบ

ในส่วนของการกำหนดอัตราการเย็นตัวให้ใช้หลักการ และอักษรย่อของการดำเนินการทั่วไปตามปกติในภาคอุตสาหกรรม คือ การเย็นตัวในเตา (Furnace Cool หรือ FC) เย็นตัวในอากาศ (Air Cool หรือ AC) เย็นตัวในอากาศที่มีการไหลมากกว่าปกติ (AC flow), quench ในน้ำอุณหภูมิห้อง (Water Quench หรือ WQ) และ quench ในน้ำอุณหภูมิใกล้เคียงจุดเยือกแข็ง (WQ ice) ทั้งนี้ในงานวิจัยจะต้องมีการกำหนดอัตราการเย็นตัวเหล่านี้ให้ออกมาในรูปตัวเลข เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่มีการทำให้เย็นตัวด้วยแก๊สที่สามารถกำหนดอัตราการเย็นตัวได้จากอุปกรณ์ควบคุม โดยอัตราการเย็นตัวตามเงื่อนไขต่าง ๆ เป็นดังนี้

- FC = 0.32 °C/sec
- AC = 22 °C/sec
- AC flow = 41 °C/sec
- WQ = 139 °C/sec
- WQ ice = 166 °C/sec

6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

6.3.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวและกัดกรดสำหรับขึ้นทดสอบ

นำชิ้นงานไปห่อหุ้มด้วยเรซินเพื่อให้ง่ายต่อการทำงานโดยให้ผิวหน้าของชิ้นงานสูงกว่าระดับผิวหน้าของเรซินโดยประมาณ 3-5 mm. จากนั้นทำการขัดปรับระนาบโดยใช้เครื่องขัดแบบจานหมุน โดยเริ่มจากความหยาบของกระดาษทรายตามลำดับดังนี้ 100, 150, 320, 500, 800, 1000, 1200 จนครบแล้วนำมาขัดปรับความเรียบผิวบนผ้าสักหลาดและใช้ผงอนุภาคอลูมิเนียมสามน้ำเป็นตัวขัด โดยไล่ความละเอียดที่ 50 μm และ 20 μm ตามลำดับ เมื่อจบกระบวนการขัดด้วยสารละลายอลูมิเนียม นำชิ้นงานมาขัดต่อบนผ้าสักหลาดด้วยการใช้น้ำกลั่น เพื่อล้างผงอลูมิเนียมที่ตกค้างอยู่

การกัดกรดสำหรับชิ้นงานในงานวิจัยนี้จะต้องนำไปกัดกรดภายใน 5 นาที หลังจากทำการขัดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด oxide เคลือบที่ผิวหน้าอย่างสมบูรณ์จนเป็นผลให้ไม่สามารถทำการตรวจโครงสร้างจุลภาคได้ จากนั้นล้างชิ้นงานด้วยเอทิลแอลกอฮอล์และเป่าชิ้นงานให้แห้ง โดยส่วนผสมของกรดประกอบด้วย

- HNO_3 (65% con.) 10 ml
- HF (40% con.) 2 ml
- น้ำกลั่น 88 ml

6.3.2 การประเมินผลของโครงสร้างจุลภาค

6.3.2.1 การประเมินสัดส่วนของเฟส

วิธีการที่ใช้ในการหาอัตราส่วนของเฟสต่างๆในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้วิธีการนับจุดสี(Pixel) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเลือกโปรแกรม Meesoft Image Analyzer ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบ freeware พัฒนาขึ้นโดย Michel Vinter โดยตัวโปรแกรมจะทำการนับจุดสีของภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในลักษณะ binary ซึ่งจะกำหนดให้พื้นภาพกลายเป็นจุดขาวและดำเท่านั้น ซึ่งตัวอย่างการใช้โปรแกรมจะแสดงให้เห็นในรูปแบบที่ 6.3



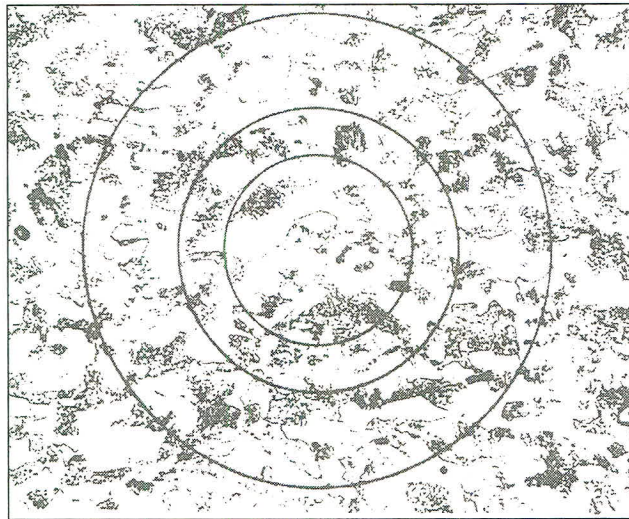
รูปที่ 6.3 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม Meesoft ทำการหาสัดส่วนของเฟส

6.3.2.2 การหาขนาดเกรน (Grain Size Measurement)

งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM E112-46 โดยเลือกวิธี Intercept Method การหาขนาดเกรนโดยใช้เส้น มีวิธีการดังนี้ จะเป็นการขีดเส้นความยาวทั้งหมด 500 mm ลงบนรูปโครงสร้าง จากนั้นจะนับจำนวนเกรนทั้งหมดที่เส้นตัดผ่านเป็น N แล้วหารค่า N ด้วยความยาวเส้นทั้งหมด จะได้ค่า N_L (หมายเหตุ: เกรนที่ขอบเกรนทับกับเส้นให้นับเป็น 0.5 เกรน และหากบริเวณ triple point ทับเส้นให้นับเป็น 2 เกรน)

Mean linear intercept length $\bar{L}_3 = P/N_L$ (P = volume fraction / 100)

ตัวอย่างการหาขนาดระยะความกว้างระหว่างขอบเกรนเฉลี่ย



รูปที่ 6.4 รูปตัวอย่างการทำ Grain Size Measurement [1]

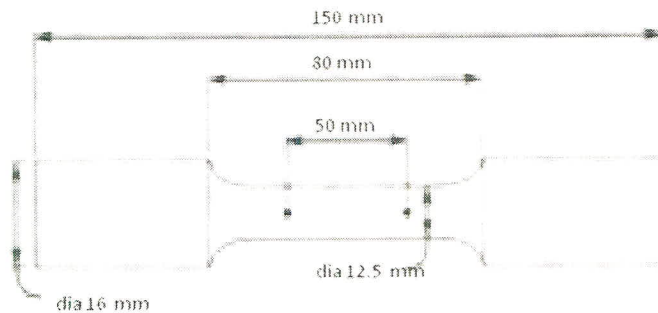
ถ้าในกรณีที่โครงสร้างจุลภาคมี 2 เฟส ดังแสดงในภาพ คือ เฟส Alpha (สีขาว) และ เฟส alpha-beta eutectoid ที่เป็นสีดำ เราต้องการหาขนาดของเกรน alpha (สีขาว) กำลังขยาย = 500x, มีขั้นตอนดังนี้

- คำนวณเปอร์เซ็นต์เฟสของเฟส alpha ด้วยวิธี point counting ได้เท่ากับ 48.5%
- วาดวงกลม 3 วงให้ได้ความยาวเส้นรอบวงทั้งหมด (Total line length) = 500 mm
- นับจำนวนเกรน alpha ที่ตัดกับเส้นรอบวง ได้ 76 เกรน, $N = 76$
- $N_L = 76/(500\text{mm}/500) = 76 \text{ mm}^{-1}$
- Mean linear intercept $\bar{L}_3 = 0.485/N_L = 0.485/76 = 0.006382 \text{ mm}$

6.4 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

6.4.1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อดึงทดสอบ

เตรียมรูปร่างชิ้นงานโดยใช้วิธีการกลึงให้ได้ชิ้นงานตามมาตรฐานของ ASTM E8 ตามรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ลักษณะของชิ้นงานที่ต้องเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8 [1]

6.4.2 ขั้นตอนการดึงทดสอบ

ก. นำชิ้นงานเข้าจับยึดกับเครื่องทดสอบตามคู่มือของเครื่องกำหนด

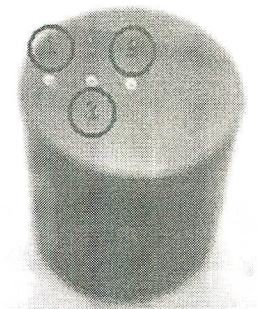
ข. ทำการดึงทดสอบด้วยค่า Strain Rate 0.1 mm/sec โดยตรวจสอบค่าที่ได้จากกราฟในหน้าจอ CRT ของเครื่องโดยสม่ำเสมอ จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน

ค. นำชิ้นงานที่แตกหักมาประกอบรอยแตกเข้าด้วยกันและวัดความยาวรวมเก็บไว้เป็นข้อมูลเพื่อใช้

คำนวณค่า % Elongation

6.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness Measurement)

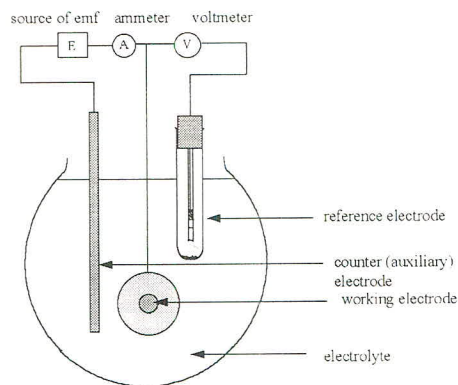
ตัดปรับระนาบชิ้นงานด้วยกระดาษทรายจากเบอร์ 100 จนถึงเบอร์ 1000 จากนั้นนำมาทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่อง Micro hardness test โดยใช้หัว rock well scale C โดยทำการวัด 3 จุด เริ่มจากตรงกลางไปถึงขอบ ลักษณะของการวัดจะวัดเฉลี่ย 3 ค่า บริเวณใกล้ขอบนอกของชิ้นงาน บริเวณจุดกึ่งกลางหน้าตัดของชิ้นงาน และ บริเวณที่อยู่ระหว่างสองบริเวณแรก จากนั้นนำค่ามาเฉลี่ย



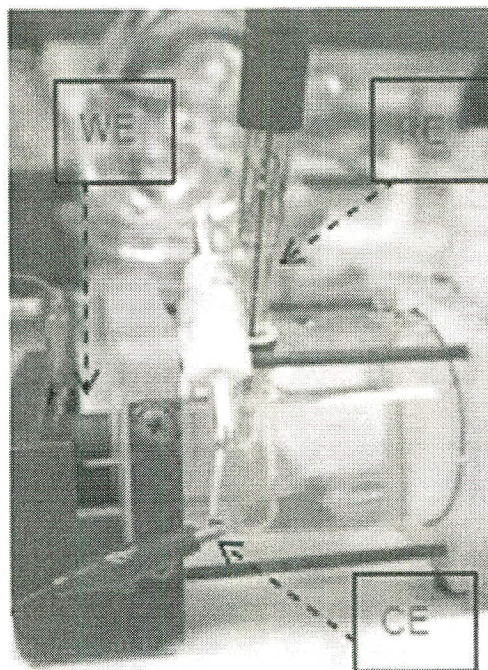
รูปที่ 6.6 แสดงจุดวัดความแข็งบนหน้าตัดชิ้นงาน

6.6 การทดสอบอัตราการกัดกร่อนด้วยวิธี การทางไฟฟ้าเคมีแบบ Potentiodynamic

1. ขัดผิวชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 120, 240, 360, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ จากนั้นล้างน้ำกลั่น สารละลายอะซีโตน-เอทานอล 50% (โดยปริมาตร) เป่าชิ้นทดสอบให้แห้ง
2. เตรียมสารละลายทดสอบคือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% (w/v) ที่อุณหภูมิห้อง
3. ติดตั้งเซลล์ทดสอบเคมีไฟฟ้าแบบ 3 ขั้วประกอบด้วย ขั้วทำงาน (Working electrode, WE) ขั้วงานช่วยทำงาน (Counter electrode, CE) และ แท่งแพลตตินัม ลักษณะการติดตั้งตามรูปที่ 6.7 และ ภาพถ่ายการเดินสายต่อเซลล์ไฟฟ้าจริงที่รูป 6.8 ดังนี้



รูปที่ 6.7 แผนภาพการติดตั้งเซลล์ไฟฟ้า



รูปที่ 6.8 แสดงการเดินสายสัญญาณเข้ากับขั้วต่าง ๆ

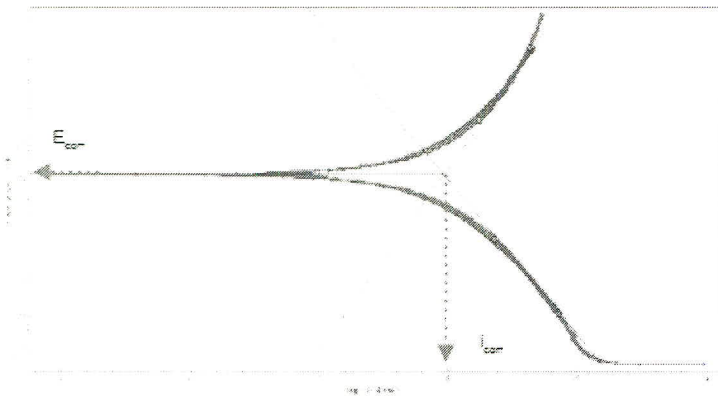
4. เปิดเครื่องมือทดสอบเคมีไฟฟ้ารุ่น VMP multichannel และโปรแกรม EC-Lab ของ BioLogic Science Instruments โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าคือ โพเทนชิโอดนามิก โดยตั้งค่าดังนี้

- 4.1 วัดค่าศักย์ไฟฟ้าของซินทดสอบที่จุ่มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% (w/v) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
- 4.2 อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 60 มิลลิโวลต์/นาที
- 4.3 ช่วงศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -250 ถึง +250 มิลลิโวลต์
- 4.4 พื้นที่ชิ้นงานทดสอบที่สัมผัสสารละลาย เท่ากับ 0.95 ตารางเซนติเมตร

จากผลการทดสอบได้กราฟโพลาริเซชันตามรูปที่ 6.9 จากนั้นหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) โดยวิธีทาเฟล (Tafel) และคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, CR) ตามสมการ ดังนี้

$$\text{Corrosion Rate (mm/year)} = \frac{3.27 \times eq.w \times i_{corr}}{D}$$

- i_{corr} = ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน มีหน่วยเป็น มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
- eq.w = น้ำหนักสมมูลของวัสดุทดสอบ
- Density (D) = ความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ



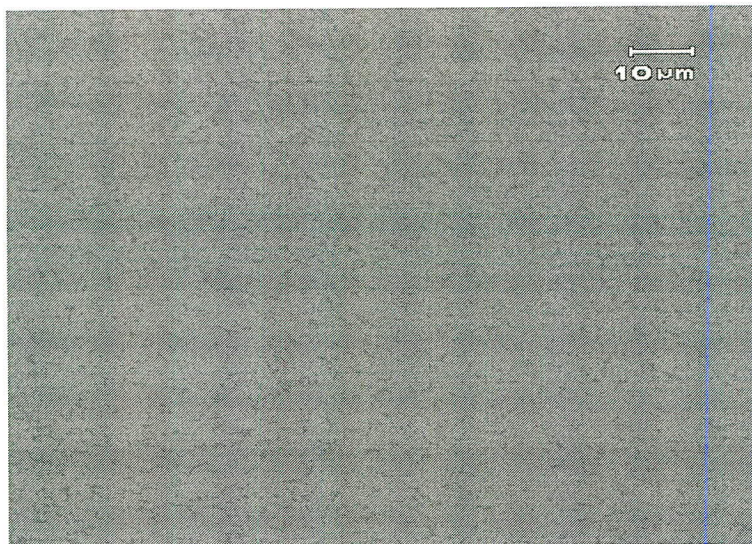
รูปที่ 6.9 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) และ ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) โดยวิธีทาเฟล จากกราฟโพลาริเซชัน

7. ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและอธิบายผลการทดลอง ถึงผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยจะแยกเป็นกลุ่มตามลักษณะโครงสร้าง จากนั้นจะอธิบายถึงผลการวิเคราะห์ค่าจากการทดสอบสมบัติทางกลประเภทการดึงทดสอบ และการทดสอบความแข็ง รวมถึงผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี โดยจะทำการอธิบายแยกเป็นกลุ่มของโครงสร้าง และนำไปอธิบายเปรียบเทียบผลระหว่างกลุ่ม

7.1 โครงสร้างของชิ้นงานเริ่มต้น

ชิ้นงานที่เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นจะอยู่ในสภาพที่ผ่านกระบวนการ Mill annealing โดยเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจะพบว่า โครงสร้างประกอบขึ้นด้วยเฟส 2 ชนิดคือเฟส β ที่จะสังเกตได้จากพื้นที่มืดสีดำในรูปที่ 7.1 ในพื้นที่สว่างนั้นจะเป็นเฟส α ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยประเมินแล้วจะพบว่าเฟส α จะมีสัดส่วนของพื้นที่ถึง 68% ในภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาค ลักษณะของเฟส β นั้นจะมีภาพเสมือนวงกลมขนาดเล็กมาต่อกันเป็นเส้นรูปร่างอิสระกระจายตัวอยู่บนพื้นที่ที่เป็นเฟส α



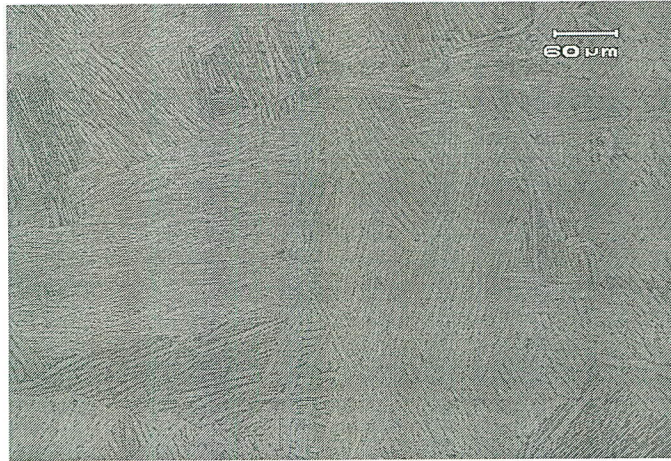
รูปที่ 7.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเริ่มต้น (As-Received) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

7.2 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อน

7.2.1 โครงสร้าง Lamellar

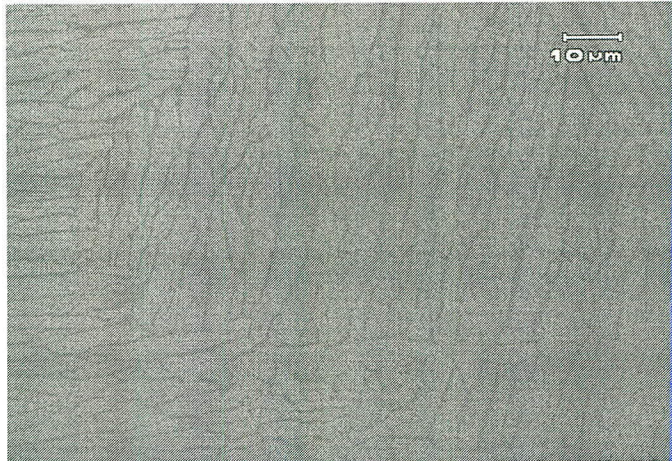
7.2.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่เกิดโครงสร้าง Lamellar

เมื่อนำชิ้นงานไปทำกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อน โดยให้ความร้อนที่ 1030°C และปล่อยให้เย็นตัวภายในเตา ซึ่งมีอัตราการเย็นตัวที่ประมาณ 0.32°C ต่อวินาที จะได้ผลลัพธ์เป็นโครงสร้างแบบ Lamellar โดยจะมีลักษณะของโครงสร้างเป็นแท่งยาวๆ รูปร่างเกือบมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยจะจัดกลุ่มกันอยู่เป็นชุดๆ และในแต่ละชุดจะวางตัวต่อกันในลักษณะอิสระตามรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่เกิดโครงสร้างแบบ Lamellar กำลังขยาย 200 เท่า

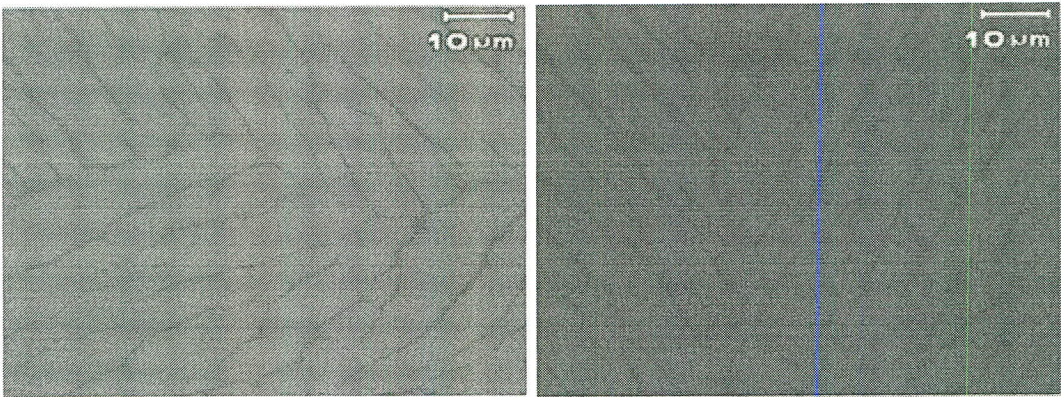
และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าดังรูปที่ 4.3 พบลักษณะโครงสร้างประกอบขึ้นด้วยเฟส 2 ชนิดคือเฟส β ที่จะสังเกตได้จากพื้นที่เส้นขอบของแท่งที่เป็นสีดำ ซึ่งพื้นที่สว่างที่อยู่ด้านในขอบนั้นจะเป็นเฟส α เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนพบว่าเฟส α จะมีสัดส่วนของพื้นที่ประมาณ 74% ในภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาค ลักษณะความกว้างของแผ่น Lamellar โดยเฉลี่ยนั้นอยู่ที่ 7 μm และความหนาของเส้นขอบของแต่ละแผ่นของ Lamellar ซึ่งเป็นเฟส β นั้นจะมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 0.8 μm



รูปที่ 7.3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นทดสอบที่เกิดโครงสร้างแบบ Lamellar กำลังขยาย 1000 เท่า

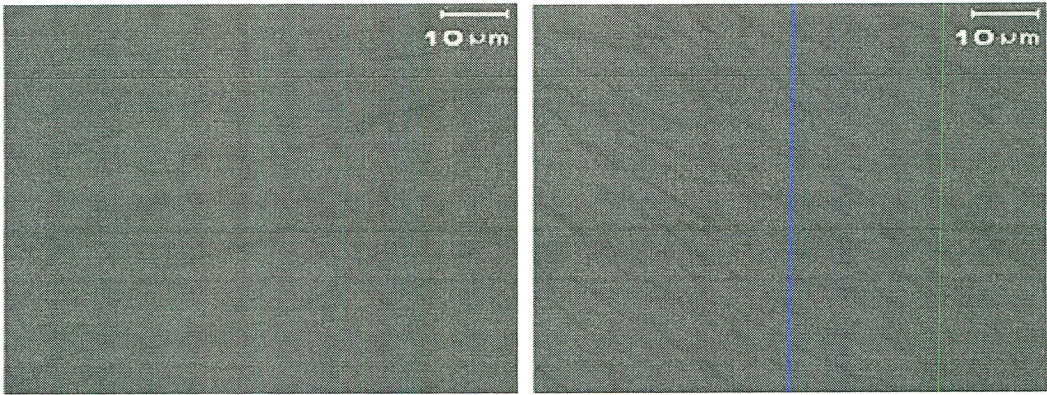
7.2.1.2 โครงสร้างจุลภาค Lamellar ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

ชิ้นงานชุดนี้มีจำนวน 6 ชิ้น ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นโครงสร้างแบบ Lamellar เหมือนกันทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอนที่สองซึ่งเรียกว่า Aging โดยในชุดแรกจะผ่านกรรมวิธี Aging ที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 450⁰C เวลานาน 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.4 ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่ากรรมวิธีการ Aging เวลา 3 ชั่วโมงนั้นไม่ได้ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับกับโครงสร้างจุลภาคก่อนทำการ Aging แต่ชิ้นงานที่ผ่านการ Aging เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงพบเส้นสีดำซึ่งเป็นเฟส β แต่จะมีขนาดบางกว่าเส้นขอบที่เป็นเฟส β เดิม โครงสร้าง β ที่เป็นเส้นจะกระจายตัวเป็นเส้นเล็กๆ ทั้งในแบบขาดตอน และแบบแตกกิ่งก้านสาขาออกมาภายในพื้นที่ของเฟส α ด้านในสัดส่วนของเฟส β นั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 28% ไปเป็น 31% เมื่ออบเพิ่มจาก 3 เป็น 8 ชม.



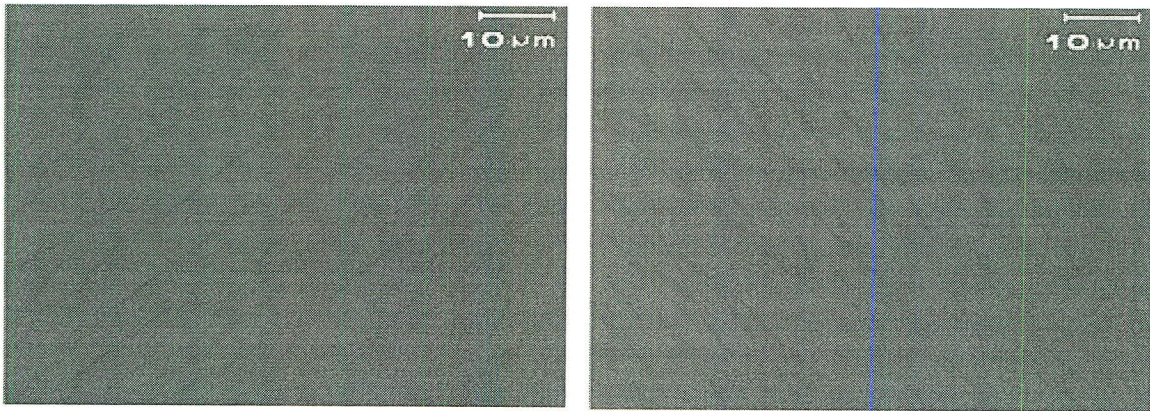
รูปที่ 7.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบ Lamellar ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 450⁰C
(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

ชิ้นงานทดสอบชุดที่สองจะผ่านกรรม Aging ที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 650⁰C ที่เวลา 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.5 ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่า สัดส่วนของเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานผ่านเงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างกัน มีค่าสัดส่วนที่ใกล้เคียง สัดส่วนของพื้นที่เฟส β จะอยู่ระหว่าง 26-28%



รูปที่ 7.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบ Lamellar ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 650⁰C
(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

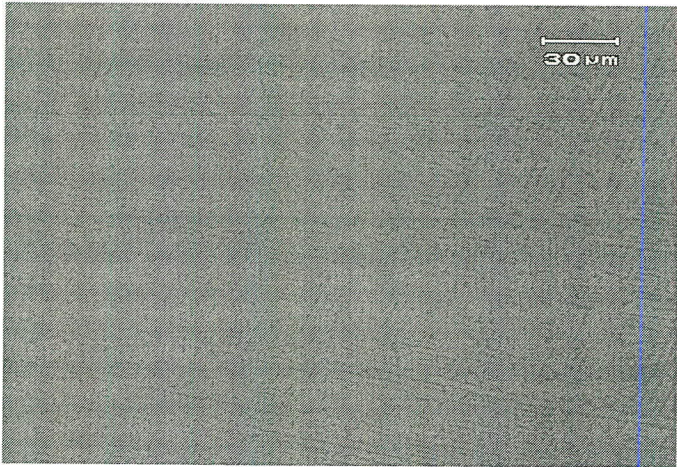
ชิ้นงานทดสอบชุดที่สองจะผ่านกรรม Aging ที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 800 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.6 ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่า สัดส่วนของ เฟสที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานผ่านเงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างกัน มีค่าสัดส่วนที่ใกล้เคียง สัดส่วนของพื้นที่ เฟส β จะอยู่ระหว่าง 29% และ 31%



รูปที่ 7.6 ลักษณะโครงสร้างแบบ Lamellar ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 800°C
(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

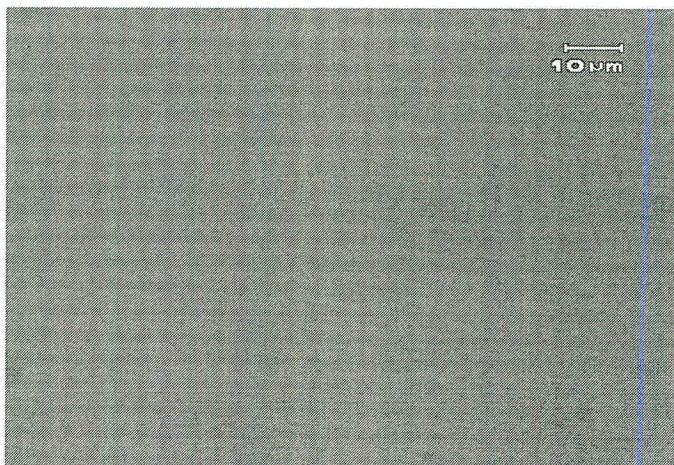
7.2.2 โครงสร้าง Basket Weave

7.2.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เกิดโครงสร้าง Basket Weave โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอนเดียว เมื่อนำชิ้นงานไปดำเนินการกรรมวิธีทางความร้อน โดยให้ความร้อนที่ 1030°C และกำหนดให้เย็นตัวภายในอากาศอุณหภูมิห้อง อัตราการเย็นตัว 22°C ต่อวินาที จะได้ผลลัพธ์เป็นโครงสร้างแบบ Basket Weave โดยจะมีลักษณะของแท่งรูปร่างเหมือนไม้ระแนง Lath plate วางตัวไขว้กันในลักษณะตะกร้าสานที่แสดงตามรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบ Basket Weave ที่กำลังขยาย 500 เท่า

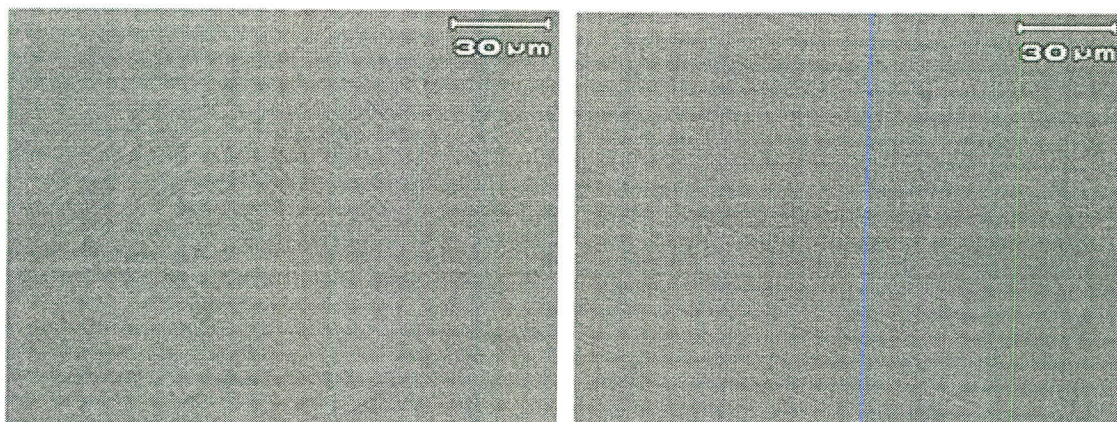
เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าดังรูปที่ 7.8 จะสามารถอธิบายลักษณะของโครงสร้างได้โดยโครงสร้างประกอบขึ้นด้วยเฟส 2 ชนิดคือเฟส β ที่จะสังเกตได้จากพื้นที่เส้นขอบของแท่งที่เป็นสีดำ ซึ่งพื้นที่สว่างที่อยู่ด้านในขอบนั้นจะเป็นเฟส α ซึ่งเฟส α จะมีสัดส่วนของพื้นที่ประมาณ 88% ในภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาค ความกว้างของแผ่น Lath plate โดยเฉลี่ย $2.5\ \mu\text{m}$ ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านอัตราการเย็นตัวสูงกว่าในระดับ 41°C ต่อวินาที ไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน



รูปที่ 7.8 ลักษณะโครงสร้างแบบ Basket Weave ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

7.2.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่เป็นโครงสร้าง Basket Weave ภายใต้เงื่อนไขเวลาและอุณหภูมิ ของการ Aging ที่ต่างกัน

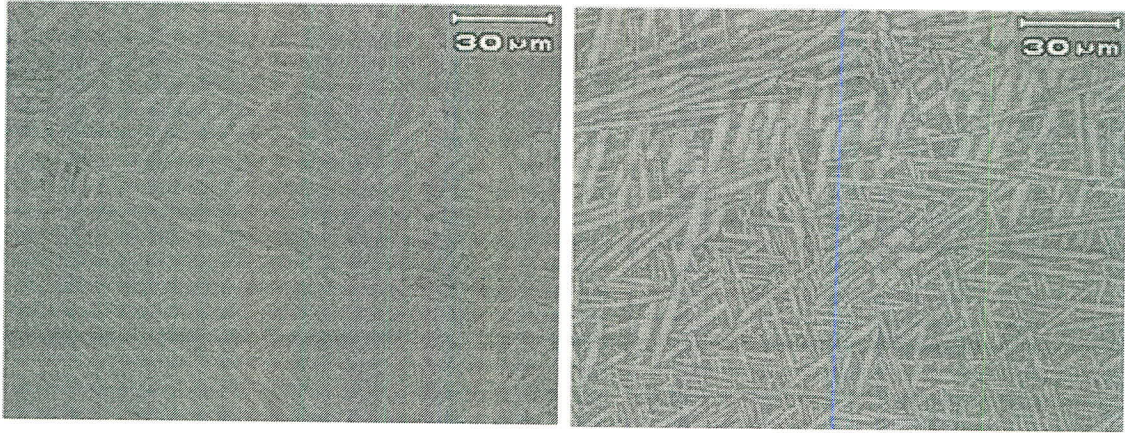
ชิ้นงานทดสอบชุดนี้มีจำนวน 6 ชิ้น ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นสภาพโครงสร้างแบบ Basket Weave เหมือนกันทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอนที่สองซึ่งเรียกว่า Aging โดยชุดแรกจะผ่านกรรมวิธี Aging ที่อุณหภูมิ 450°C ที่เวลา 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.9 ซึ่งโครงสร้างมีลักษณะไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 7.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบ Basket Weave ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 650°C

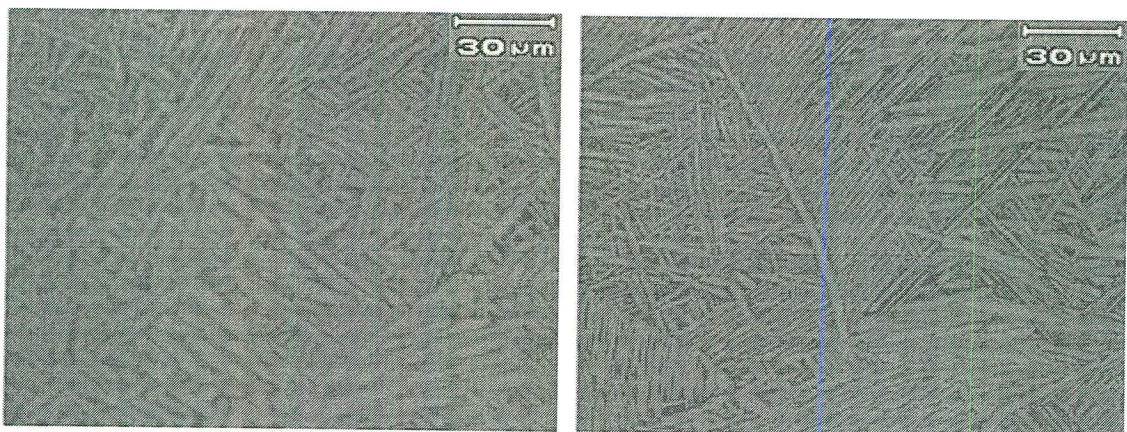
(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.10 ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่ากรรมวิธีการ Aging ที่เวลา 8 ชั่วโมงนั้นเฟส α มีขนาดเพิ่มขึ้น มีความหนาเฉลี่ย 8 μm (aging 3 ชั่วโมง เฟส α มีความหนาเฉลี่ย 4 μm)



รูปที่ 7.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบ Basket Weave ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 650°C
(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

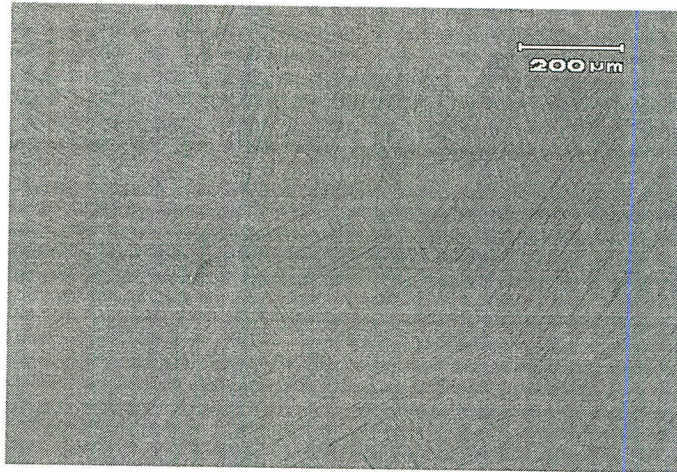
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.11 ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่ากรรมวิธีการ Aging ที่อุณหภูมินี้ทั้งในระยะเวลา 3 และ 8 ชั่วโมงจะทำให้เฟส α ที่กลายสภาพเป็นแท่งขนาดใหญ่ เข้าครอบครองพื้นที่ส่วนใหญ่และมีการจัดเรียงตัวในรูปแบบที่อิสระจนไม่สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ได้ พื้นที่ที่ยังคงสภาพเป็น Basket Weave นั้นลดลงอย่างมากจนเหลือประมาณ 15% และ Lathe plate มีความกว้าง 4 μm พื้นที่สีดำที่เป็นเฟส β นั้นมีสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นโดยมีสัดส่วนถึง 23% และ 25% ตามลำดับของระยะเวลาในการ Aging 3 และ 8 ชั่วโมง



รูปที่ 7.11 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคแบบ Basket Weave ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 800°C
(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

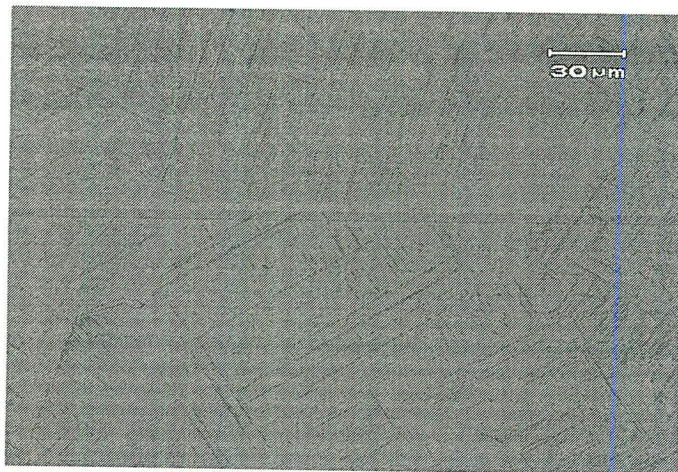
7.2.3 โครงสร้าง Martensite

7.2.3.1 โครงสร้างจุลภาคที่เกิดโครงสร้าง Martensite โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอนเดียว เมื่อนำชิ้นงานไปดำเนินการกระบวนการทางกรรมวิธีทางความร้อน โดยให้ความร้อนที่ 1030°C และ กำหนดให้เย็นตัวแบบ Water quenched (WQ) อัตราการเย็นตัวประมาณ 139°C ต่อวินาที จะได้ผลลัพธ์เป็น โครงสร้างแบบ Martensite โดยจะมีลักษณะที่เป็นแนวเส้นสีดำที่กระจายตัวแบบอิสระ บางส่วนจะคล้ายลักษณะ ของกากบาทอยู่บนพื้นที่ Light Zone ดังที่แสดงตามรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 โครงสร้างจุลภาคแบบ Martensite ที่กำลังขยาย 100 เท่า

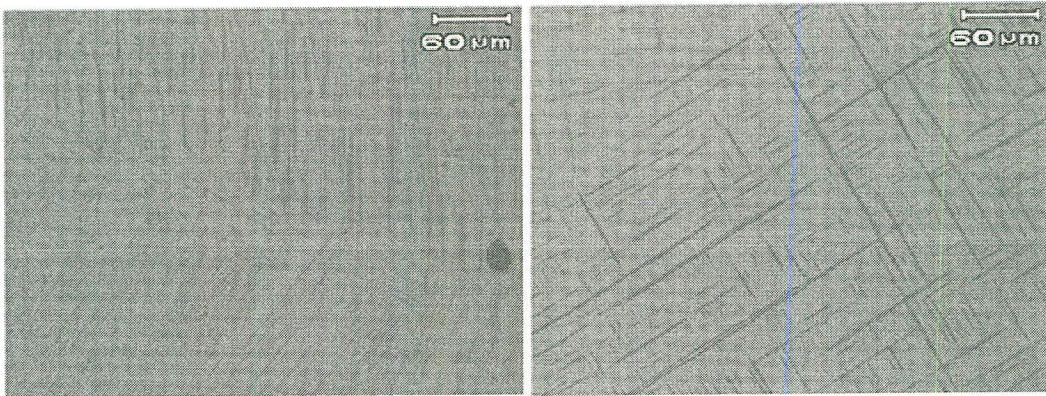
และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1000 เท่าดังรูปที่ 7.13 พบลักษณะของ โครงสร้างประกอบขึ้นด้วยเฟส 2 ชนิดคือ เฟส β ที่จะสังเกตได้จากเส้นสีดำที่ชีดกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่ และเฟสที่เป็นพื้นที่สว่างที่เป็นลักษณะพื้นนั้นยังไม่สามารถระบุชี้ชัดได้ว่าเป็นโครงสร้างแบบใด เนื่องจากต้องใช้กล้องที่มี กำลังขยายสูงกว่า



รูปที่ 7.13 โครงสร้างจุลภาคแบบ Martensite พิจารณาที่กำลังขยาย 500 เท่า

7.2.3.2 โครงสร้างจุลภาคแบบ Martensite และผ่านกรรมวิธี Aging ในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

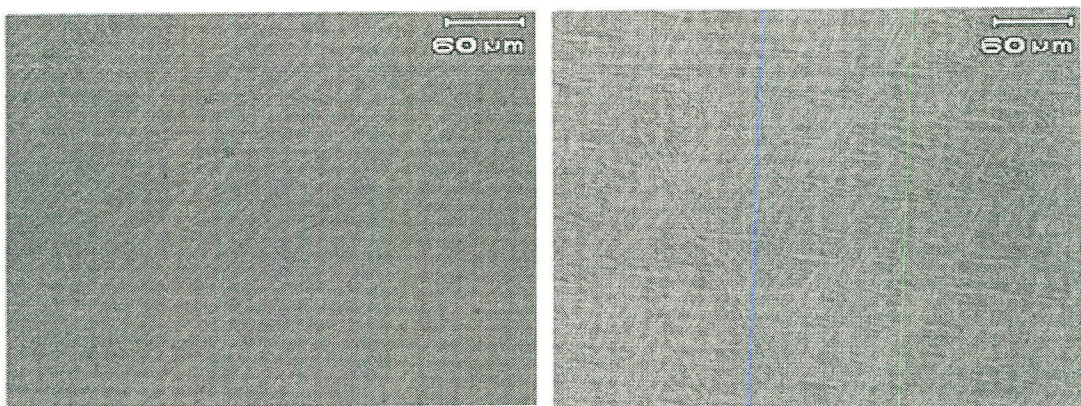
ชิ้นงานทดสอบในชุดนี้จำนวน 4 ชิ้น ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นสภาพโครงสร้างเริ่มต้นเป็น Martensite เหมือนกันทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอน Aging โดยชุดแรกจะผ่านกรรมวิธี Aging ที่อุณหภูมิ 450°C เวลา 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.14 ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่ากรรมวิธีการ Aging ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมงนั้นมีลักษณะของโครงสร้างที่ไม่ได้แตกต่างจากชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการ Aging แต่สำหรับชิ้นทดสอบที่ผ่านการ Aging เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงนั้น จะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของเส้นขีดดำที่เป็นเฟส β ซึ่งจะมีขนาดหนาขึ้น และมีความชัดเจนมากขึ้น



รูปที่ 7.14 โครงสร้างจุลภาคแบบ Martensite ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 450°C

(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

ชิ้นงานชุดที่สองที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่อุณหภูมิ 800°C เวลา 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 7.15 จากการวิเคราะห์พบว่ากรรมวิธีการ Aging ที่อุณหภูมินี้ทั้งในระยะเวลา 3 และ 8 ชั่วโมง จะทำให้เกิดเฟส α โดยเฟส α ไตขึ้น มีลักษณะคล้ายเข็มโดยมีลักษณะเป็นแท่งสั้นๆกระจายตัวอยู่เป็นส่วนใหญ่ เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความหนาเฉลี่ยของเข็มเฟส α จะพบว่า เมื่อทำการ Aging ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมงจะได้ขนาดความหนาเฉลี่ยของเข็ม $1.5\text{ }\mu\text{m}$ และในชิ้นทดสอบทำการ Aging ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมงจะได้ขนาดความหนาเฉลี่ยของเข็ม $2.3\text{ }\mu\text{m}$



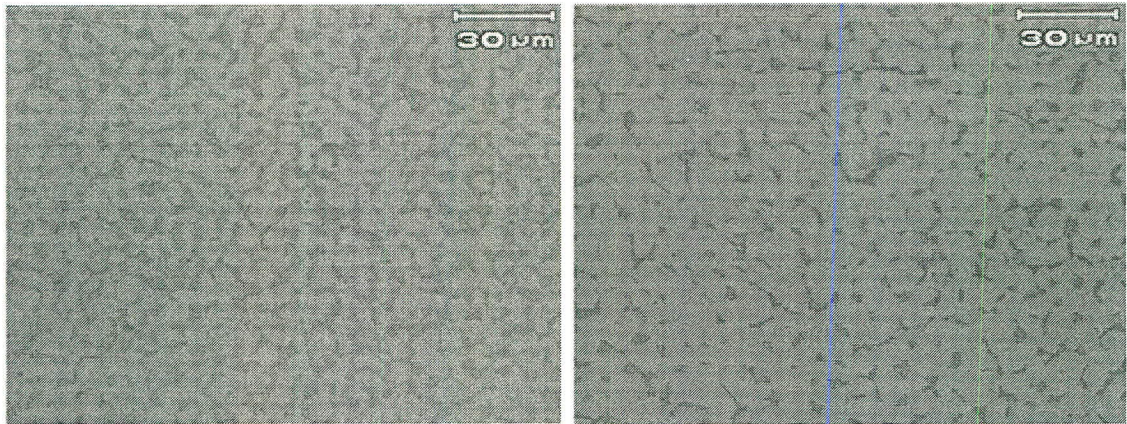
รูปที่ 7.15 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบ Martensite ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 800°C

(ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

7.2.4 โครงสร้าง Globular

7.2.4.1 โครงสร้างจุลภาคแบบ Globular โดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอนเดียว

เมื่อนำชิ้นงานไปดำเนินการกระบวนการทางกรรมวิธีทางความร้อน โดยให้ความร้อนที่ 925°C และเย็นตัวแบบ Water Quenched (WQ) อัตราการเย็นตัวประมาณ 139°C ต่อวินาที จะได้ผลลัพธ์เป็นโครงสร้างแบบ Globular ซึ่งในขั้นตอนของการทดลองนี้จะกำหนดระยะเวลาการให้ความร้อนแตกต่างกัน 2 ค่า โดยชิ้นงานชุดที่หนึ่งทำการอบด้วยเวลานาน 2 ชั่วโมงและชิ้นงานชุดที่สองจะทำการอบเวลานาน 4 ชั่วโมง โครงสร้างที่ได้จะประกอบไปด้วยสองเฟสด้วยกัน เฟสแรกคือเฟส α' พื้นที่มีสีขาว ลักษณะของเกรนจะมีรูปร่างทรงกลม เฟสที่สองคือเฟส $\beta + \alpha$ พื้นที่มีสีน้ำตาล ลักษณะของเกรนเป็นทรงกลมเช่นกัน ขนาดของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการอบระยะเวลาแตกต่างกัน ก็จะมีขนาดต่างกันอย่างชัดเจน โดยชิ้นงานที่ทำการอบระยะเวลา 2 ชั่วโมงนั้นจะมีขนาดของเกรนเฟส α' $5\text{ }\mu\text{m}$ และมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส α' ที่ 58% และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ทำการอบในเวลา 4 ชั่วโมงขนาดของเกรนเฟส α' มีขนาด $7\text{ }\mu\text{m}$ และมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส α' ที่ 69% ดังรูปที่ 7.16

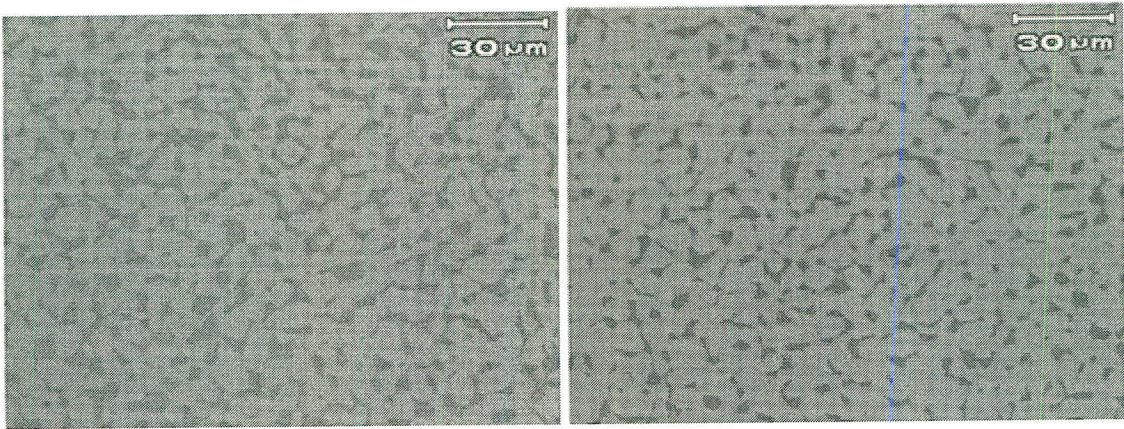


รูปที่ 7.16 โครงสร้างจุลภาคแบบ Globular ที่ผ่านการอบ 925°C

(ซ้าย) ระยะเวลา 2 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

7.2.4.2 โครงสร้างจุลภาคแบบ Globular ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

ชิ้นงานชุดนี้มีจำนวน 2 ชุด ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นสภาพโครงสร้างแบบ Globular เหมือนกันทั้งหมดในเงื่อนไขของการอบที่ 925°C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงและทำ water quenched (WQ) จากนั้นจึงนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในขั้นตอน Aging โดยชุดแรกจะผ่านกรรมวิธี Aging ที่อุณหภูมิที่ 550°C เวลา 3 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ผลที่ได้ดังภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 7.17 ชิ้นงานที่ผ่านการ Aging ในระยะเวลา 3 ชั่วโมงจะได้ขนาดของเกรนเฟส α' $6.5\text{ }\mu\text{m}$ และมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส α' ที่ 68% และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าของชิ้นทดสอบที่ทำการ Aging ในระยะเวลา 8 ชั่วโมงนั้น ขนาดของเกรนเฟส α' $7.5\text{ }\mu\text{m}$ และมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส α' ที่ 72%

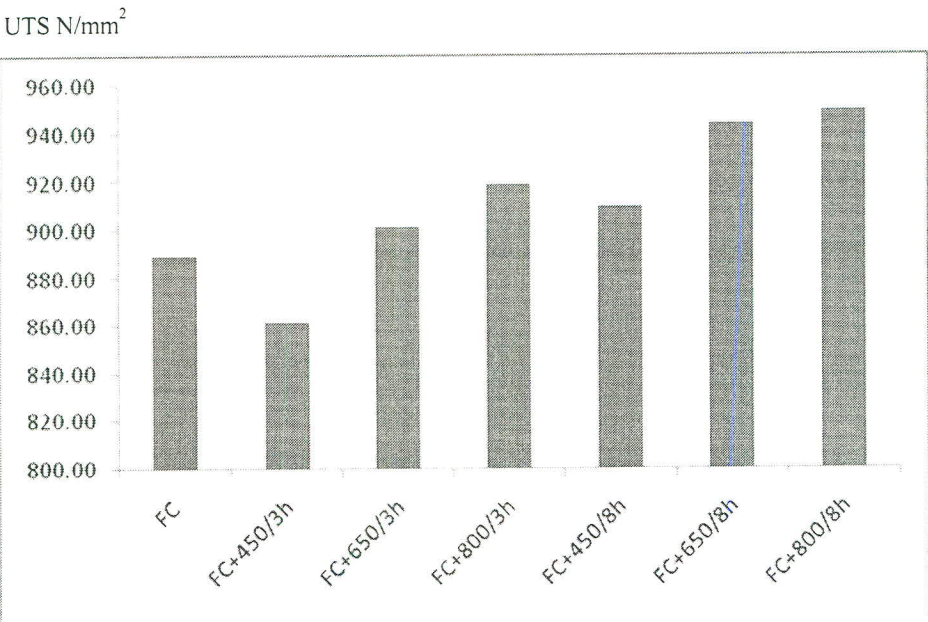


รูปที่ 7.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแบบ Globular ที่ผ่านกรรมวิธี Aging ที่ 800°C (ซ้าย) ระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ขวา) ระยะเวลา 8 ชั่วโมง

7.3 อิทธิพลของลักษณะโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติทางกล

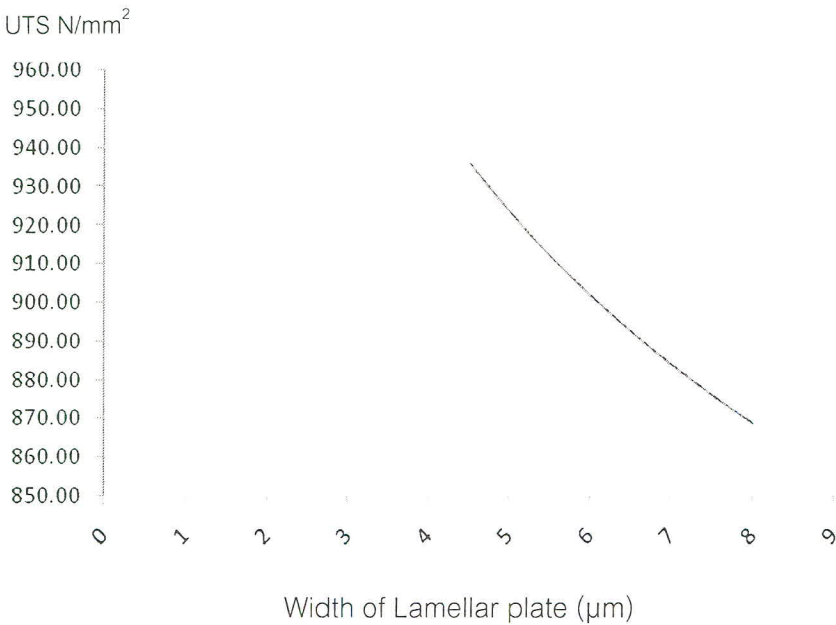
7.3.1 สมบัติทางกลของชิ้นงานที่มีโครงสร้าง Lamellar

นำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่มโครงสร้างแบบ Lamellar ทั้งที่ผ่านการ Aging และ ไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการดึงทดสอบ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์จากการทดสอบดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.18



รูปที่ 7.18 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ Lamellar

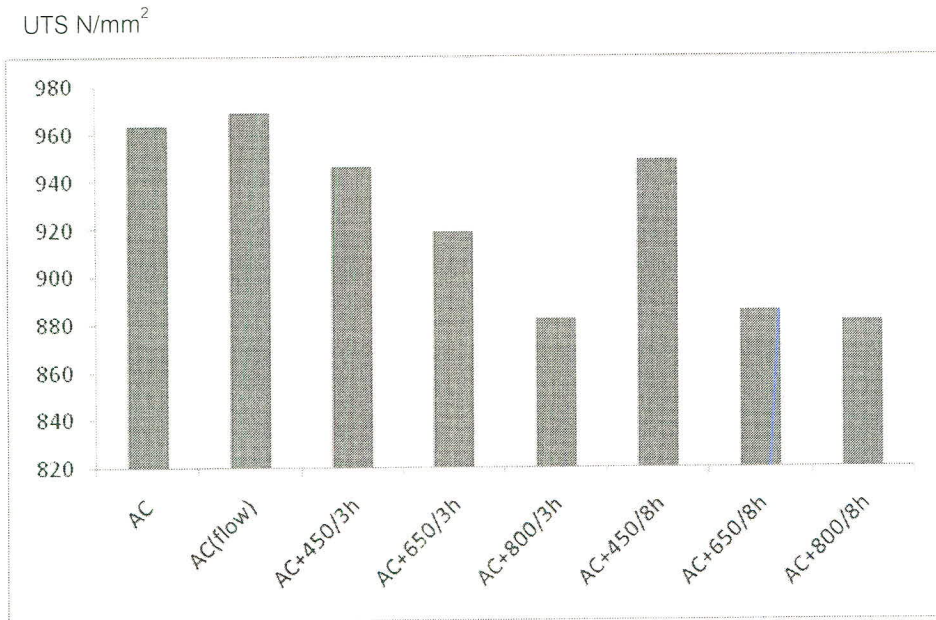
ค่า Ultimate tensile strength (UTS) และค่าความแข็งของโลหะ Ti-6Al-4V ที่มีโครงสร้างแบบ lamellar จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขนาดเกรนของ Lamellar มีความละเอียดขึ้น เนื่องจากขอบเกรนที่เพิ่มขึ้นมานั้นทำหน้าที่เป็นเสมือน ตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ boundary ของ dislocation ในกรณีที่ grain boundary จำนวนมาก ย่อมทำให้ต้องใช้พลังงานที่มากขึ้นในการเปลี่ยนรูปวัสดุ ทั้งนี้ยังสามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ด้วยข้อมูลความสัมพันธ์ของขนาดความกว้างของ Lamellar plate กับค่า UTS ที่ได้จากการดึงทดสอบในรูปที่ 7.19 ซึ่งจะปรากฏผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันกว่ายิ่งขนาดความกว้างของ Lamellar plate มีขนาดเล็กลงเท่าไร ค่า UTS ที่ได้จากการดึงทดสอบยังมีค่ามากขึ้นเท่านั้น



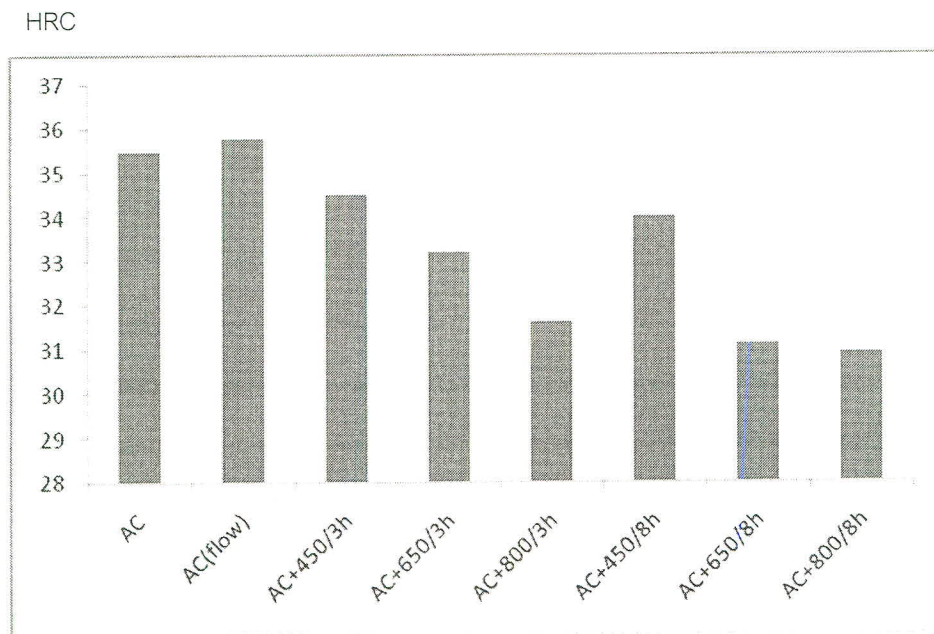
รูปที่ 7.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของ Lamellar และค่า Ultimate Tensile Strength (UTS)

7.3.2 สมบัติทางกลของโครงสร้าง Basket Weave

นำชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ Basket Weave ทั้งที่ผ่านการ Aging และไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการดึง (Tensile Test) และทดสอบความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะได้ผลลัพธ์จากการทดสอบดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.20 และ 7.21 ตามลำดับ



รูปที่ 7.20 ค่า Ultimate Tensile Strength ของชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ Basket Weave

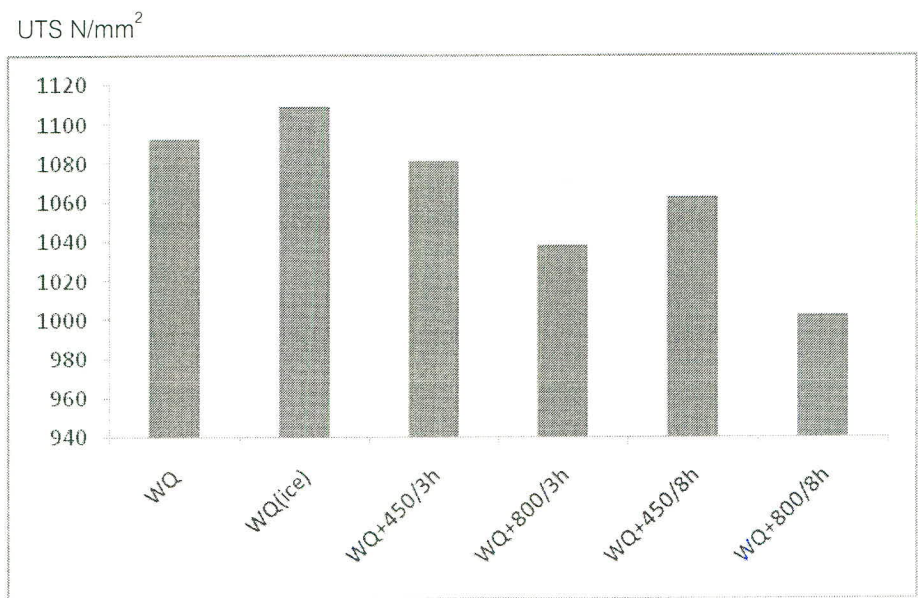


รูปที่ 7.21 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ Basket Weave

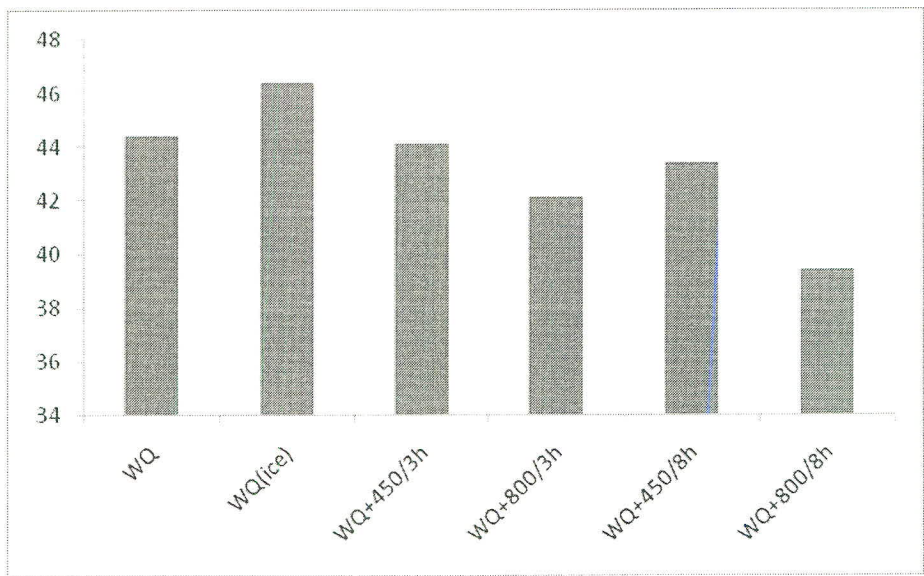
ชิ้นงานที่มีรูปร่างโครงสร้างแบบ Basket Weave นั้นมีลักษณะที่เป็นการขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation ที่ดีเนื่องจาก Dislocation จะต้องวิ่งผ่านขอบเกรนในจำนวนที่มากมาย แต่เมื่อชิ้นงานเริ่มสูญเสียสภาพโครงสร้างแบบ Basket Weave จะพบว่าเฟส α เติบโตทั้งและปรับเปลี่ยนรูปร่างเป็นทรงกลม และแบบที่ขยายความกว้างของ Lath plate มากขึ้น เป็นสาเหตุที่ทำให้ Dislocation สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลง โดยความแข็งแรงของโลหะไททาเนียม แปรผันตามสัดส่วนการสูญเสียของโครงสร้าง Basket Weave

7.3.3 สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบโครงสร้าง Martensite

นำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่มโครงสร้างแบบ Martensite ทั้งที่ผ่านการ Aging และไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการดึงทดสอบ และทดสอบความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะได้ผลลัพธ์จากการทดสอบดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.22 และ 7.23 ตามลำดับ



รูปที่ 7.22 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบดึงชิ้นทดสอบโครงสร้างแบบ Martensite ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด

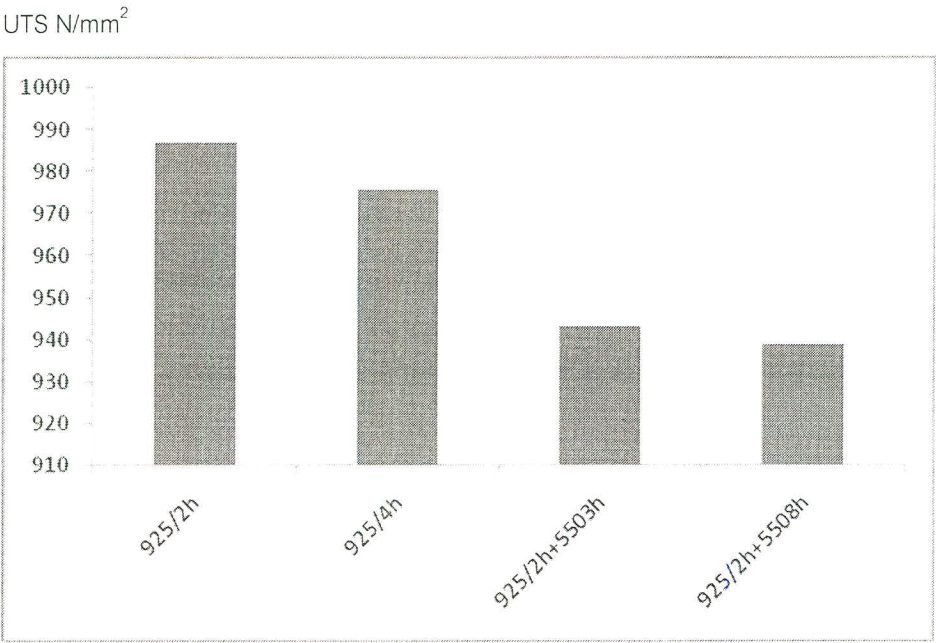


รูปที่ 7.23 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบความแข็งชิ้นทดสอบโครงสร้างแบบ Martensite ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด

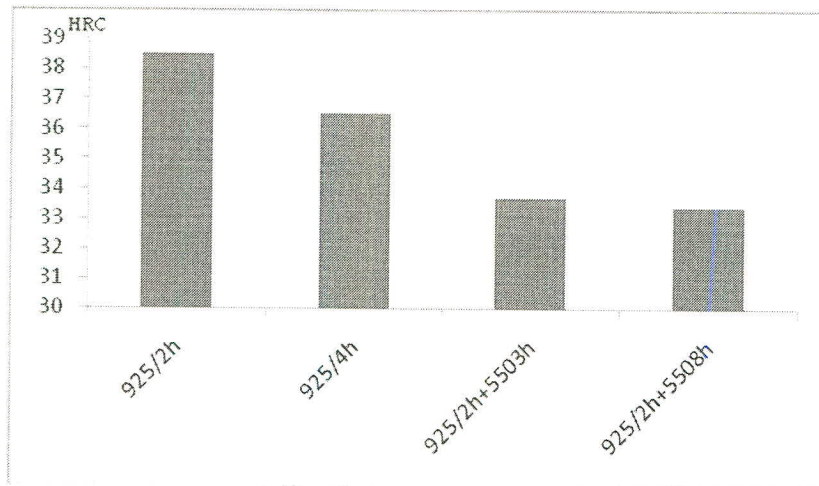
ชิ้นงานที่มีรูปร่างโครงสร้างแบบ Martensite นั้นจะได้รับความแข็งแรงมาจาก Shear band จำนวนมากภายในโครงสร้างซึ่งจะไม่เกี่ยวข้องกับลักษณะของเฟสแต่อย่างใด หากให้ความร้อนในขั้นตอนของการ Aging โดยอุณหภูมิยังไม่ถึงจุดที่จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (ซึ่งต้องมากกว่า 700 องศาขึ้นไป) ค่าความแข็งแรงที่ลดลงเล็กน้อยนั้นจะเป็นผลมาจากการคลายความเครียดในโครงสร้างเท่านั้นกรณีนี้ที่โครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากแบบ Martensite ไปเป็นโครงสร้างแบบเข็มนั้นค่าความแข็งแรงจะลดต่ำลงอย่างมากสามารถยกตัวอย่างเปรียบเทียบได้ เช่นชิ้นทดสอบโครงสร้าง Martensite จะมีค่า Ultimate tensile strength เท่ากับ 1092.78 N/mm² ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการ Aging ที่อุณหภูมิ 800⁰C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะเหลือค่าจากการทดสอบดังเท่ากับ 1038.84 N/mm² ซึ่งในโครงสร้างแบบเข็มนี้ตัวแปรที่จะกำหนดความแข็งแรงคือความละเอียดของ Needle α ว่าจะมีขอบเกรนเพื่อขัดขวาง Dislocation ได้มากน้อยในระดับใด

7.3.4 สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบโครงสร้าง Globular

นำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่มโครงสร้างแบบ Globular ทั้งที่ผ่านการ Aging และ ไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการดึงทดสอบ และทดสอบความแข็งแรงที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะได้ผลลัพธ์จากการทดสอบดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.24 และ 7.25 ตามลำดับ

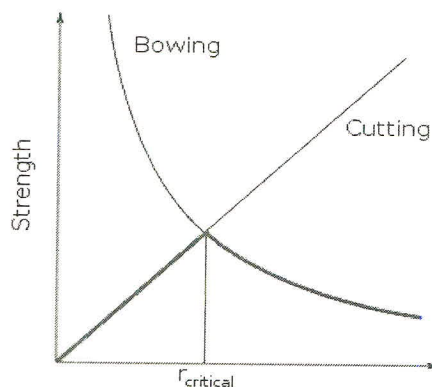


รูปที่ 7.24 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบดึงชิ้นทดสอบโครงสร้างแบบ Globular ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 7.25 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบความแข็งขึ้นทดสอบโครงสร้างแบบ Globular ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด

ชิ้นงานที่มีรูปร่างโครงสร้างแบบ Globular นั้น จะถูกกำหนดความแข็งแรงด้วยรูปร่างการเชื่อมต่อระหว่างของเฟส α' และเฟส $\beta + \alpha$ ซึ่งจะไปกำหนดลักษณะของขอบเกรนที่จะต้านการเคลื่อนที่ของ Dislocation ในชิ้นงานชิ้นแรกที่ทำการอบที่ 925°C เป็นเวลาสองชั่วโมง ปรากฏว่าได้รูปร่างและการจัดเรียงของโครงสร้างในแบบที่เหมาะสมจนค่าความแข็งแรงที่วัดได้ค่อนข้างสูง นั้นอาจสามารถให้ทฤษฎีได้เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของ Dislocation ผ่าน Precipitation phase แต่ให้ใช้รูปร่างเกรนของแต่ละเฟส แทนการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเคลื่อนที่ของ Dislocation ผ่านในรูปแบบของ Cutting หรือ Bowing นั้นอยู่ในค่าจุดตัดที่เหมาะสมพอดีตามที่แสดงในรูปภาพที่ 7.26 ในกรณีขึ้นทดลองชิ้นอื่นจะสังเกตได้ว่าขนาดของเกรน Primary α ไม่ได้มีความสัมพันธ์ในแบบแปรผกผันหรือแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงของวัสดุ นั้นจะเป็นสิ่งที่ยืนยันเหตุผลในข้อแรกว่าขนาดของ Primary α จะต้องมีความพอดีเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ลงไปทดลองในรายละเอียดเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของ Primary α

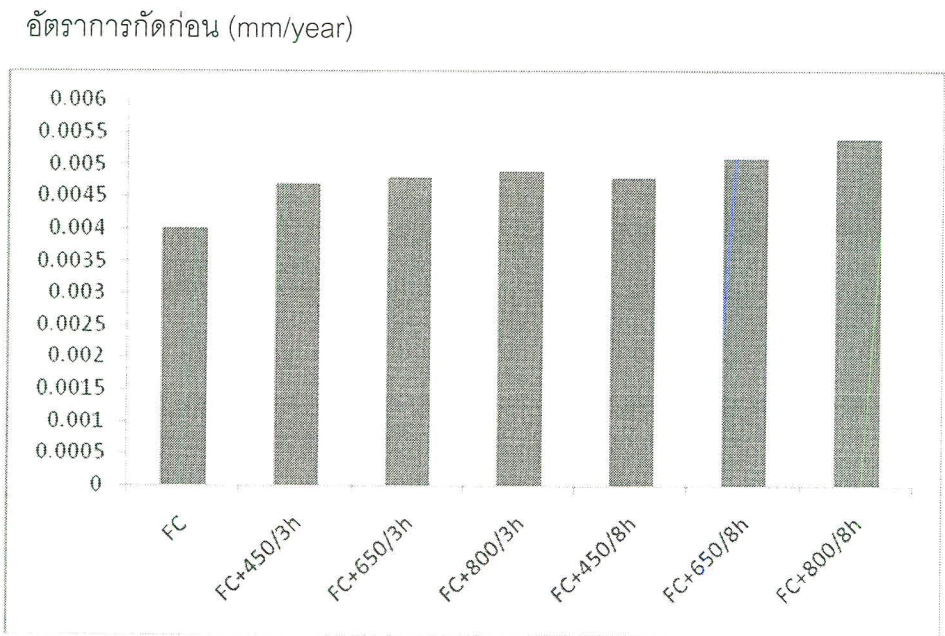


รูปที่ 7.26 แสดงลักษณะของค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ขึ้นกับ Equivalent R ที่เหมาะสม

7.4 ผลกระทบของลักษณะโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติทางการกัดกร่อน

7.4.1 สมบัติทางการกัดกร่อนของขึ้นทดสอบโครงสร้าง Lamellar

นำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่มแบบ Lamellar ทั้งที่ผ่านการ Aging และไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเคมีแบบ Potentiodynamic ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.27

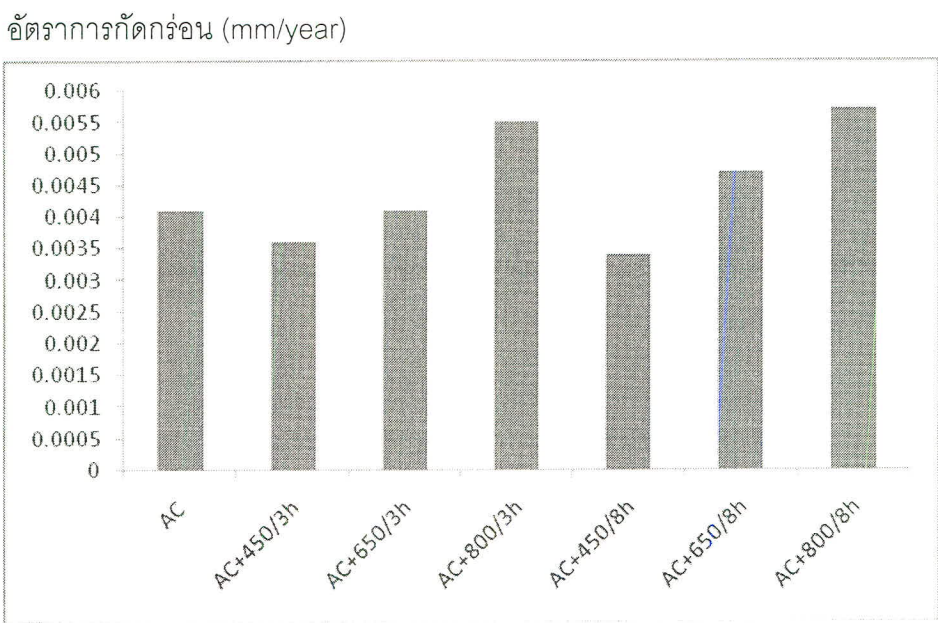


รูปที่ 7.27 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบโครงสร้างแบบ Lamellar ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด

ชิ้นงานโครงสร้าง Lamellar ที่ผ่านกรรมวิธีการ Aging ในขั้นตอนที่สองจะมีอัตราการกัดกร่อนที่ค่อนข้างสูงขึ้นเรื่อย ๆ แปรผันตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการ Aging และเมื่อนำไปสร้างความสัมพันธ์ร่วมกับลักษณะของโครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะสามารถแสดงได้ว่าคุณลักษณะของ Galvanic cell ที่เกิดขึ้นระหว่าง เฟส β และ เฟส α นั้นจะเป็นตัวกำหนดค่าอัตราการกัดกร่อน โดยเมื่อสังเกตข้อมูลของขึ้นทดสอบโครงสร้าง Lamellar ที่ไม่ผ่านการ Aging ใด ๆ จะมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส β 26% และมีค่าอัตราการกัดกร่อน 0.0040 มิลลิเมตรต่อปี ในขณะที่ขึ้นทดสอบที่ผ่านการ Aging ที่อุณหภูมิ 800°C ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง จะมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส β 31% และมีค่าอัตราการกัดกร่อน 0.0054 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งจะมีค่ามากกว่าและแปรผันตามสัดส่วนของเฟส β ที่มากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนพื้นที่ของเฟส β ไม่แตกต่างกันมากเนื่องจากความเสถียรของโครงสร้างทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากจนเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งจะทำให้การออกแบบเลือกใช้วัสดุดิบในโครงสร้างนี้จะมีเงื่อนไขทางคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนที่เสถียรเมื่อผ่านสภาวะความร้อนที่เงื่อนไขต่าง ๆ

7.4.2 สมบัติทางการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบโครงสร้าง Basket Weave

นำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่มแบบ Basket Weave ทั้งที่ผ่านการ Aging และไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเคมีแบบ Potentio dynamic ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.28

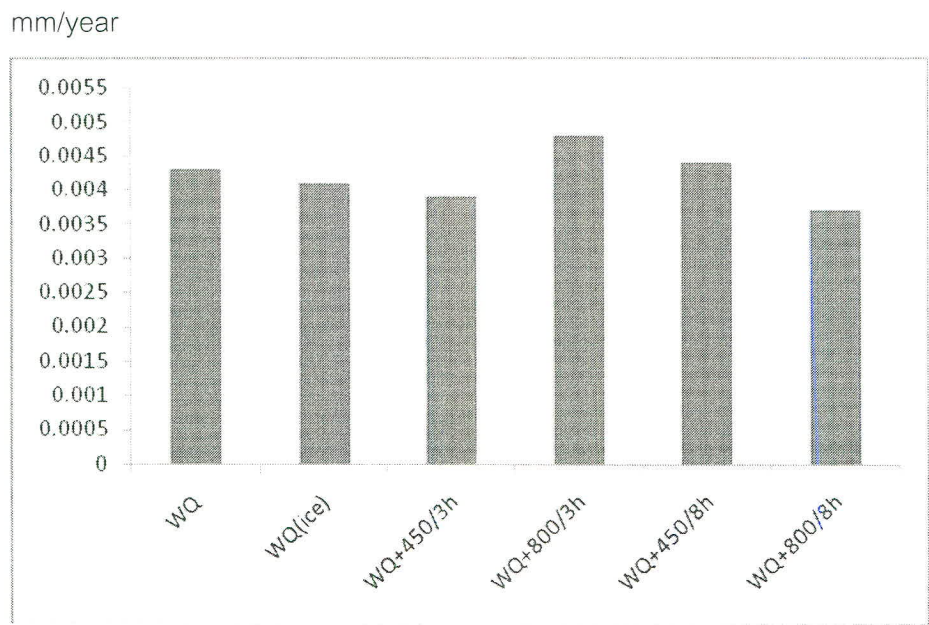


รูปที่ 7.28 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบอัตราการกัดกร่อนชิ้นทดสอบโครงสร้างแบบ BasketWeave ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด

ลักษณะของ galvanic cell ที่เกิดขึ้นระหว่าง เฟส β และ เฟส α นั้นจะเป็นตัวกำหนดค่าอัตราการกัดกร่อน โดยเมื่อสังเกตข้อมูลของชิ้นทดสอบโครงสร้าง Basket Weave ที่ไม่ผ่านการ Aging ใดๆ จะมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส β 12% และมีค่าอัตราการกัดกร่อน 0.0041 มิลลิเมตรต่อปี ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่ผ่านการ Aging ที่อุณหภูมิ 800°C ในระยะเวลา 8 ชั่วโมง จะมีสัดส่วนพื้นที่ของเฟส β 25% และมีค่าอัตราการกัดกร่อน 0.0057 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งจะมีค่ามากกว่าและแปรผันตามสัดส่วนของเฟส β ที่มากขึ้น

7.4.3 สมบัติทางการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบโครงสร้าง Martensite

นำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่มแบบ Martensite ทั้งที่ผ่านการ Aging และไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเคมีแบบ Potentiodynamic ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.29

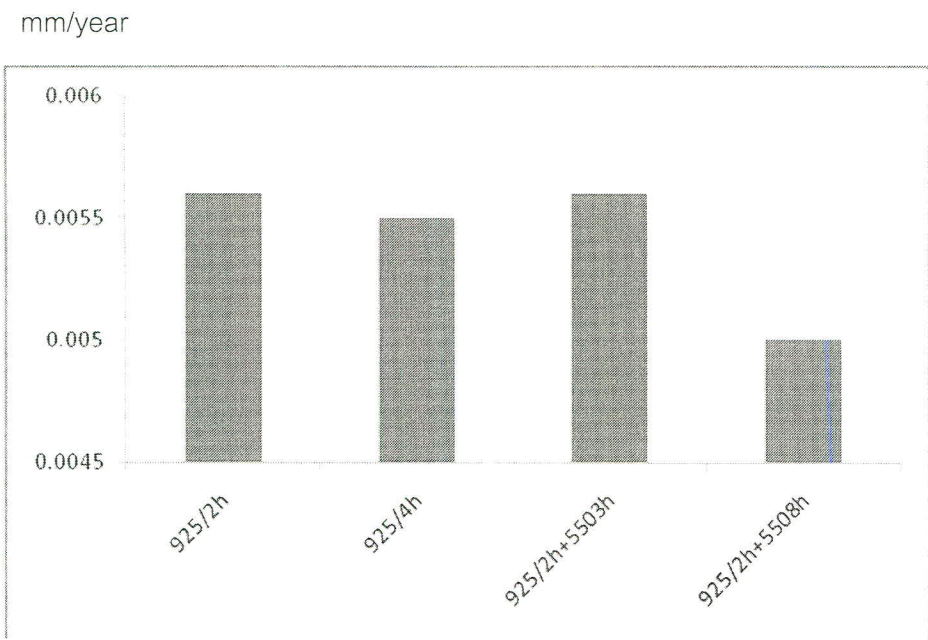


รูปที่ 7.29 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบโครงสร้างแบบ Martensite ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด

ชิ้นงานที่อยู่ในกลุ่มโครงสร้างแบบ Martensite นั้นมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ในระดับกลางถึงจะให้ความร้อนจนเฟส β จะมีขนาดที่ชัดเจนขึ้นมาก ก็ยังไม่ส่งผลกระทบอย่างเป็นนัยสำคัญ กรณีที่โครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากแบบ Martensite ไปเป็นโครงสร้างแบบเข็มนี้จะทำให้อัตราการต้านทานการกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากมีผลของการเติบโตของเฟส α ซึ่งจะมีความชัดเจนในคุณลักษณะของการเป็น Galvanic cell กับเฟส β ซึ่งค่าจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการเข้าครอบครองพื้นที่ของทั้งเฟส α และเฟส β

7.4.4 สมบัติทางการกัดกร่อนของขึ้นทดสอบโครงสร้าง Globular

นำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่มแบบ Globular ทั้งที่ผ่านการ Aging และไม่ผ่านการ Aging นำมาทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเคมีแบบ Potentiodynamic ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังที่ปรากฏในภาพที่ 7.30

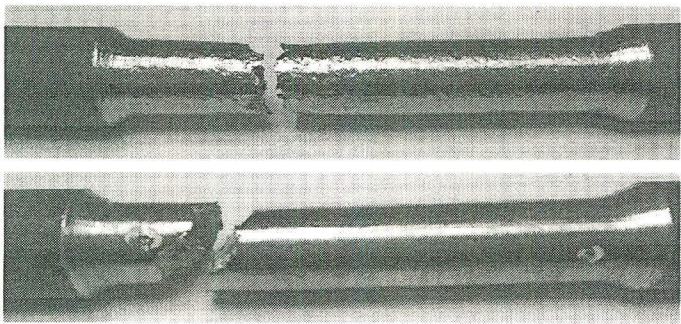


รูปที่ 7.30 แผนภูมิแสดงค่าจากการทดสอบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบโครงสร้างแบบ Globular ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในเงื่อนไขที่กำหนด

ค่าจากการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบชุดนี้แสดงผลของความสัมพันธ์ได้ชัดเจนมาก โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพียงขั้นตอนเดียว และทำการอบที่ 2 ชั่วโมง จะได้ค่าอัตราส่วนของเฟส $\beta + \alpha$ อยู่ที่ 42% จะมีอัตราการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.0056 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งในส่วนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการ Aging เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงจะได้ค่าอัตราส่วนของเฟส $\beta + \alpha$ อยู่ที่ 31% จะมีอัตราการกัดกร่อนอยู่ที่ 0.0050 มิลลิเมตรต่อปี จากการเปรียบเทียบจึงสามารถระบุได้ว่าอัตราการกัดกร่อนจะแปรผกผันกับอัตราส่วนของเฟส $\beta + \alpha$ สำหรับโครงสร้างแบบ Globular

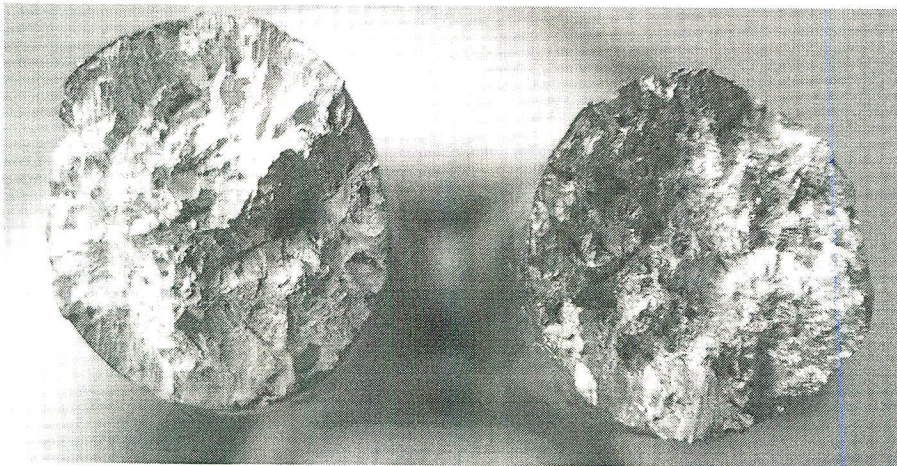
7.5 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการดึงทดสอบ

ลักษณะของหน้าตัดที่ถูกดึงจนขาดในงานวิจัยฉบับนี้จะเกิดขึ้นเพียง 2 ลักษณะเท่านั้น คือ การขาดแบบเปราะ ซึ่งในแผนภูมิแรงต่อระยะทางจะไม่ปรากฏช่วงของการเปลี่ยนรูปโดยถาวร ซึ่งเกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบที่สามารถระบุได้ว่า เป็นชิ้นงานในกลุ่มโครงสร้าง Martensite ทั้งหมด การแตกหักชนิดที่สองจะเป็นการขาดแบบเหนียวซึ่งในแผนภูมิแรงต่อระยะทางจะปรากฏช่วงของการเปลี่ยนรูปโดยถาวร ซึ่งเกิดขึ้นในชิ้นทดลองโครงสร้างอื่น ๆ นอกเหนือจาก Martensite ในทุก ๆ ชิ้น



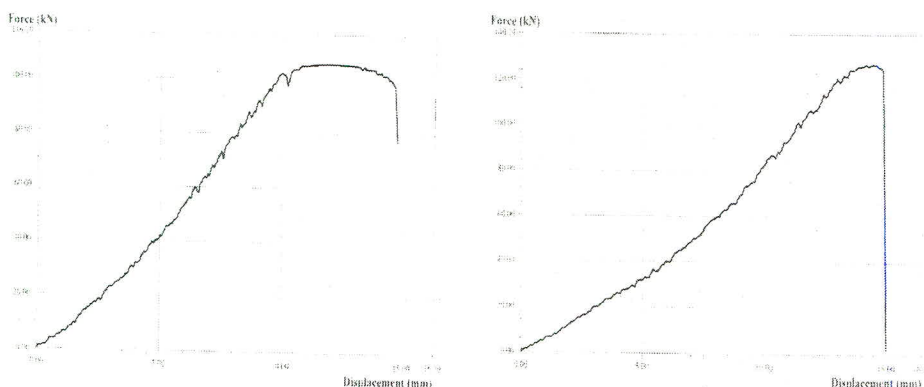
รูปที่ 7.31 (บน) ชิ้นงานขาดแบบเหนียว (ล่าง) ชิ้นงานขาดแบบเปราะ

อ้างอิงจากรูปที่ 7.31 ชิ้นงานที่ขาดแบบเหนียวจะมีลักษณะของผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบฉาบปรากอยู่ ในขณะที่ชิ้นงานแบบเปราะจะไม่ปราก และยังเห็นแนวของผิวที่ทำการกลึงมาอยู่ จากรูปที่ 7.31 จะสังเกตได้ อีกว่า ชิ้นงานแบบเหนียวจะมีลักษณะ Cup & Cone ใกล้แนวขาดในขณะที่ชิ้นงานที่ขาดแบบเปราะจะไม่มี โดยที่ ชิ้นงานเมื่อขาดแล้วจะหดกลับเป็นส่วนใหญ่ ในส่วนหน้าตัดของชิ้นงานที่ขาดแบบเหนียวจะมีลักษณะค่อนข้าง ละเอียด เป็นเยื่อ ๆ ในขณะที่ชิ้นงานที่ขาดแบบเปราะจะมีการผสมผสานระหว่างแนวขาดแบบเยื่อ และหน้าตัดที่ แตกหักเป็นแนวเรียบเหมือนหินแตก หรือแบบลูกกวาดแตก ดังที่แสดงในรูปที่ 7.32



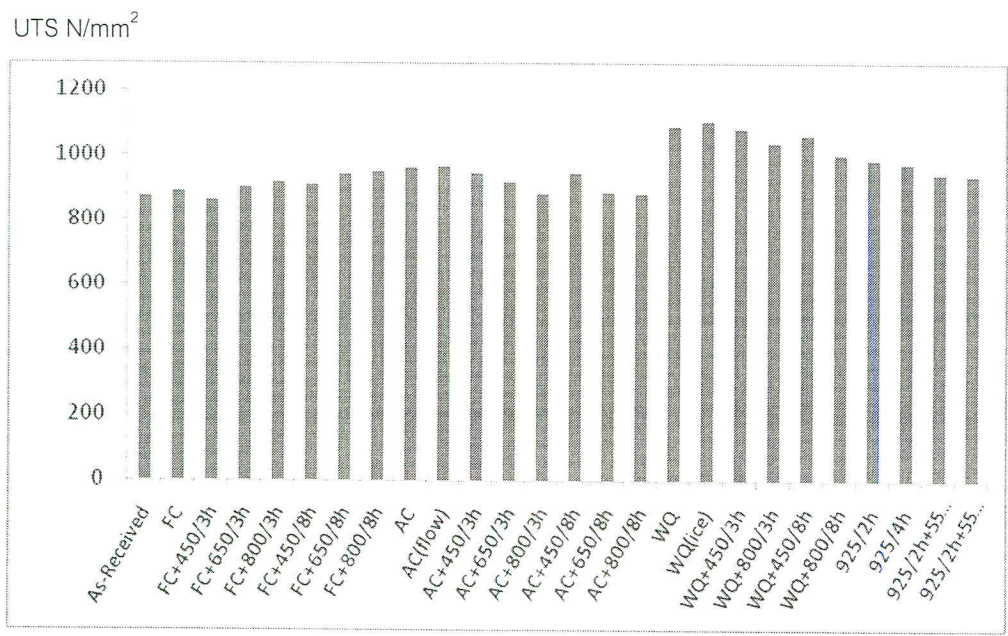
รูปที่ 7.32 (ซ้าย) หน้าตัดชิ้นงานขาดแบบเปราะ (ขวา) หน้าตัดชิ้นงานขาดแบบเหนียว

เมื่อสังเกตที่กราฟซึ่งชุดควบคุมเครื่องดัดทดสอบพิมพ์ออกมา นั้น จะสรุปได้ว่าถึงแม้สเกลของกราฟจะเป็น หน่วยแรงต่อระยะการยืดตัว แต่ยังสามารถแยกความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมของชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่แตกหัก แบบเหนียว กับแตกหักแบบเปราะได้อยู่จากช่วงที่เป็น Plastic Zone ซึ่งชิ้นทดสอบที่แตกหักแบบเหนียวจะไม่ ปรากฏให้พบถึงแม้จะมีการยืดตัวเล็กน้อยก็ตาม ดังรูปที่ 7.33



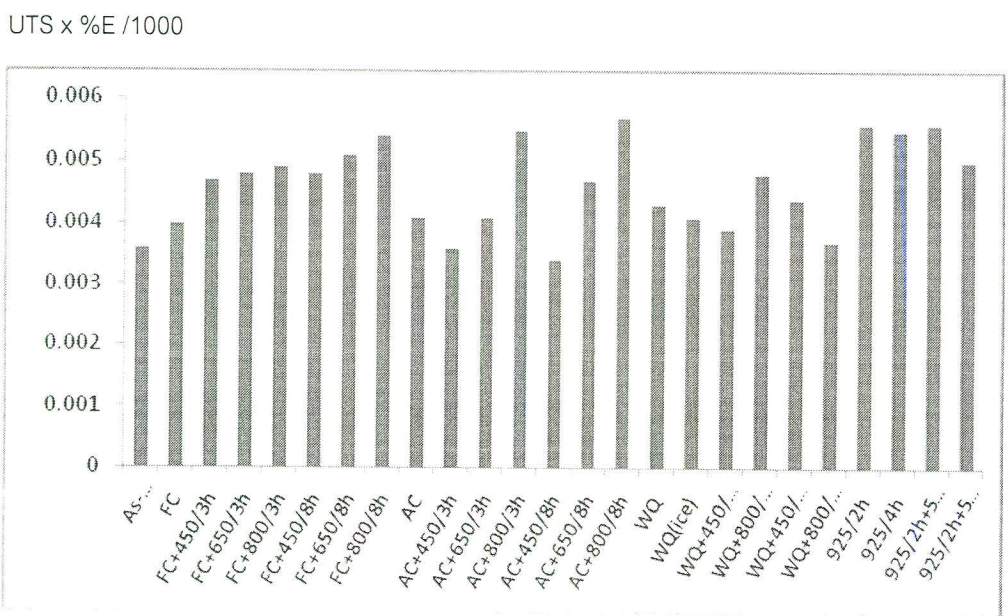
รูปที่ 7.33 กราฟจากการดัดทดสอบ (ซ้าย) ชิ้นงานขาดแบบเปราะ (ขวา) ขาดแบบเหนียว

7.6 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบแต่ละโครงสร้างจุลภาค
นำข้อมูลการดึงทดสอบที่ได้มาแสดงรวมดังในรูปที่ 7.34



รูปที่ 7.34 แสดงผลลัพธ์ของค่า Ultimate tensile stress ของชิ้นทดสอบทั้งหมดในงานวิจัย

การนำข้อมูลเพียงแค่ UTS มาแสดงจะยังไม่สามารถบอกคุณสมบัติความแข็งแรงได้ทั้งหมด เนื่องจากวัสดุจำเป็นจะต้องมีความสามารถในการดูดซับพลังงาน และมีความยืดหยุ่นที่เหมาะสม ดังนั้นจึงนำเสนอค่า UTS x %E และหารด้วย 1000 เพื่อดูความสามารถโดยรวมดังรูปที่ 7.36

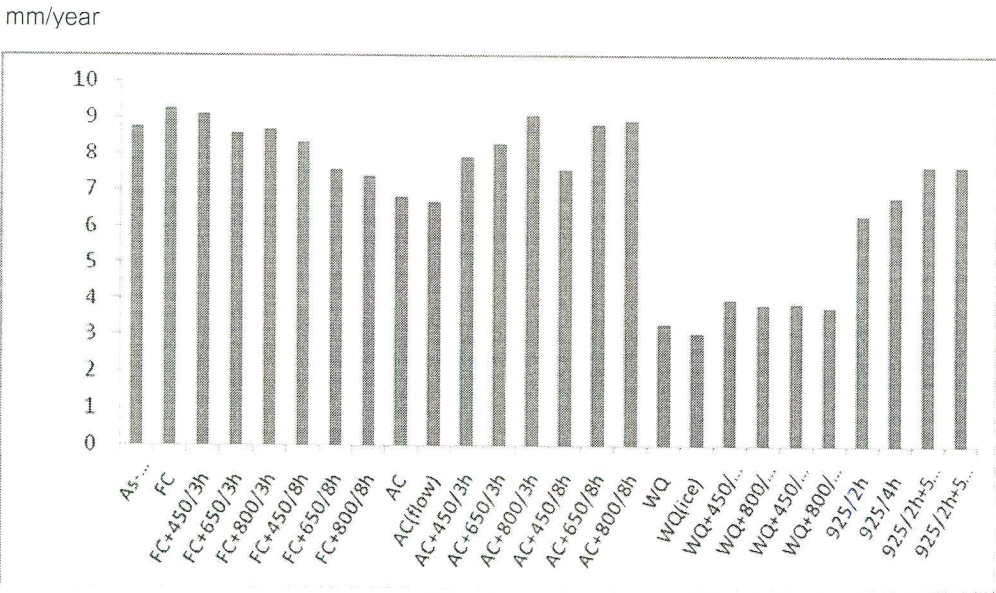


รูปที่ 7.35 แสดงผลลัพธ์ของค่าความสมดุลของความแข็งแรงและยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบทั้งหมด

จากข้อมูลในแผนภูมิของรูปที่ 7.34 และ 7.35 จะพบว่า โครงสร้างแบบ Martensite นั้นมีความแข็งแรงสูง แต่ขาดความยืดหยุ่น และความสามารถในการดูดซับพลังงานที่เข้ามากระทำ ในส่วนของกลุ่มโครงสร้างแบบ Lamellar นั้นจะมีความสมดุลทางด้านความแข็งแรงสูง แต่เมื่อผ่านกระบวนการ Aging จะทำให้ค่าความสมดุลทางด้านความแข็งแรงลดลง ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ตรงกันข้ามกับโครงสร้างแบบ Basket Weave ที่ขึ้นทดสอบเมื่อผ่านกระบวนการ Aging แล้วจะทำให้ค่าความสมดุลด้านความแข็งแรงสูงขึ้นตามลำดับ

7.7 เปรียบเทียบสมบัติทางการกัดกร่อนของขึ้นทดสอบแต่ละโครงสร้างจุลภาค

นำข้อมูลการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อนด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเคมีแบบ Potentiodynamic ที่ได้มาแสดงรวมดังในรูปที่ 7.36

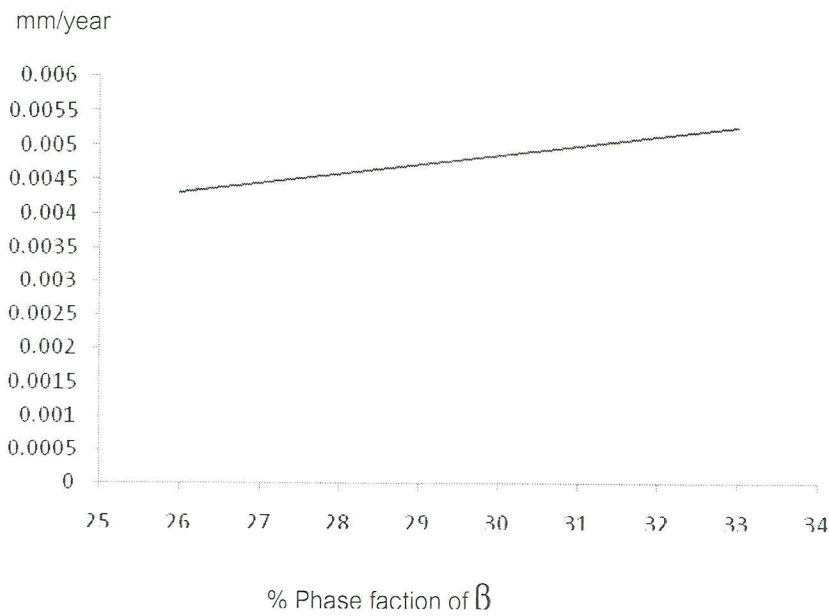


รูปที่ 7.36 แสดงผลลัพธ์ของค่าอัตราการกัดกร่อนของขึ้นทดสอบทั้งหมด

Basket Weave ที่ผ่านการ Aging ที่ 450⁰C ที่ 8 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าอัตราการกัดกร่อนที่สูงในกลุ่มคือ 0.0034 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งน้อยกว่าชิ้นงาน As-Received และขึ้นทดสอบโครงสร้าง Basket Weave ที่ผ่านการ Aging ที่ 450⁰C ที่ 3 ชั่วโมง ก็มีอัตราการกัดกร่อนต่อปีน้อยเช่นกัน ซึ่งทั้งสามขึ้นทดสอบนี้อยู่ในกลุ่มที่สามารถทนทานสภาพการกัดกร่อนได้สูง ในส่วนของขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการ Aging ด้วยอุณหภูมิและระยะเวลายาวนานจะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนที่ทดสอบได้มีค่าเพิ่มขึ้น กลุ่มโครงสร้าง Globular นั้นจะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำทั้งกลุ่มอันเป็นผลมาจากเฟส β ที่เกิดการกระจุกตัวขึ้นมาเป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ชัดเจน

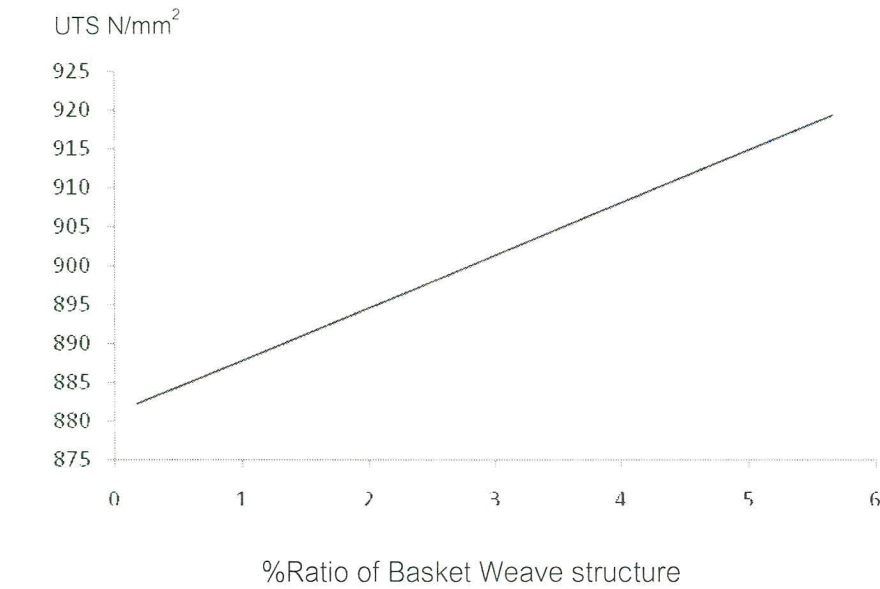
8. สรุปผล

- 1. ชิ้นงานทดสอบ Ti-6Al-4V ที่เริ่มต้นด้วยสภาพ Mill annealing เมื่อผ่านการให้ความร้อนเหนือเส้น Transus temperature แล้วทำให้เย็นตัวในรูปแบบที่แตกต่างกันจากเร็วไปช้าตามลำดับดังนี้ เย็นตัวในเตา (0.32^oC/sec) เย็นตัวในอากาศ (22^oC/sec) และเย็นตัวด้วยการ quench ในน้ำ (139^oC/sec) จะได้ผลลัพธ์โครงสร้างเรียงตามลำดับดังนี้ โครงสร้าง Lamellar โครงสร้าง Basket Weave และโครงสร้าง Matensite
- 2. ชิ้นงานทดสอบ Ti-6Al-4V ที่เริ่มต้นด้วยสภาพ Mill annealing เมื่อผ่านการให้ความร้อนต่ำกว่าเส้น Transus temperature แล้วทำให้เย็นตัวด้วยการ Quench ในน้ำ (139^oC/sec) จะได้ผลลัพธ์โครงสร้างแบบ Globular
- 3. ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างตั้งต้นแบบ Lamellar เมื่อผ่านกรรมวิธีการ Aging จะทำให้เกิดการขยายตัวของเฟส α และส่งผลให้เฟส β ที่ทำหน้าที่เป็น Boundary มีการแตกกิ่งเส้นขอบเกรนที่มากขึ้น จนทำให้ค่าความกว้างของ Lamellar plate มีค่าน้อยลง เกรนมีความละเอียดขึ้นส่งผลให้ค่าสมบัติทางกลจากการดึงทดสอบ และการวัดค่าความแข็งที่ผิวมีค่ามากขึ้น
- 4. ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างตั้งต้นแบบ Lamellar เมื่อผ่านกรรมวิธีการ Aging จะส่งผลให้เฟส β ที่อยู่ตามขอบเกรน มีจำนวนลดลงส่วนที่มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากสภาพความเสถียรของโครงสร้างที่เย็นตัวลงด้วยอัตราที่ช้าจนใกล้เคียงสภาวะสมดุล จึงส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามที่แสดงในรูปภาพที่ 8.1 ซึ่งลักษณะกราฟที่ได้นั้นเกือบจะเป็นเส้นตรง และทำให้โครงสร้างประเภทนี้มีคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ค่อนข้างเสถียรในการเลือกใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมที่สูง



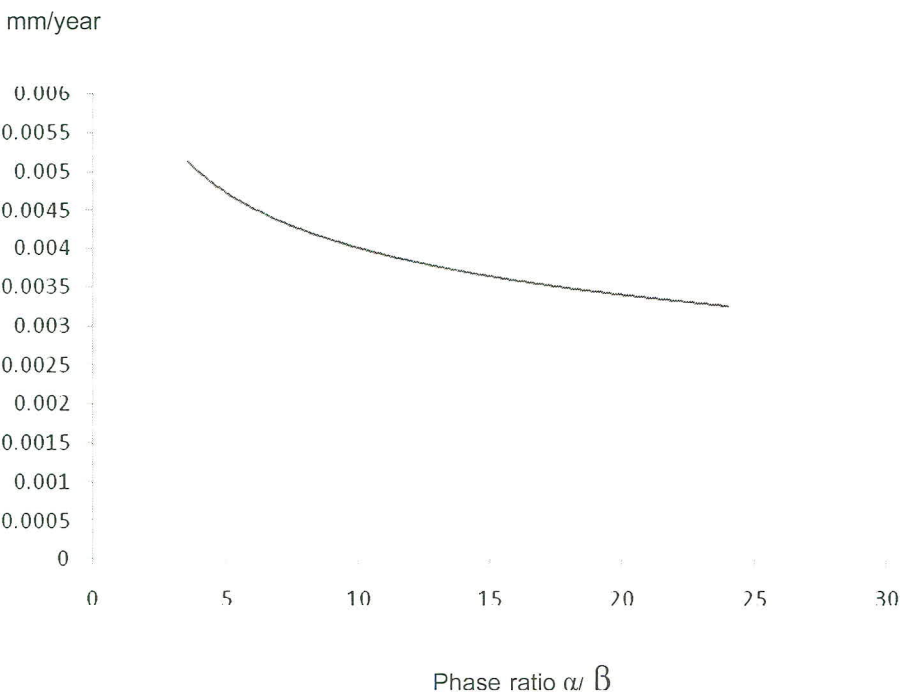
รูปที่ 8.1 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับ % Phase faction of β ของโครงสร้างกลุ่ม Lamellar

5. ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างตั้งต้นแบบ Basket Weave เมื่อผ่านกรรมวิธีการ Aging จะทำให้เกิดการเสียสภาพโครงสร้าง Basket Weave เนื่องจากเฟส α จะมีการเติบโตแบบอิสระและเฟส β ที่อยู่ขอบเกรนไม่สามารถขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation อีกต่อไป ทำให้คุณสมบัติความแข็งแรงลดลงดังที่แสดงในรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง UTS กับ สัดส่วน%โครงสร้าง Basket Weave ต่อโครงสร้างอื่น

6. ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างตั้งต้นแบบ Basket Weave เมื่อผ่านกรรมวิธีการ Aging จะทำให้ เฟส β เกิดการจับกลุ่มขึ้นเป็นอีกเกรนหนึ่งและมีสัดส่วนที่มากขึ้น จนส่งผลทำให้อัตราการกัดกร่อนมีค่ามากขึ้นตามลักษณะของ Galvanic cell ที่เปลี่ยนแปลงไปจนมีผลลัพธ์ตามที่แสดงในรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับ Phase ratio α / β ของโครงสร้างกลุ่ม Basket Weave

7. ชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ Martensite เมื่อผ่านกรรมวิธีการ Aging ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของเฟส β ทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าลดลง แต่เมื่อผ่านกรรมวิธีการ Aging ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C จะทำให้เกิดการโตโดยเฟส α แบบเข็ม (Needle α) ทำให้ความแข็งแรงทางกลลดลงอย่างมาก

8. ชิ้นงานที่มีโครงสร้าง Martensite มีค่าอัตราการกัดกร่อนในระดับกลาง การผ่านกระบวนการ Aging ไม่ส่งผลที่ทำให้อัตราการกัดกร่อนเปลี่ยนแปลงไปอย่างแตกต่างมากนัก อัตราการกัดกร่อนจะมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นแบบเข็ม (Needle α)

9. ชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ Globular เมื่อได้รับความร้อนต่อเนื่องทั้งจากการทำ Heat treatment ในขั้นตอนแรกหรือในขั้นตอนของการ Aging จะส่งผลให้ขนาดของเฟส α' มีขนาดใหญ่ขึ้น

10. ชิ้นงานทดสอบโครงสร้างแบบ Globular จะถูกกำหนดค่าอัตราการกัดกร่อนโดยแปรผันตรงสัดส่วนของเฟส $\beta + \alpha$ โดยอัตราการกัดกร่อนจะมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อเฟส $\beta + \alpha$ มีสัดส่วนที่มากขึ้น

11. ชิ้นงานที่มีโครงสร้าง Martensite จะมีการแตกหักแบบเปราะในการทดสอบดึง ในส่วนของโครงสร้าง Lamellar, Basket Weave และ Globular จะเป็นการแตกหักแบบเหนียว

12. ชิ้นงาน As-Received จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนที่ค่อนข้างน้อยเนื่องจากลักษณะของเฟส β ถึงแม้จะมีอัตราส่วนพื้นที่ถึง 32% แต่ลักษณะของเกรนมีลักษณะกระจายตัว ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของเฟส β ของชิ้นงานโครงสร้าง Basket Weave ที่ผ่านการ aging ที่ 450°C ที่ 3 และ 8 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงชิ้นงาน As-Received

9. ข้อเสนอแนะ

1. กรรมวิธีทางความร้อนที่ทำให้โครงสร้างของเฟส β มีลักษณะเป็นเส้นขอบ เส้นบางๆ หรือมีลักษณะเล็กสปี จะทำให้เราสามารถควบคุมคุณสมบัติทั้งด้านความแข็งแรง ได้ง่ายเนื่องจากเฟส β ในลักษณะแบบนี้จะมีความสัมพันธ์ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นกับสมบัติดังกล่าว

2. หากต้องการนำ Ti-6Al-4V ไปใช้ในงานที่มีสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 500°C ควรเลือกใช้โครงสร้าง Lamellar หรือ Martensite เนื่องจากโครงสร้างทั้งสองนี้มีความสามารถทางด้าน Temperature Stabilizer มากที่สุดในกลุ่มโครงสร้างทั้งหมด

3. กรรมวิธีทางความร้อนที่ทำให้โครงสร้างของเฟส β มีลักษณะกระจายตัว ไม่รวมเป็นกลุ่มจะมีคุณสมบัติทั้งด้านไฟฟ้าเคมีที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี