

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb



นางสาว อนัญญา รัมมะทรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF MICROSTRUCTURE AND YOUNG'S MODULUS OF  
THE Ti-Al-V-Nb TITANIUM ALLOYS



Miss Ananya Rummasong

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb

โดย

นางสาว อนัญญา รั่มมะทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

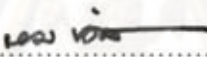
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

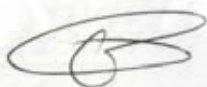
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

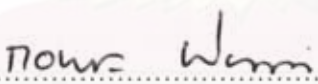
ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์

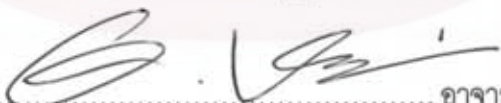
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐวร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

ศูนย์ทรัพยากรพยากรณ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนัญญา รั่มมะทง : การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb. (A STUDY OF MICROSTRUCTURE AND YOUNG'S MODULUS OF THE Ti-Al-V-Nb TITANIUM ALLOYS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เอกรัตน์ ไวยนิศย์, 122 หน้า.

ปัจจุบันโลหะผสมไทเทเนียมได้รับความนิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนวัสดุฝังในร่างกายมนุษย์ (Orthopedic implants) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โลหะผสมโคบอลต์ อย่างไรก็ตาม ค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียมยังคงสูงกว่ากระดูกมนุษย์ จึงได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญของปัญหาอาการเจ็บปวดในบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างกระดูกมนุษย์กับวัสดุฝังใน และนำไปสู่การคลายตัวของการเกาะยึดระหว่างวัสดุฝังในและกระดูก

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ที่มีค่ามอดุลัสของยังเหมาะสมที่นำไปใช้เป็นวัสดุฝังในร่างกาย โดยเริ่มจากเตรียมชิ้นงานทดสอบจากเศษโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V และผสมไนโอเบียมในปริมาณ 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลอมรวมกันในเตาอาร์คสตูญญากาศ เพื่อศึกษามลของไนโอเบียมต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียมด้วยเครื่อง Grindosonic พร้อมกับยืนยันผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยการวัดค่าความแข็ง การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ถูกมาใช้เพื่อยืนยันผลของไนโอเบียมต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสของยัง นอกจากนี้ ยังศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบโลหะผสมไทเทเนียมในสารละลายแอสค์ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

ผลจากการศึกษาของงานวิจัยนี้ พบว่า โลหะผสมไทเทเนียมมีโครงสร้างจุลภาคแบบ Widmanstätten ประกอบด้วย โครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้า โดยโครงสร้างแบบเข็มอัลฟามีแนวโน้มลดลง เมื่อผสมไนโอเบียมปริมาณสูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของค่ามอดุลัสของยังสำหรับโลหะผสมไทเทเนียมสภาพหล่อ (As-cast titanium alloys) ปริมาณไนโอเบียม 11.42 เปอร์เซ็นต์ ช่วยลดค่ามอดุลัสของยังจาก 107 กิกะปาสคาล มาอยู่ที่ 89 กิกะปาสคาล การอบชุบทางความร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปทำให้ค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียมเพิ่มขึ้นประมาณ 8 เท่า เมื่อเทียบกับโลหะผสมไทเทเนียมสภาพหล่อ อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธีการแบบโพเทนชิอไดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization measurement)

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....ชานัญญา รั่มมะทง.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....Prof. Wan.....  
 ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....G. Wan.....

# # 4870718321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : TITANIUM ALLOY / Ti-Al-V-Nb / YOUNG'S MODULUS / MICROSTRUCTURE

ANANYA RUMMASONG: A STUDY OF MICROSTRUCTURE AND YOUNG'S MODULUS OF THE Ti-Al-V-Nb TITANIUM ALLOYS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM. Dr.-Ing, THESIS CO-ADVISOR: EKKARUT VIYANIT. Dr.-Ing, 122 pp.

Nowadays, the titanium alloys are widely used for orthopedic implants because of their excellent properties compared with stainless steels 316L, cobalt base alloys. However, its Young's modulus is still more than modulus of bone, so it causes a pain in joining area and to loose of implant.

This work was intended to develop the Ti6Al4V titanium alloy to have an appropriated Young's modulus for orthopedic implant. Initially, the Ti6Al4V titanium alloy scrap and pure niobium 2, 6, 8 and 12 weight percent were melted by vacuum arc melting furnace. The effect of niobium content on young's modulus of titanium alloys were experimented by Grindosonic tester. To support the measured young's modulus of these alloys, the hardness was tested and microstructure was also observed by optical and scanning electron microscopes. Furthermore, to study corrosion behavior of those alloys, the polarization curves were evaluated in Hank's balance salt solution at 37 degree Celsius.

Based on experimental results, microstructure of the Ti-Al-V-Nb alloys were a typical Widmanstätten structure, acicular alpha on beta matrix. The acicular alpha decreased when niobium content increased which resulted in the effect on young's modulus of the as-cast titanium alloys. Increasing of the niobium content up to 11.42 weight percent in the as-cast Ti-Al-V-Nb, the young's modulus decreased from 107 GPa to 89 GPa. Heat treatment of the as-forged those alloys resulted in increasing the young's modulus up to 8 times. However, the corrosion behavior of all as-cast Ti-Al-V-Nb alloys showed no any significant change by potentiodynamic polarization measurement.

Department : ..... Metallurgical Engineering .....

Student's Signature ..... Ananya Rummasong .....

Field of Study : ..... Metallurgical Engineering .....

Advisor's Signature ..... Gobboon Lothongkum .....

Academic Year : ..... 2009 .....

Co-Advisor's Signature ..... Ekkarut Viyanit .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และรองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ คณะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านทั้งสองได้ให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย ที่สนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ตามสัญญารับทุนเลขที่ TG 01-50-045 และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน พี่ๆ หน่วยปฏิบัติการวิเคราะห์การประลัยและการเสื่อมสภาพของวัสดุ (FAMD) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ พี่พัชณี เทพนุ้ย และพี่ๆ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และนนทวุฒิ ปรีชาวุฒิ ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ทำยนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ด้วยดี ตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	20
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	21
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวอย่าง.....	35
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง.....	37
4.3 ผลการทดสอบหาค่ามอดุลัสของยังของตัวอย่าง.....	50
4.4 ผลการทดสอบความแข็งของตัวอย่าง.....	53
4.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของตัวอย่าง.....	56
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	60

บทที่	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก.....	65
ภาคผนวก ข.....	67
ภาคผนวก ค.....	71
ภาคผนวก ง.....	74
ภาคผนวก จ.....	76
ภาคผนวก ฉ.....	84
ภาคผนวก ช.....	89
ภาคผนวก ซ.....	90
ภาคผนวก ฌ.....	108
ภาคผนวก ญ.....	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	122

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนผสมของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	3
2.2	คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V.....	7
2.3	คุณสมบัติเปรียบเทียบของโลหะแต่ละชนิดกับกระดูก.....	7
2.4	คุณสมบัติต่างๆ ของไนโอเบียม.....	8
2.5	รายการวัสดุชีวการแพทย์โลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้ทดสอบ.....	8
2.6	ค่า Bo และ Md ของชิ้นทดสอบ.....	9
2.7	คุณสมบัติกลของ Ti-8Nb-13Zr และ Ti-18Nb-13Zr.....	18
3.1	ผลการคำนวณน้ำหนักของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V และไนโอเบียม.....	27
4.1	รหัสชิ้นงานสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ.....	35
4.2	ปริมาณธาตุในชิ้นงานตัวอย่างจากการวิเคราะห์ของ บริษัท MBH Analytical จำกัด และเอ็มเทค.....	36
4.3	ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุผสมที่ได้จากการชั่งน้ำหนักกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้ของชิ้นงานรหัส C และ F.....	36
4.4	ขนาดและน้ำหนักของชิ้นงาน.....	51
4.5	ผลการคำนวณค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานรหัส C และ F ตามมาตรฐาน ASTM E 1867-01.....	52
4.6	ผลค่าความแข็งของชิ้นงาน.....	54
4.7	ผลการทดสอบการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน.....	56
ง.1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส C และ F.....	74
ง.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส S ของ บริษัท MBH Analytical....	74
ง.3	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส S ของเอ็มเทค.....	75
จ.1	ผลการวัดความกว้าง และความหนาของชิ้นงาน.....	76
จ.2	ผลการวัดความถี่ของชิ้นงานรหัส C.....	77
จ.3	ผลการวัดความถี่ของชิ้นงานรหัส F.....	78
ฉ.1	ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน.....	84
ฉ.2	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน.....	85

ตารางที่		ญ หน้า
ด.3	อัตราการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน.....	85
ด.4	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน.....	85
ช.1	ผลค่าความแข็งของชิ้นงาน.....	89



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V.....	4
2.2	การเปลี่ยนแปลงของแผนภูมิสมดุลเฟสของไทเทเนียมเมื่อมีการผสมธาตุ.....	6
2.3	การแบ่งประเภทของธาตุผสมในระบบโลหะผสมไทเทเนียมสองธาตุ (Binary titanium alloys).....	6
2.4	ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุที่ว่าการแพทย์โลหะผสมไทเทเนียม.....	9
2.5	แผนภูมิเสถียรภาพเฟสจากความสัมพันธ์ของ Bo และ Md โดยกำหนดค่ามอดูลัสของยังไว้ในวงเล็บของโลหะผสมแต่ละชนิด.....	10
2.6	แผนภูมิโลหะผสมในไทเทเนียมจากความสัมพันธ์ของ Bo และ Md โดยกำหนดให้ M เป็นธาตุผสมใดๆ.....	10
2.7	ขั้นตอนการผลิตขึ้นทดสอบ.....	11
2.8	คุณสมบัติกลของโลหะผสมแต่ละชนิด.....	12
2.9	ค่ามอดูลัสของโลหะผสมแต่ละชนิด.....	12
2.10	เส้นโพราไรเซชันของขึ้นทดสอบ เมื่อจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายแอ่งค์ เป็นเวลา 1 และ 168 ชั่วโมง.....	13
2.11	ความต้านทานฟิล์มพาสซีฟกับเวลาของ CPTi, Ti-6Al-4V และ Ti-13.4Al-29Nb เมื่อจุ่มแช่ในสารละลายแอ่งค์ .....	14
2.12	เส้นโพราไรเซชันของขึ้นทดสอบ เมื่อจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายแอ่งค์ เป็นเวลา 1 และ 168 ชั่วโมง.....	15
2.13	ความต้านทานฟิล์มพาสซีฟกับเวลาของ Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4Fe และ Ti-6Al-4Nb ในสารละลายแอ่งค์.....	16
2.14	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และชุบในน้ำ.....	17
2.15	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชุบในน้ำ..	17

ภาพที่		๘ หน้า
2.16	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของ ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชุบในน้ำ.....	18
2.17	กราฟความเค้นแรงดึงของชิ้นทดสอบ.....	18
3.1	ลักษณะของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ในโอเปียม และอิเล็กโทรด.....	22
3.2	ลักษณะของกรรไกรตัดโลหะ และเครื่องตัดแบบ Discotom.....	22
3.3	ลักษณะของเครื่องเลื่อย และเครื่องขึงน้ำหนักร.....	23
3.4	ลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด และเครื่องวัดพีเอช.....	23
3.5	ลักษณะของเตาอาร์กสฤษฎากาศ และลักษณะภายใน Chamber.....	24
3.6	ลักษณะของเครื่อง Grindosonic ฟองน้ำสำหรับวางชิ้นงานและที่เคาะ สัญญาณ.....	24
3.7	แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.8	ลักษณะของโลหะผสมไทเทเนียมที่ถูกตัดสำหรับเตรียมทำการหลอม และ ลักษณะเปรียบเทียบผิวของชิ้นงานก่อนและหลังขัด.....	26
3.9	ลักษณะของแผ่นไนโอเปียมที่ถูกตัดสำหรับเตรียมทำการหลอม.....	26
3.10	ลักษณะของชิ้นงานสภาพหล่อในแบบหล่อเรซิน และกัดปาดผิวด้วยเครื่องกัด แล้ว.....	27
3.11	ลักษณะของชิ้นงานสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่อง ชุบขึ้นรูปร้อนแล้ว.....	28
3.12	ลักษณะของชิ้นงานรหัส C และ F สำหรับทดสอบวิเคราะห์ปริมาณธาตุ.....	29
3.13	ลักษณะของชิ้นงานรหัส C และ F สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	30
3.14	ลักษณะของชิ้นงานรหัส C และ F สำหรับทดสอบหาค่ามอดุลัส.....	31
3.15	ลักษณะของชิ้นงานรหัส C1-C5 สำหรับทดสอบการกัดกร่อน โดยเรียงลำดับ จากซ้ายไปขวา.....	32
3.16	ลักษณะของชุดควบคุมอุณหภูมิก่อนทดสอบ จะใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อน แบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ส่วนเครื่องควบคุมอุณหภูมินั้นจะ ใช้ในขณะทดสอบ.....	33
3.17	ลักษณะของอิเล็กโทรดอ้างอิง และ อิเล็กโทรดวัดกระแส.....	33
3.18	ลักษณะการต่อวงจรสำหรับทดสอบการกัดกร่อน.....	34

ภาพที่	ฐ หน้า
4.1	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1..... 38
4.2	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2..... 38
4.3	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3..... 39
4.4	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C4..... 39
4.5	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C5..... 40
4.6	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1 ..... 41
4.7	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2..... 42
4.8	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3..... 42
4.9	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4..... 43
4.10	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5..... 44
4.11	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1..... 45
4.12	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2..... 45
4.13	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3..... 46
4.14	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C4..... 46
4.15	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C5..... 47
4.16	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1..... 48
4.17	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2..... 48
4.18	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3..... 49
4.19	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4..... 49
4.20	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5..... 50
4.21	ผลการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของชิ้นงานรหัส C..... 53
4.22	ผลการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของชิ้นงานรหัส F..... 54
4.23	ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส C..... 55
4.24	ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส F..... 55
4.25	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบหาเส้นโพลาริเซชัน..... 57
4.26	ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าการกักความร้อนของชิ้นงานรหัส C..... 57
4.27	ผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกักความร้อนของชิ้นงานรหัส C..... 58
4.28	ผลการเปรียบเทียบอัตราการกักความร้อนของชิ้นงานรหัส C..... 58
4.29	ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มของชิ้นงานรหัส C 59

ภาพที่	หน้า
ก.1	เซลล์สำหรับทดสอบการกัดกร่อน..... 66
ข.1	การกำหนดช่วงที่จะทำการหาค่าตัวแปรต่างๆ..... 67
ข.2	การกรอกข้อมูลของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ..... 68
ข.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน, กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน.... 68
ข.4	ลักษณะกราฟเส้นสีดำที่โปรแกรมทำการ Fit curve ซ้อนทับกับกราฟที่ได้จาก การทดสอบ..... 69
ข.5	วิธีการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม..... 70
ค.1	ลักษณะของฟองน้ำสำหรับวางชิ้นงานและที่เคาะสัญญาณ..... 71
ค.2	ลักษณะของไมโครโฟนสำหรับวัดสัญญาณของชิ้นงาน..... 72
ค.3	ลักษณะการทำงานของวงจรสำหรับการวัดค่าความถี่ของชิ้นงาน..... 72
ค.4	ลักษณะการวางชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ..... 72
จ.1	กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C1 ที่ Mode 1..... 80
จ.2	กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C1 ที่ Mode 2..... 80
จ.3	กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C4 ที่ Mode 1..... 81
จ.4	กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C4 ที่ Mode 2..... 81
จ.5	กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส F1 ที่ Mode 1..... 82
จ.6	กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส F1 ที่ Mode 2..... 82
จ.7	กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส F5 ที่ Mode 1..... 83
ฉ.1	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C1... 86
ฉ.2	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C2... 86
ฉ.3	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C3... 87
ฉ.4	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C4... 87
ฉ.5	ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C5... 88
ช.1	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1..... 90
ช.2	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2..... 91
ช.3	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3..... 91
ช.4	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C4..... 92
ช.5	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C5..... 92
ช.6	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1..... 93

ภาพที่		หน้า
๗.7	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2.....	94
๗.8	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3.....	94
๗.9	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4.....	95
๗.10	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5.....	96
๗.11	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1.....	96
๗.12	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2.....	97
๗.13	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3.....	97
๗.14	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C4.....	98
๗.15	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C5.....	97
๗.16	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1.....	99
๗.17	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2.....	100
๗.18	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3.....	100
๗.19	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4.....	101
๗.20	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5.....	102
๗.21	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1.....	103
๗.22	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2.....	103
๗.23	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3.....	104
๗.24	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C4.....	104
๗.25	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C5.....	105
๗.26	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1.....	105
๗.27	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2.....	106
๗.28	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3.....	106
๗.29	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4.....	107
๗.30	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5.....	107

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลหะผสมไทเทเนียมได้รับความนิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนวัสดุที่ฝังในร่างกาย (Orthopedic implants) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โลหะผสมที่มีโคบอลต์เป็นหลัก เช่น ความต้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion) ต่ำ กระจกสามารถโตที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างกระดูกมนุษย์กับวัสดุที่ฝังในร่างกายได้ และสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ (Biocompatibility) ดี แต่อย่างไรก็ตาม ค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียมยังคงสูงกว่ากระดูกมนุษย์ จึงได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญของปัญหาอาการเจ็บปวดในบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างกระดูกมนุษย์กับวัสดุที่ฝังในร่างกาย และนำไปสู่การคลายตัวของวัสดุที่ยึดกระดูก ดังนั้น การเพิ่มความสามารถของการเข้ากันได้ทางกลของวัสดุที่ฝังในร่างกายกับกระดูกมนุษย์จึงได้รับความสนใจ และเป็นหัวข้อสำคัญของการพัฒนาโลหะผสมที่เหมาะสมเพื่อนำมาผลิตวัสดุที่ฝังในร่างกายคุณภาพสูง

โลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมนำมาทำเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกาย เนื่องจากหาได้ง่ายในท้องตลาด ราคาไม่สูงมากนัก และมีคุณสมบัติทางวัสดุที่ดี การผสมธาตุที่ช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการยึดตัว หรือลดค่ามอดุลัสของยังส่งผลให้มีการประยุกต์ใช้โลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ทำวัสดุที่ฝังในร่างกายเพิ่มสูงขึ้น

ไนโอเบียม จัดเป็นธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้า ( $\beta$ -stabilizer) ของโลหะผสมไทเทเนียม ซึ่งการเกิดโครงสร้างจุลภาคเบต้าช่วยลดค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียมลง นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณไนโอเบียมยังช่วยเพิ่มความเสถียรของชั้นผิวฟิล์มออกไซด์ ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียมในร่างกายมนุษย์ ลดผลกระทบของการกัดกร่อนต่อระบบทำงานภายในร่างกายมนุษย์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V เพื่อให้มีค่ามอดุลัสของยังเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุในการผลิตวัสดุที่ฝังในร่างกาย โดยเริ่มต้นจากโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V เกรดที่หาได้ตามท้องตลาด (Commercial grade) โดยการผสมไนโอเบียม ในการศึกษา



ครั้งนี้จะเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb ที่มีไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาโลหะผสมไทเทเนียมสำหรับใช้ทำเป็นวัสดุที่ฝังในร่างกาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb เมื่อผสมไนโอเบียม 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงค่ามอดูลัสของยังให้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุฝังในร่างกาย

1.2.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb เมื่อผสมไนโอเบียม 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้เป็นเฟสเบต้าเพิ่มขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb ที่มีปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการหลอมในเตาอาร์กสุญญากาศ และผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน

1.3.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb ที่มีปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการหลอมในเตาอาร์กสุญญากาศ และผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบค่ามอดูลัสของยังที่แตกต่างกันของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb เมื่อผสมไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงค่ามอดูลัสของยังให้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุฝังในร่างกาย

1.4.2 ทราบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-Al-V-Nb เมื่อผสมไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้เป็นเฟสเบต้าเพิ่มขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

##### 2.1.1 โลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V

โลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ถูกพัฒนาขึ้นในสหรัฐอเมริกาเมื่อช่วงปลายปี ค.ศ. 1940 มีโครงสร้างเป็นอัลฟา ( $\alpha$ ) –เบต้า ( $\beta$ ) เป็นเกรดที่มีการใช้งานมากที่สุดในบรรดาโลหะผสมไทเทเนียมทั้งหมด (คิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของโลหะผสมไทเทเนียมทั้งหมด) ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์เป็นการใช้งานด้านอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ ส่วนการการใช้งานเป็นชิ้นส่วนฝังในทางการแพทย์ (Medical implant) มีประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ [1]

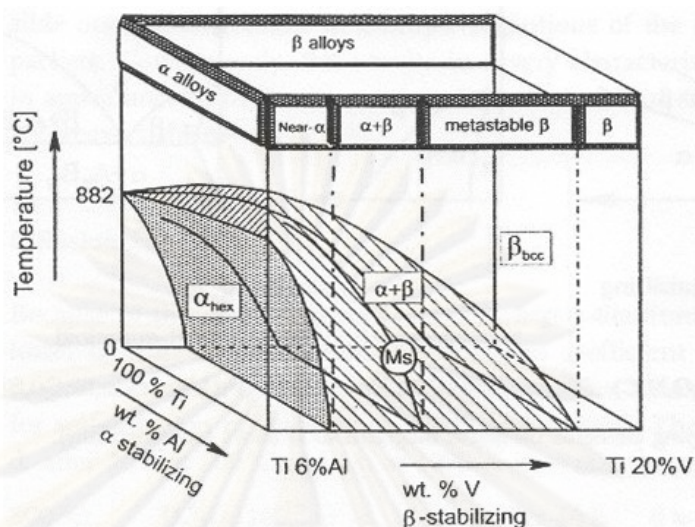
คุณสมบัติเด่นของโลหะผสมไทเทเนียมชนิดนี้ คือ ความแข็งแรง ความแกร่ง และความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม [1, 2, 3] นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติที่สามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่ออีกด้วย การใช้งานด้านการผ่าตัดจึงนิยมนำโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V มาทำเป็นสกรู ยึดกระดูก และข้อสะโพก หัวเข่า ข้อศอก ขากรรไกร นิ้วมือ และหัวใจเทียม [1, 3]

โลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V มีอะลูมิเนียมประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ เป็นธาตุเพิ่มความเสถียรโครงสร้างจุลภาคอัลฟา ( $\alpha$ -stabilizer) ทำให้เส้นการเปลี่ยนเฟสระหว่าง  $\beta/(\alpha+\beta)$  (Transus) สูงขึ้น และมีวาเนเดียมประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ เป็นธาตุเพิ่มความเสถียรโครงสร้างจุลภาคเบต้า ( $\beta$ -stabilizer) ทำให้เส้นการเปลี่ยนเฟสระหว่าง  $(\alpha+\beta)/\alpha$  ต่ำลง [1] ในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงแผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V โดยแผนภูมิด้านซ้ายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของไทเทเนียมกับอะลูมิเนียม และอุณหภูมิ ขณะที่แผนภูมิด้านหน้าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของไทเทเนียมที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ 6 เปอร์เซ็นต์ กับปริมาณวาเนเดียมที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิ

ส่วนผสมของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ตามมาตรฐานทางการค้าที่กำหนดไว้แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) [1]

Al	V	C	Fe	N	O	H	Ti
5.5-6.75	3.5-4.5	0.08	0.25	0.05	0.13	0.012	Bal.



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลเฟสของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V [3]

## 2.1.2 ความเข้าใจทางโลหะวิทยา

ไทเทเนียมเป็นธาตุอัญรูป (Allotropic element) โดยที่อุณหภูมิห้องจะมีโครงสร้างเป็น Hexagonal close-packed (HCP) หรือเรียกว่า “เฟสอัลฟา (Alpha phase,  $\alpha$ )” แล้วโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น Body Centered Cubic (BCC) หรือเรียกว่า “เฟสเบต้า (Beta phase,  $\beta$ )” เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 882.5 องศาเซลเซียส [1, 2, 3]

### 2.1.2.1 ธาตุผสม

ธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคอัลฟา ( $\alpha$ -stabilizer) ของโลหะผสมไทเทเนียม คือ กลุ่มของธาตุผสมที่เมื่อผสมกับไทเทเนียมแล้วจะทำให้ช่วงที่มีเสถียรภาพของเฟสอัลฟาขยับไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2.2 ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้แก่ อะลูมิเนียม แกลเลียม เจอมาเนียม คาร์บอน ออกซิเจน และไนโตรเจน ธาตุในกลุ่มนี้จะเป็นธาตุที่ละลายในโครงสร้างแบบแทรกตัว (Interstitial elements) และไม่เป็นธาตุทรานซิชัน (Non-transition elements)

ธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้า ( $\beta$ -stabilizer) ของโลหะผสมไทเทเนียม คือ กลุ่มของธาตุผสมที่เมื่อผสมกับไทเทเนียมแล้วจะทำให้ช่วงที่มีเสถียรภาพของเฟสเบต้าขยับไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำลงดังรูปที่ 2.2 ธาตุในกลุ่มนี้จะเป็นธาตุทรานซิชัน และธาตุมีตระกูล (Noble elements) ธาตุเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. กลุ่มที่สามารถละลายเข้าด้วยกันกับเฟสเบต้าได้ทุกส่วนผสม (Isomorphous group) ประกอบด้วย โมลิบดีนัม วาเนเดียม ทานทาลัม และโคบอลต์เบียม หรือไนโอเบียม

2. กลุ่มที่สร้างยูเทกตอยด์ (Eutectoid group) เป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) กับไทเทเนียม โดยมีอุณหภูมิยูเทกตอยด์ต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสของไทเทเนียมบริสุทธิ์ ประกอบด้วย แมงกานีส เหล็ก โครเมียม โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง ซิลิกอน ไฮโดรเจน และแพลลาเดียม

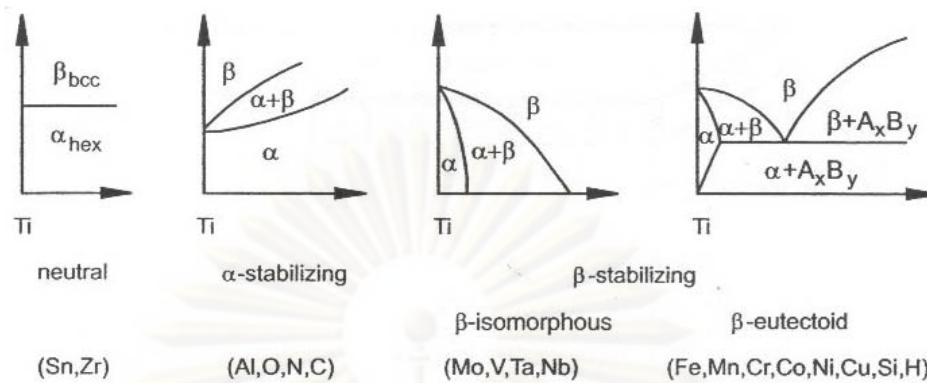
ธาตุกลุ่มที่เป็นกลาง (Neutral elements) คือ กลุ่มของธาตุผสมที่เมื่อผสมกับไทเทเนียมแล้วสามารถละลายได้ทั้งในเฟสอัลฟาและเบต้า แต่มีคุณสมบัติทำให้เฟสอัลฟาแข็งแรงขึ้น ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้แก่ ดีบุก และเซอร์โคเนียม [2, 3]

รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแผนภูมิสมดุลเฟสเมื่อมีการผสมธาตุกลุ่มที่เป็นกลาง กลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคอัลฟา กลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้าในกลุ่มที่สามารถละลายเข้าด้วยกันกับเฟสเบต้าได้ทุกส่วนผสม และกลุ่มที่สร้างยูเทกตอยด์ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 2.3 นั้นได้แสดงการแบ่งประเภทของธาตุผสมในระบบโลหะผสมไทเทเนียมสองธาตุ

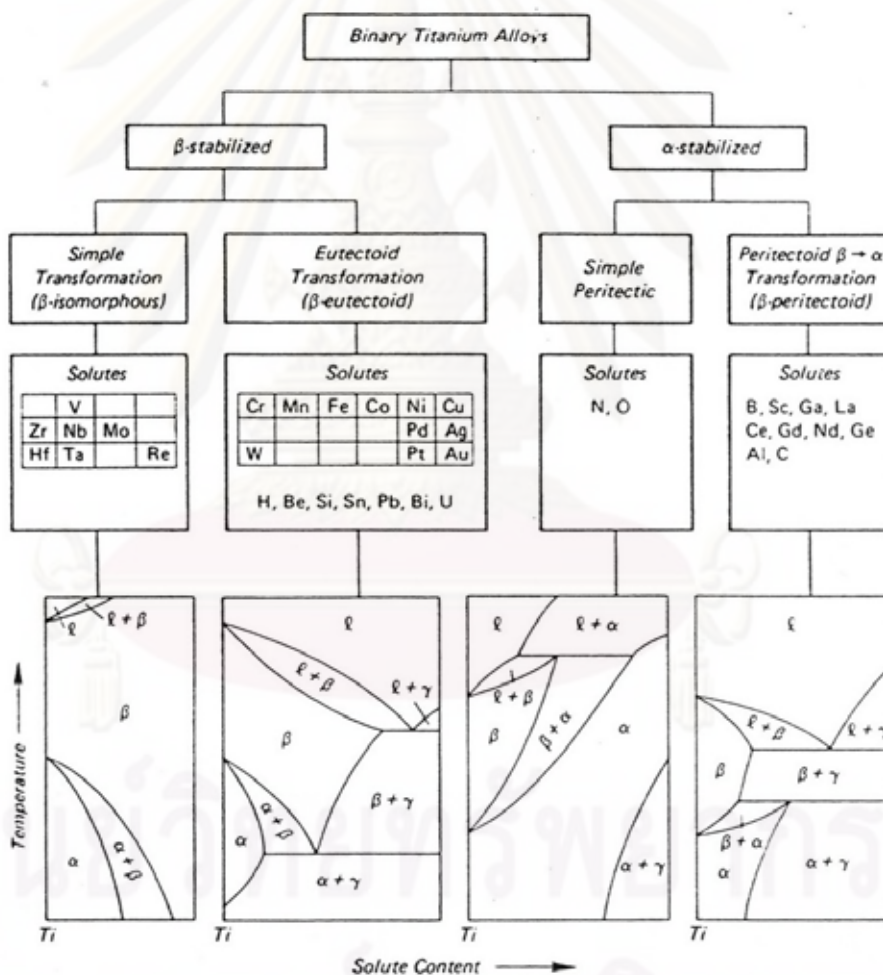
#### 2.1.2.2 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus)

ค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V อยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับโลหะผสมไทเทเนียมทั้งหมด แต่อยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับโลหะที่มีความแข็งแรงสูงชนิดอื่น โดยค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V นั้นอยู่ที่ประมาณ 100-130 กิกะปาสกาล คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V แสดงอยู่ในตารางที่ 2.2 ธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคอัลฟาที่เป็นแบบละลายแทรกที่ (Interstitial) และละลายแทนที่ (Substitution) ทำให้ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น ขณะที่ธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้าทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง ภายหลังจากการอบชุบละลาย (Solution treatment) จากอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่ามอดูลัสของยังที่ได้จะต่ำ ส่วนการบ่ม (Aging) ทำให้ค่ามอดูลัสของยังจากค่าที่ต่ำเพิ่มสูงขึ้น [1] การเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดกับกระดูกแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะพบว่า ค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V มีค่าใกล้เคียงกับกระดูกมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของแผนภูมิสมดุลเฟสของไทเทเนียมเมื่อมีการผสมธาตุ [3]



รูปที่ 2.3 การแบ่งประเภทของธาตุผสมในระบบโลหะผสมไทเทเนียมสองธาตุ (Binary titanium alloys) [1]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V [1, 4]

คุณสมบัติ	
ความหนาแน่น	4.43 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1650±15 องศาเซลเซียส
เส้นเบต้า	995±15 องศาเซลเซียส
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	(300 เคลวิน) 7.2 วัตต์/เมตร เคลวิน
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	(25 องศาเซลเซียส) 8.8 ไมครอน/เมตร เคลวิน
ความต้านแรงดึง	895-1250 เมกะปาสคาล
ค่ามอดุลัสของยัง	105-116 กิกะปาสคาล
ค่ามอดุลัสของแรงเฉือน	41-45 กิกะปาสคาล
อัตราส่วนปัวซอง	0.26-0.36

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิดกับกระดูก [1, 5]

โลหะผสม	ค่ามอดุลัสของยัง (กิกะปาสคาล)	ความต้านแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
กระดูก	7-28	100-150	~2.0
316L SS	210	230-1160	8.0
Co-Cr-Mo	230	430-1028	~8.5
Ti6Al4V	106	895-1250	4.43
CP Ti	110	240-740	4.51

### 2.1.3 ไนโอเบียม (Niobium)

โคลัมเบียม (Columbium, Cb) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1801 โดย Charles Hatchett พบในแร่โคลัมไบต์ (Columbite :  $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$  ในปัจจุบันเรียกว่า ไนโอไบต์ (Niobite)) ต่อมาในปี ค.ศ. 1846 Heinrich Rose และ Jean Charles Galissard de Marignac ก็ค้นพบธาตุนี้ใหม่ และไม่รู้ว่าจะเคยมีการค้นพบมาก่อนจึงตั้งชื่อให้ใหม่ว่า ไนโอเบียม (Niobium, Nb) [6] ไนโอเบียมมีเลขอะตอม 41 เป็นธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้าของโลหะผสมไทเทเนียม โดยอยู่ในกลุ่มที่สามารถละลายเข้าด้วยกันกับเฟสเบต้าได้ทุกส่วนผสม ธาตุไนโอเบียมสามารถลดค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V และยังสามารถเพิ่ม

คุณสมบัติของฟิล์มออกไซด์ที่ผิวทำให้ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้นอีกด้วย [2, 3] คุณสมบัติของไนโอเบียมแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของไนโอเบียม [6]

คุณสมบัติ	
ความหนาแน่น	8.57 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	2750 เคลวิน (2477 องศาเซลเซียส)
โครงสร้างผลึก	Body Centered Cubic
เลขออกซิเดชัน	5, 3
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	(300 เคลวิน) 53.7 วัตต์/เมตร เคลวิน
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	(25 องศาเซลเซียส) 7.3 ไมครอน/เมตร เคลวิน
ค่ามอดุลัสของยัง	105 กิกะปาสคาล
ค่ามอดุลัสของแรงเฉือน	38 กิกะปาสคาล
อัตราส่วนปัวซอง	0.40

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

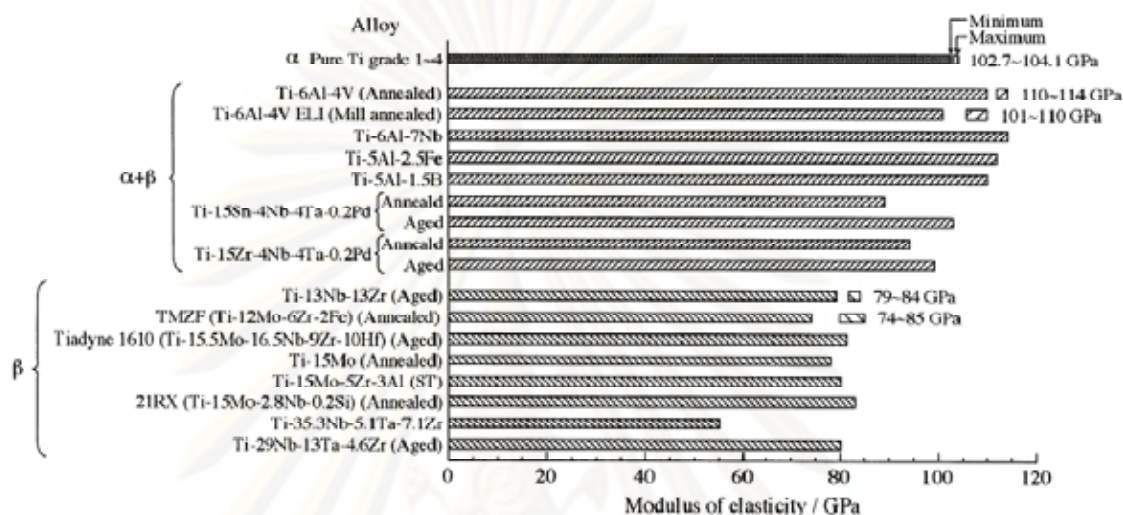
Mitsuo Niinomi [7] ได้ศึกษาคุณสมบัติกลของวัสดุชีวการแพทย์โลหะผสมไทเทเนียมโดยใช้ขั้นตอนทดสอบดังในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 รายการวัสดุชีวการแพทย์โลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้ทดสอบ [7]

1. Pure titanium (ASTM F67): Grade 1, 2, 3 and 4	9. Ti-13Nb-13Zr: near $\beta$ type (USA), low modulus <sup>a</sup>
2. Ti-6Al-4V ELI (Wrought: ASTM F136 and forged: ASTM F620): $\alpha + \beta$ type	10. Ti-12Mo-6Zr-2Fe: $\beta$ type (USA), low modulus <sup>a</sup>
3. Ti-6Al-4V (Casting: F1108): $\alpha + \beta$ type	11. Ti-15Mo: $\beta$ type (USA), low modulus <sup>a</sup>
4. Ti-6Al-7Nb (ASTM F1295): $\alpha + \beta$ type (Switzerland) <sup>a</sup>	12. Ti-16Nb-10Hf: $\beta$ type (USA), low modulus <sup>a</sup>
5. Ti-5Al-2.5Fe (ISO/DIS 5832-10): $\beta$ rich $\alpha + \beta$ type (Germany) <sup>a</sup>	13. Ti-15Mo-5Zr-3Al: $\beta$ type (Japan), low modulus
6. Ti-5Al-3Mo-4Zr: $\alpha + \beta$ type (Japan) <sup>a</sup>	14. Ti-15Mo-3Nb: $\beta$ type (USA), low modulus <sup>a</sup>
7. Ti-15Sn-4Nb-2Ta-0.2Pd: $\alpha + \beta$ type (Japan) <sup>a</sup>	15. Ti-35.3Nb-5.1Ta-7.1Zr: $\beta$ type (USA), low modulus <sup>a</sup>
8. Ti-15Zr-4Nb-2Ta-0.2Pd: $\alpha + \beta$ type (Japan) <sup>a</sup>	16. Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr: $\beta$ type (Japan), low modulus <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Developed for biomedical applications.

จากการศึกษาพบว่า ค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมเบต้ามีค่าอยู่ระหว่าง 55-85 กิกะปาสกาล ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามอดุลัสของยังของกระดูกที่มี 17-28 กิกะปาสกาล มากที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะผสมประเภทอื่น ดังรูปที่ 2.4



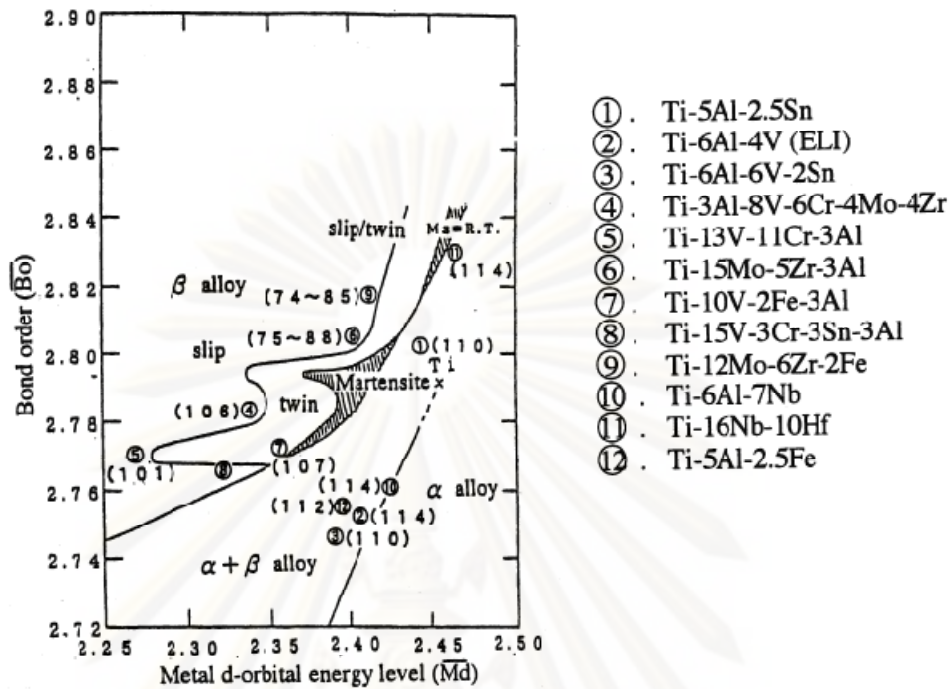
รูปที่ 2.4 ค่ามอดุลัสของยังของวัสดุชีวการแพทย์โลหะผสมไทเทเนียม [7]

Daisuke Kuroda, Mitsuo Niinomi et al. [8] ได้ออกแบบและศึกษาคุณสมบัติของโลหะผสมไทเทเนียมเบต้าชนิดใหม่สำหรับวัสดุที่ฝังในร่างกาย โดยใช้ขั้นตอน 7 ขั้นตอน ได้แก่ Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr, Ti-16Nb-13Ta-4Mo, Ti-29Nb-13Ta, Ti-29Nb-13Ta-4Mo, Ti-29Nb-13Ta-2Sn และ Ti-29Nb-13Ta-6Sn เพื่อทดสอบหาค่า  $\overline{B}_o$  (Bond order) และ  $\overline{M}_d$  (Metal d-orbital energy level) เมื่อค่า  $\overline{B}_o$  คือ ค่าเฉลี่ยจากการวัดความแข็งแรงพันธะโคเวเลนต์ระหว่างไทเทเนียมกับธาตุผสม และค่า  $\overline{M}_d$  คือ ค่าเฉลี่ยของพลังงานในชั้น d-Orbital ของโลหะ ซึ่งได้ค่า  $\overline{B}_o$  และ  $\overline{M}_d$  ดังในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่า  $\overline{B}_o$  และ  $\overline{M}_d$  ของขั้นตอนทดสอบ [8]

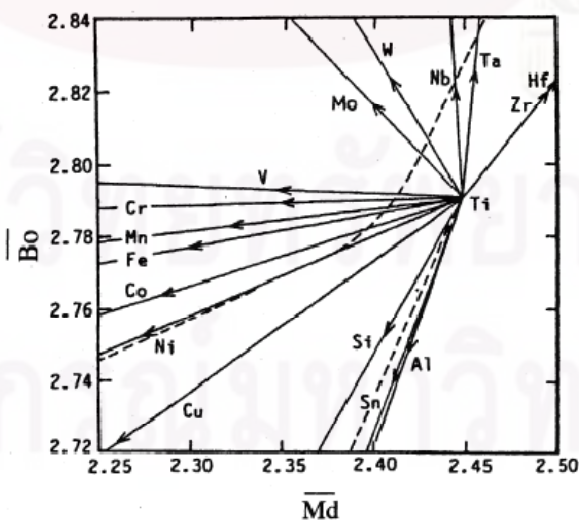
Alloy number	Chemical composition (mass%)	$\overline{B}_o$	$\overline{M}_d$
1	Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr	2.878	2.462
2	Ti-16Nb-13Ta-4Mo	2.843	2.436
3	Ti-29Nb-13Ta	2.866	2.446
4	Ti-29Nb-13Ta-4Mo	2.815	2.413
5	Ti-29Nb-13Ta-2Sn	2.856	2.438
7	Ti-29Nb-13Ta-6Sn	2.853	2.434





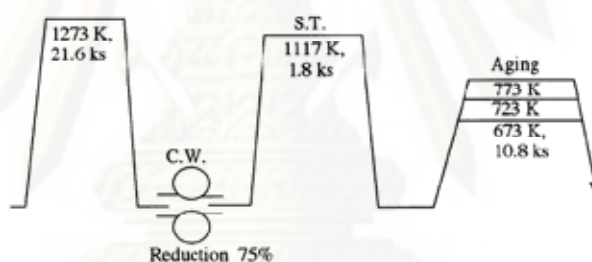
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเสถียรภาพเฟสจากความสัมพันธ์ของ  $\overline{Bo}$  และ  $\overline{Md}$  โดยกำหนดค่ามอดุลัสของยังไว้ในช่วงเล็บของโลหะผสมแต่ละชนิด [8]

จากการศึกษาดังรูปที่ 2.5 พบว่า ค่ามอดุลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียมลดลงเมื่อค่า  $\overline{Bo}$  และ  $\overline{Md}$  เพิ่มขึ้น และได้มีการแสดงแผนภูมิโลหะผสมในไทเทเนียม (Ti-M Binary alloys) จากความสัมพันธ์ของ  $\overline{Bo}$  และ  $\overline{Md}$  โดยกำหนดให้ทิศทางของหัวลูกศรในรูปที่ 2.6 เป็นปริมาณของธาตุผสมที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.6 แผนภูมิโลหะผสมในไทเทเนียมจากความสัมพันธ์ของ  $\overline{Bo}$  และ  $\overline{Md}$  โดยกำหนดให้ M เป็นธาตุผสมใดๆ [8]

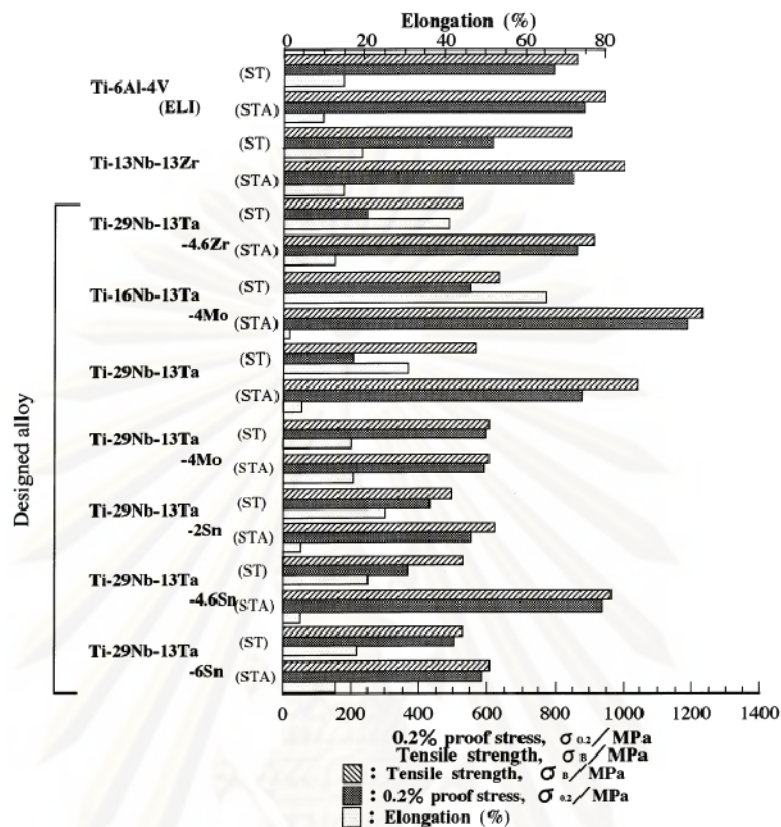
นอกจากนี้ Daisuke Kuroda, Mitsuo Niinomi et al. ยังได้ศึกษาคุณสมบัติกลของโลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ โดยนำขึ้นทดสอบมาทำการอบให้เนื้อสม่ำเสมอ (Homogenized) ที่ 1273 เคลวิน เป็นเวลา 21,600 วินาที แล้วทำการรีดเย็นลดขนาด 75 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.7 จากนั้นจึงนำมาอบชุบละลาย (Solutionized) ที่ 1117 เคลวิน เป็นเวลา 1,800 วินาที หลังจากอบให้เนื้อสม่ำเสมอแล้วทำการบ่ม (Aged) ที่ 673, 723 และ 773 เคลวิน เป็นเวลา 10,800 วินาที ตามลำดับ นำขึ้นทดสอบขนาด  $56 \times 12 \times 1.5$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> ทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง โดยหลังจากการนำขึ้นงานที่ผ่านการทำอบชุบละลาย (ST) ตรวจสอบค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืดตัว (Elongation) จากรูปที่ 2.8 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของขึ้นทดสอบต่ำกว่า และระยะยืดตัวมากกว่า/เท่ากับของโลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้กันทั่วไป เมื่อพิจารณาที่ Ti-16Nb-13Ta-4Mo และ Ti-29Nb-13Ta-4Mo พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของ Ti-16Nb-13Ta-4Mo ต่ำกว่า Ti-29Nb-13Ta-4Mo และจากรูปที่ 2.9 พบว่า เมื่อปริมาณไนโอเบียมมากขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง



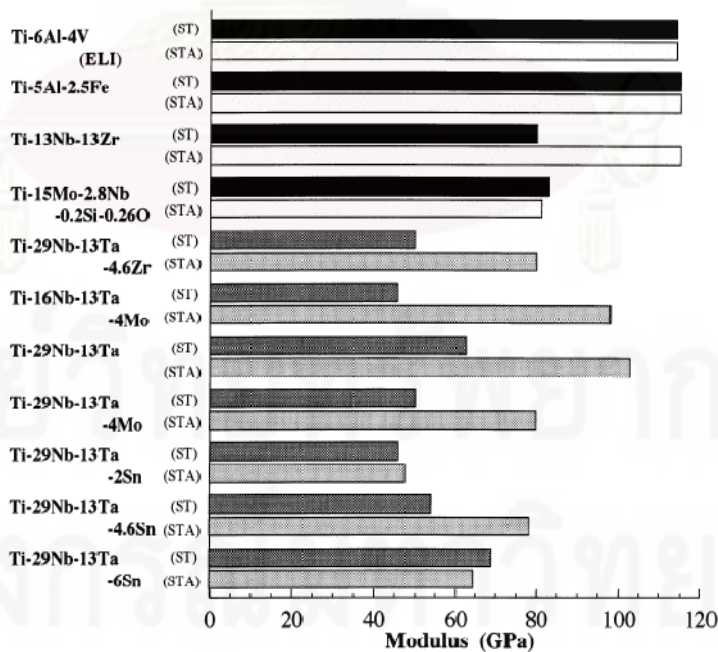
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตขึ้นทดสอบ [8]

A.K. Shukla, R. Balasubramaniam และ S. Bhargava [9] ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มพาสซีฟ (Passive film) ของ CPTi (Commercial pure titanium), Ti-6Al-4V และ Ti-13.4Al-29Nb ในสภาวะจำลองของของเหลวในร่างกายมนุษย์ โดยนำแผ่น CPTi และ Ti-13.4Al-29Nb ผ่านการรีดความหนา 2 เซนติเมตร และ Ti-6Al-4V ความหนา 1 เซนติเมตร มาล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วตามด้วยการทำความสะอาด โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคในอะซิโตน และใช้สารละลายแฮงค์ (Hank's solution) ทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

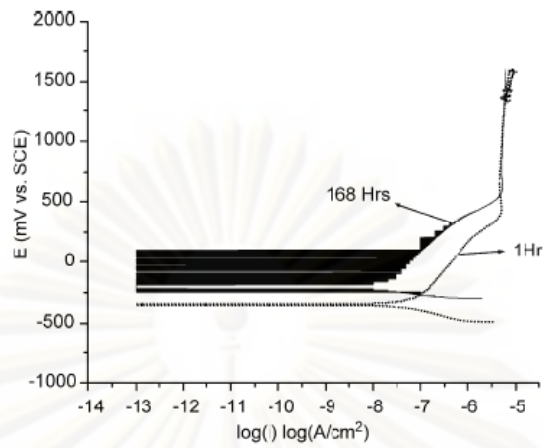
จากการศึกษาเส้นโพลาริเซชัน พบว่า เส้นโพลาริเซชันของขึ้นทดสอบ CPTi, Ti-6Al-4V และ Ti-13.4Al-29Nb มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม (Passive current density) เหมือนกัน และไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อจุ่มแช่ขึ้นงานในสารละลายแฮงค์ (รูปที่ 2.10) แต่ขึ้นทดสอบ Ti-13.4Al-29Nb พบการแตกของฟิล์มพาสซีฟ เมื่อมีปริมาณอะลูมิเนียมผสมเพิ่มขึ้น



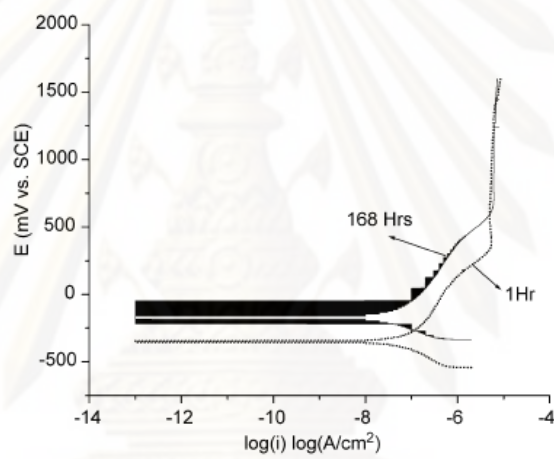
รูปที่ 2.8 คุณสมบัติกลของโลหะผสมแต่ละชนิด [8]



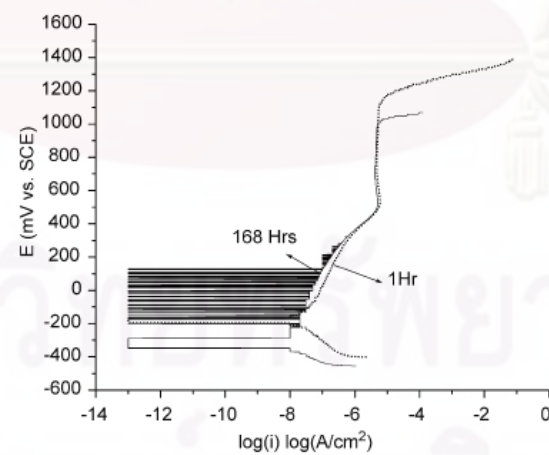
รูปที่ 2.9 ค่ามอดุลัสของโลหะผสมแต่ละชนิด [8]



ก. CPTi



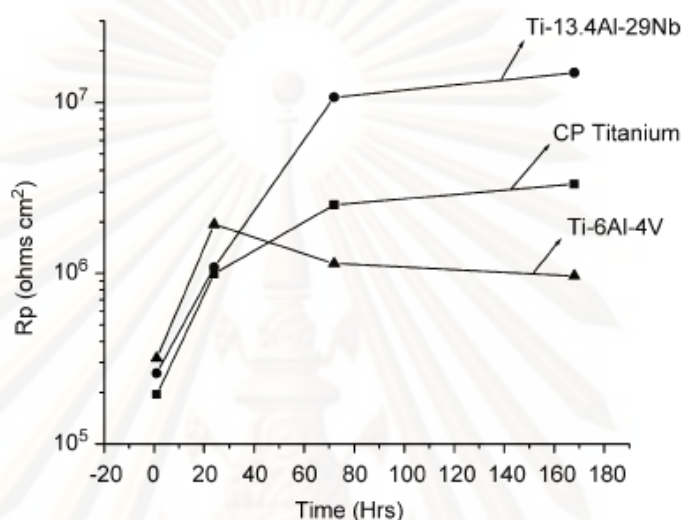
ข. Ti-6Al-4V



ค. Ti-13.4Al-29Nb

รูปที่ 2.10 เส้นโพลาริเซชันของชั้นทดสอบ เมื่อจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายแอ่งค์ เป็นเวลา 1 และ 168 ชั่วโมง [9]

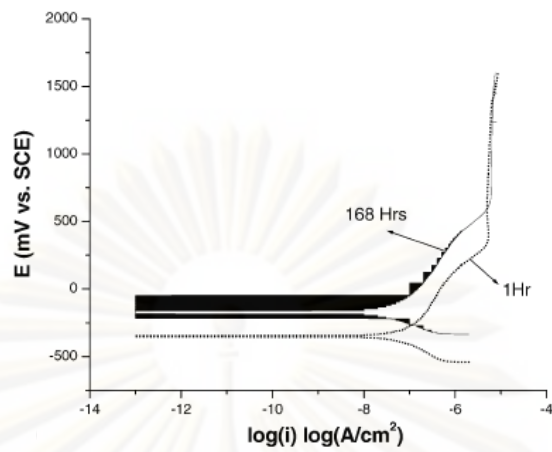
จากการศึกษาคุณสมบัติฟิล์มพาสซีฟของ Ti-6Al-4V ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 [9] พบว่าความต้านทานฟิล์มพาสซีฟ ( $R_p$ ) ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่คุณสมบัติฟิล์มพาสซีฟของ CP Ti และ Ti-13.4Al-29Nb ต้านทานได้สูงขึ้น โดยฟิล์มพาสซีฟของ Ti-13.4Al-29Nb ต้านทานได้สูงที่สุด



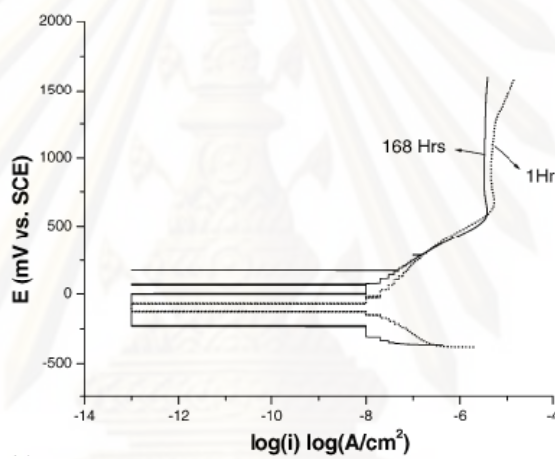
รูปที่ 2.11 ความต้านทานฟิล์มพาสซีฟกับเวลาของ CP Ti, Ti-6Al-4V และ Ti-13.4Al-29Nb เมื่อจุ่มแช่ในสารละลายแอสค [9]

A.K. Shukla, R. Balasubramaniam และ S. Bhargava [10] ศึกษาผลของการแทนที่วาเนเดียมด้วยเหล็กและไนโอเบียมต่อพฤติกรรมของฟิล์มพาสซีฟของ Ti-6Al-4V ในสภาวะจำลองของของเหลวในร่างกายมนุษย์ โดยใช้ชิ้นทดสอบเป็นแผ่น Ti-6Al-4V ผ่านการรีดขนาด  $10 \times 10 \times 1$  เซนติเมตร<sup>3</sup> และแผ่นกลม (Pancake) Ti-6Al-4Fe และ Ti-6Al-4Nb ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร มาหลอมแล้วตัดเป็นชิ้นงานสี่เหลี่ยมขนาด  $1 \times 1$  เซนติเมตร<sup>2</sup> หนา 0.5 เซนติเมตร และใช้สารละลายแอสคทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

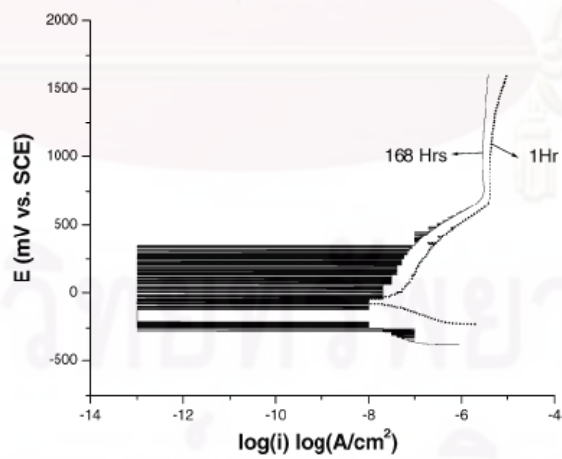
จากการศึกษาเส้นโพลาริเซชัน พบว่า เส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบ Ti-6Al-4V พบการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มต่ำที่สุด ขณะที่ชิ้นทดสอบ Ti-6Al-4Nb และ Ti-6Al-4Fe มีการลดลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม ผลดังแสดงในรูปที่



ก. Ti-6Al-4V



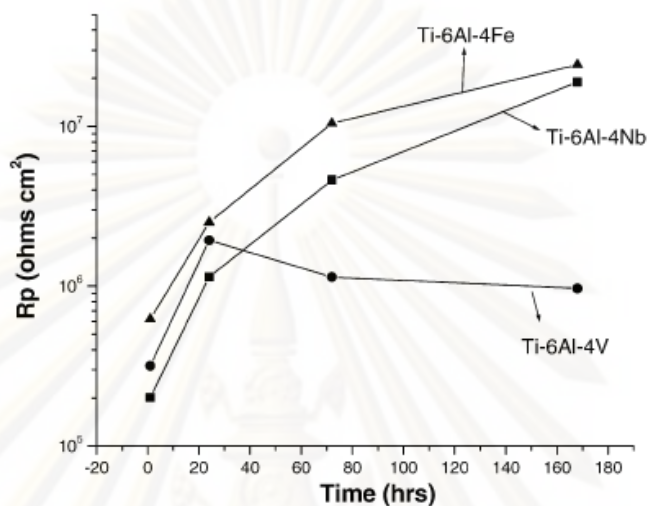
ข. Ti-6Al-4Nb



ค. Ti-6Al-4Fe

รูปที่ 2.12 เส้นโพลาริเซชันของชั้นทดสอบ เมื่อจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายแอสแต็ค เป็นเวลา 1 และ 168 ชั่วโมง [10]

จากการศึกษาคุณสมบัติฟิล์มพาสซีฟของ Ti-6Al-4V ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 พบว่า ความต้านทานฟิล์มพาสซีฟได้ต่ำลงเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่คุณสมบัติฟิล์มพาสซีฟของ Ti-6Al-4Fe และ Ti-6Al-4Nb ต้านทานได้ดีขึ้น

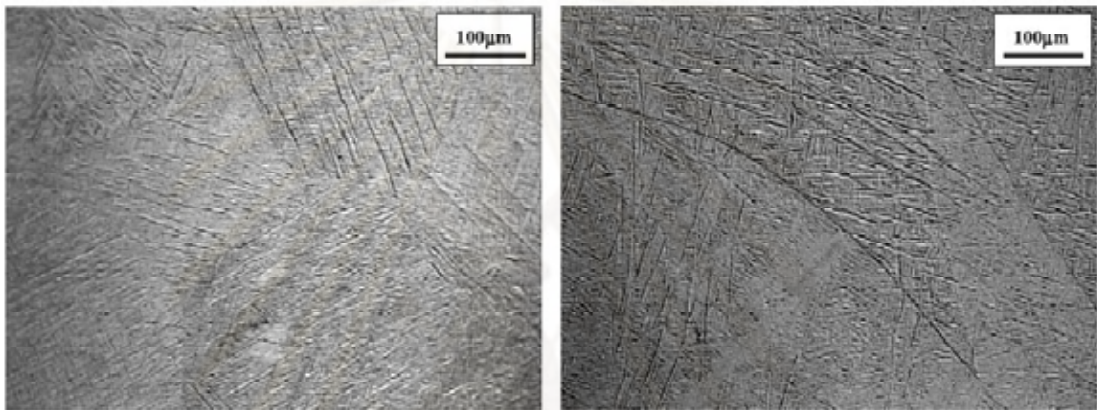


รูปที่ 2.13 ความต้านทานฟิล์มพาสซีฟกับเวลาของ Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4Fe และ Ti-6Al-4Nb ในสารละลายแยงค์ [10]

และ H.M. Silva, S.G. Schneider และ C. Moura Neto [11] ศึกษาโลหะผสมไทเทเนียมที่ปราศจากอะลูมิเนียม และวานาเดียมสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ โดยใช้ชิ้นทดสอบเป็น Ti-8Nb-13Zr และ Ti-18Nb-13Zr ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร อบชุบความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และชุบในน้ำ จากนั้นรีดเย็นจนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายเป็น 6 มิลลิเมตร (ลดขนาด 89 เปอร์เซ็นต์) และอบชุบความร้อนอีกครั้งที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชุบในน้ำ แล้วทดสอบแรงดึง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และชุบในน้ำ พบว่า มีโครงสร้างจุลภาคที่ไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นทั้งในชิ้นทดสอบ Ti-8Nb-13Zr และ Ti-18Nb-13Zr โดยเกิดเป็นเฟสเดี่ยวที่ปรากฏดังรูปที่ 2.14 เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดจากการทำการรีดเย็น ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชุบในน้ำ พบว่า มีโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์  $\alpha'$  ดังรูปที่ 2.15 โดยชิ้นทดสอบ Ti-8Nb-13Zr จะปรากฏเป็นโครงสร้าง Basket-weave ขนาดเล็ก ส่วนชิ้นทดสอบ Ti-18Nb-13Zr จะปรากฏเป็นโครงสร้างแบบเข็ม (Acicular) มาร์เทนไซต์  $\alpha'$  ขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบ Ti-8Nb-13Zr และ

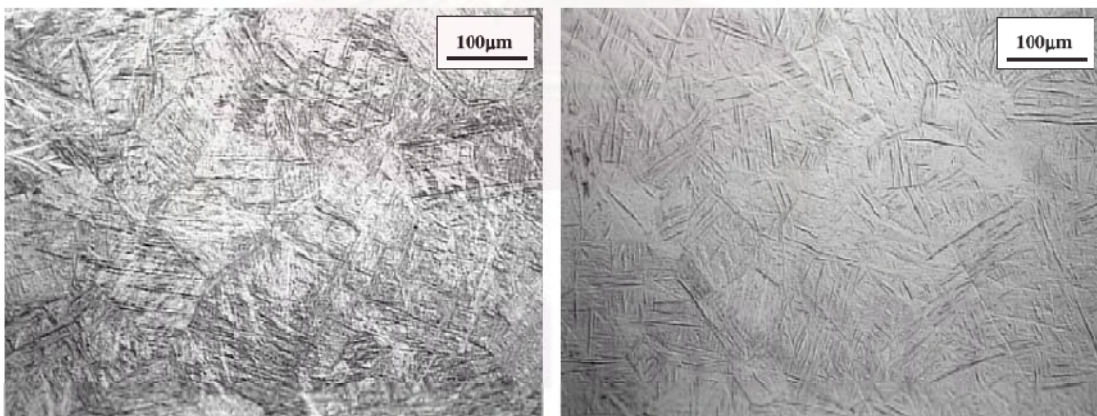
เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดดังรูปที่ 2.16 พบว่า การที่ขึ้นทดสอบ Ti-8Nb-13Zr ปรากฏขนาดของโครงสร้างแบบเข็มเล็กกว่า อาจจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณไนโอเบียมที่น้อยกว่า และจากการศึกษาค่ามอดูลัสของยังที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของขึ้นทดสอบ Ti-8Nb-13Zr และ Ti-18Nb-13Zr หลังผ่านการอบชุบความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และชุบในน้ำ ได้ผลดังกราฟรูปที่ 2.17 พบว่า เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง ดังตารางที่ 2.7



ก. Ti-8Nb-13Zr

ข. Ti-18Nb-13Zr

**รูปที่ 2.14** ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และชุบในน้ำ [11]

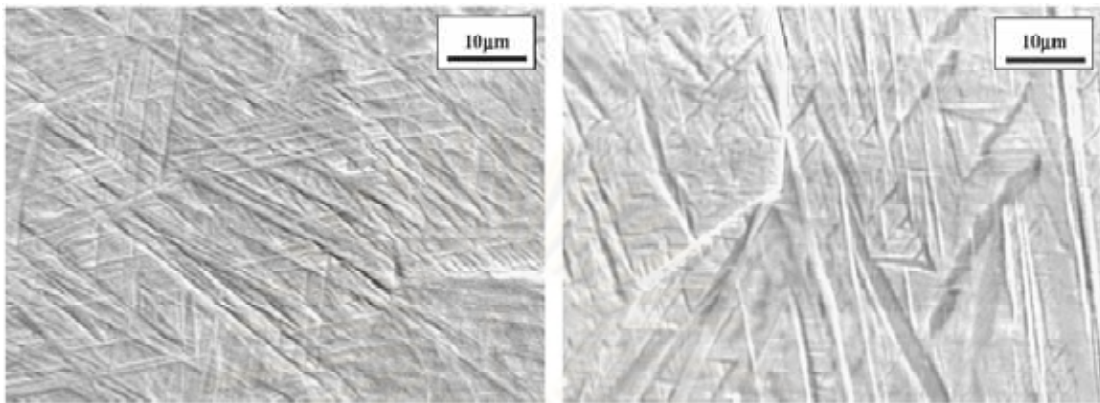


ก. Ti-8Nb-13Zr

ข. Ti-18Nb-13Zr

**รูปที่ 2.15** ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชุบในน้ำ [11]

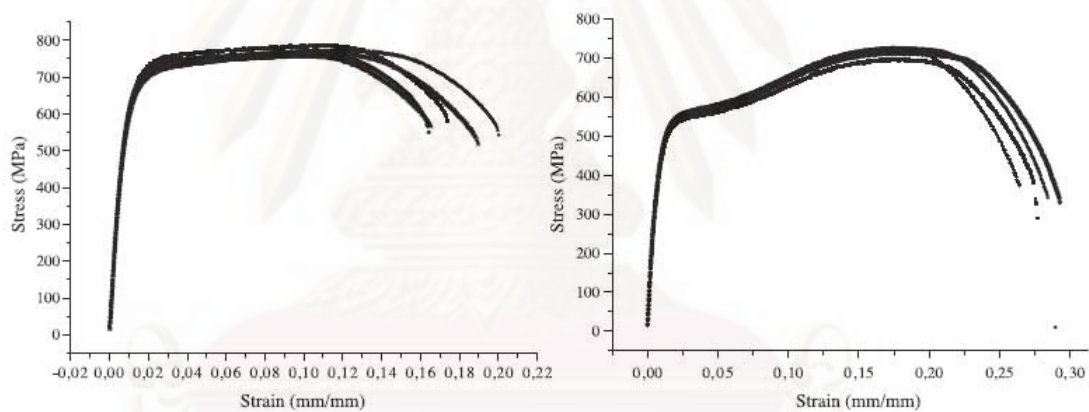




ก. Ti-8Nb-13Zr

ข. Ti-18Nb-13Zr

รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และชุบน้ำ [11]



ก. Ti-8Nb-13Zr

ข. Ti-18Nb-13Zr

รูปที่ 2.17 กราฟความเค้นแรงดึงของชิ้นทดสอบ [11]

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติกลของ Ti-8Nb-13Zr และ Ti-18Nb-13Zr [11]

คุณสมบัติกล	Ti-8Nb-13Zr	Ti-18Nb-13Zr
ความแข็งแรงสูงสุด (เมกะปาสกาล)	768.73±8.78	715.55±9.02
ความแข็งแรงจุดคราก (เมกะปาสกาล)	553.80±21.97	416.59±24.58
มอดุลัสความยืดหยุ่น (กิกะปาสกาล)	85.85±0.87	69.60±0.72
ระยะยืด (เปอร์เซ็นต์)	17.08±1.34	26.83±11.07
การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (เปอร์เซ็นต์)	50.14±3.69	68.49±11.07

จากการศึกษาสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การเพิ่มปริมาณไนโอเบียมในโลหะผสมไทเทเนียมช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้เข้ากันได้กับกระดูกของมนุษย์มากขึ้น และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาโลหะผสมชนิดใหม่จากเศษวัสดุ (Scrap) ของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ที่มีอยู่มากภายในประเทศ โดยการเพิ่มปริมาณไนโอเบียม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุฝังในทางการแพทย์



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 โลหะผสม Ti6Al4V

3.1.2 ไนโอเบียม

3.1.3 อิเล็กโทรด Thoriated Tungsten

3.1.4 ก๊าซอาร์กอน และไนโตรเจน

3.1.5 เรซินหล่อใส่

3.1.6 ดินน้ำมัน

3.1.7 แผ่นอะคริลิก

3.1.8 แผ่นสแตนเลส

3.1.9 แท่งอะลูมิเนียม

3.1.10 น้ำยาประสานแผ่นอะคริลิก และกาวซิลิโคน

3.1.11 ตัวอย่าง

3.1.12 หลอดแก้วนำก๊าซขนาด 20 เซนติเมตร และหลอดแก้วรูปตัวแอลขนาด 10 เซนติเมตร

3.1.13 จุกยางเจาะรู

3.1.14 วาล์วพลาสติกควบคุมการไหล และท่อพลาสติกสามทาง

3.1.15 นัทและสกรูขนาด M6 และ M8

3.1.16 กระดาษทรายเบอร์ 80, 160, 320, 400, 600, 800, 1200, 2000 และ 4000

3.1.17 ผ้าสักหลาด และผงขัดเพชร ขนาด 1, 3 และ 6 ไมครอน

3.1.18 อะซิโตน

3.1.19 น้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร สารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ 8 มิลลิลิตร และสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ 2 มิลลิลิตร

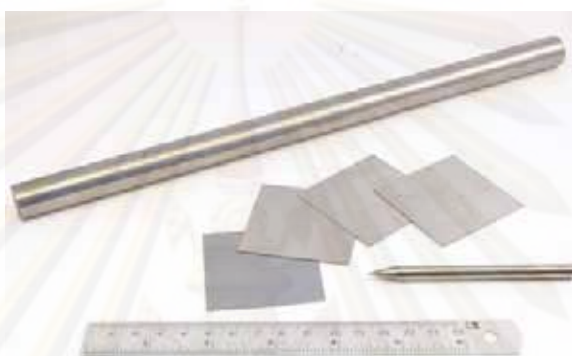
### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 กรรไกรตัดโลหะ
- 3.2.2 เวอร์เนียคาลิเปอร์
- 3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล
- 3.2.4 เครื่องเลื่อย
- 3.2.5 เครื่องตัดแบบ Discotom
- 3.2.6 เต้าอาร์กสแตนดาร์ด CENTORR รุ่น 5BJ
- 3.2.7 เครื่องกัด
- 3.2.8 เครื่องตัดแบบ Wire cut
- 3.2.9 เครื่องทึบขึ้นรูปร้อน SANES รุ่น SHF400
- 3.2.10 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด DAIICHI รุ่น TM100
- 3.2.11 เต้าสแตนดาร์ด CABOLITE รุ่น AAF1100
- 3.2.12 เครื่องเจียรไนราบ
- 3.2.13 เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
- 3.2.14 เครื่อง X-ray Florescence Spectroscopy (XRF) PHILLIPS รุ่น PW2404 แบบ

#### Wavelength dispersive

- 3.2.15 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน BUEHLER
- 3.2.16 ปีกเกอร์ กระบอกรัด และหลอดหยดพลาสติก
- 3.2.17 ปากคีบแบบไม่มีเขี้ยว
- 3.2.18 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
- 3.2.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) JEOL รุ่น JSM-5410
- 3.2.20 เครื่องเคลือบทอง JEOL รุ่น JFC-1200 FINE COATER
- 3.2.21 เครื่อง Grindosonic
- 3.2.22 เครื่องเจาะ
- 3.2.23 เครื่องกลึง
- 3.2.24 เครื่องปั๊มโลหะแผ่น
- 3.2.25 อุปกรณ์ชุดตีป (Tap) และตาย (Die)
- 3.2.26 เครื่องโพเทนชิโอสแตท AUTOLAB รุ่น PGSTAT302N
- 3.2.27 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) แบบ Ag/AgCl (3 M KCl)

- 3.2.28 อิเล็กโทรดวัดกระแส (Counter electrode) แบบแพลทินัม
- 3.2.29 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.2.30 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- 3.2.31 เครื่องกวนสารให้ความร้อนแบบแท่งแม่เหล็ก (Hot Plate Stirrer)
- 3.2.32 เครื่องวัดพีเอช OAKTON
- 3.2.33 เครื่อง Micro hardness รุ่น Model MHT10



รูปที่ 3.1 ลักษณะของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ในโอเปียม และอิเล็กโทรด



ก. กรรไกรตัดโลหะ



ข. เครื่องตัดแบบ Discotom

รูปที่ 3.2 ลักษณะของกรรไกรตัดโลหะ และเครื่องตัดแบบ Discotom

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. เครื่องเลื่อย



ข. เครื่องชั่งน้ำหนัก

รูปที่ 3.3 ลักษณะของเครื่องเลื่อย และเครื่องชั่งน้ำหนัก



ก. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด



ข. เครื่องวัดพีเอช

รูปที่ 3.4 ลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด และเครื่องวัดพีเอช

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. เตาศาร์กสตูญญากาศ



ข. ภายใน Chamber

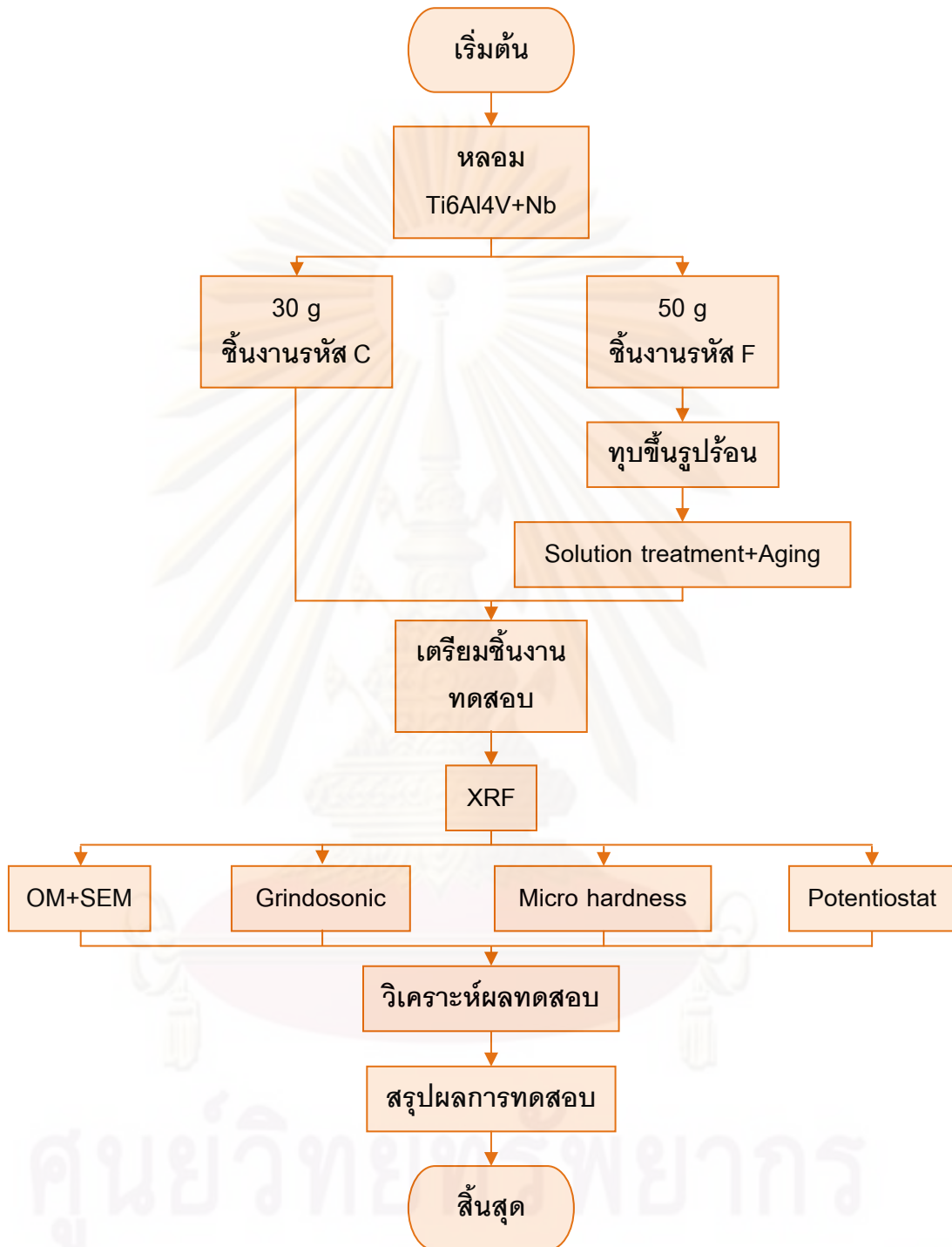
รูปที่ 3.5 ลักษณะของเตาศาร์กสตูญญากาศ และลักษณะภายใน Chamber



รูปที่ 3.6 ลักษณะของเครื่อง Grindosonic ฟองน้ำสำหรับวางชิ้นงานและที่เคาะสัญญาณ

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 30 กรัม เป็นชิ้นงานสภาพหล่อที่ไม่ผ่านทั้งกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อนและกระบวนการอบชุบความร้อน และได้กำหนดรหัสชิ้นงานขึ้นต้นด้วยตัวอักษร C ถัดมาจะเป็นชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 50 กรัม ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อนและกระบวนการอบชุบความร้อน และได้กำหนดรหัสชิ้นงานขึ้นต้นด้วยตัวอักษร F



รูปที่ 3.7 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย



### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3.1.1 ตัดโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ให้ได้ขนาดชิ้นงานคิดเป็นน้ำหนัก 30, 29.4, 28.2, 27.6 และ 26.4 กรัม ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานน้ำหนัก 30 กรัม และน้ำหนัก 50, 49, 47, 46 และ 44 กรัม ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานน้ำหนัก 50 กรัม

3.3.1.2 ทำการขัดผิวทั้ง 2 ด้าน ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80

3.3.1.3 ล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน โดยเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้ง



ก. โลหะผสมไทเทเนียมที่ถูกตัด



ข. ผิวของชิ้นงานก่อนและหลังขัด

**รูปที่ 3.8** ลักษณะของโลหะผสมไทเทเนียมที่ถูกตัดสำหรับเตรียมทำการหลอม และลักษณะเปรียบเทียบผิวของชิ้นงานก่อนและหลังขัด

3.3.1.4 ตัดไนโอเบียมให้ได้ขนาดชิ้นงานคิดเป็นน้ำหนัก 0, 0.6, 1.8, 2.4 และ 3.6 กรัม สำหรับชิ้นงานน้ำหนัก 30 กรัม และน้ำหนัก 0, 1, 3, 4 และ 6 กรัม สำหรับชิ้นงานน้ำหนัก 50 กรัม ซึ่งคิดเป็นปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



**รูปที่ 3.9** ลักษณะของแผ่นไนโอเบียมที่ถูกตัดสำหรับเตรียมทำการหลอม

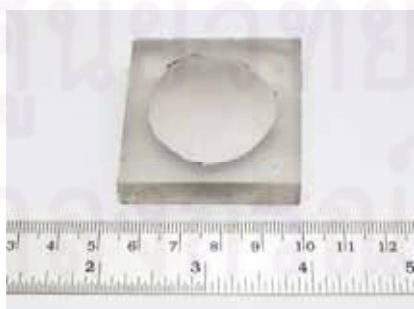
ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณน้ำหนักของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V และไนโอเบียม

รหัสชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์ไนโอเบียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	โลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V (กรัม)	ไนโอเบียม (กรัม)
C1	0	30.0	0.0
C2	2	29.4	0.6
C3	6	28.2	1.8
C4	8	27.6	2.4
C5	12	26.4	3.6
F1	0	50.0	0.0
F2	2	49.0	1.0
F3	6	47.0	3.0
F4	8	46.0	4.0
F5	12	44.0	6.0

3.3.1.5 หลอมโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V ผสมกับปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเตาอาร์กสฎฎฎฎฎฎฎฎฎฎจำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1

3.3.1.6 นำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 30 กรัม มาทำการหล่อในแบบหล่อเรซินหล่อใส

3.3.1.7 ทำการกัดปาดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องกัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มิลลิเมตร จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงาน ตามหัวข้อ 3.3.2 รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของชิ้นงานสภาพหล่อในแบบหล่อเรซิน และผ่านการกัดปาดผิวด้วยเครื่องกัดแล้ว



ก. ด้านหน้า



ข. ด้านข้าง

รูปที่ 3.10 ลักษณะของชิ้นงานสภาพหล่อในแบบหล่อเรซิน และกัดปาดผิวด้วยเครื่องกัดแล้ว

3.3.1.8 หลังผ่านการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแล้ว นำชิ้นงานมาทำการตัดด้วยเครื่องตัดแบบ Wire cut ให้ได้ขนาด  $30 \times 5 \times 1$  มิลลิเมตร<sup>3</sup> ขนาดประมาณ  $15 \times 10$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> และขนาดประมาณ  $10 \times 5$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยัง การทดสอบการกัดกร่อน และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และตรวจสอบความแข็ง ตามลำดับ

3.3.1.9 นำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 50 กรัม มาทำการชุบขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องชุบขึ้นรูปร้อน ลดขนาดชิ้นงานให้ได้ความหนาประมาณ 2.5 มิลลิเมตร โดยชุบขึ้นรูปชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 870-980 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ [1] รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของชิ้นงานสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องชุบขึ้นรูปร้อนแล้ว



ก. สภาพหล่อ

ข. ผ่านการชุบขึ้นรูปแล้ว

รูปที่ 3.11 ลักษณะของชิ้นงานสภาพหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องชุบขึ้นรูปร้อนแล้ว

3.3.1.10 นำชิ้นงานที่ได้มาทำอบชุบละลาย และบ่มภายในเตาสุญญากาศ โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานถึงประมาณ 940 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วชุบด้วยน้ำ ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานอีกครั้งถึงประมาณ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ [1, 2]

3.3.1.11 นำชิ้นงานที่ได้มาทำการขัดผิวด้านหนึ่งด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 เพื่อปรับระนาบ

3.3.1.12 ทำการลดความหนาของชิ้นงานให้เหลือประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเจียรไนราบ

3.3.1.13 นำชิ้นงานที่ได้มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดแบบ Wire cut ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ขนาด  $45 \times 7.5$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> และขนาดประมาณ  $10 \times 5$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

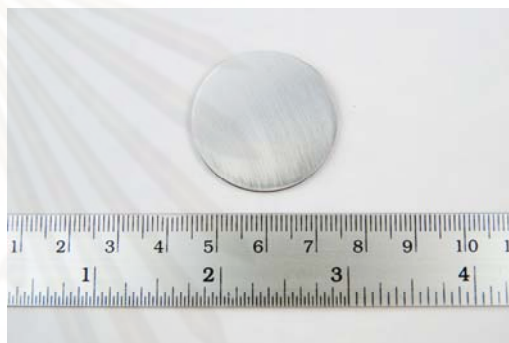
การทดสอบหาค่ามอดูลัสของยัง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และตรวจสอบความแข็งตามลำดับ

### 3.3.2 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงาน

3.3.2.1 นำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 30 และ 50 กรัม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1 มาขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 160, 400 และ 600 ตามลำดับ



ก. ชิ้นงานรหัส C



ข. ชิ้นงานรหัส F

รูปที่ 3.12 ลักษณะของชิ้นงานรหัส C และ F สำหรับทดสอบวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

3.3.2.2 ล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน โดยเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้ง

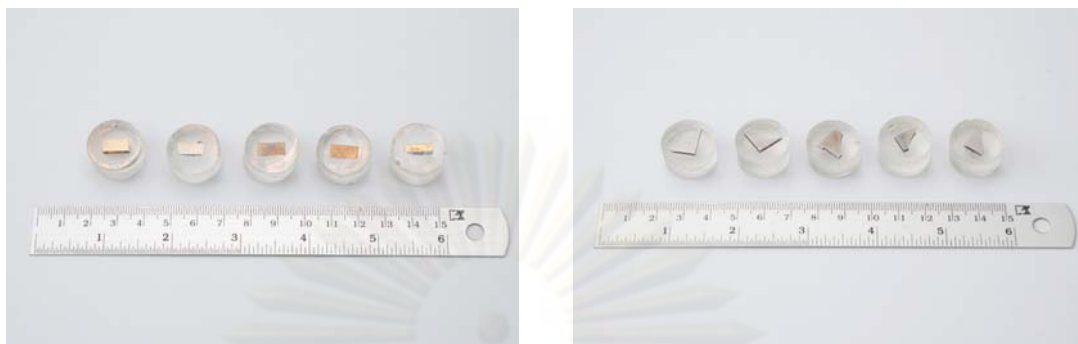
3.3.2.3 นำชิ้นงานมาทดสอบวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานด้วยเครื่อง X-Ray Florescence Spectroscope

3.3.2.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

### 3.3.3 วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.3.3.1 นำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 30 และ 50 กรัม ขนาดประมาณ  $10 \times 5$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1 มาขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 160, 400, 600, 800, 1200, 2000 และ 4000 ตามลำดับ

3.3.3.2 นำชิ้นงานมาขัดด้วยผ้าสักหลาด และผงขัดเพชร ขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ



ก. ชิ้นงานรหัส C

ข. ชิ้นงานรหัส F

รูปที่ 3.13 ลักษณะของชิ้นงานรหัส C และ F สำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.3.3.3 ล้างชิ้นงานด้วยด้วยแอลกอฮอล์ โดยเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้ง

3.3.3.4 นำไปกัดด้วยสารละลายกรดเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค โดยมีส่วนผสมเป็นน้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร สารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ 8 มิลลิลิตร และสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ 2 มิลลิลิตร [12]

3.3.3.5 ล้างชิ้นงานด้วยน้ำเปล่า และตามด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้ง

3.3.3.6 นำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.3.3.7 นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมาทำการเคลือบทองที่ผิวชิ้นงาน และติดแผ่นคาร์บอน

3.3.3.8 นำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

3.3.3.9 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

### 3.3.4 วิธีการหาค่ามอดูลัสของยัง

3.3.4.1 นำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 30 กรัม ขนาด 30 x 5 x 1 มิลลิเมตร<sup>3</sup> และชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 50 กรัม ขนาด 45 x 7.5 x 1.5 มิลลิเมตร<sup>3</sup> จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1 มาขัดผิวทั้ง 2 ด้านด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 160, 400, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ

3.3.4.2 ล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน โดยเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้ง



ก. ชิ้นงานรหัส C



ข. ชิ้นงานรหัส F

### รูปที่ 3.14 ลักษณะของชิ้นงานสำหรับทดสอบหาค่ามอดุลัส

3.3.4.3 ชั่งน้ำหนัก และวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาที่บริเวณตรงกลางและปลายทั้ง 2 ด้าน ของชิ้นงาน

3.3.4.4 นำชิ้นงานมาทดสอบหาค่ามอดุลัสของยังด้วยเครื่อง Grindosonic โดยการนำชิ้นงานมาวางบริเวณตรงกลางของฟองน้ำสำหรับวางชิ้นงาน แล้วทำการเคาะชิ้นงานด้วยที่เคาะสัญญาณ ซึ่งบริเวณปลายที่เคาะสัญญาณจะมีโลหะลักษณะกลมขนาดเล็กติดอยู่ โดยที่หน้าจอก็จะแสดงผลค่าความถี่ของชิ้นงาน และทำการบันทึกค่าความถี่ที่ปรากฏ

3.3.4.5 ทำการเคาะชิ้นงานในขั้นตอนที่ 3.3.4.4 ซ้ำเป็นจำนวน 30 ครั้ง

3.3.4.6 นำค่าความถี่ที่ปรากฏมาคำนวณหาค่ามอดุลัสของยัง ตามมาตรฐาน ASTM E 1867-01 [13]

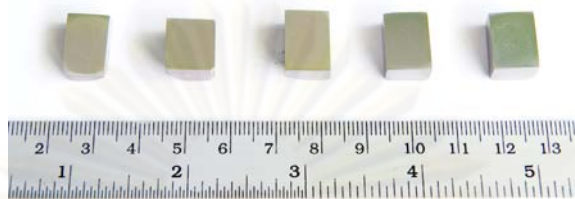
3.3.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

### 3.3.5 วิธีการทดสอบการกัดกร่อน

3.3.5.1 นำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 30 กรัม ขนาดประมาณ  $15 \times 10$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1 มาขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 160, 400, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ

3.3.5.2 ล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน โดยเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้ง

3.3.5.3 เก็บชิ้นงานไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



**รูปที่ 3.15** ลักษณะของชิ้นงานรหัส C1-C5 สำหรับทดสอบการกัดกร่อน โดยเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา

3.3.5.4 เตรียมสารละลายแอมป์ส่วนผสมตามภาคผนวก ญ ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ให้มีอุณหภูมิประมาณ  $37 \pm 1$  องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อนแบบแท่งแม่เหล็ก และให้สารละลายอยู่ในสถานะไม่มีออกซิเจน (Deaerated) โดยการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงไป ในสารละลายเป็นเวลา 45 นาที ก่อนทดสอบ

3.3.5.5 จดบันทึกค่าพีเอชของสารละลาย ก่อนทดสอบ

3.3.5.6 นำชิ้นงานมาวางปิดรูช่องใส่สารละลาย โดยทำการขันสกรูดันชิ้นงานให้แน่น พอที่สารละลายจะไม่รั่วไหลออกมาได้

3.3.5.7 เทสารละลายที่เตรียมไว้ลงในช่องใส่สารละลาย

3.3.5.8 ควบคุมสารละลายให้มีอุณหภูมิประมาณ  $37 \pm 1$  องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ และให้สารละลายอยู่ในสถานะไม่มีออกซิเจน โดยการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงไป ในสารละลาย

3.3.5.9 ให้ชิ้นงานสัมผัสกับสารละลายเป็นเวลา 3600 วินาที โดยสารละลายจะต้องมีอุณหภูมิประมาณ  $37 \pm 1$  องศาเซลเซียส และอยู่ในสถานะไม่มีออกซิเจนตลอดระยะเวลาที่ทดสอบ

3.3.5.10 ทดสอบหาเส้นโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท ซึ่งต่อวงจรโดยมี อิเล็กโทรดอ้างอิงเป็น  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  (3 M KCl) อิเล็กโทรดวัดกระแสเป็นแพลทินัม และทำการต่อ อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode) เข้ากับชิ้นงาน รูปที่ 3.18

3.3.5.11 ทดสอบในขั้นตอนที่ 3.3.5.1-3.3.5.10 ซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง

3.3.5.12 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ



ก. ชุดควบคุมอุณหภูมิก่อนทดสอบ



ข. เครื่องควบคุมอุณหภูมิขณะทดสอบ

**รูปที่ 3.16** ลักษณะของชุดควบคุมอุณหภูมิก่อนทดสอบ จะใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อนแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ส่วนเครื่องควบคุมอุณหภูมินั้นจะใช้ขณะทดสอบ



ก. อิเล็กโทรดอ้างอิง



ข. อิเล็กโทรดวัดกระแส

**รูปที่ 3.17** ลักษณะของอิเล็กโทรดอ้างอิง และ อิเล็กโทรดวัดกระแส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.18 ลักษณะการต่อวงจรสำหรับทดสอบการกัดกร่อน

### 3.3.6 วิธีการทดสอบความแข็ง

3.3.6.1 นำชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 30 และ 50 กรัม ขนาดประมาณ  $10 \times 5$  มิลลิเมตร<sup>2</sup> จำนวน 1 ตัวอย่างต่อหนึ่งส่วนผสม ตามตารางที่ 3.1 ที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแล้วมาทำการทดสอบความแข็ง

3.3.6.2 ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Micro hardness โดยใช้ภาระ 100 กรัม แรง Dwell time 15 วินาที

3.3.6.3 ทำการทดสอบในขั้นตอนที่ 3.3.7.2 ซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

3.3.6.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวอย่าง

ในโครงการวิจัยนี้ ชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. ชิ้นงานน้ำหนัก 30 กรัม เป็นชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมสภาพหล่อ (As-cast titanium alloys) กำหนดรหัสขึ้นต้นด้วยตัวอักษร C

2. ชิ้นงานน้ำหนัก 50 กรัม เป็นชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียมสภาพหล่อ ผ่านกระบวนการทอบขึ้นรูปร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 870-980 องศาเซลเซียส ปริมาณการแปรรูปประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิ 940 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กำหนดรหัสขึ้นต้นด้วยตัวอักษร F

โดยชิ้นงานทั้งสองกลุ่มเตรียมจากโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V และเปลี่ยนแปลงเพิ่มปริมาณไนโอเบียม 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ชิ้นงานสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รหัสชิ้นงานสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ

ชิ้นงาน	สภาพ	ปริมาณไนโอเบียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
		0	2	6	8	12
30 กรัม	หล่อ	C1	C2	C3	C4	C5
50 กรัม	ขึ้นรูป* + อบชุบความร้อน	F1	F2	F3	F4	F5

\*ปริมาณการแปรรูปประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

ใช้เครื่อง X-Ray Florescence Spectroscope ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) วิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงาน เริ่มจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณธาตุของชิ้นงานตัวอย่างผลิตโดย บริษัท TIMET UK จำกัด และรับรองผลโดยบริษัท MBH Analytical จำกัด (ดูตารางที่ 4.2) เพื่อสอบเทียบก่อนวิเคราะห์กับชิ้นงานจริง ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในชิ้นงานตัวอย่างของ บริษัท MBH Analytical จำกัด เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือของเอ็มเทค โดย S1 เป็นชิ้นงานตัวอย่างสำหรับสอบเทียบปริมาณวาเนเดียม และ S2 เป็นชิ้นงานตัวอย่างสำหรับสอบเทียบปริมาณไนโอเบียม

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุในชิ้นงานตัวอย่างจากการวิเคราะห์ของ บริษัท MBH Analytical จำกัด และเอ็มเทค

ชิ้นงาน ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)								เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่าง			
	MBH Analytical				เอ็มเทค							
	Ti	Al	V	Nb	Ti	Al	V	Nb	Ti	Al	V	Nb
S1	89.31	6.46	4.07	-	90.15	6.79	3.05	-	0.94	5.11	25.06	-
S2	86.31	5.59	-	1.00	86.47	5.65	0.01	0.91	0.19	1.07	-	9.00

จากผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส S1 และ S2 พบว่า ปริมาณไทเทเนียมของชิ้นงานรหัส S1 และ S2 และปริมาณอะลูมิเนียมของชิ้นงานรหัส S1 และ S2 ที่วิเคราะห์ได้ต่างกัน 0.94, 0.19, 5.11 และ 1.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณวานาเดียมของชิ้นงานรหัส S1 ที่วิเคราะห์ได้ต่างกัน 25.06 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณไนโอเบียมของชิ้นงานรหัส S2 ที่วิเคราะห์ได้ต่างกัน 9.00 เปอร์เซ็นต์ จากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยมาก แสดงว่าเครื่องมือของเอ็มเทคสามารถใช้วิเคราะห์ปริมาณธาตุได้

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบปริมาณธาตุผสมที่ได้จากการชั่งน้ำหนักกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้ของชิ้นงานรหัส C และ F

รหัสชิ้นงาน	ธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
	ผสม				วิเคราะห์โดย XRF			
	Ti	Al	V	Nb	Ti	Al	V	Nb
C1	89.77	6.08	4.05	-	90.08	6.84	2.96	-
C2	87.96	5.96	3.97	2.02	88.44	6.71	2.89	1.91
C3	84.38	5.72	3.81	6.00	84.86	6.45	2.85	5.76
C4	82.61	5.60	3.73	7.97	83.48	6.15	2.78	7.51
C5	79.00	5.35	3.56	12.00	79.45	5.93	2.68	11.42
F1	89.77	6.08	4.05	-	90.65	6.34	2.98	-
F2	87.87	5.95	3.96	2.12	88.35	6.21	3.51	1.90
F3	84.38	5.72	3.81	6.00	85.79	6.07	2.82	5.29
F4	82.58	5.59	3.73	8.01	83.83	6.11	2.77	7.26
F5	79.00	5.35	3.56	12.00	80.96	5.70	2.64	10.71

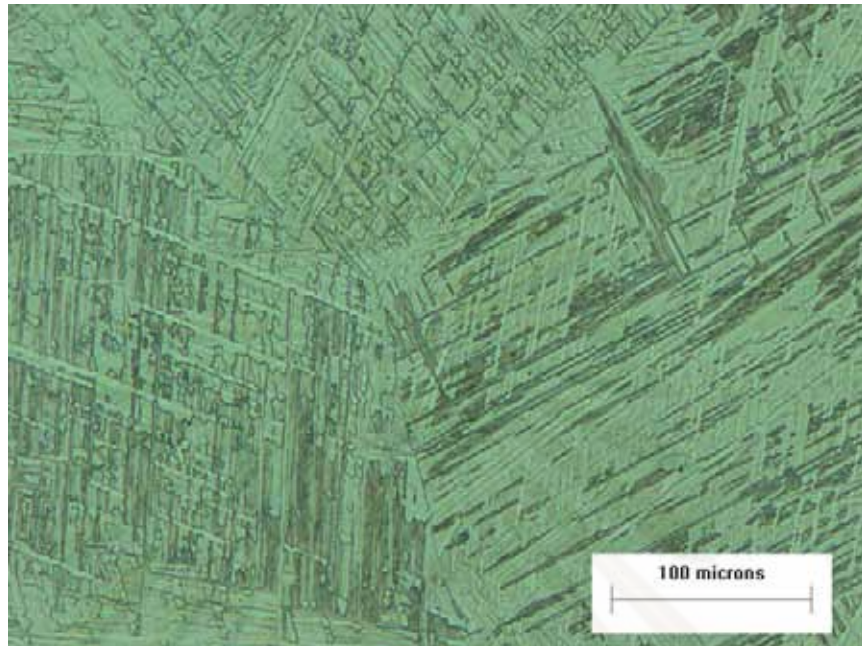
จากผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส C และ F ในตารางที่ 4.3 พบว่า ปริมาณไทเทเนียมที่ผสมกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRF ของชิ้นงานรหัส C ต่างกันประมาณ 0.35-1.05 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานรหัส F ต่างกันประมาณ 0.55-2.48 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอะลูมิเนียมของชิ้นงานรหัส C ต่างกันประมาณ 9.82-12.76 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานรหัส F ต่างกันประมาณ 4.28-9.30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณวาเนเดียมของชิ้นงานรหัส C ต่างกันประมาณ 24.72-27.20 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานรหัส F ต่างกันประมาณ 11.36-26.42 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณไนโอเบียมของชิ้นงานรหัส C ต่างกันประมาณ 4.00-5.77 เปอร์เซ็นต์ และชิ้นงานรหัส F ต่างกันประมาณ 9.36-11.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกันของชิ้นงานรหัส S, C และ F พบว่า อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถถือได้ว่า ปริมาณธาตุที่มีอยู่ในชิ้นงานรหัส C และ F เป็นไปตามปริมาณที่ผสมลงไป และเมื่อพิจารณาปริมาณที่วิเคราะห์ได้จากตารางที่ 4.3 พบว่า มีปริมาณอะลูมิเนียม และวาเนเดียมอยู่ประมาณ 6 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จึงเขียนได้เป็น Ti-6Al-3V-xNb

#### 4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง

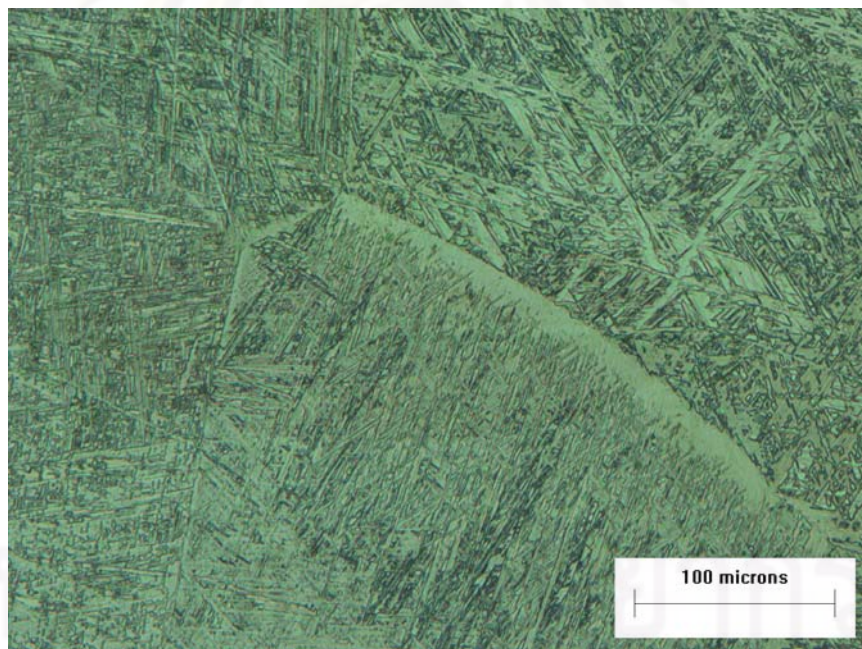
ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด วิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เริ่มจากการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200x และ 500x ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และที่กำลังขยาย 2,000x วิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยภาพทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข ในที่นี้จะนำตัวอย่างภาพโครงสร้างจุลภาคมาอธิบายเท่านั้น

##### 4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1 (รูปที่ 4.1) พบว่า โครงสร้างที่พบมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างทั่วไปของ Ti6Al4V ที่มีโครงสร้างแบบเข็มอัลฟา (Acicular  $\alpha$ ) ในเนื้อพื้นเบต้า ( $\beta$  Matrix) โดยมีทิศทางของโครงสร้างหลายทิศทางเป็นแบบ Widmanstätten ขณะที่เฟสเบต้าจะถูกพบบริเวณขอบของโครงสร้างแบบเข็มอัลฟา และไม่ปรากฏขอบเกรนที่ชัดเจน ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2 (รูปที่ 4.2) พบว่า โครงสร้างที่พบมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้าเช่นเดียวกับชิ้นงานรหัส C1 และปรากฏโครงสร้างอัลฟาทุติยภูมิ (Secondary  $\alpha$ ) ที่บริเวณขอบเกรน โดยโครงสร้างอัลฟาทุติยภูมิเกิดจากการเปลี่ยนเฟสของเบต้า (Transformed  $\beta$ )

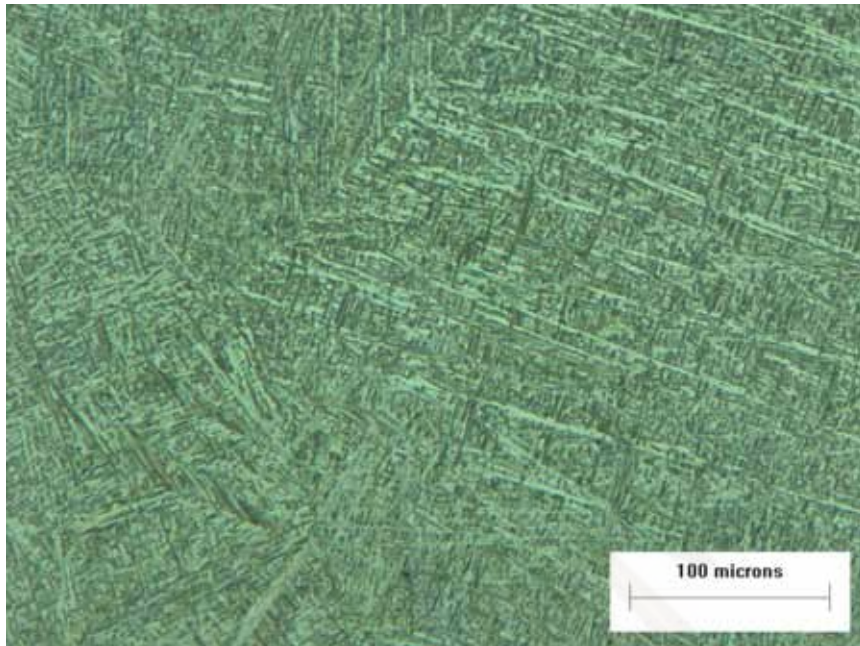


รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1

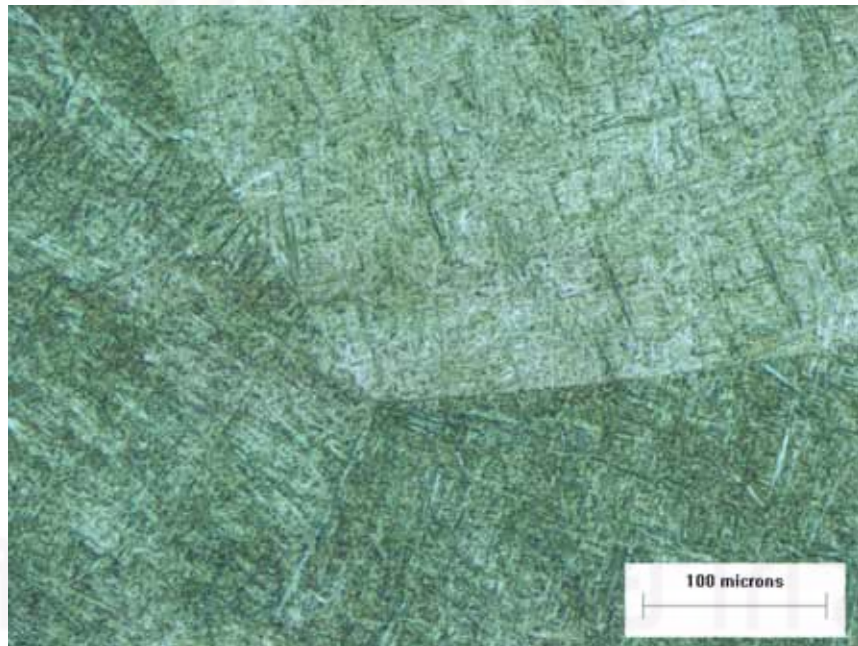


รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

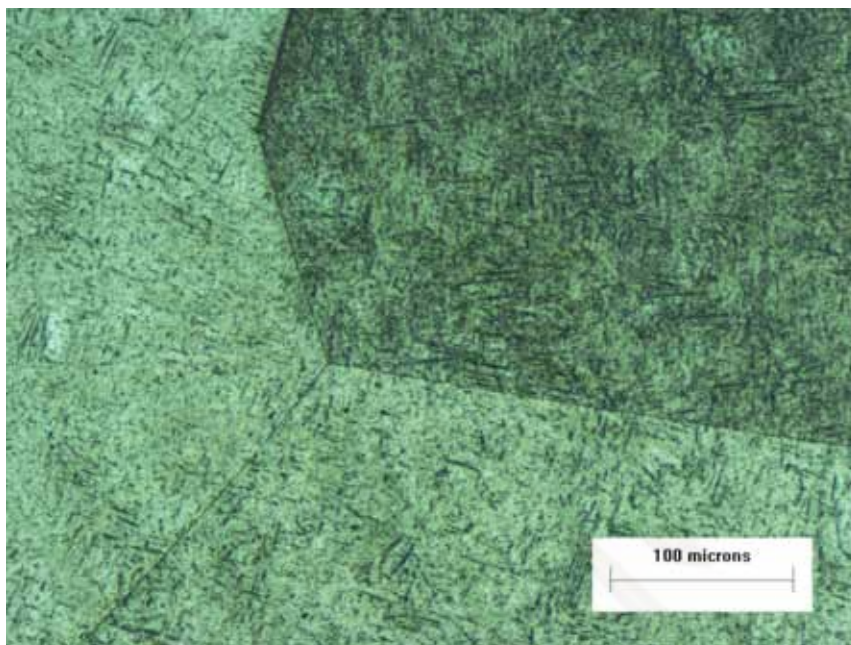


รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของซิงงานรหัส C3



รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของซิงงานรหัส C4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

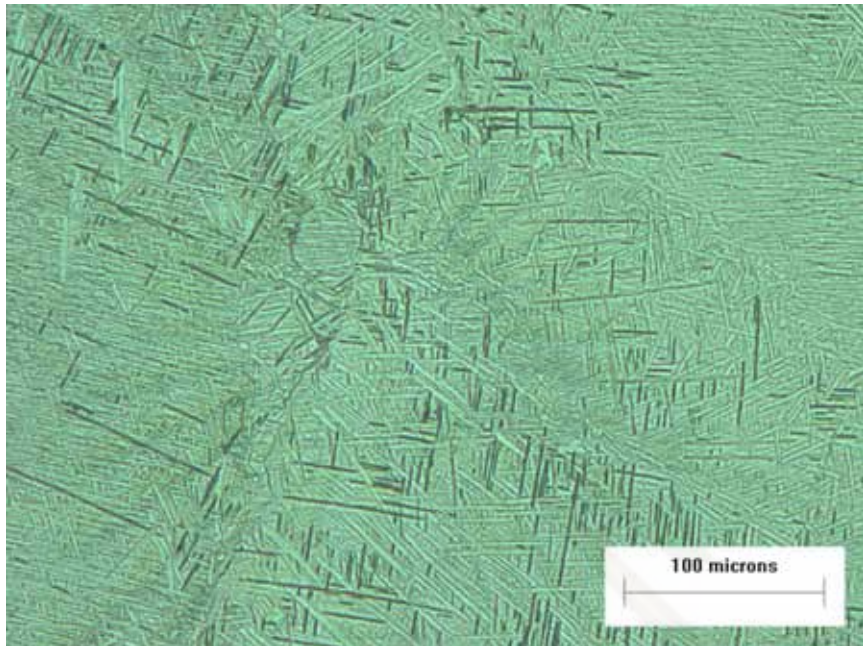


รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส C5

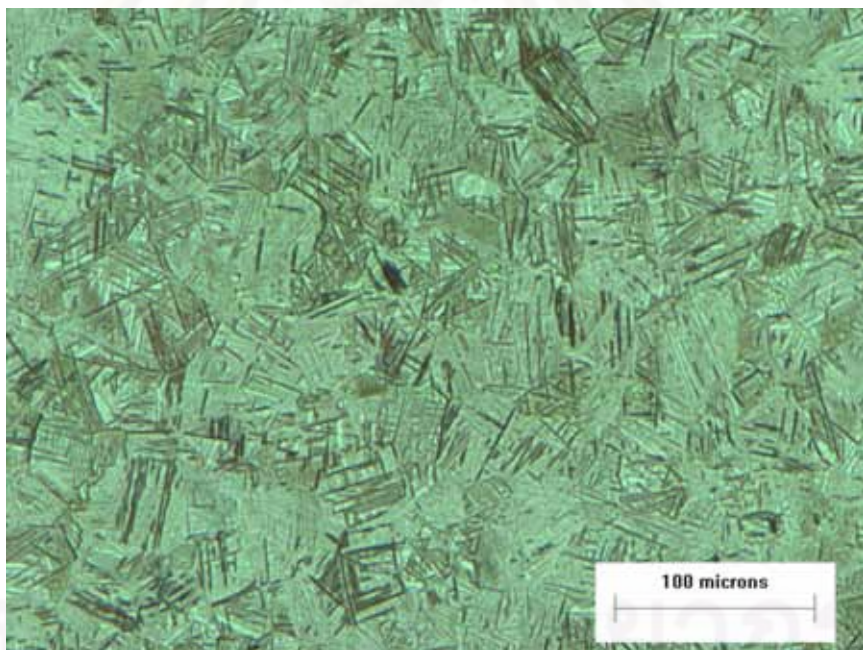
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส C3 (รูปที่ 4.3) พบว่า โครงสร้างที่พบมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้าเช่นเดียวกันกับชั้นงานรหัส C1 และ C2 แต่ปริมาณและขนาดของโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาลดลง และขอบเกรนที่ปรากฏชัดขึ้นกว่าขอบเกรนของชั้นงานรหัส C1 และ C2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส C4 (รูปที่ 4.4) พบว่า โครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้าที่ปรากฏในชั้นงานรหัส C1, C2 และ C3 มีปริมาณและขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด และขอบเกรนที่ปรากฏมีความคมชัด ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส C5 (รูปที่ 4.5) พบว่า โครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้าที่ปรากฏในชั้นงานรหัส C1, C2 และ C3 กลายเป็นโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาขนาดเล็ก และสั้นกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นเบต้า และขอบเกรนที่ปรากฏมีความคมชัดที่สุด

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. แบบเกรนหยาบ

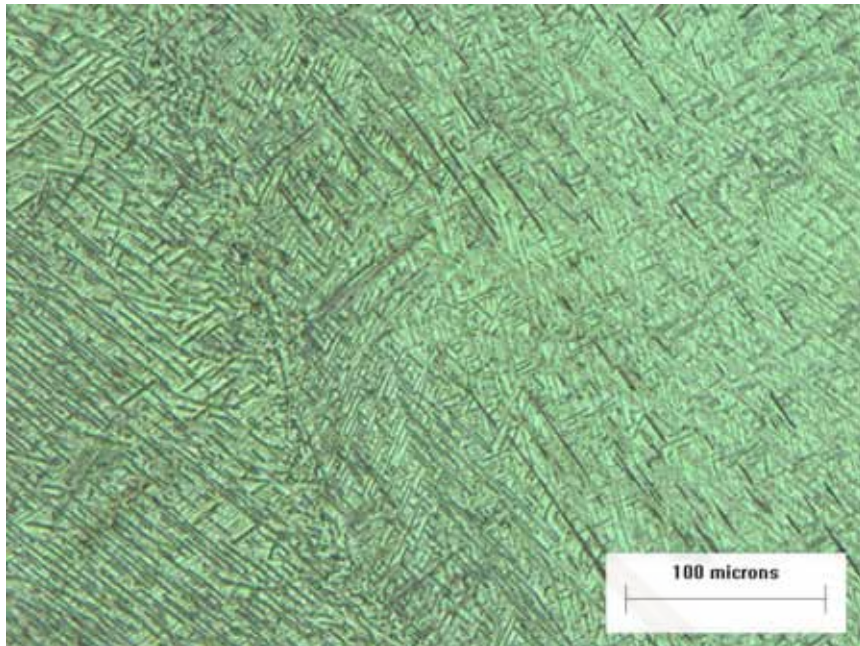


ข. แบบเกรนละเอียด

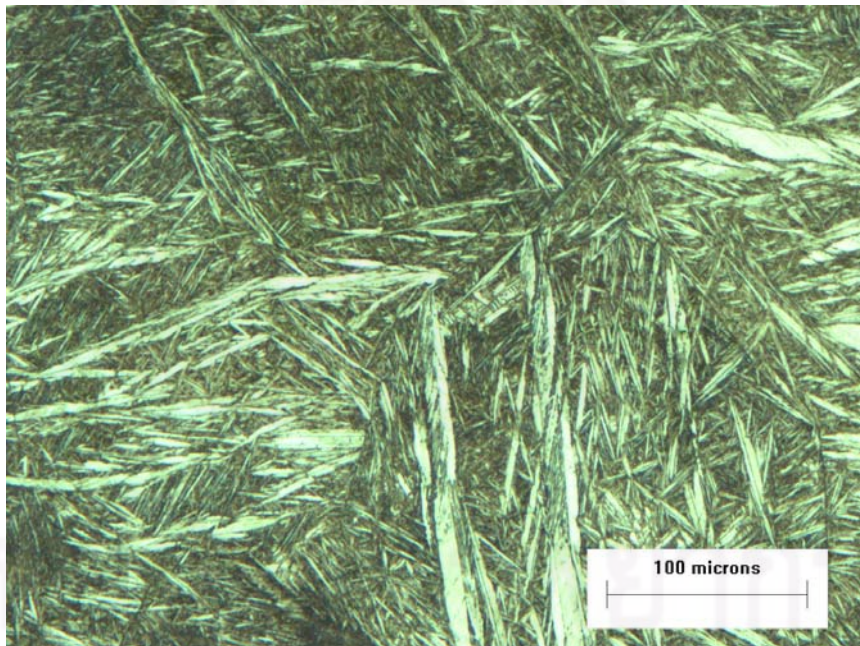
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

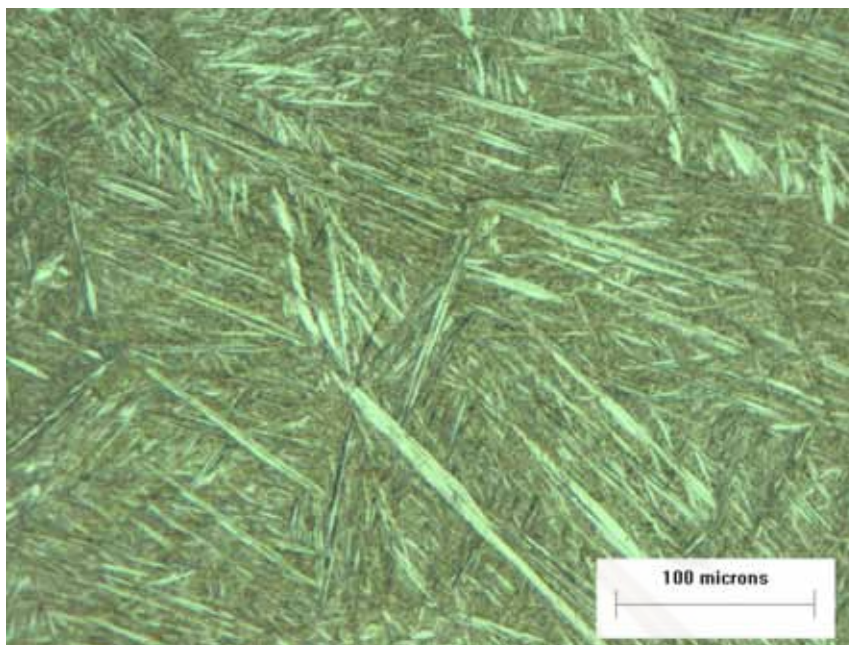




รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2



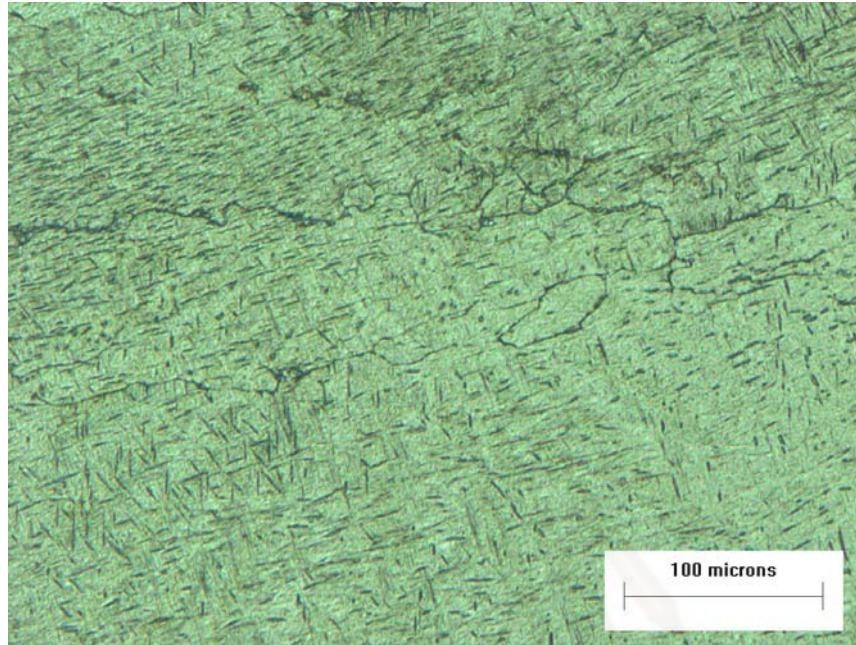
รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3



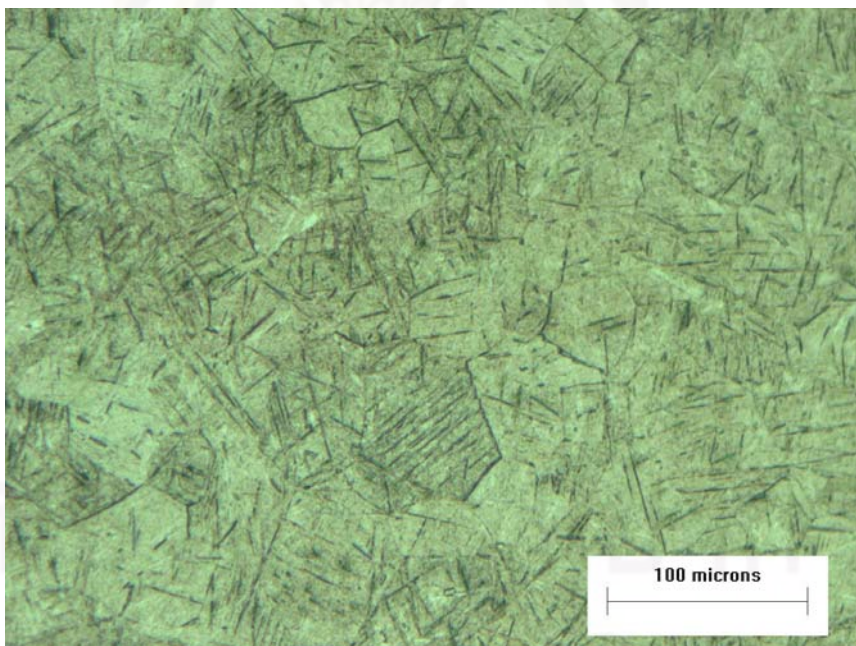
รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1 พบว่า มีความไม่สม่ำเสมอ  
กันของโครงสร้างจุลภาค ทำให้ปรากฏเป็นเกรนหยาบ และเกรนละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.6 ก.  
และ ข. ตามลำดับ โครงสร้างเกรนหยาบที่พบมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างของชิ้นงานรหัส C1 ที่  
มีโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้า และไม่ปรากฏขอบเกรนที่ชัดเจน ผลการตรวจสอบ  
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2 (รูปที่ 4.7) พบว่า มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ และมีลักษณะ  
โครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้า และไม่ปรากฏขอบเกรนที่ชัดเจนเช่นเดียวกันกับชิ้นงาน  
รหัส F1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3 (รูปที่ 4.8) พบว่า มีโครงสร้างที่  
สม่ำเสมอ และมีลักษณะโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้า แต่ขนาดของโครงสร้างแบบ  
เข็มอัลฟามีขนาดกว้าง และใหญ่ขึ้น และบริเวณขอบเกรนปรากฏชัดเจนขึ้น ผลการตรวจสอบ  
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4 (รูปที่ 4.9) พบว่า มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ และมีลักษณะ  
โครงสร้างแบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้า แต่ขนาดของโครงสร้างแบบเข็มอัลฟามีขนาดกว้าง และ  
ใหญ่ขึ้น และบริเวณขอบเกรนปรากฏชัดเจนขึ้นเช่นเดียวกันกับชิ้นงานรหัส F3 ผลการตรวจสอบ  
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5 พบว่า มีความไม่สม่ำเสมอกันของโครงสร้างจุลภาค ทำให้  
ปรากฏเป็นเกรนหยาบ และเกรนละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.10 ก. และ ข. ตามลำดับ โครงสร้าง  
แบบเข็มอัลฟาในเนื้อพื้นเบต้าที่ปรากฏในชิ้นงานรหัส F1 ถึง F4 กลายเป็นโครงสร้างแบบ

ซีเมนต์ฟอสฟอรัสขนาดเล็ก และเส้นกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นเบต้า และไม่ปรากฏขอบเกรนที่ชัดเจนในบริเวณเกรนหยาบ และเกรนละเอียด



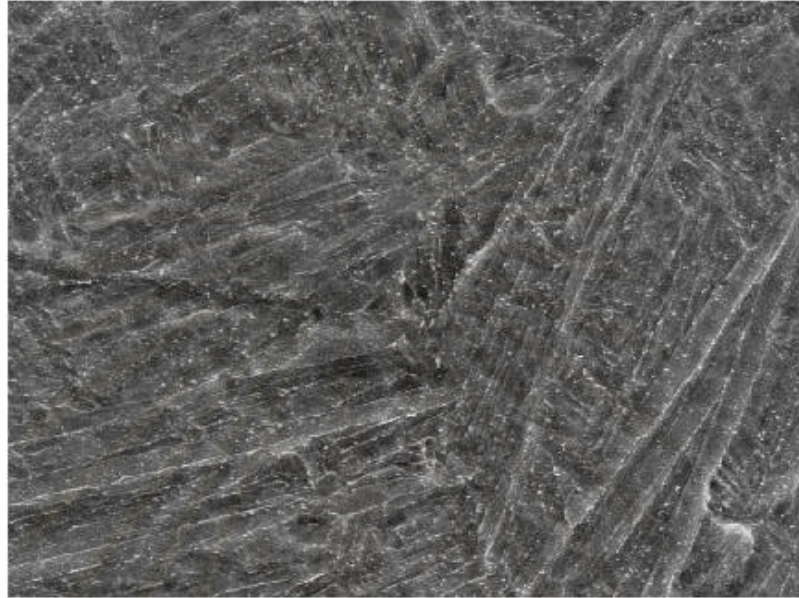
ก. แบบเกรนหยาบ



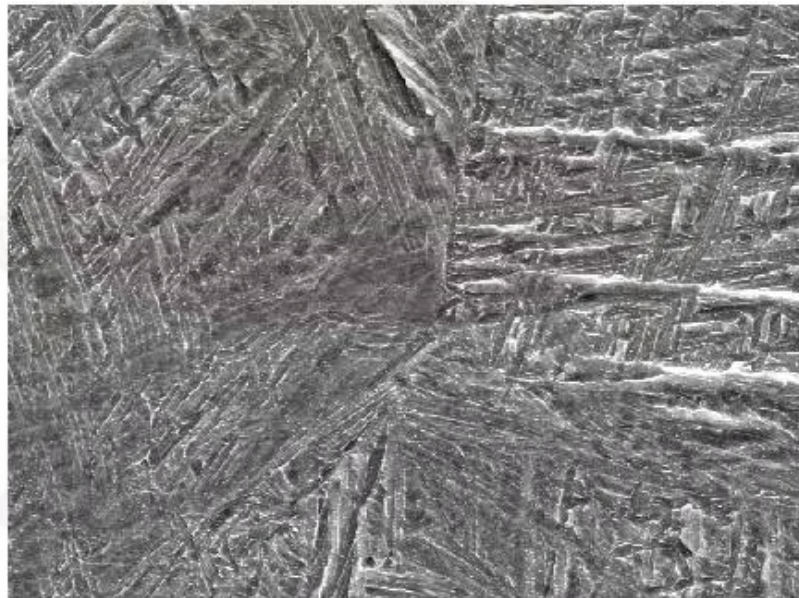
ข. แบบเกรนละเอียด

รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส F5

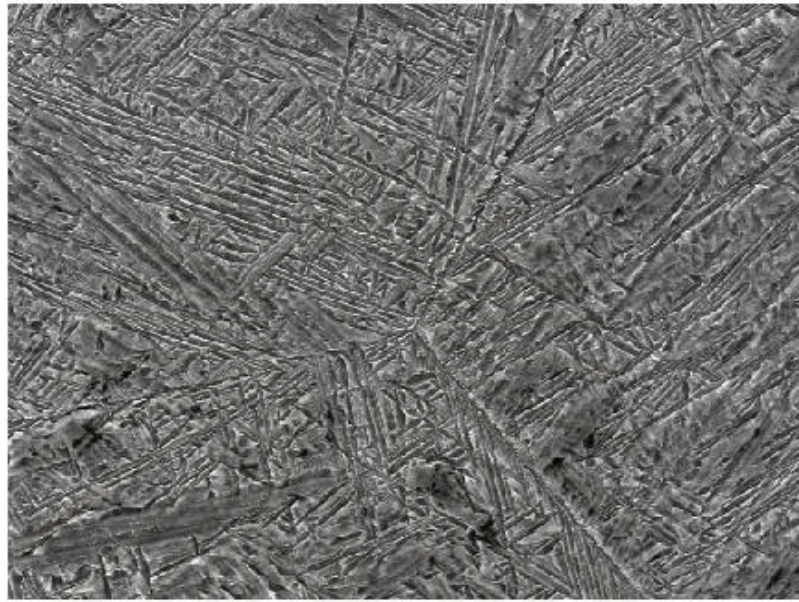
4.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)



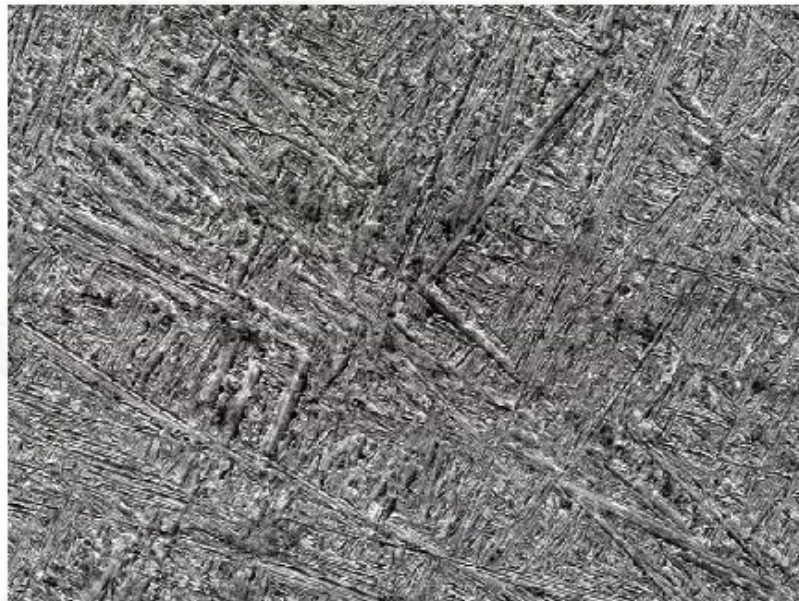
รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1



รูปที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2

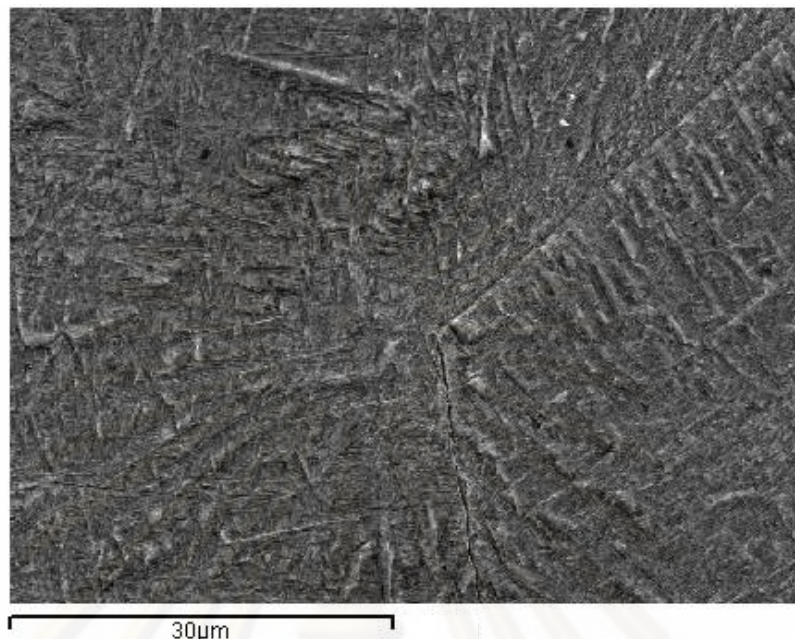


รูปที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3



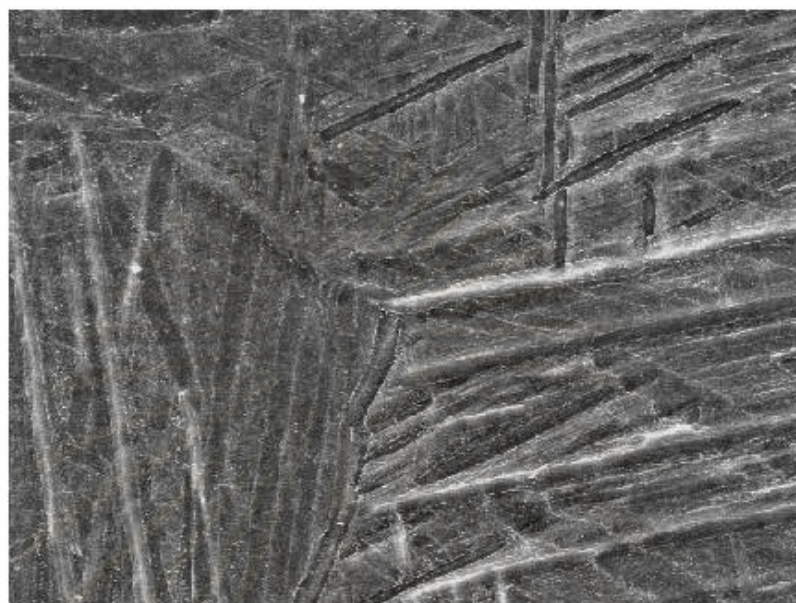
รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

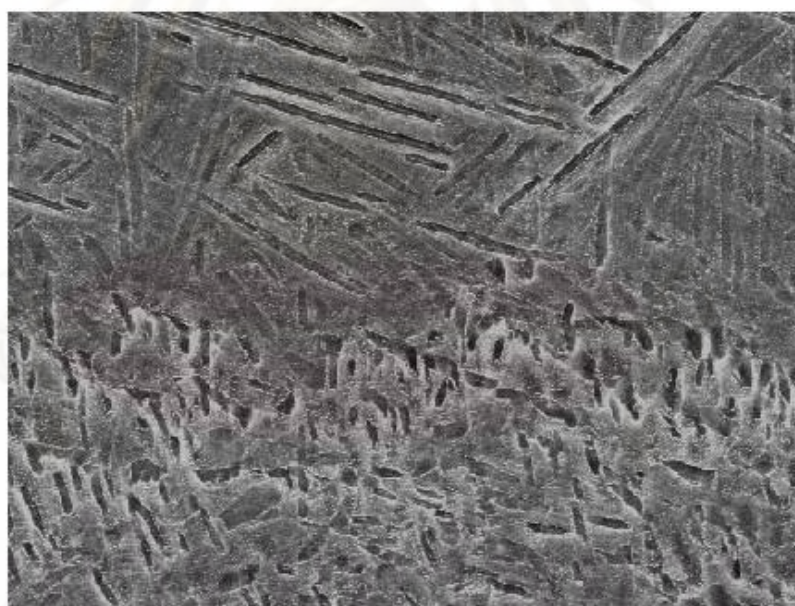


รูปที่ 4.15 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C5

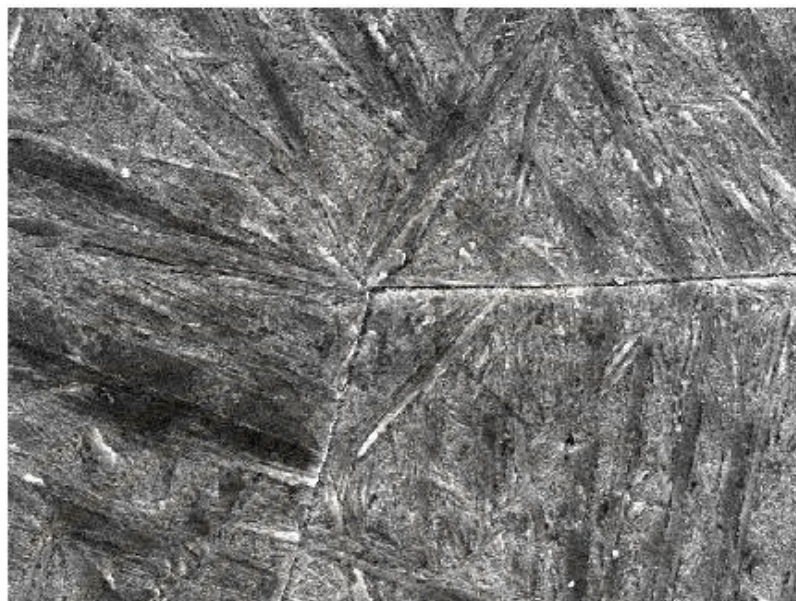
จากผลการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1 ถึง C5 (รูปที่ 4.11-4.15) พบว่า โครงสร้างแบบเข็มอัลฟาที่พบมีขนาดความกว้างของเข็มน้อยลง เมื่อชิ้นงานมีปริมาณไนโอเปียมผสมเพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึง 11.42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาขนาดเล็ก และสั้นที่สุดในชิ้นงานรหัส C5 เนื่องจากไนโอเปียมเป็นธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้า ทำให้ช่วงที่มีเสถียรภาพของเฟสเบต้าที่ปกติอยู่ที่อุณหภูมิสูงขยับไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในรูป 2.1 และ 2.2 [3] จึงพบว่าปรากฏเฟสเบต้าเพิ่มขึ้นในชิ้นงานที่มีปริมาณไนโอเปียมผสมเพิ่มขึ้น



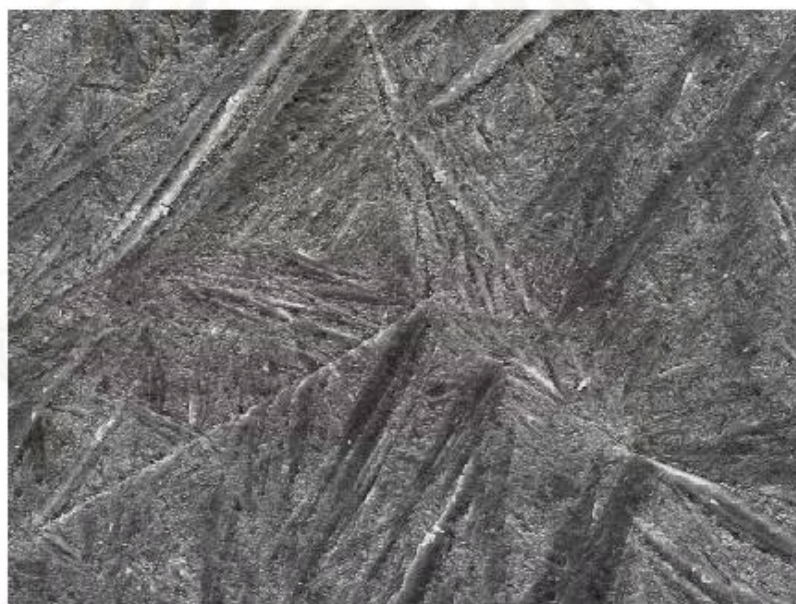
รูปที่ 4.16 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1



รูปที่ 4.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2

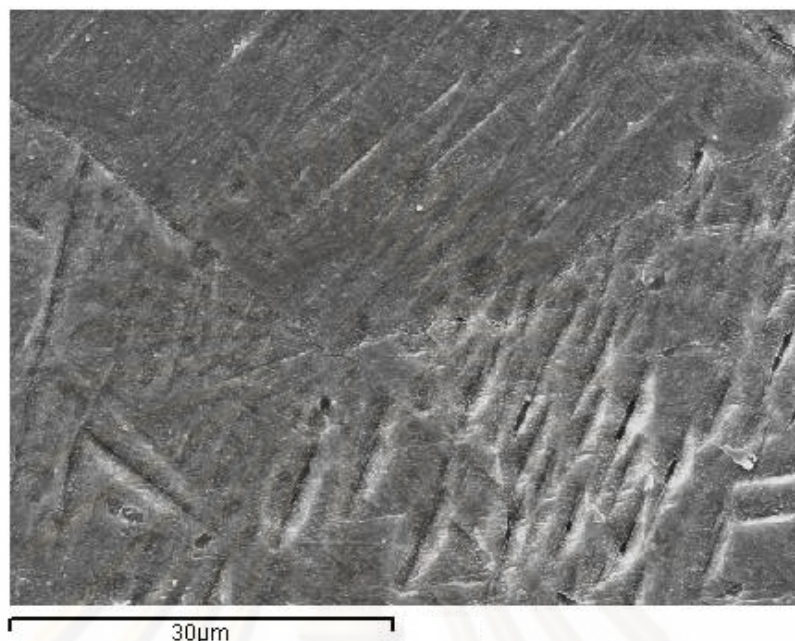


รูปที่ 4.18 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3



รูปที่ 4.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4





รูปที่ 4.20 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส F5

จากผลการเปรียบเทียบชั้นงานรหัส F1 ถึง F5 (รูปที่ 4.16-4.20) พบว่า โครงสร้างแบบฮีมอัลฟาของชั้นงานรหัส F1 มีขนาดความกว้างของฮีมที่ใหญ่กว่าของชั้นงานรหัส F2 และปรากฏโครงสร้างแบบฮีมอัลฟาที่มีขนาดความกว้างของฮีมใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในชั้นงานรหัส F3 และ F4 ซึ่งอาจเกิดจากการที่มีความเค้นตกค้างภายในชั้นงานมาก เมื่อผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนจึงส่งผลทำให้ขนาดเกรนของเฟสเบต้ามีขนาดใหญ่ขึ้น และขนาดของโครงสร้างแบบฮีมอัลฟามีขนาดกว้างขึ้น [14] ขณะที่โครงสร้างแบบฮีมอัลฟาขนาดเล็ก และสั้นที่สุดปรากฏในชั้นงานรหัส F5 เนื่องจากเป็นชั้นงานที่มีปริมาณไนโอเบียมผสมมากที่สุดถึง 10.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากไนโอเบียมเป็นธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้า ทำให้ช่วงที่มีเสถียรภาพของเฟสเบต้าปกติอยู่ที่อุณหภูมิสูงขยับไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 [3] จึงสามารถปรากฏเฟสเบต้าเพิ่มขึ้นในชั้นงานที่มีปริมาณไนโอเบียมผสมเพิ่มขึ้น

#### 4.3 ผลการทดสอบหาค่ามอดุลัสของยังของตัวอย่าง

ใช้เครื่อง Grindosonic วิเคราะห์ตรวจสอบค่าความถี่ เริ่มจากการตรวจสอบขนาดความกว้าง ความยาว ความหนา และน้ำหนักของชิ้นงาน จากนั้นจึงนำค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้ไปคำนวณค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานรหัส C และ F ตามสมการ ค.1 และ ค.2 ในภาคผนวก ค ซึ่งได้แสดงตัวอย่างการหาค่ามอดุลัสของยังด้วยวิธีวัดความถี่ของคลื่นเสียงจากการสั่นของชิ้นงาน ผลการทดสอบหาค่ามอดุลัสของยังแสดงดังตารางที่ 4.5

จากผลการตรวจสอบค่าความถี่ทั้งหมดดังตารางที่ ๔.2 และ ๔.3 พบว่า ค่าความถี่ที่พบบ่อยที่สุดของชิ้นงานรหัส C1-C5 ได้แก่ 6.55, 6.40, 5.96, 5.77 และ 5.34 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ และค่าความถี่ที่พบบ่อยที่สุดของชิ้นงานรหัส F1-F5 ได้แก่ 9.44, 9.27, 9.05, 8.72 และ 9.41 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าความถี่ที่พบเหล่านี้เป็นความถี่มูลฐานของชิ้นงาน (Fundamental frequency) นำค่าความถี่มูลฐานคำนวณหาค่ามอดุลัสของยังดังสรุปในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ขนาดและน้ำหนักของชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	น้ำหนัก (กรัม)	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความยาว (มิลลิเมตร)
C1	0.6626	4.90	1.08	29.00
C2	0.7161	4.90	1.13	29.80
C3	0.7237	4.90	1.10	29.85
C4	0.6675	4.90	1.00	29.15
C5	0.7132	4.98	1.05	29.80
F1	1.9653	7.62	1.30	45.00
F2	2.003	7.60	1.32	45.00
F3	2.2866	7.58	1.43	45.05
F4	1.9727	7.30	1.35	45.00
F5	2.1601	7.60	1.38	45.00

ผลการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานรหัส C และ F จากตารางที่ 4.5 แสดงดังรูปที่ 4.21-4.22 พบว่า ค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานรหัส C และ F มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่ามอดุลัสต่ำสุดอยู่ที่ 89 กิกะปาสคาล และ 721 กิกะปาสคาล ตามลำดับ การลดลงของค่ามอดุลัสของยังเป็นผลมาจากการผสมไนโอเบียม ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มรักษาเสถียรภาพโครงสร้างจุลภาคเบต้า ทำให้เส้นการเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $(\alpha+\beta)/\alpha$  (รูปที่ 2.1) ต่ำลง [1] เฟสเบต้าจึงสามารถมีเสถียรภาพมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง เฟสเบต้ามีโครงสร้างเป็น BCC ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความยาวของเส้นทางการเลื่อนที่สั้นที่สุด (Length of the minimal slip path,  $b_{min}$ ) ต่อความยาวของหน่วยเซลล์ (Space lattice,  $a$ ) น้อยกว่าของโครงสร้าง HCP โดยอัตราส่วน  $b_{min}/a$  ของโครงสร้าง BCC มีค่าเท่ากับ 0.87 และของโครงสร้าง HCP มีค่าเท่ากับ 1 ส่งผลให้โครงสร้าง BCC สามารถแปรรูปถาวร

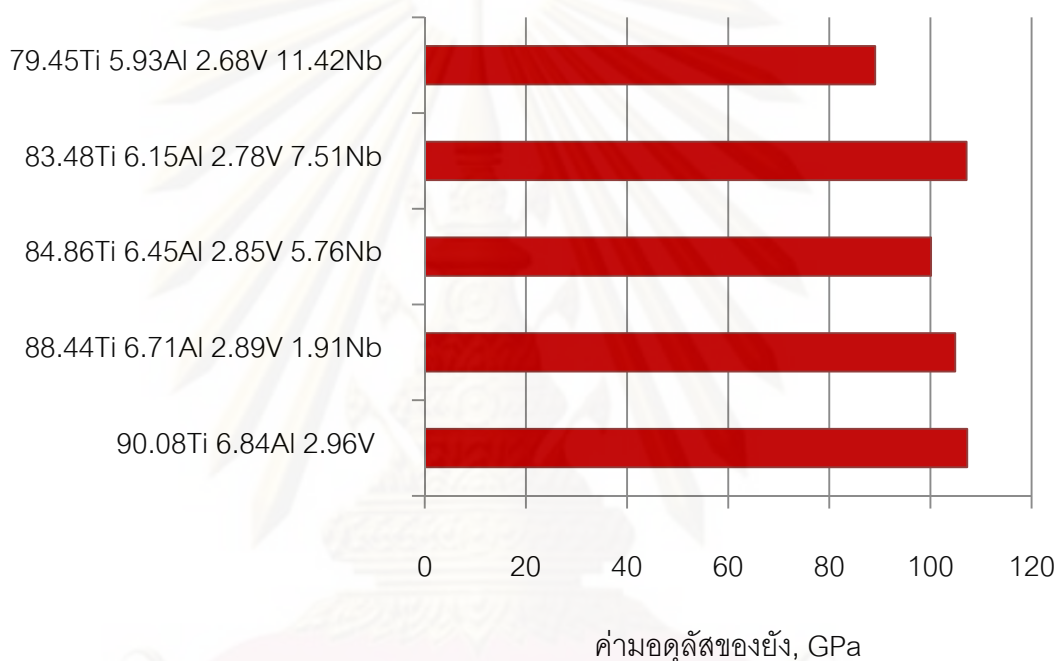
(Plastic deformation) ได้ง่ายกว่าโครงสร้าง HCP [3] โครงสร้างที่ได้จากการผสมไนโอเบียมประมาณ 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงมีเฟสเบต้าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบพบว่า โครงสร้างแบบเข็มอัลฟามีขนาดเล็ก และสั้นลง เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น ซึ่งการทดสอบของงานวิจัยสอดคล้องกับการศึกษาของ Daisuke Kuroda, Mitsuo Niinomi et al. [8] ที่ออกแบบ และศึกษาคุณสมบัติกลของโลหะผสมไทเทเนียมเบต้าชนิดใหม่สำหรับวัสดุที่ฝังในร่างกาย โดยใช้ชิ้นทดสอบ 7 ชิ้น ได้แก่ Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr Ti-16Nb-13Ta-4Mo Ti-29Nb-13Ta Ti-29Nb-13Ta-4Mo Ti-29Nb-13Ta-2Sn และ Ti-29Nb-13Ta-6Sn พบว่าค่าความต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบต่ำกว่า แต่ระยะยืดมากกว่า/เท่ากับของโลหะผสมไทเทเนียมที่ใช้กันทั่วไป และเมื่อพิจารณาที่ Ti-16Nb-13Ta-4Mo และ Ti-29Nb-13Ta-4Mo พบว่า ค่าความต้านแรงดึงของ Ti-29Nb-13Ta-4Mo ต่ำกว่า Ti-16Nb-13Ta-4Mo และจากการศึกษาเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยัง พบว่า เมื่อปริมาณไนโอเบียมมากขึ้น ค่ามอดูลัสของยังจะลดลง นอกจากนี้ผลการทดสอบของงานวิจัยยังสอดคล้องกับการศึกษาของ H.M. Silva S.G. Schneider และ C. Moura Neto [11] ที่ศึกษาโลหะผสมไทเทเนียมที่ปราศจากอะลูมิเนียม และวาเนเดียมสำหรับการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ โดยใช้ชิ้นทดสอบเป็น Ti-8Nb-13Zr และ Ti-18Nb-13Zr ที่พบว่า เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลงเช่นกัน

**ตารางที่ 4.5** ผลการคำนวณค่ามอดูลัสของยังชิ้นงานรหัส C และ F ตามมาตรฐาน ASTM E

1867-01 [13]

รหัสชิ้นงาน	ค่าความถี่ที่ใช้ในการคำนวณ (กิโลเฮิร์ตซ์)	ค่ามอดูลัสของยัง (กิกะปาสกาล)
C1	6.55	107
C2	6.40	105
C3	5.96	100
C4	5.77	107
C5	5.34	89
F1	9.44	907
F2	9.27	854
F3	9.05	736
F4	8.72	721
F5	9.41	831

แต่จากการทดสอบของงานวิจัยพบข้อขัดแย้งในชิ้นงานรหัส C4 และ F5 โดยค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานรหัส C4 กลับมีค่ามอดุลัสของยังเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อผิดพลาดจากการวัดขนาดของชิ้นงานรหัส C4 จึงส่งผลให้คำนวณค่ามอดุลัสของยังผิดพลาด ส่วนค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานรหัส F5 กลับมีค่ามอดุลัสของยังเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับชิ้นงานรหัส C4 ซึ่งอาจเป็นผลจากข้อผิดพลาดในกระบวนการอบชุบความร้อน จึงส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอกันตลอดทั้งชิ้นงาน ดังปรากฏในภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่มีทั้งเกรนหยาบ และเกรนละเอียดเกิดขึ้น

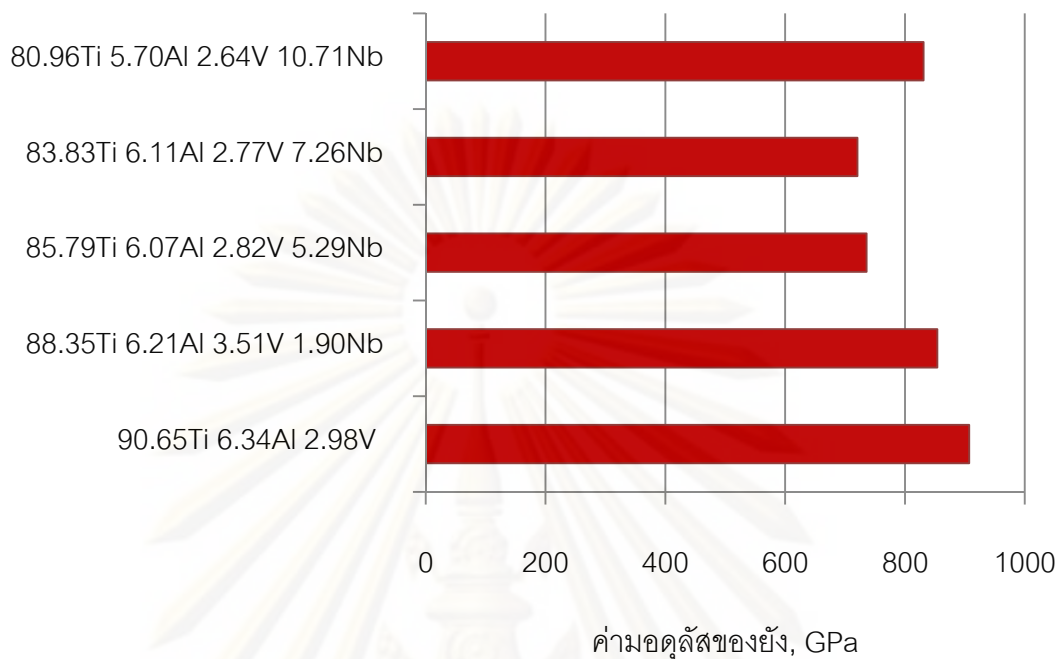


รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานรหัส C

#### 4.4 ผลการทดสอบความแข็งของตัวอย่าง

ใช้เครื่อง Micro hardness วิเคราะห์ตรวจสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส C และ F ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.6

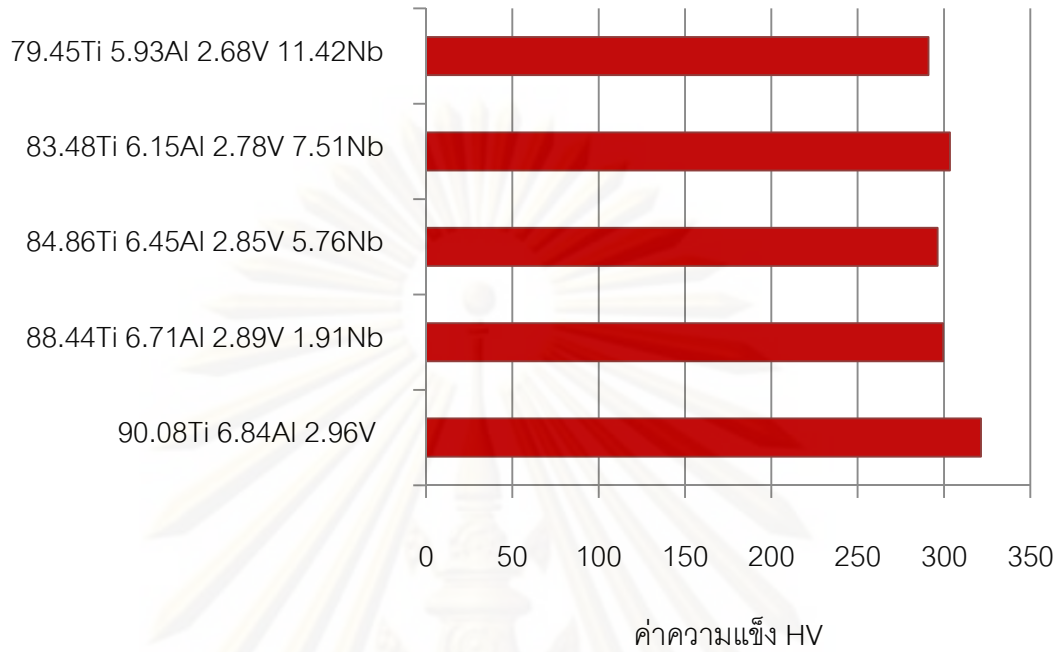
จากผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส C และ F ดังแสดงในรูปที่ 4.23-4.24 พบว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส C และ F มีแนวโน้มลดลง แต่ค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส C4 กลับมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น และค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส F5 กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากการทดสอบหาค่าความแข็ง พบว่า มีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบหาค่ามอดุลัสของยังของงานวิจัย



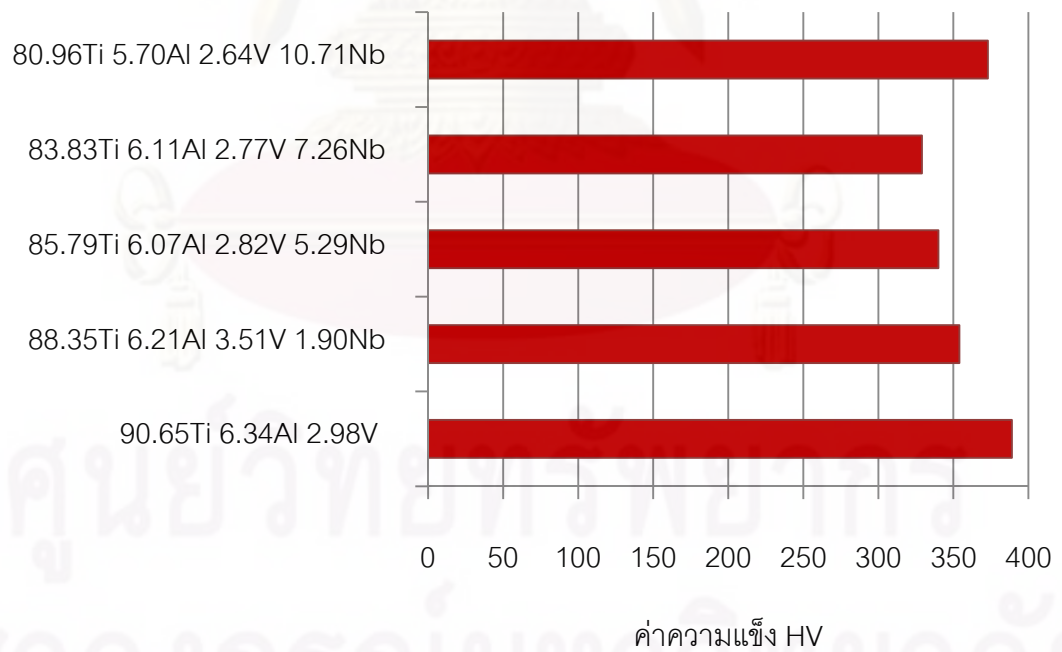
รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของยังของชิ้นงานรหัส F

ตารางที่ 4.6 ผลค่าความแข็งของชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	ค่าความแข็ง HV
C1	321
C2	299
C3	296
C4	303
C5	291
F1	389
F2	354
F3	340
F4	329
F5	373



รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส C



รูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส F

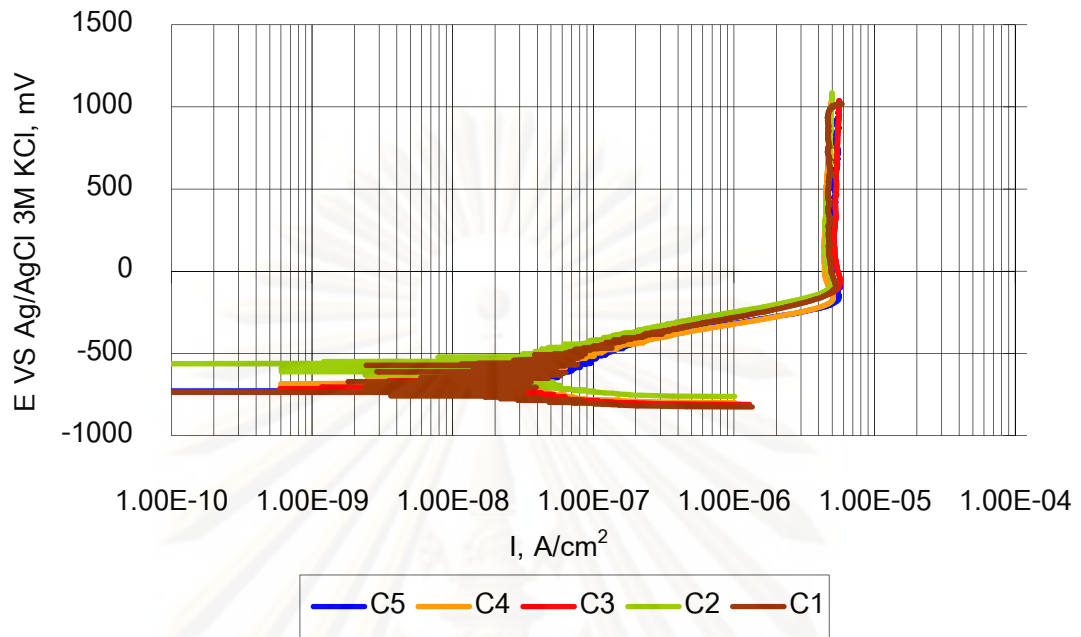
#### 4.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของตัวอย่าง

ใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตทวิเคราะห์ตรวจสอบเส้นโพลาริเซชัน ซึ่งการทดสอบหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) อัตราการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม ( $I_p$ ) จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C นั้น ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.7 และลักษณะของเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C ปรากฏดังรูปที่ 4.25

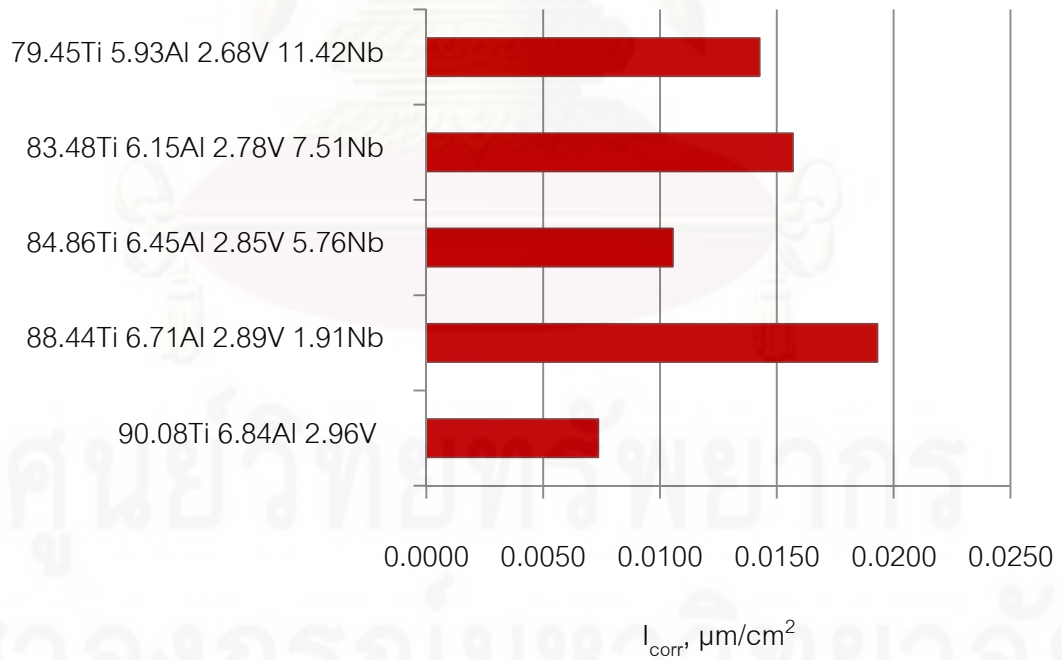
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน

รหัสชิ้นงาน	$I_{corr}$ (ไมโครแอมป์/ ตารางเซนติเมตร)	$E_{corr}$ (มิลลิโวลต์)	อัตรา การกัดกร่อน (ไมโครเมตร/ปี)	$I_p$ (ไมโครแอมป์/ ตารางเซนติเมตร)
C1	0.0074	-703.7	0.1200	4.877
C2	0.0193	-574.0	0.3137	4.763
C3	0.0105	-676.3	0.1658	5.314
C4	0.0157	-674.7	0.2385	4.611
C5	0.0143	-671.7	0.2217	5.290

จากผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มของชิ้นงานรหัส C ดังแสดงในรูปที่ 4.26-4.28 นั้น พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานรหัส C1 มีค่าต่ำที่สุด และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4.25 และ 4.29 พบว่า ชิ้นงานรหัส C มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มเหมือนกัน และไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ A.K. Shukla, R. Balasubramaniam และ S. Bhargava ที่ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มพาสซีฟ (Passive film) ของ CPTi, Ti-6Al-4V และ Ti-13.4Al-29Nb ในสภาวะจำลองของของเหลวในร่างกายมนุษย์ [9] ที่พบว่า เส้นโพลาริเซชันของชิ้นทดสอบมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มเหมือนกัน และไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบชิ้นงานในสารละลายแสงค์

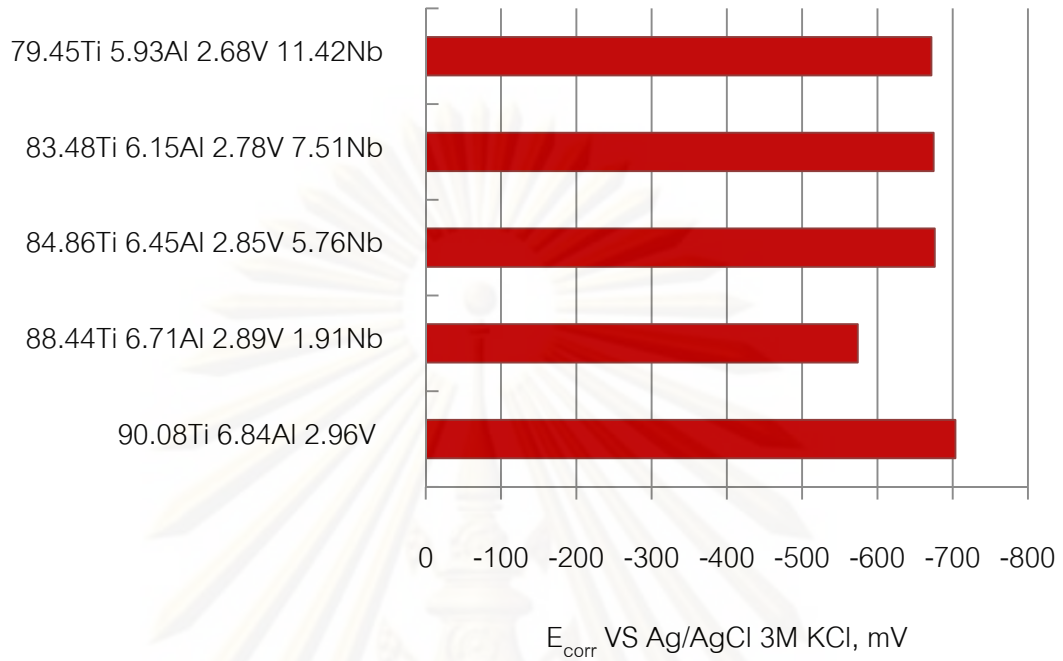


รูปที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบหาเส้นโพลาไรเซชัน

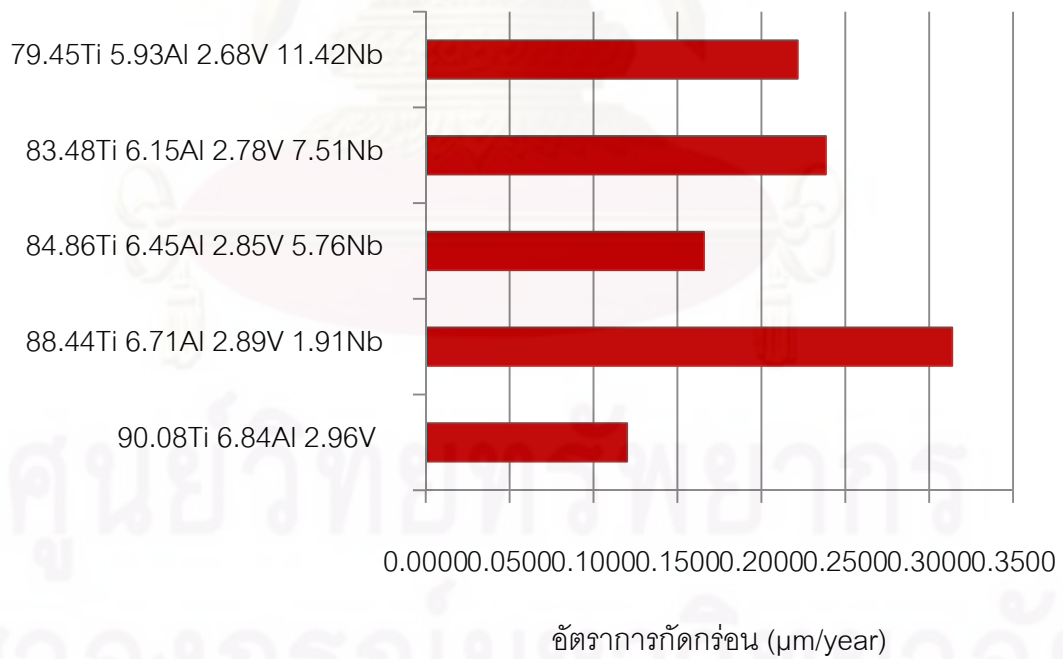


รูปที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานรหัส C

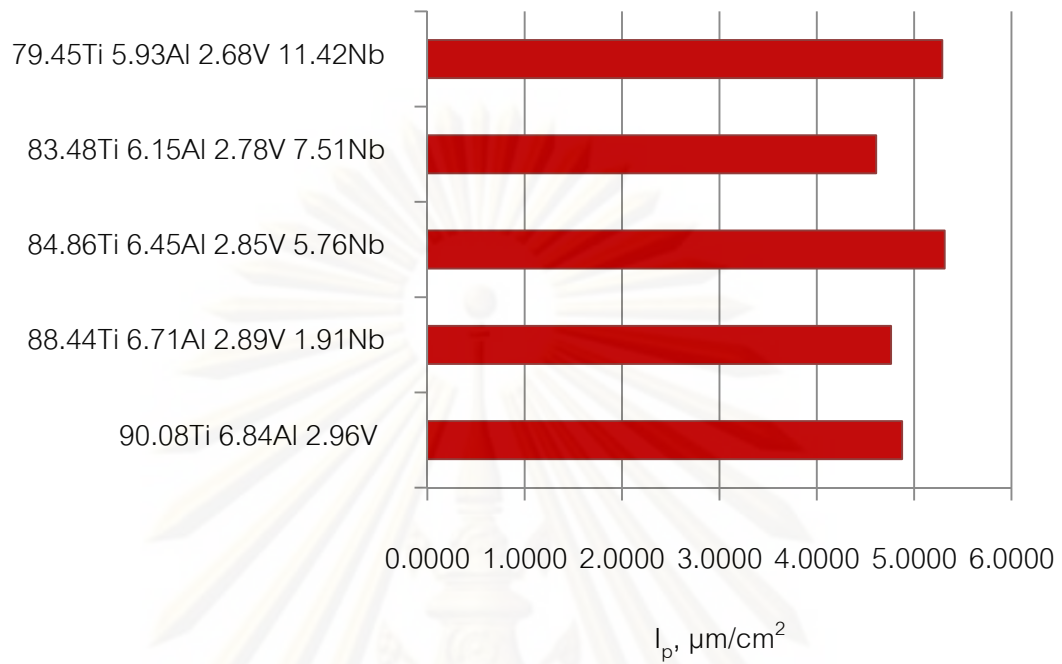




รูปที่ 4.27 ผลการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานรหัส C



รูปที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานรหัส C



รูปที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มของชิ้นงานรหัส C

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การหาค่ามอดุลัสของยัง การทดสอบการกัดกร่อน และการหาค่าความแข็งของชิ้นงาน Ti-6Al-3V-xNb สภาพหล่อ และชิ้นงาน Ti-6Al-3V-xNb ที่ผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อน และอบชุบความร้อน โดยมีปริมาณไนโอเบียมประมาณ 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า

5.1.1 เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น โครงสร้างแบบเข็มอัลฟาจะมีขนาดเล็ก และสั้นลง โดยชิ้นงานที่มีปริมาณไนโอเบียมประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความกว้างของโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาน้อยที่สุด และมีขนาดของโครงสร้างแบบเข็มอัลฟาสั้นที่สุด

5.1.2 ค่ามอดุลัสของยังทั้งในชิ้นงานรหัส C และ F มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น โดยค่ามอดุลัสของยังที่ต่ำที่สุดของชิ้นงานรหัส C อยู่ที่ 89 กิกะปาสคาล จากค่ามอดุลัสของยังที่สูงที่สุด 107 กิกะปาสคาล ขณะที่ชิ้นงานรหัส F มีค่ามอดุลัสของยังต่ำที่สุดอยู่ที่ 721 กิกะปาสคาล และค่ามอดุลัสของยังที่สูงที่สุดอยู่ที่ 907 กิกะปาสคาล

5.1.3 ชิ้นงานสภาพหล่อมีค่ามอดุลัสของยังต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปร้อน และอบชุบความร้อน

5.1.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานรหัส C1 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่มีไนโอเบียมผสม พบว่า มีค่าต่ำที่สุด และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น

5.1.5 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มของชิ้นงานรหัส C เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น

5.1.6 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งของชิ้นงานรหัส C และ F มีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบหาค่ามอดุลัสของยัง โดยค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาผลของกระบวนการชุบขึ้นรูปรีดร้อน และกระบวนการอบชุบความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V เมื่อมีปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2.2 ควรมีการศึกษาความเป็นพิษของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V เมื่อมีปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2.3 ควรมีการศึกษาคุณสมบัติการต้านทานฟิล์มพาสซีฟของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V เมื่อมีปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2.4 ควรมีการศึกษากลไกการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพาสซีฟของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V เมื่อมีปริมาณไนโอเบียม 0, 2, 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2.5 ควรมีการศึกษาผลของธาตุผสมชนิดอื่นต่อโครงสร้างจุลภาค และค่ามอดูลัสของยังของโลหะผสมไทเทเนียม Ti6Al4V

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Rodney Boyer, Gerhard Welsch, and E. W. Collings. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. USA : ASM International, 1994.
- [2] Matthew J. Donachie, Jr. Titanium, A Technical Guide. USA : ASM International, 1988.
- [3] C. Leyens, and M. Peters. Titanium and Titanium Alloys. Federal Republic of Germany : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim, 2003.
- [4] Titanium Alloys-Physical Properties. [Online]. Available from: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1413> [2007, May 2].
- [5] เอกรัตน์ ไวยนิตย์. เอกสารประกอบการบรรยาย Degradation and Corrosion of Biomaterials. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [6] Niobium [Online]. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Niobium> [2007, May 2].
- [7] Mitsuo Niinomi. Mechanical properties of biomedical titanium alloys. Materials Science and Engineering A 243 (1998) : 231-236.
- [8] Daisuke Kuroda, Mitsuo Niinomi, et al. Design and mechanical properties of new  $\beta$  type titanium alloys for implant materials. Materials Science and Engineering A. 243 (1998) : 244-249.
- [9] A.K. Shukla, R. Balasubramaniam, and S. Bhargava. Properties of passive film formed on CP titanium, Ti-6Al-4V and Ti-13.4Al-29Nb alloys in simulated human body conditions. Intermetallics. 13 (2005) : 631-637.
- [10] A.K. Shukla, R. Balasubramaniam, and S. Bhargava. Effect of replacement of V by Fe and Nb on passive film behavior of Ti-6Al-4V in simulated body fluid conditions. Journal of Alloys and Compounds. 389 (2005) : 144-152.
- [11] H.M. Silva, S.G. Schneider, and C. Moura Neto. Study of nontoxic aluminum and vanadium-free titanium alloys for biomedical applications. Materials Science and Engineering C. 24 (2004) : 679-682.
- [12] Günter Petzow. Metallographic Etching. USA : ASM International, 1999.

- [13] ASTM Designation : E 1876-01, Standard Test Methods for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.
- [14] ASM Handbook Volume 9, Metallurgy and Microstructures 2004.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีการประกอบเซลล์สำหรับการทดสอบการกัดกร่อน

#### ก.1 วิธีการประกอบ

ก.1.1 ตัดแผ่นอะคริลิกความหนา 3 และ 10 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดตามแบบในภาคผนวก ฉ

ก.1.2 เจาะรูแผ่นอะคริลิกด้วยเครื่องเจาะตามแบบในภาคผนวก ฉ

ก.1.3 นำแผ่นอะคริลิกความหนา 3 มิลลิเมตร ตามหมายเลขแบบ cell-002 และ cell-003 และแผ่นอะคริลิกความหนา 10 มิลลิเมตร ตามหมายเลขแบบ cell-006 มาประกอบเป็นช่องเซลล์ โดยใช้น้ำยาประสานแผ่นอะคริลิกที่ขอบรอยต่อของแผ่นอะคริลิก แล้วรอจนแห้ง

ก.1.4 นำกาวซิลิโคนมาทาที่บริเวณรอบนอกของช่องเซลล์ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึม แล้วรอจนแห้ง

ก.1.5 นำแผ่นอะคริลิกความหนา 10 มิลลิเมตร ตามหมายเลขแบบ cell-007 และ cell-008 มาประกอบเป็นกล่องหล่อน้ำ โดยใช้น้ำยาประสานแผ่นอะคริลิกที่ขอบรอยต่อของแผ่นอะคริลิก แล้วรอจนแห้ง

ก.1.6 นำช่องเซลล์, กล่องหล่อน้ำ และฝากล่องหล่อน้ำด้านบน ตามหมายเลขแบบ cell-001 มาประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้น้ำยาประสานแผ่นอะคริลิกที่ขอบรอยต่อของแผ่นอะคริลิก แล้วรอจนแห้ง

ก.1.7 นำกาวซิลิโคนมาทาที่บริเวณรอบนอกของกล่องหล่อน้ำ และฝากล่องหล่อน้ำด้านบน แล้วรอจนแห้ง

ก.1.8 นำแผ่นอะคริลิกความหนา 3 มิลลิเมตร ตามหมายเลขแบบ cell-004 และ cell-005 มาประกอบเป็นฝาปิดช่องเซลล์ด้านบน โดยใช้น้ำยาประสานแผ่นอะคริลิกที่ขอบรอยต่อของแผ่นอะคริลิก แล้วรอจนแห้ง

ก.1.9 ทำการพับแผ่นสแตนเลสทั้ง 5 แผ่น ด้วยเครื่องพับโลหะแผ่นตามหมายเลขแบบ cell-009

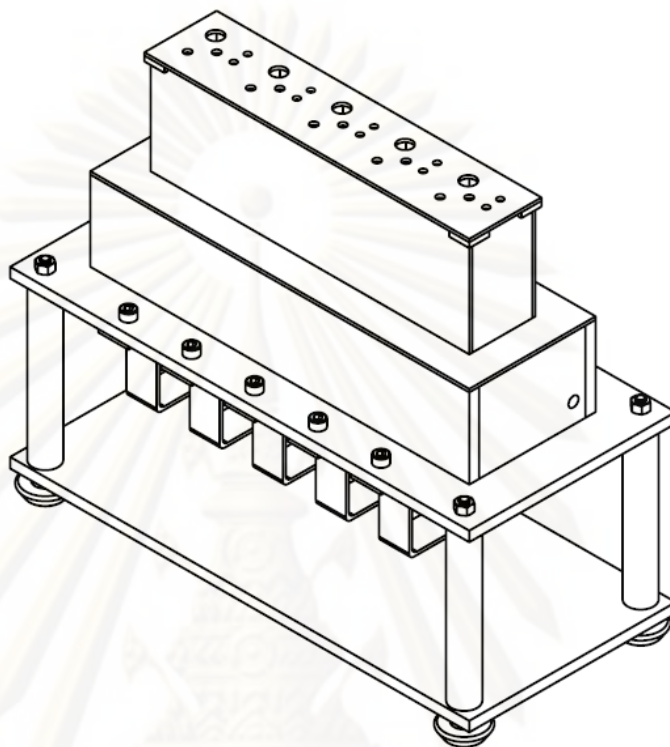
ก.1.10 ทำการเจาะรู และพ่นสีแผ่นสแตนเลสทั้ง 5 แผ่น เพื่อป้องกันการกัดกร่อน

ก.1.11 ทำการกลึงแท่งอะลูมิเนียมทั้ง 4 แท่ง ด้วยเครื่องกลึงตามหมายเลขแบบ cell-010

ก.1.12 ทำการตีปและตายแท่งอะลูมิเนียมทั้ง 4 แท่ง ด้วยอุปกรณ์ชุดตีป และตาย



ก.1.13 ทำการประกอบชุดเซลล์เข้ากับฐาน แท่งอะลูมิเนียม และแผ่นสแตนเลสด้วย นัทและ  
สกรูขนาด M6 และ M8



รูปที่ ก.1 เซลล์สำหรับทดสอบการกัดกร่อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

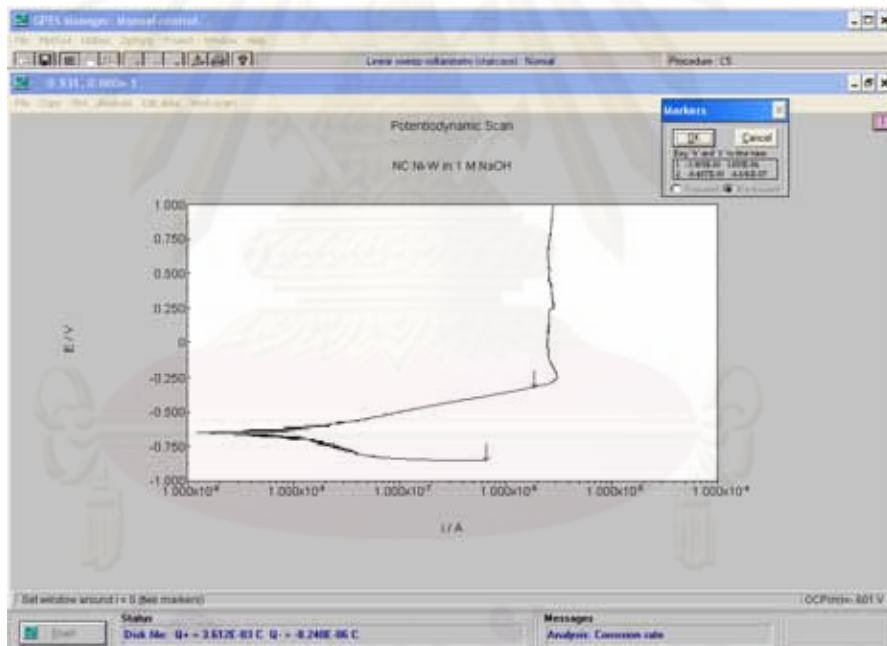
## ภาคผนวก ข

### การหาค่าตัวแปรการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน

#### ข.1 การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ), กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{\text{corr}}$ ) และอัตราการกัดกร่อน

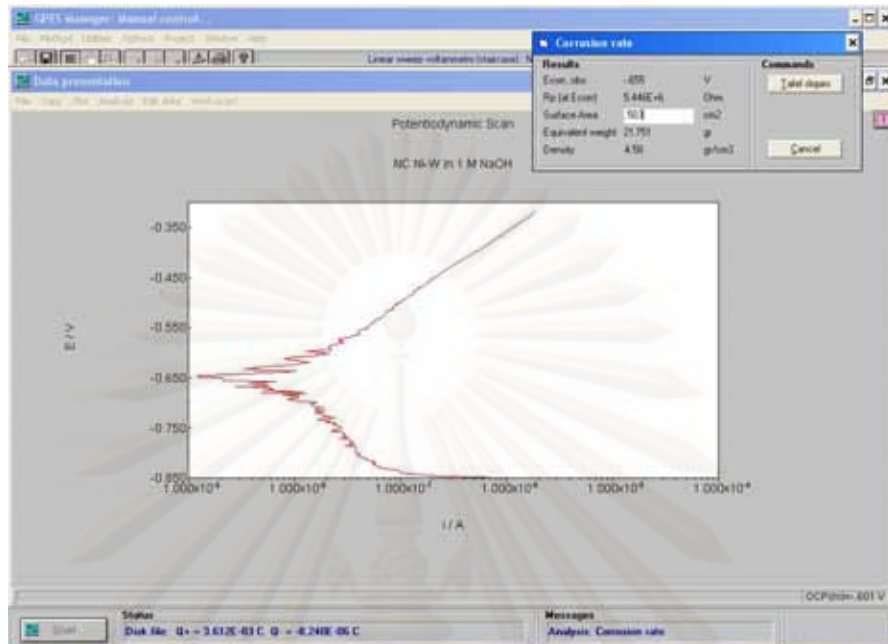
ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน, กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนหาได้โดยวิธีหาจุดตัดของเส้น Tafel ในที่นี้ใช้โปรแกรม Corrosion Rate ซึ่งมีวิธีการหาดังขั้นตอนต่อไปนี้

ข.1.1 ทำการเรียกข้อมูลที่ต้องการ และกำหนดช่วงที่จะทำการหาค่าตัวแปรการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ดังรูปที่ ข.1



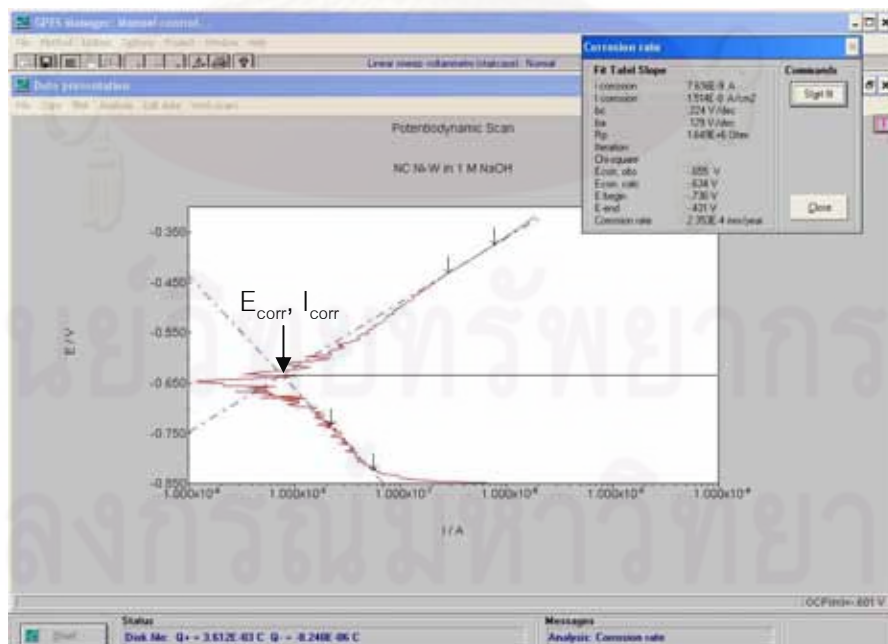
รูปที่ ข.1 การกำหนดช่วงที่จะทำการหาค่าตัวแปรต่างๆ

ข.1.2 กรอกรข้อมูลของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ และกดปุ่ม Tafel slope ดังรูปที่ ข.2

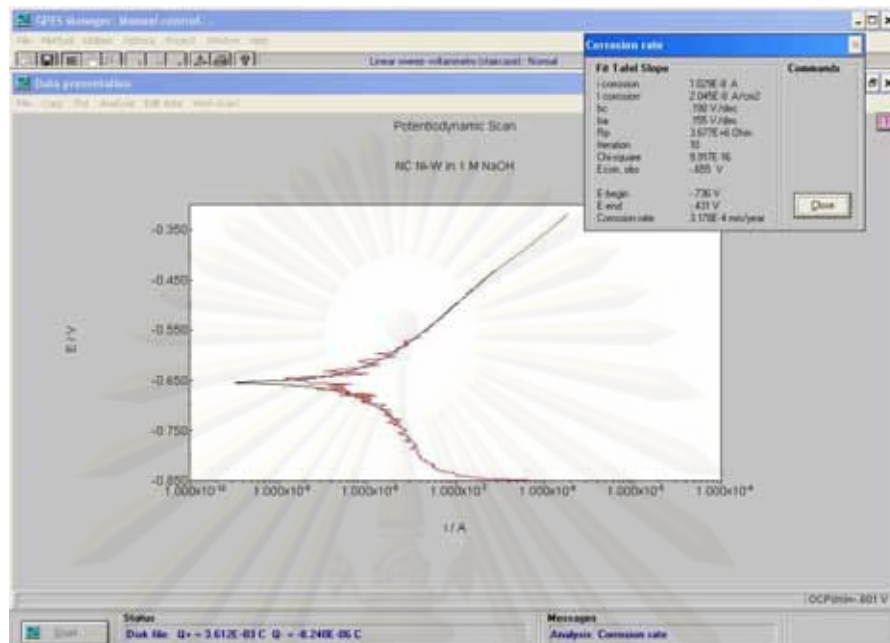


รูปที่ ข.2 การกรอกข้อมูลของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

ข.1.3 กำหนดตำแหน่ง 2 จุดบนเส้นโค้งโพลาริเซชันทั้ง 2 เส้น โดยโปรแกรมจะคำนวณเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดไว้ดังรูปที่ ข.3 ซึ่งจุดตัดระหว่างเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแอโนด และเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแคโทด คือ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และโปรแกรมจะคำนวณอัตราการกัดกร่อนให้



รูปที่ ข.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ ข.4 ลักษณะกราฟเส้นสีดำที่โปรแกรมทำการ Fit curve ซ้อนทับกับกราฟที่ได้จากการทดสอบ

## ข.2 การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน

สามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้จาก

$$R_{\text{umpy}} = \frac{(3.27 \times I_{\text{corr}} \times e)}{\rho} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ  $R_{\text{umpy}}$  คือ อัตราการเกิดการกัดกร่อน, ไมโครเมตร/ปี

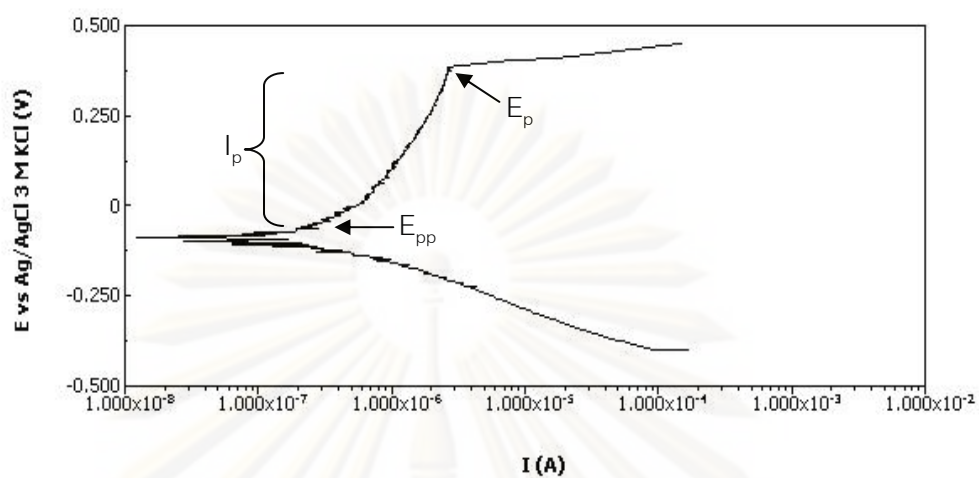
$I_{\text{corr}}$  คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน, ไมโครแอมป์/ตารางเซนติเมตร

$e$  คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของโลหะ, กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

## ข.3 การหาค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ ( $E_{pp}$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม ( $E_p$ ) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม ( $I_p$ )

เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจนถึงจุดที่กระแสไฟฟ้าเริ่มมีอัตราการเพิ่มลดลง หรือจุดที่ความชันของเส้นแอนดิกเริ่มเปลี่ยนแปลง ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเริ่มเกิดพาสซีฟ กรณีที่กระแสช่วงพาสซีฟเพิ่มอย่างกะทันหันกลายเป็นกระแสวิ่งทรานพาสซีฟจะกำหนดให้จุดดังกล่าวเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม ดังแสดงในรูปที่ ข.5 ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มนั้น สามารถหาได้จากการนำข้อมูลช่วงพาสซีฟมาทำการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ ๗.5 วิธีการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม

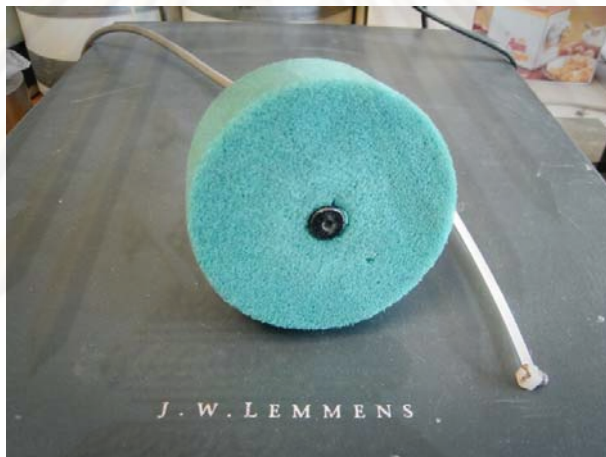
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### การหาค่ามอดุลัสของยัง

#### ค.1 การหาค่าความถี่ด้วยเครื่อง Grindosonic

การหาค่าความถี่ด้วยเครื่อง Grindosonic นั้นจะอาศัยหลักวัดความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ของชิ้นงานด้วยการใช้ที่เคาะสัญญาณที่มีลักษณะเป็นแท่งโพลีเมอร์ที่ยืดหยุ่นได้ (Flexible polymer rod) และบริเวณปลายที่เคาะจะติดโลหะกลมขนาดเล็ก [13] ดังรูปที่ ค.1

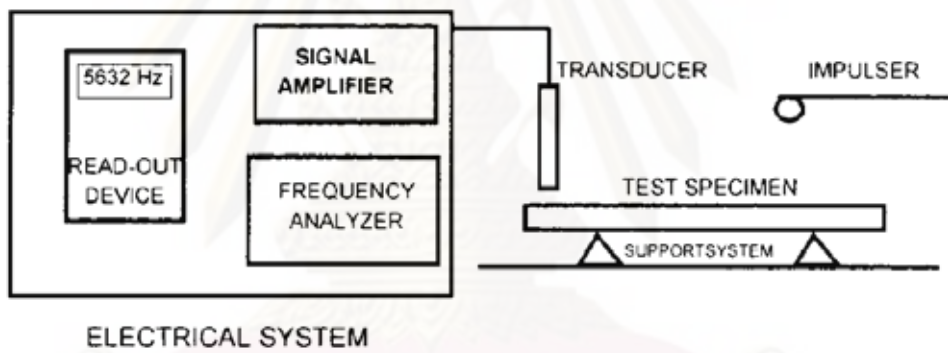


รูปที่ ค.1 ลักษณะของฟองน้ำสำหรับวางชิ้นงานและที่เคาะสัญญาณ

จากนั้นตัวแปรสัญญาณ (Transducer) ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ ไมโครโฟนดังรูปที่ ค.2 จะทำหน้าที่ส่งผลการสั่นทางกลของชิ้นงานแล้วแปลงผลลัพธ์นี้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณที่จะวิเคราะห์จะเป็นความถี่ หรือระยะเวลาในการสั่นของชิ้นงาน และความถี่มูลฐานจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzer) แล้วจึงนำค่าความถี่ที่ได้ไปคำนวณในสมการที่ (ค.1) และ (ค.2) [13]



รูปที่ ค.2 ลักษณะของไมโครโฟนสำหรับวัดสัญญาณของชิ้นงาน



รูปที่ ค.3 ลักษณะการทำงานของวงจรสำหรับการวัดค่าความถี่ของชิ้นงาน [13]



รูปที่ ค.4 ลักษณะการวางชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ

## ค.2 การคำนวณหาค่ามอดุลัสของยัง

สามารถคำนวณหาค่ามอดุลัสของยัง [13] ได้จาก

$$E = 0.9465 \left( \frac{mf_f^2}{b} \right) \left( \frac{l^3}{t^3} \right) T_1 \quad (\text{ค.1})$$

และ

$$T_1 = 1.000 + 6.585 \left( \frac{t}{L} \right)^2 \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ E คือ ค่ามอดุลัสของยัง, ปาสกาล

m คือ มวลของชิ้นงาน, กรัม

b คือ ความกว้างของชิ้นงาน, มิลลิเมตร

L คือ ความยาวของชิ้นงาน, มิลลิเมตร

t คือ ความหนาของชิ้นงาน, มิลลิเมตร

$f_f$  คือ ค่าความถี่มูลฐานของชิ้นงาน, เฮิรตซ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ง

### ปริมาณธาตุของชิ้นงาน

#### ง.1 ผลการวิเคราะห์

ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส C และ F

รหัส ชิ้นงาน	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)					
	Fe	Si	Al	V	Nb	Ti
C1	<<	0.12	6.84	2.96	-	90.08
C2	<<	0.05	6.71	2.89	1.91	88.44
C3	<<	0.09	6.45	2.85	5.76	84.86
C4	<<	0.08	6.15	2.78	7.51	83.48
C5	<<	0.14	5.93	2.68	11.42	79.45
F1	<<	0.03	6.34	2.98	-	90.65
F2	<<	0.04	6.21	3.51	1.90	88.35
F3	<<	0.03	6.07	2.82	5.29	85.79
F4	<<	0.03	6.11	2.77	7.26	83.83
F5	<<	<<	5.70	2.64	10.71	80.96

ตารางที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส S ของ บริษัท MBH Analytical

รหัส ชิ้นงาน	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)								
	Sn	Mo	Zr	Fe	Si	Al	V	Nb	Ti
S1	-	-	-	0.16	-	6.46	4.07	-	Bal.
S2	3.54	0.27	3.02	0.005	0.27	5.59	-	1.00	Bal.

ตารางที่ ง.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงานรหัส S ของเอ็มเทค

รหัส ชิ้นงาน	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)								
	Sn	Mo	Zr	Fe	Si	Al	V	Nb	Ti
S1	-	<<	-	<<	<<	6.79	3.05	-	90.15
S2	3.83	0.18	2.68	-	0.25	5.65	0.01	0.91	86.47



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### ค่าความถี่ และขนาดของชิ้นงานสำหรับการคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง

#### จ.1 ผลการวิเคราะห์

การหาค่าความกว้าง และความยาวเฉลี่ยของชิ้นงานรหัส C และ F ได้ผลการวัดตามตารางที่ จ.1 ส่วนค่าความถี่ที่วัดได้นั้นจะแบ่งเป็นผลการวัดของชิ้นงานรหัส C และ F ซึ่งได้ผลการวัดตามตารางที่ จ.2 และ จ.3 ตามลำดับ

#### ตารางที่ จ.1 ผลการวัดความกว้าง และความหนาของชิ้นงาน

รหัส ชิ้นงาน	ความกว้าง (มิลลิเมตร)					ความหนา (มิลลิเมตร)				
	หัว	กลาง	ท้าย	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD	หัว	กลาง	ท้าย	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C1	4.90	4.90	4.90	4.90	0.000	1.10	1.10	1.05	1.08	0.029
C2	4.90	4.90	4.90	4.90	0.000	1.05	1.15	1.20	1.13	0.076
C3	4.90	4.90	4.90	4.90	0.000	1.10	1.10	1.10	1.10	0.000
C4	4.90	4.90	4.90	4.90	0.000	1.00	1.00	1.00	1.00	0.000
C5	4.90	4.90	5.15	4.98	0.144	1.05	1.05	1.05	1.05	0.000
F1	7.60	7.60	7.65	7.62	0.029	1.20	1.30	1.40	1.30	0.100
F2	7.60	7.60	7.60	7.60	0.000	1.35	1.30	1.30	1.32	0.029
F3	7.55	7.60	7.60	7.58	0.029	1.50	1.40	1.40	1.43	0.058
F4	7.30	7.30	7.30	7.30	0.000	1.35	1.35	1.35	1.35	0.000
F5	7.60	7.60	7.60	7.60	0.000	1.35	1.40	1.40	1.38	0.029

ตารางที่ ๑.2 ผลการวัดความถี่ของชิ้นงานรหัส C

จำนวนครั้งที่ทำการวัด	ค่าความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)				
	C1	C2	C3	C4	C5
1	16.10	6.40	16.40	15.90	5.34
2	6.55	6.40	16.40	5.77	5.39
3	6.55	6.40	5.96	5.77	5.34
4	6.55	17.50	5.96	5.77	10.04
5	6.55	15.20	5.97	5.77	5.34
6	18.00	12.00	16.40	5.77	14.70
7	6.55	6.40	5.96	5.77	5.34
8	6.55	6.40	5.96	15.90	14.70
9	6.55	17.50	5.96	15.90	5.34
10	6.55	17.50	5.96	5.77	5.35
11	6.55	6.40	5.96	5.77	5.34
12	6.54	6.40	5.96	5.77	5.35
13	18.00	6.40	8.74	5.77	5.35
14	18.00	6.40	5.96	15.90	5.34
15	6.55	6.40	5.96	15.90	14.70
16	6.55	6.40	5.96	5.77	14.70
17	6.55	6.40	5.97	9.79	5.34
18	10.20	6.40	16.40	5.77	14.70
19	13.00	10.20	5.96	5.77	10.60
20	6.55	9.44	5.97	5.77	5.34
21	6.55	17.50	5.97	5.77	5.35
22	6.55	17.50	10.30	5.77	5.34
23	6.55	6.40	5.96	8.40	5.35
24	6.55	6.40	5.97	5.77	5.34
25	6.55	6.40	5.97	15.90	5.34
26	8.06	6.40	5.96	8.55	5.34

ตารางที่ ๑.2 (ต่อ) ผลการวัดความถี่ของชิ้นงานรหัส C

จำนวนครั้งที่ทำการวัด	ค่าความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)				
	C1	C2	C3	C4	C5
27	15.20	6.40	5.96	5.77	5.34
28	6.55	6.40	5.97	5.77	5.34
29	6.55	6.40	16.40	15.90	5.34
30	6.55	17.50	5.97	5.77	5.34

ตารางที่ ๑.3 ผลการวัดความถี่ของชิ้นงานรหัส F

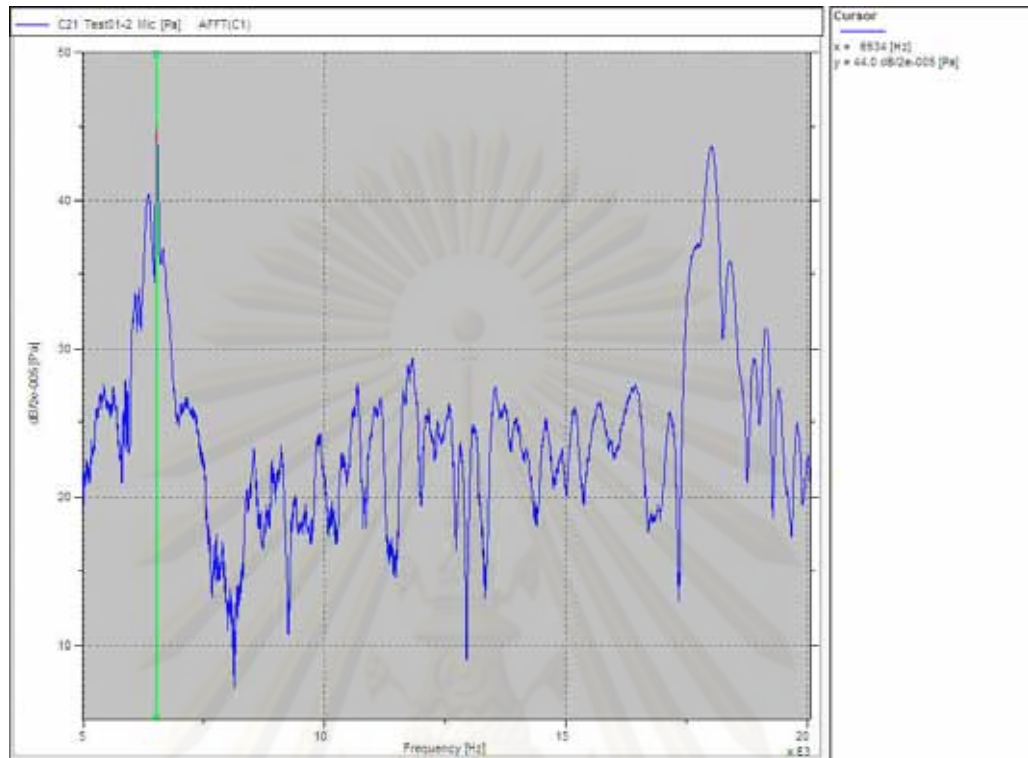
จำนวนครั้งที่ทำการวัด	ค่าความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)				
	F1	F2	F3	F4	F5
1	18.40	9.26	12.90	16.30	9.74
2	9.44	9.27	9.33	8.69	9.41
3	12.30	9.27	9.05	8.71	9.41
4	9.48	9.27	9.55	9.99	11.60
5	12.50	9.26	9.05	8.71	9.41
6	11.00	8.20	9.34	8.71	9.41
7	9.44	10.60	9.05	8.72	9.41
8	9.99	9.27	8.45	10.20	9.40
9	8.39	13.40	9.26	8.72	9.41
10	9.33	9.27	9.05	8.72	9.41
11	9.40	9.27	9.05	9.70	8.55
12	9.44	9.26	9.29	8.71	9.41
13	9.44	9.27	9.05	8.72	9.41
14	9.44	9.27	9.05	8.71	13.80
15	9.51	9.27	9.05	8.71	9.41
16	9.74	9.26	9.04	8.72	9.41
17	9.44	9.27	9.05	8.72	9.41
18	9.44	9.27	9.05	11.70	9.41

ตารางที่ ๑.3 (ต่อ) ผลการวัดความถี่ของชิ้นงานรหัส F

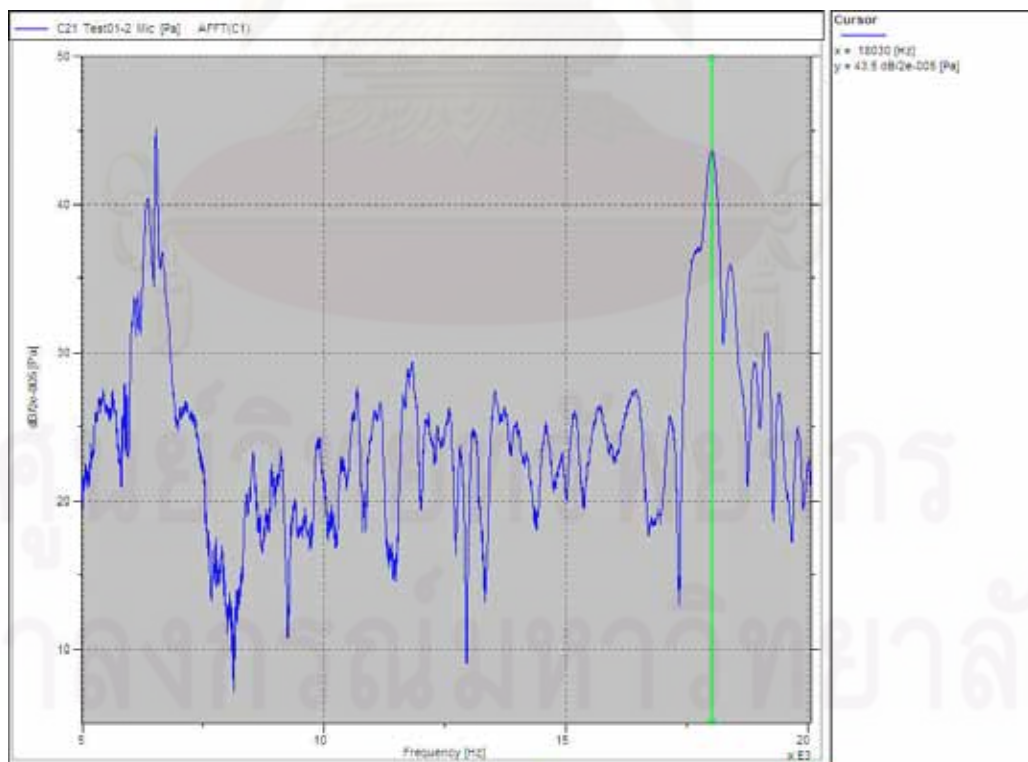
จำนวนครั้งที่ทำการวัด	ค่าความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)				
	F1	F2	F3	F4	F5
19	9.44	5.55	9.05	8.72	9.41
20	9.44	9.26	9.05	8.72	11.70
21	9.32	9.26	8.84	8.72	9.41
22	9.44	9.79	9.05	8.72	15.90
23	9.44	16.30	11.40	10.70	9.41
24	15.00	9.27	9.05	8.72	9.41
25	9.48	9.27	9.05	8.71	9.41
26	16.00	9.27	9.05	8.83	9.41
27	9.44	9.27	9.31	8.72	9.41
28	18.40	9.27	9.05	8.72	9.41
29	9.78	9.27	9.05	8.72	9.41
30	9.44	9.27	9.05	8.72	9.41

## ๑.2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความถี่กับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณอื่น

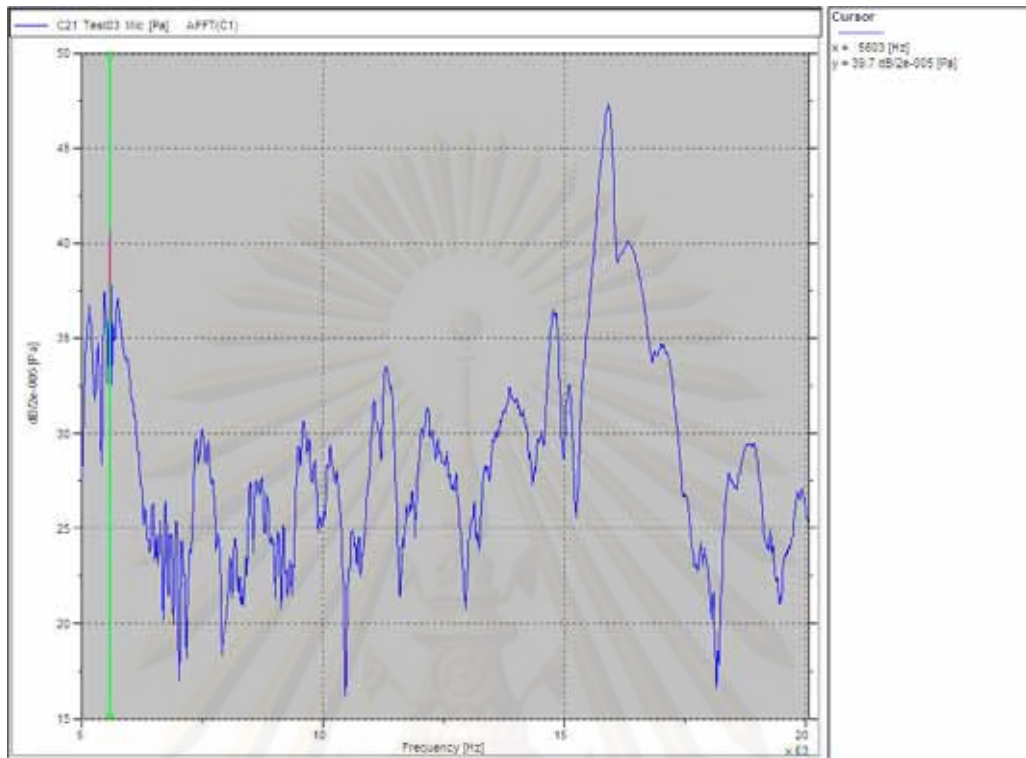
เพื่อทำการตรวจสอบค่าความถี่ที่ทำการตรวจวัดจากเครื่อง Grindosonic มีความถูกต้องหรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบหาค่าความถี่เปรียบเทียบด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzer) ยี่ห้อ LMS โดยทำการเลือกเคาะชิ้นงานรหัส C1, C4, F1 และ F5 ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ ๑.1-๑.7 พบว่า ค่าความถี่ที่ทำการตรวจวัดจากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ LMS มีความใกล้เคียงกันกับค่าความถี่ที่ทำการตรวจวัดจากเครื่อง Grindosonic ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าความถี่ที่ทำการตรวจวัดจากเครื่อง Grindosonic มีความถูกต้อง



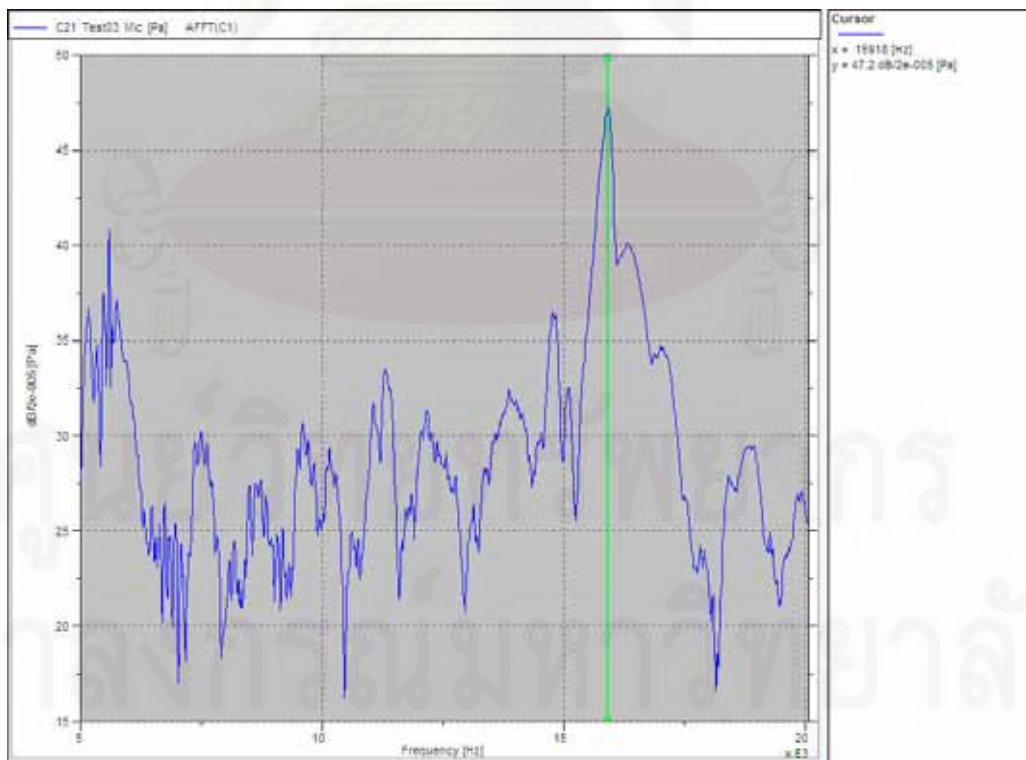
รูปที่ ๑.1 กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C1 ที่ Mode 1



รูปที่ ๑.2 กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C1 ที่ Mode 2

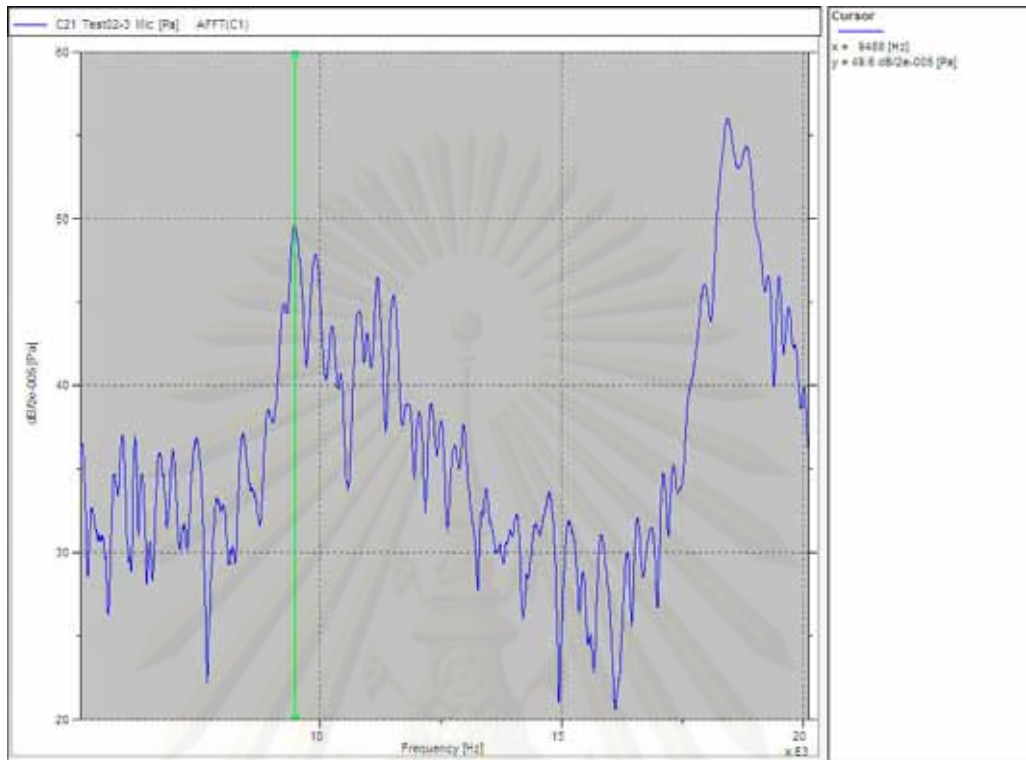


รูปที่ ๑.3 กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C4 ที่ Mode 1

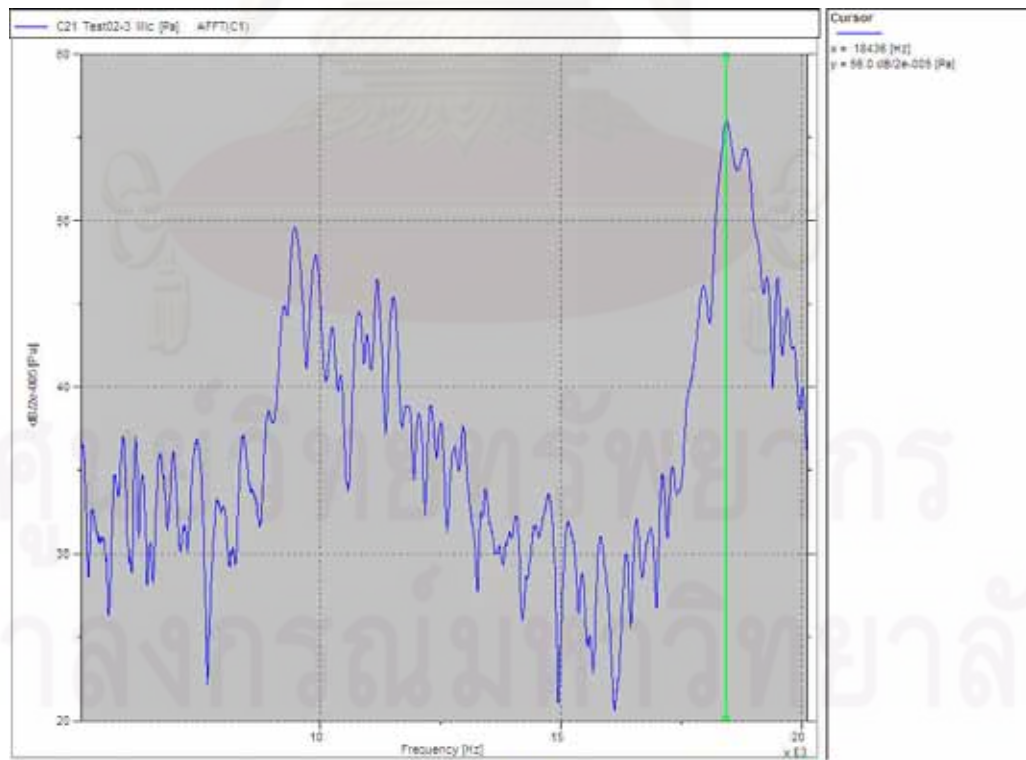


รูปที่ ๑.4 กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส C4 ที่ Mode 2

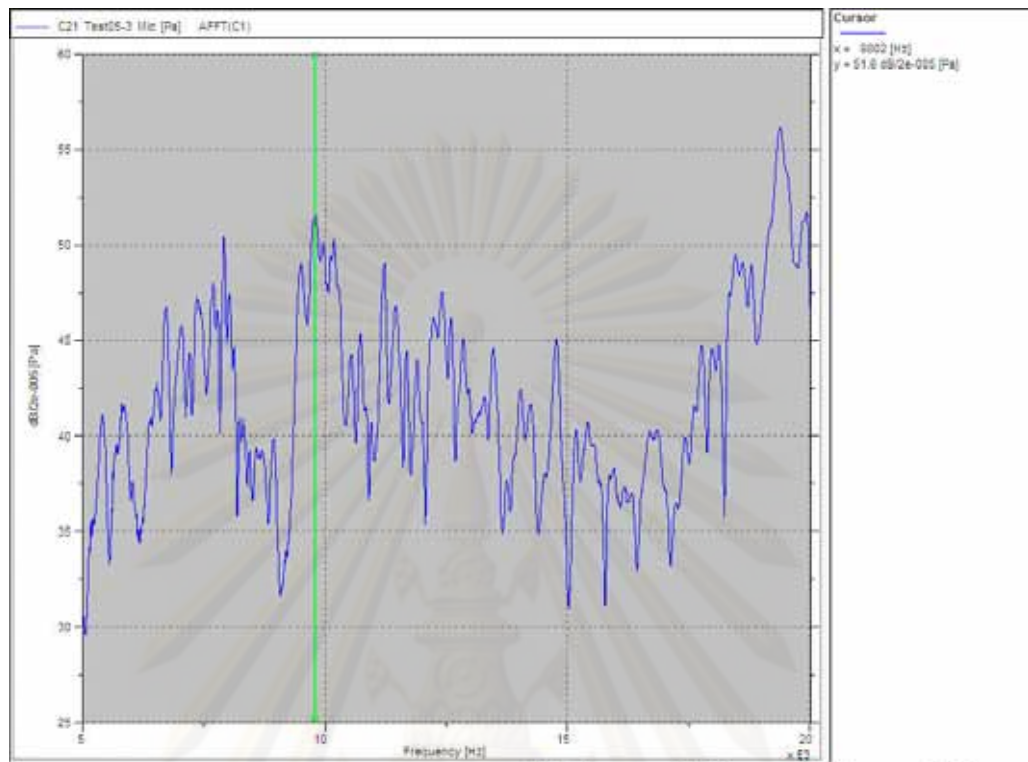




รูปที่ ๑.5 กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส F1 ที่ Mode 1



รูปที่ ๑.6 กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส F1 ที่ Mode 2



รูปที่ ๑.7 กราฟความถี่ของชิ้นงานรหัส F5 ที่ Mode 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

### ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน

#### จ.1 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

จ.1.1 สารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ สารละลายแอสค

จ.1.2 สภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 7.4

จ.1.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ  $37 \pm 1$  องศาเซลเซียส

จ.1.4 เวลาที่ใช้ในการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงไปบนสารละลายก่อนทำการทดสอบเท่ากับ 45 นาที

จ.1.5 อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที

จ.1.6 เริ่มสแกนตั้งแต่ -250 มิลลิโวลต์ ถึง 1600 มิลลิโวลต์

จ.1.5 อัตราการสแกนเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์/วินาที

จ.1.6 เวลาที่ใช้ในการให้ชิ้นงานสัมผัสกับสารละลายก่อนทำการทดสอบเท่ากับ 3600 วินาที

#### จ.2 ผลการวิเคราะห์

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) อัตราการกัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์ม ( $I_p$ ) จากเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C นั้น ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ จ.1-จ.4 และลักษณะของเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C ปรากฏดังรูปที่ จ.1-จ.5

ตารางที่ จ.1 ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน

รหัส ชิ้นงาน	$I_{corr}$ (ไมโครแอมป์/ตารางเซนติเมตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C1	0.0027	0.0078	0.0116	0.0074	0.0045
C2	0.0070	0.0231	0.0278	0.0193	0.0109
C3	0.0034	0.0060	0.0222	0.0105	0.0102
C4	0.0177	0.0062	0.0231	0.0157	0.0086
C5	0.0043	0.0197	0.0188	0.0143	0.0086

ตารางที่ จ.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน

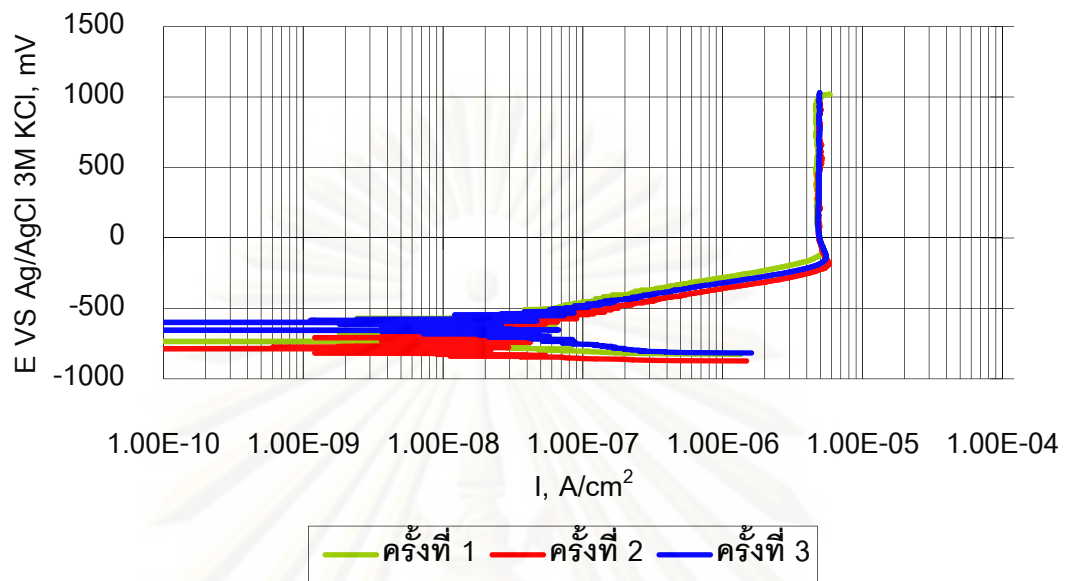
รหัส ชั้นงาน	$E_{corr}$ (มิลลิโวลต์)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C1	-689	-784	-638	-704	74.1
C2	-584	-574	-564	-574	10.0
C3	-695	-723	-611	-676	58.3
C4	-694	-689	-641	-675	29.3
C5	-680	-675	-660	-672	10.4

ตารางที่ จ.3 อัตราการกัดกร่อนที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน

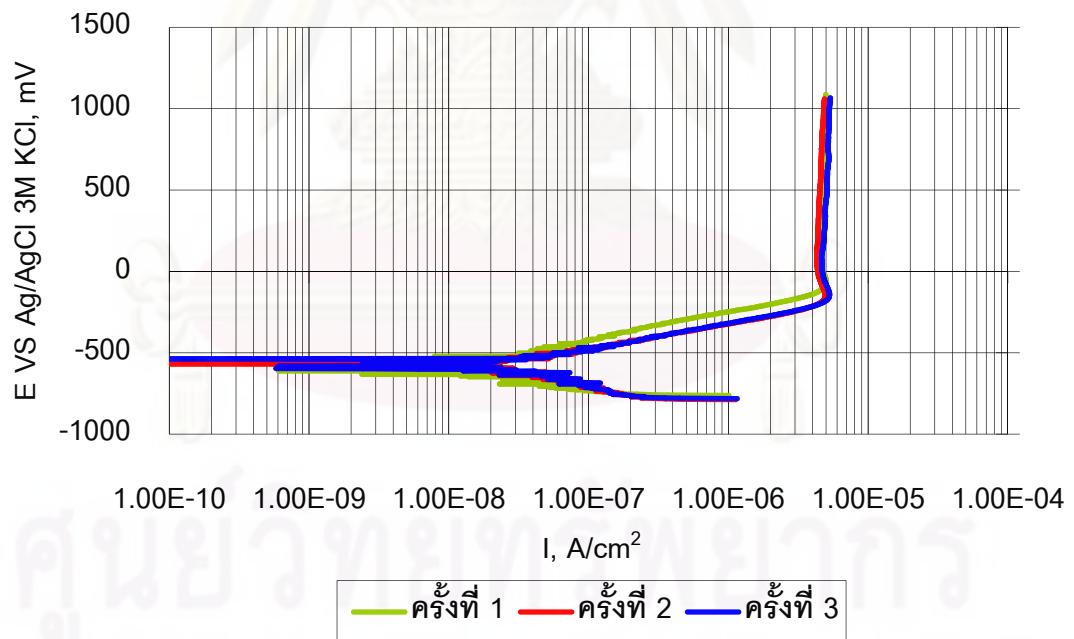
รหัส ชั้นงาน	อัตราการกัดกร่อน (ไมโครเมตร/ปี)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C1	0.0432	0.1275	0.1893	0.1200	0.0733
C2	0.1145	0.3748	0.4519	0.3137	0.1768
C3	0.0535	0.0946	0.3494	0.1658	0.1603
C4	0.2698	0.0944	0.3514	0.2385	0.1313
C5	0.0668	0.3054	0.2928	0.2217	0.1342

ตารางที่ จ.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มที่ได้จากเส้นโพลาริเซชัน

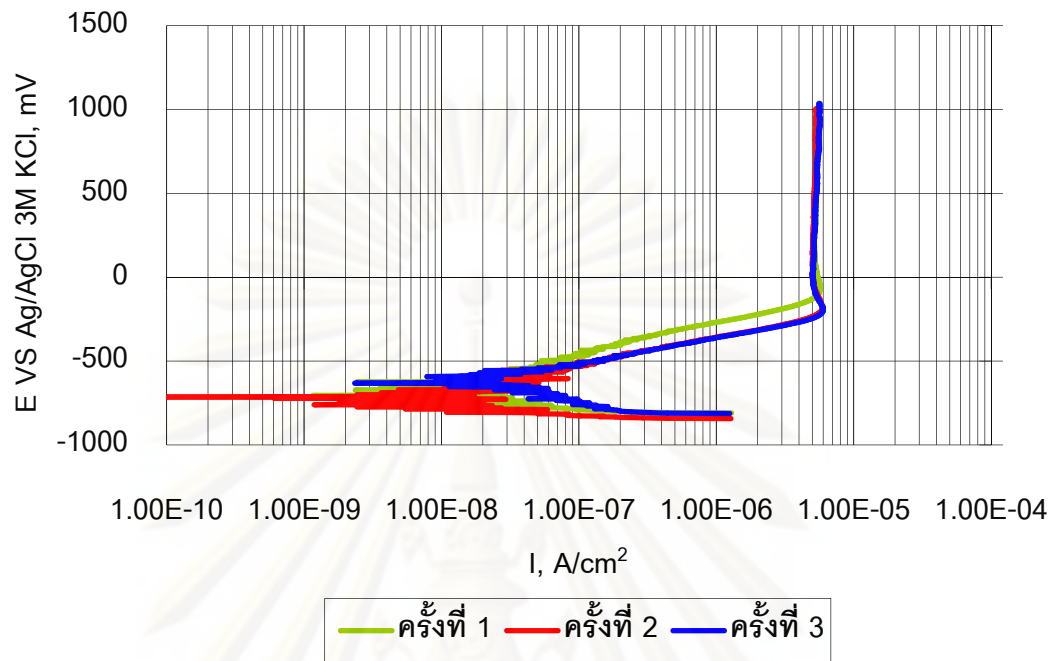
รหัส ชั้นงาน	$I_p$ (ไมโครแอมป์/ตารางเซนติเมตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C1	4.769	4.942	4.919	4.877	0.0939
C2	4.714	4.550	5.025	4.763	0.2415
C3	5.378	5.214	5.350	5.314	0.0879
C4	4.601	4.405	4.825	4.611	0.2102
C5	5.177	5.438	5.256	5.290	0.1337



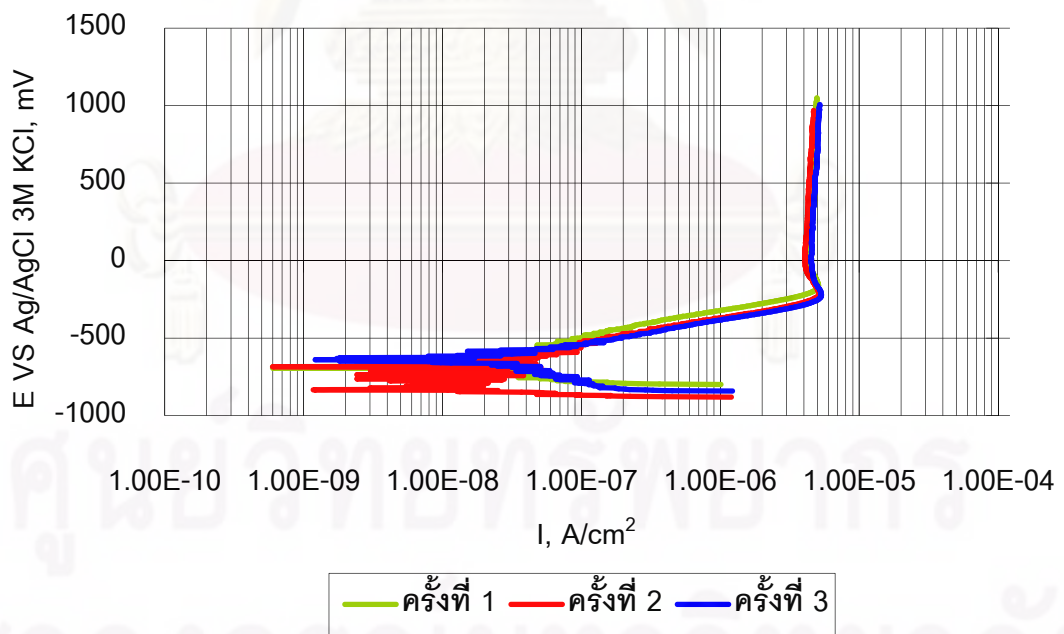
รูปที่ ๑.1 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C1



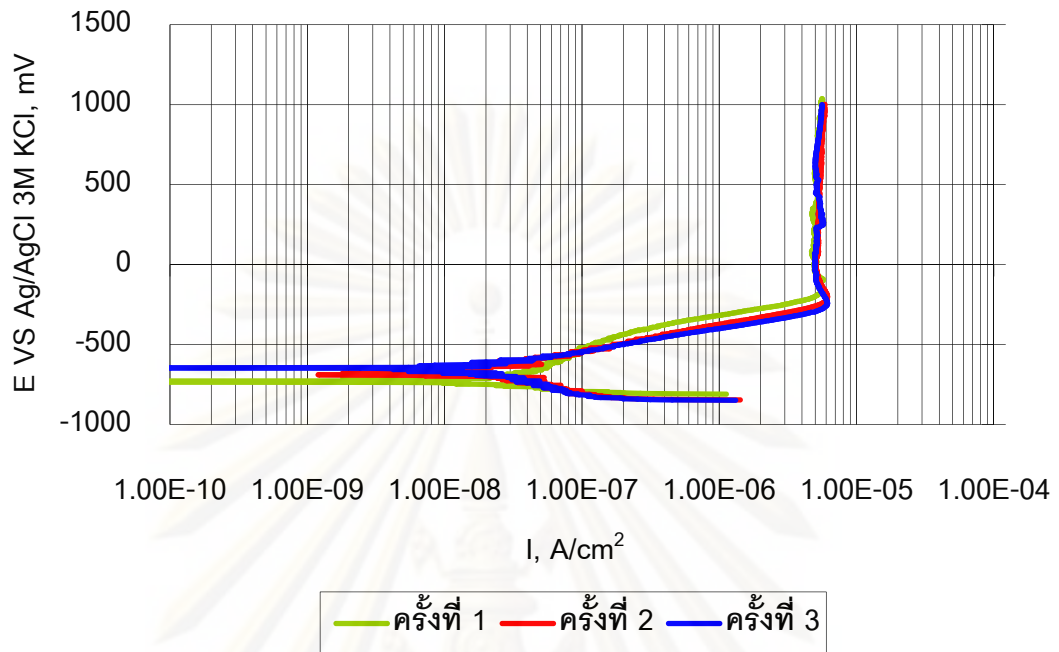
รูปที่ ๑.2 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C2



รูปที่ ๓.3 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C3



รูปที่ ๓.4 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C4



รูปที่ ๕.๕ ผลการเปรียบเทียบการทดสอบซ้ำเพื่อหาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานรหัส C5

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช

### ค่าความแข็ง

#### ช.1 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ช.1.1 ภาระ 100 กรัมแรง

ช.1.2 Dwell time 15 วินาที

#### ช.2 ผลการวิเคราะห์

ตารางที่ ช.1 ผลค่าความแข็งของชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	ค่าความแข็ง HV						
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C1	315	311	328	315	338	321	11.2
C2	303	295	299	303	299	299	3.32
C3	295	295	299	295	299	296	2.14
C4	303	303	303	307	303	303	1.78
C5	284	283	299	299	291	291	7.61
F1	เกรนหยาบ	385	374	352	379	374	12.3
	เกรนละเอียด	409	397	416	391	409	10.2
	ค่าเฉลี่ย						389
F2	347	357	352	357	358	354	4.58
F3	343	333	343	342	338	340	4.25
F4	333	338	328	328	319	329	6.76
F5	เกรนหยาบ	357	347	363	363	347	7.74
	เกรนละเอียด	385	391	385	391	397	4.98
	ค่าเฉลี่ย						373



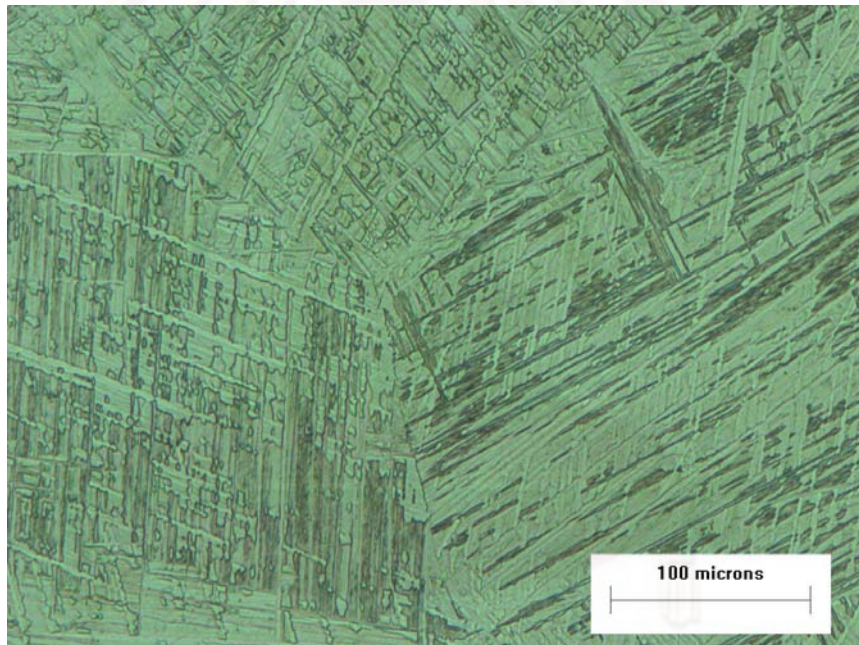
## ภาคผนวก ซ

### โครงสร้างจุลภาค

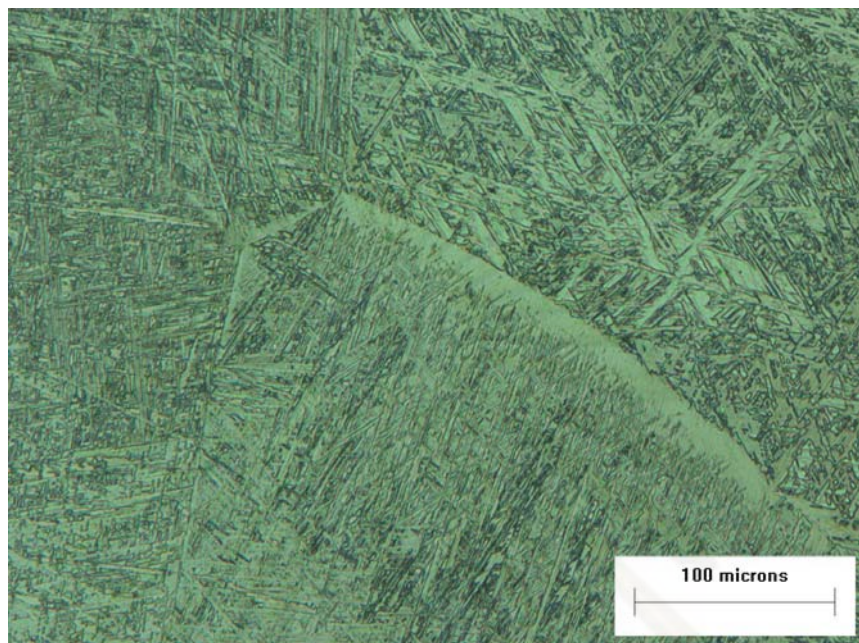
#### ซ.1 ผลการวิเคราะห์

##### ซ.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

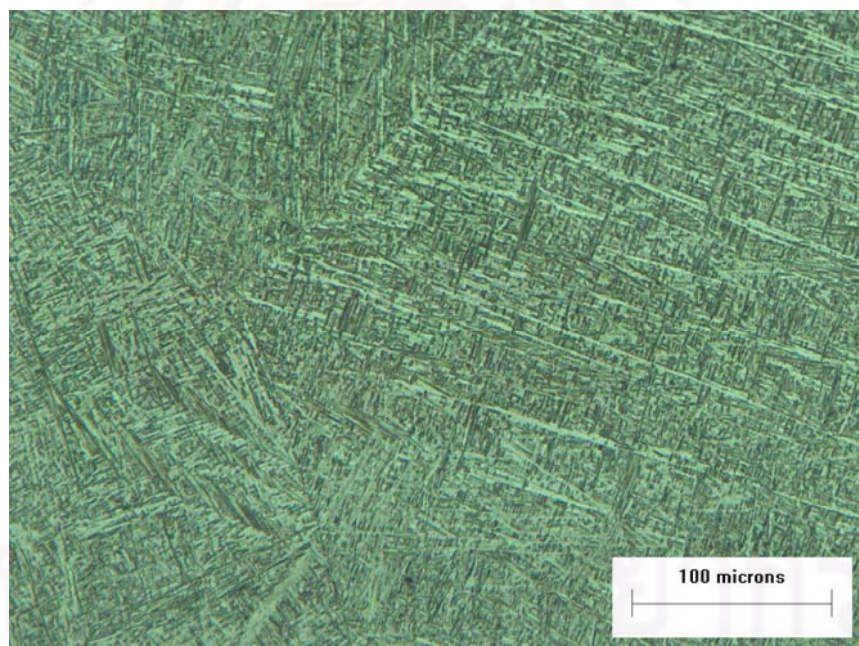
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ที่กำลังขยาย 200x และ 500x จะปรากฏโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ ซ.1-ซ.20 โดยเรียงลำดับจาก C1 ไปถึง C5 และจากนั้นจะเป็น F1 ไปถึง F5 ตามลำดับ



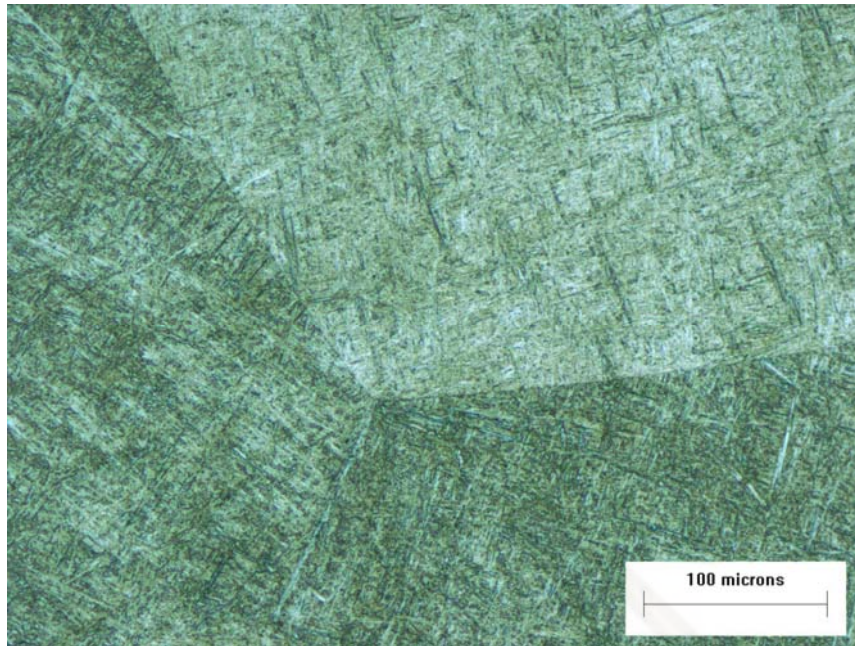
รูปที่ ซ.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1



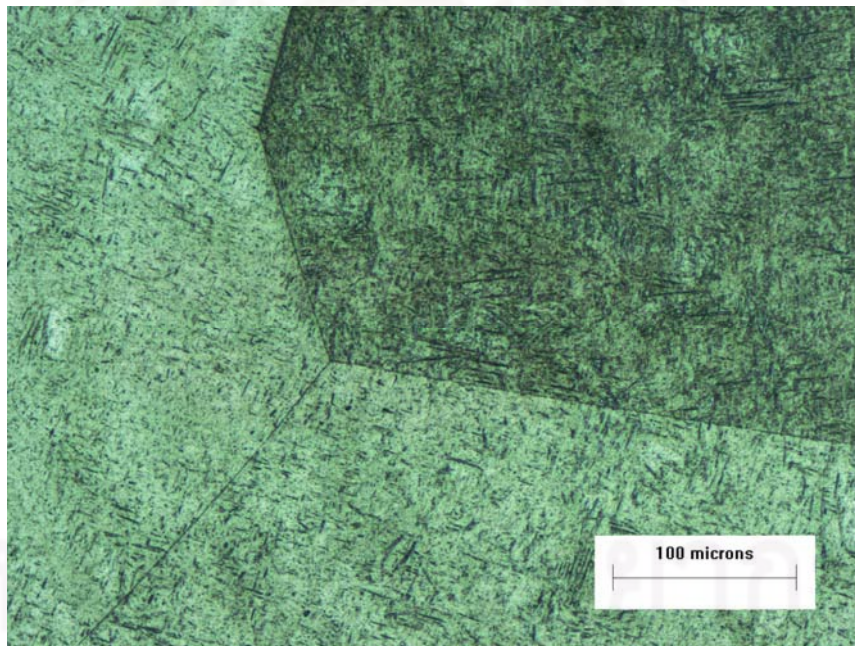
รูปที่ ๗.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2



รูปที่ ๗.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3

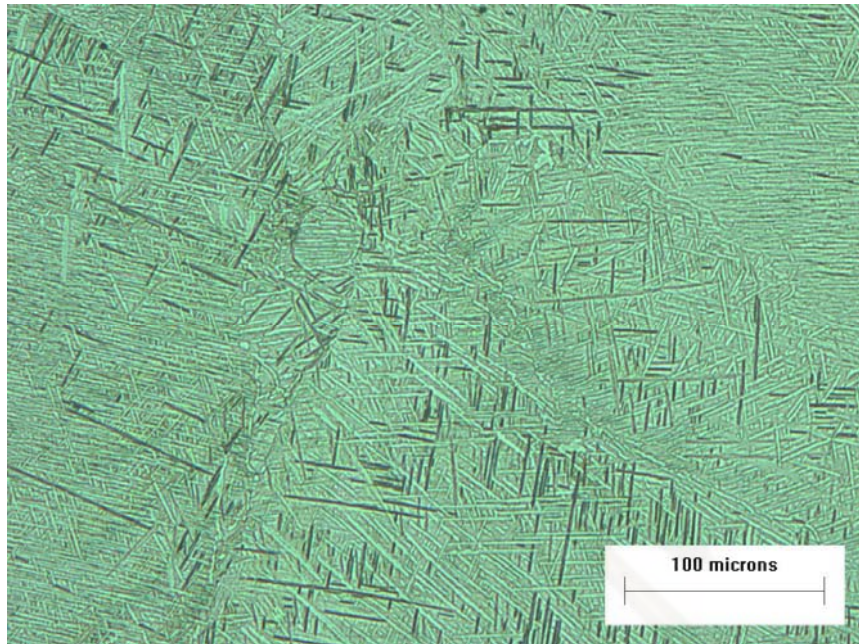


รูปที่ ๗.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของซินงานรหัส C4

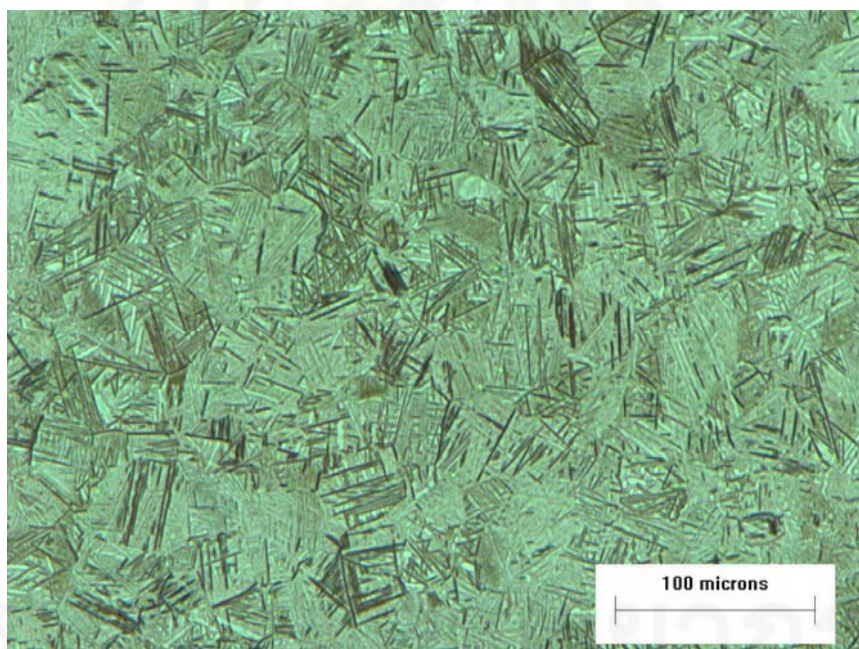


รูปที่ ๗.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของซินงานรหัส C5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



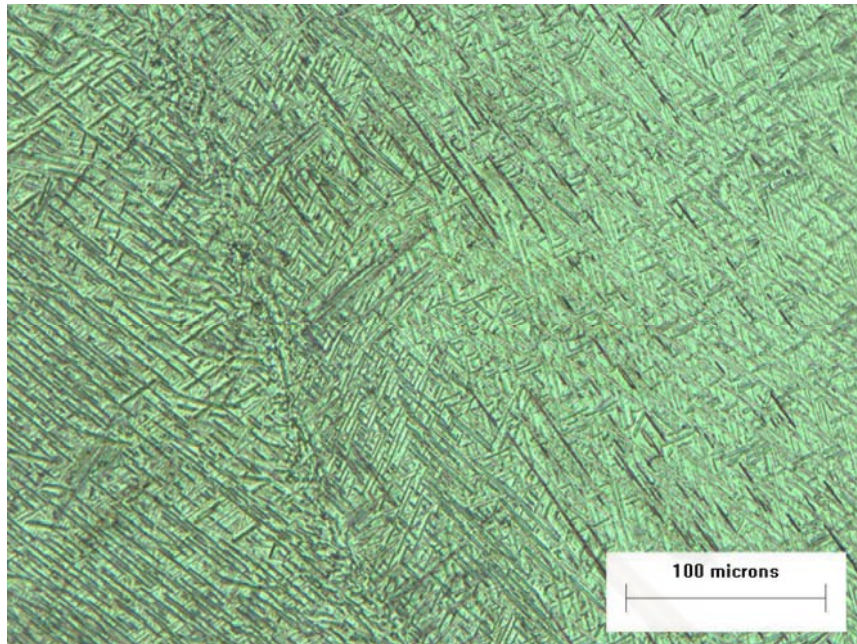
ก. แบบเกรนหยาบ



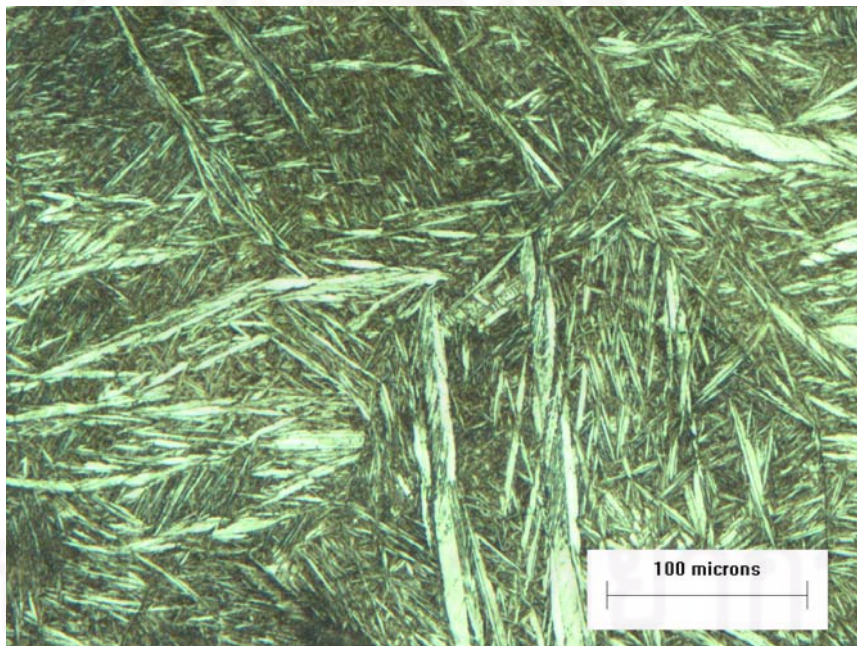
ข. แบบเกรนละเอียด

รูปที่ ๗.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1

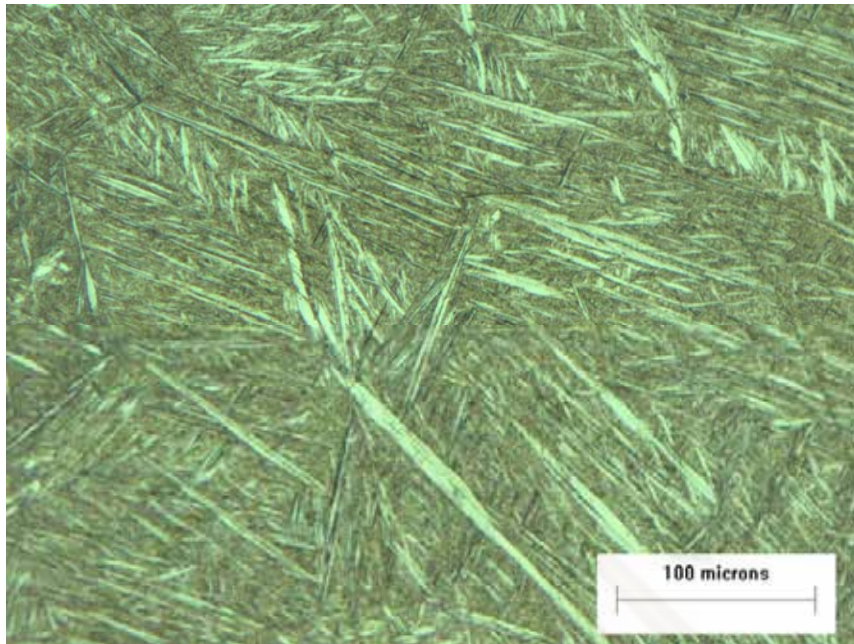
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



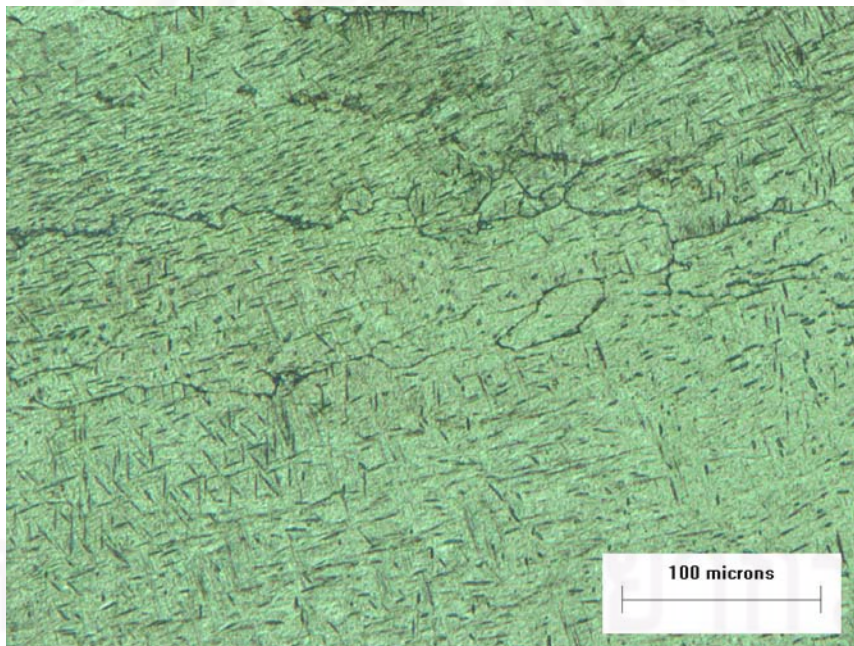
รูปที่ ๗.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส F2



รูปที่ ๗.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส F3

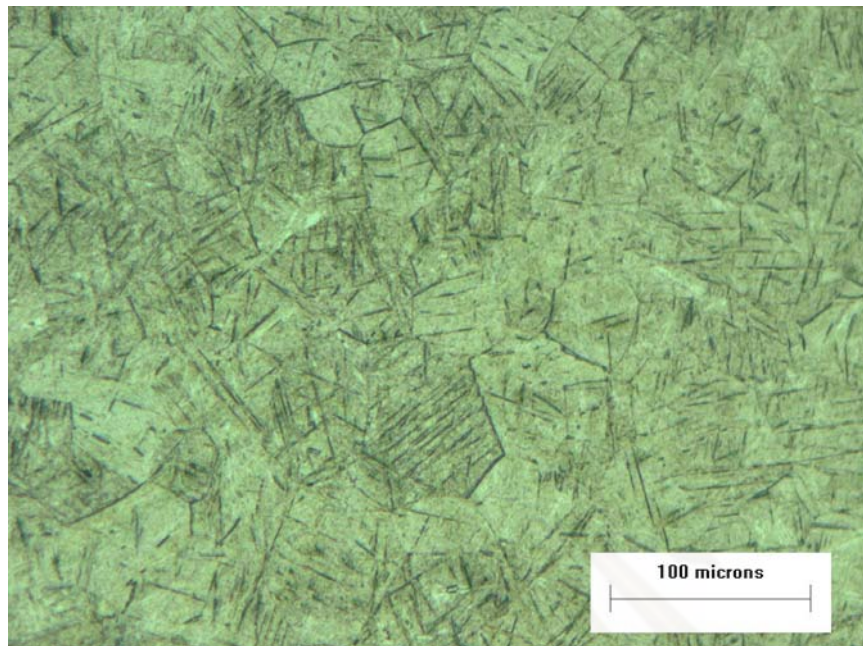


รูปที่ ๙.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเรซิน F4



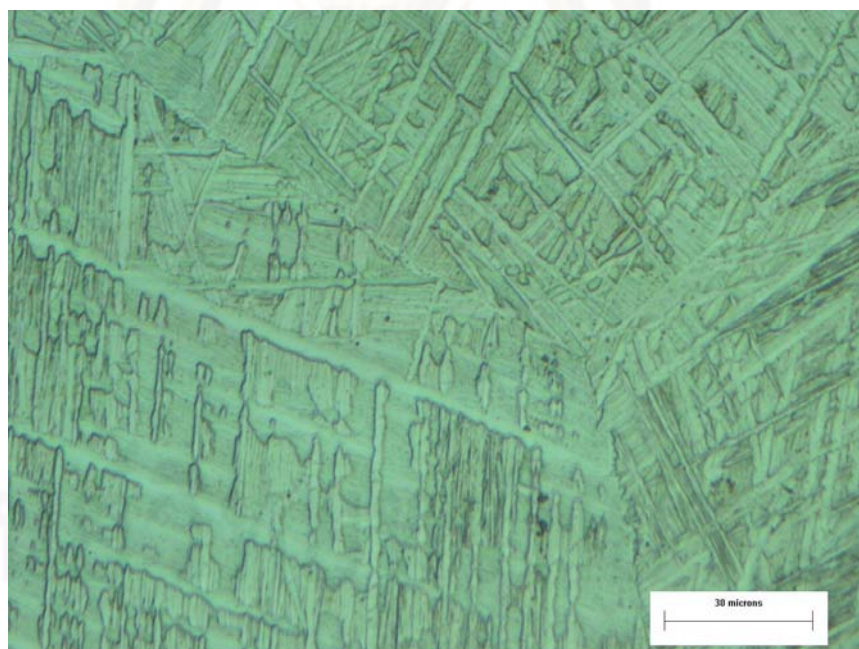
ก. แบบเกรนหยาบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

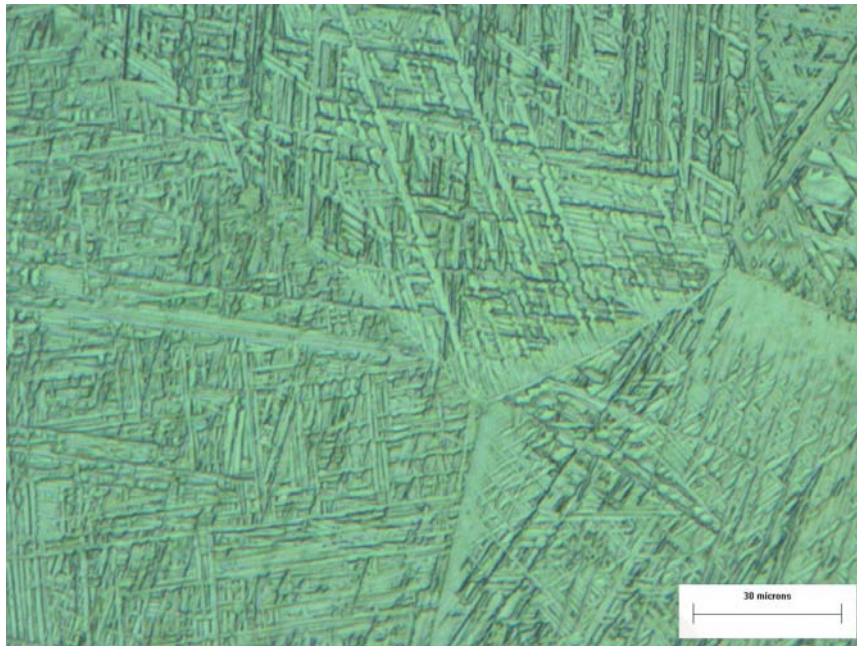


ข. แบบเกรนละเอียด

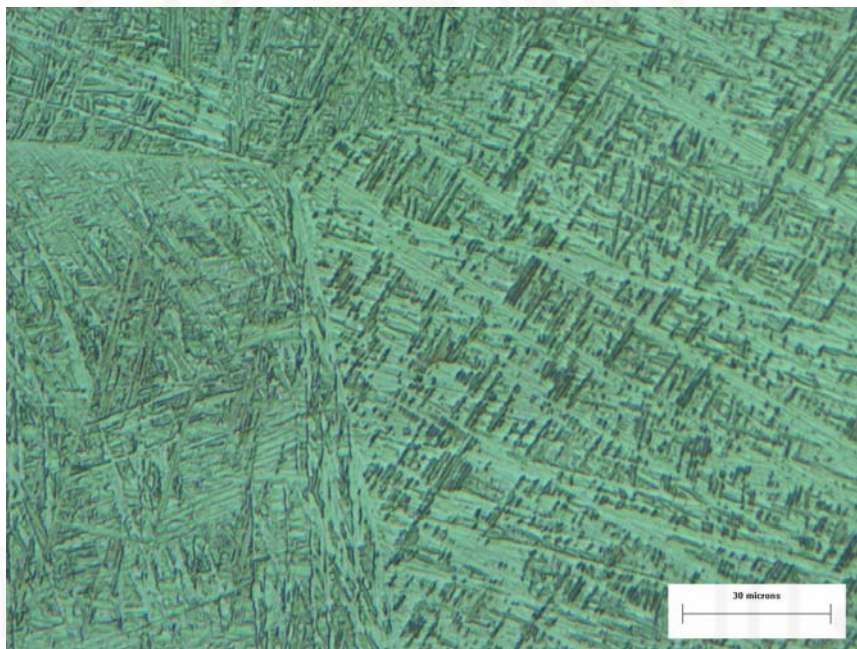
รูปที่ ๕.10 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5



รูปที่ ๕.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1



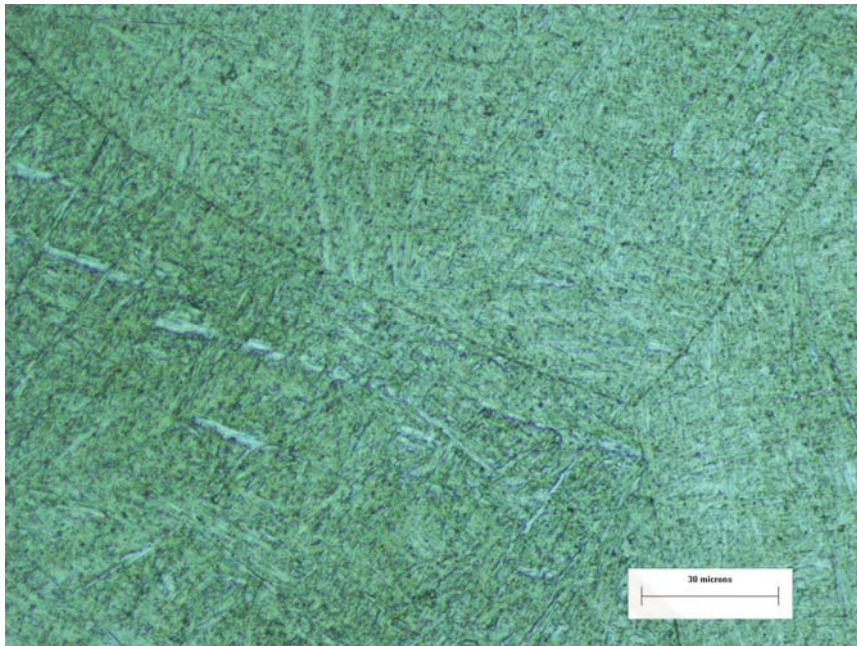
รูปที่ ๙.12 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2



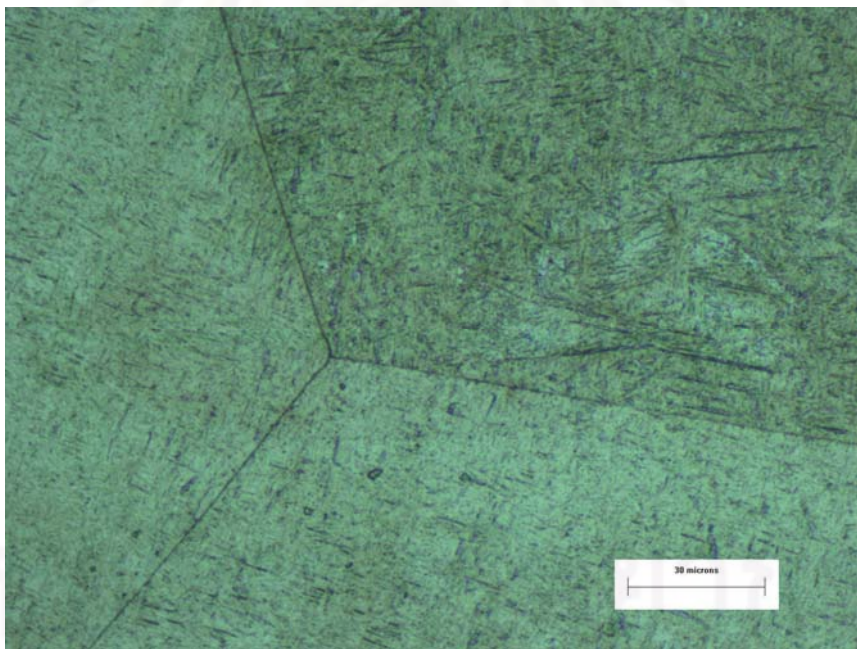
รูปที่ ๙.13 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



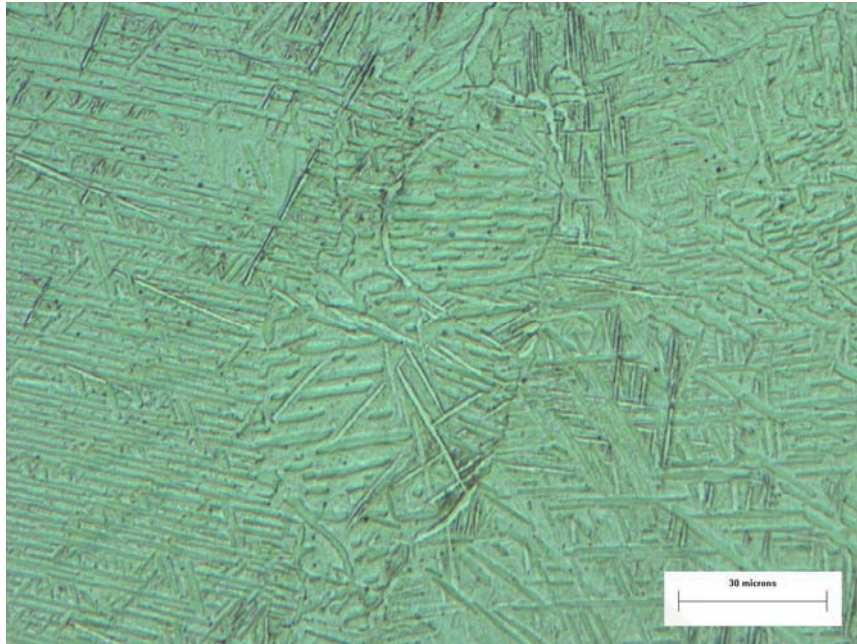


รูปที่ ๙.14 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานรหัส C4

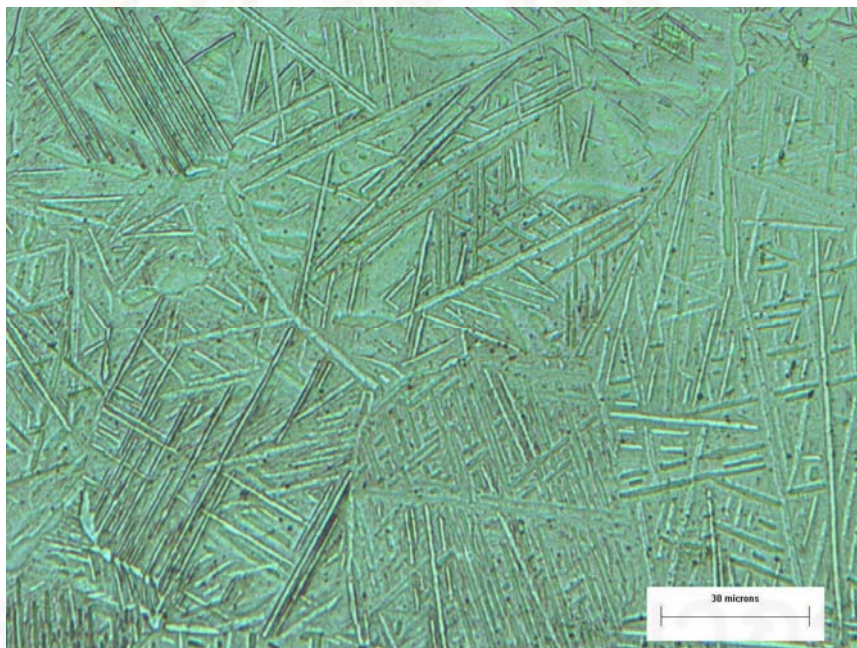


รูปที่ ๙.15 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานรหัส C5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



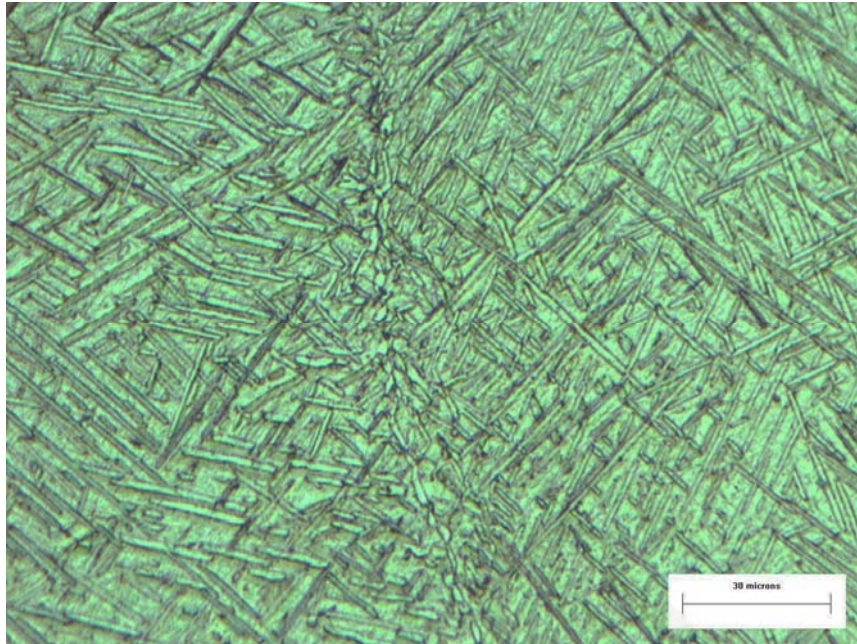
ก. แบบเกรนหยาบ



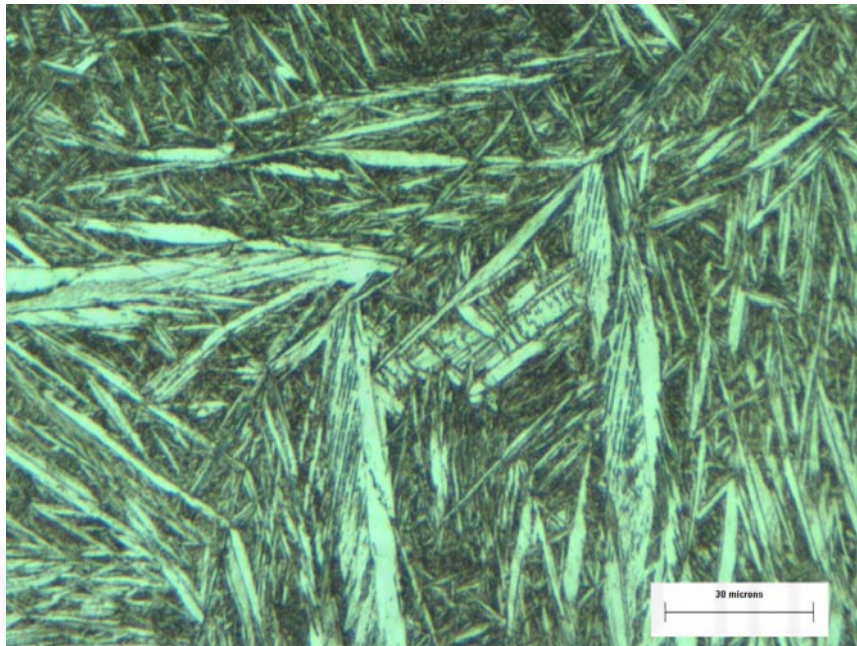
ข. แบบเกรนละเอียด

รูปที่ ๕.16 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

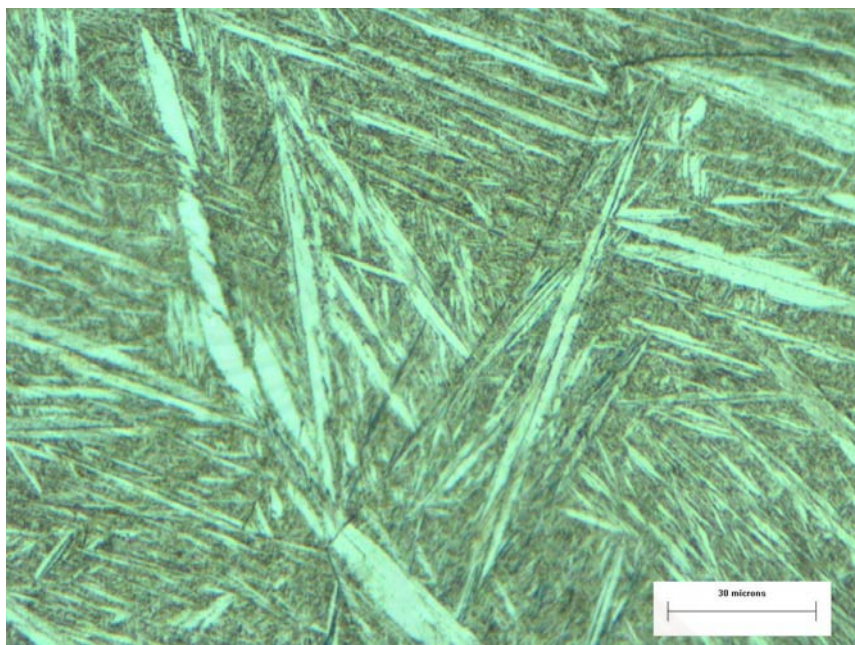


รูปที่ ๕.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F2



รูปที่ ๕.18 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



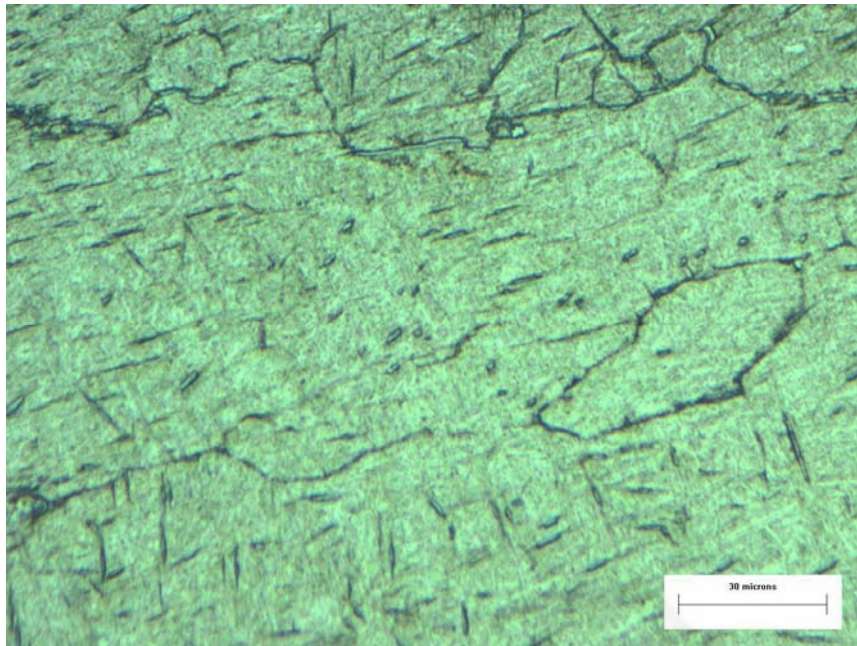
รูปที่ ๕.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4

#### ๕.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

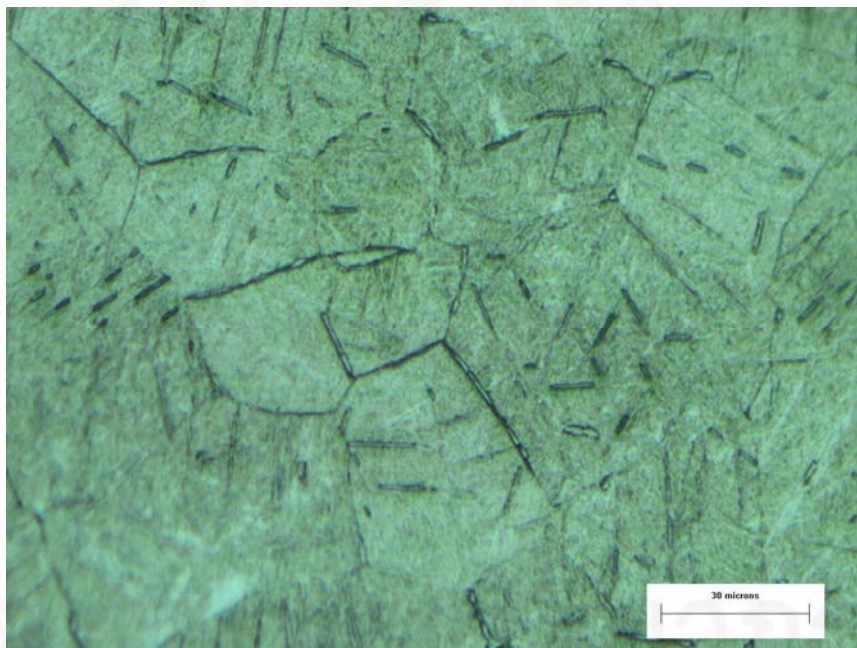
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 2,000x จะปรากฏโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ ๕.21-๕.30 โดยเรียงลำดับจาก C1 ไปถึง C5 และจากนั้นจะเป็น F1 ไปถึง F5 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



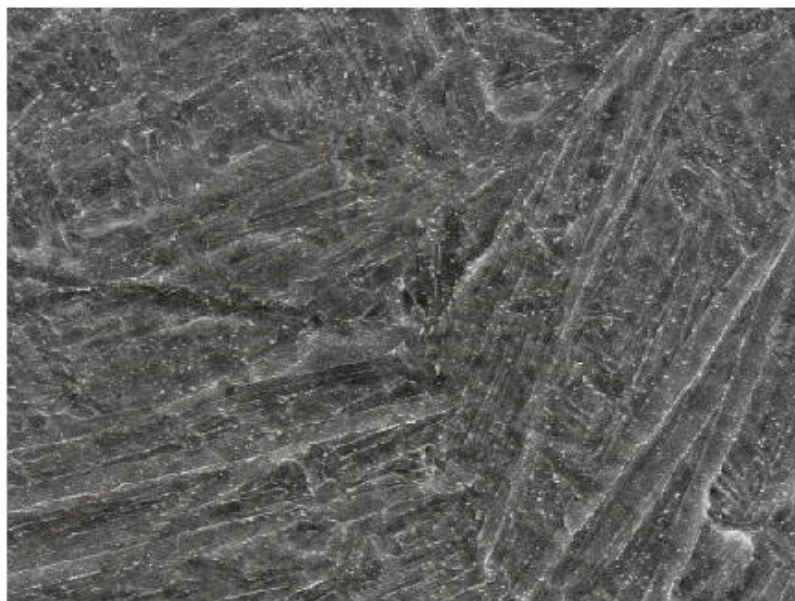
ก. แบบเกรนหยาบ



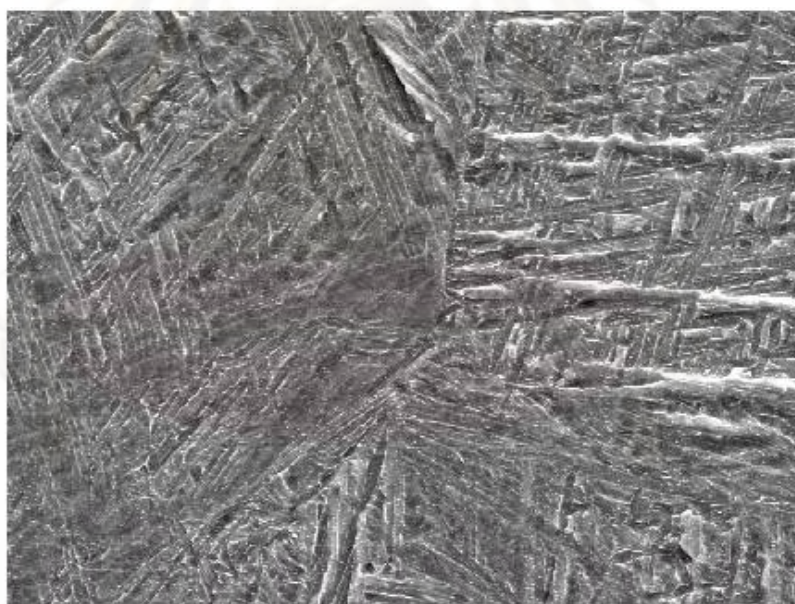
ข. แบบเกรนละเอียด

รูปที่ ๕.20 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5

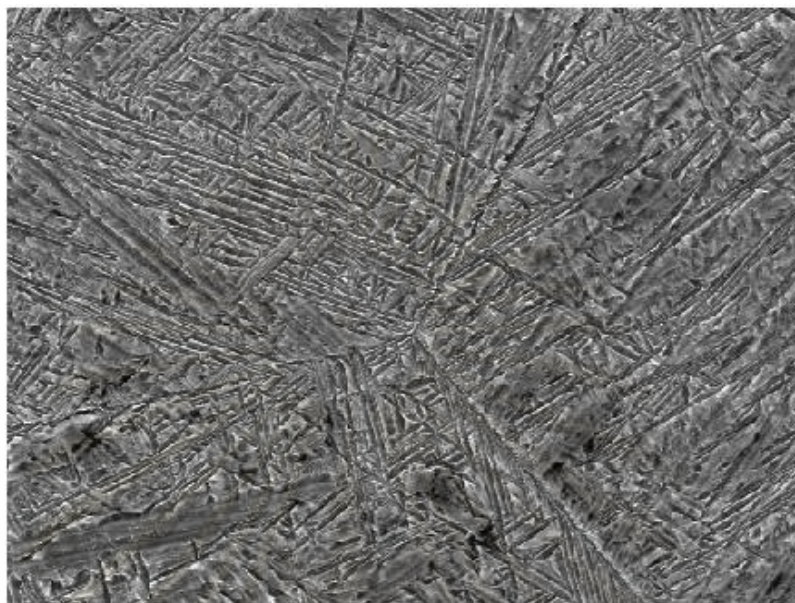
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๕.21 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C1

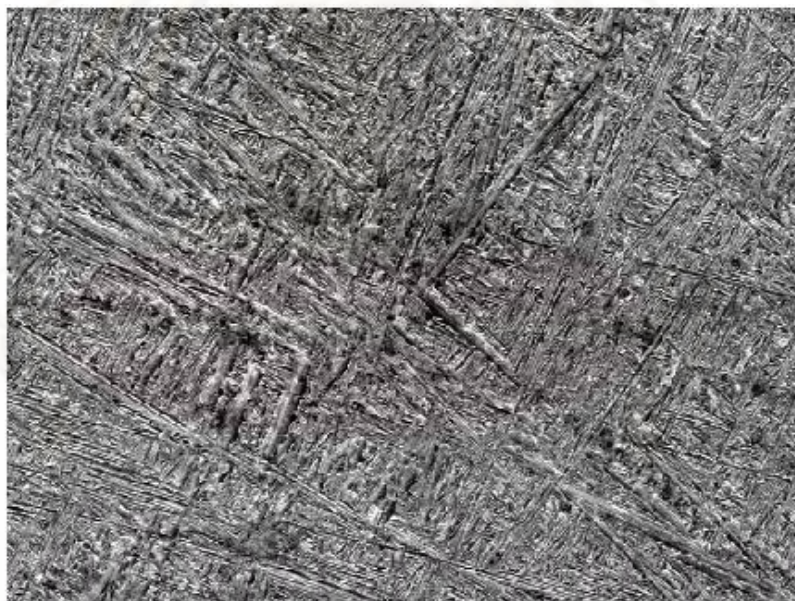


รูปที่ ๕.22 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C2



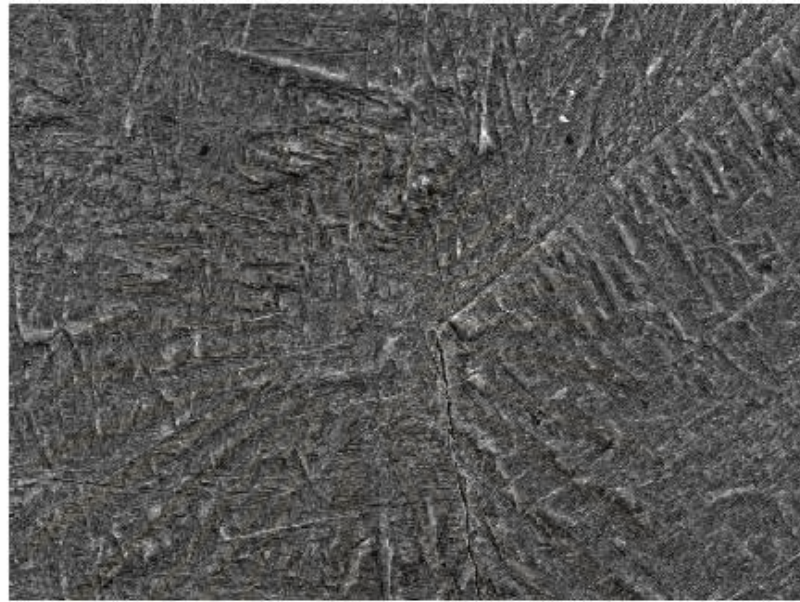
30µm

รูปที่ ๗.23 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C3

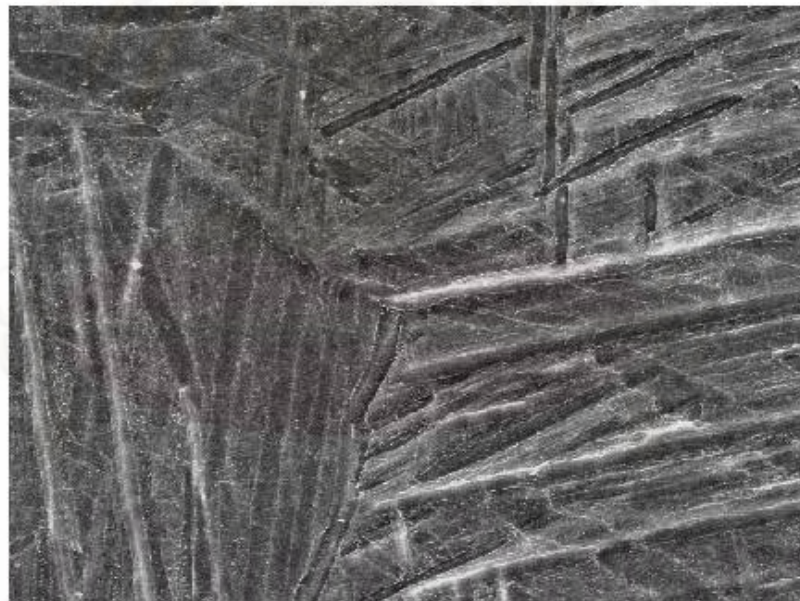


30µm

รูปที่ ๗.24 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C4



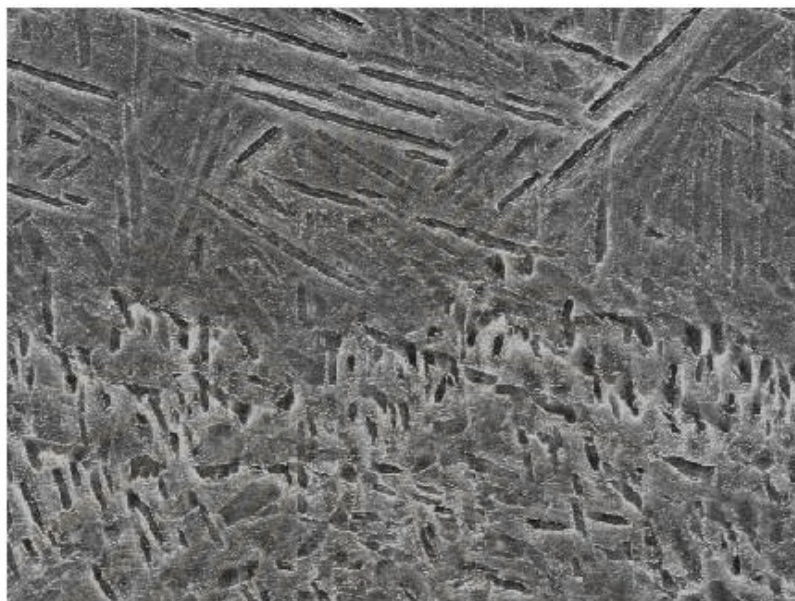
รูปที่ ๕.25 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส C5



รูปที่ ๕.26 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F1

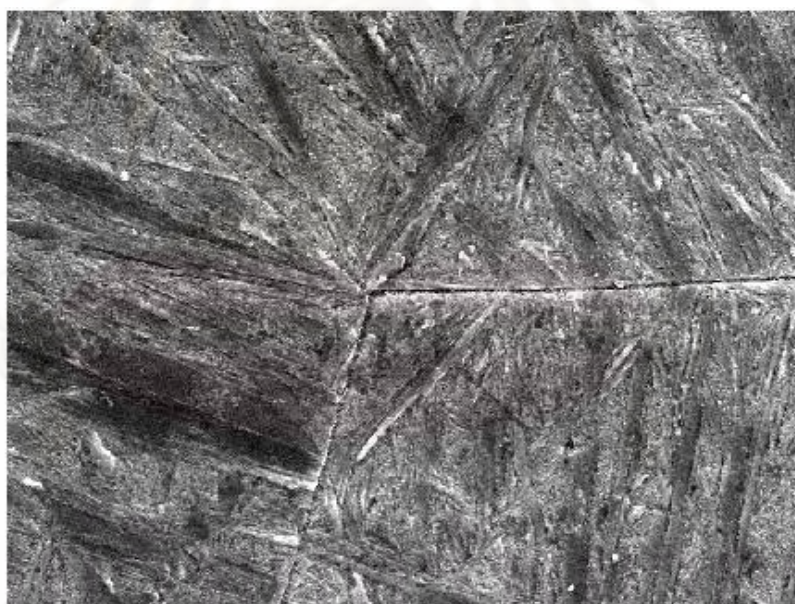
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





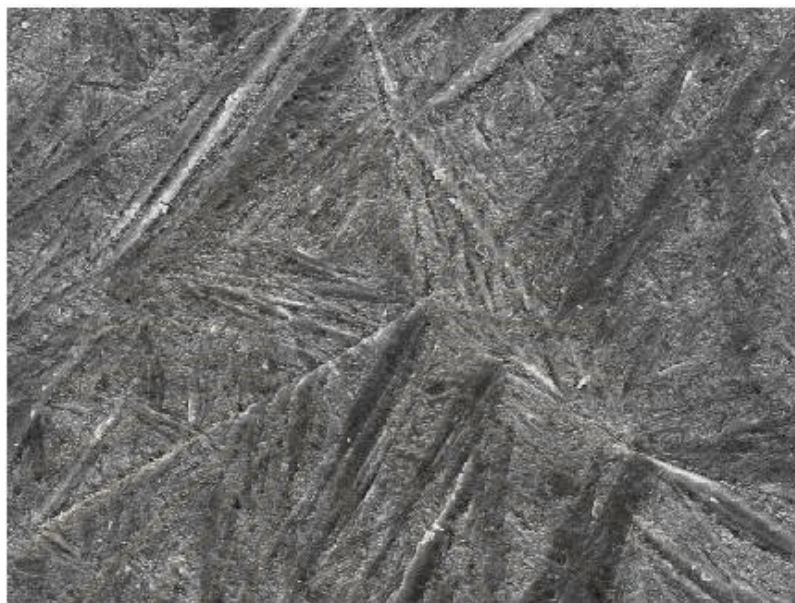
30µm

รูปที่ ๕.27 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส F2



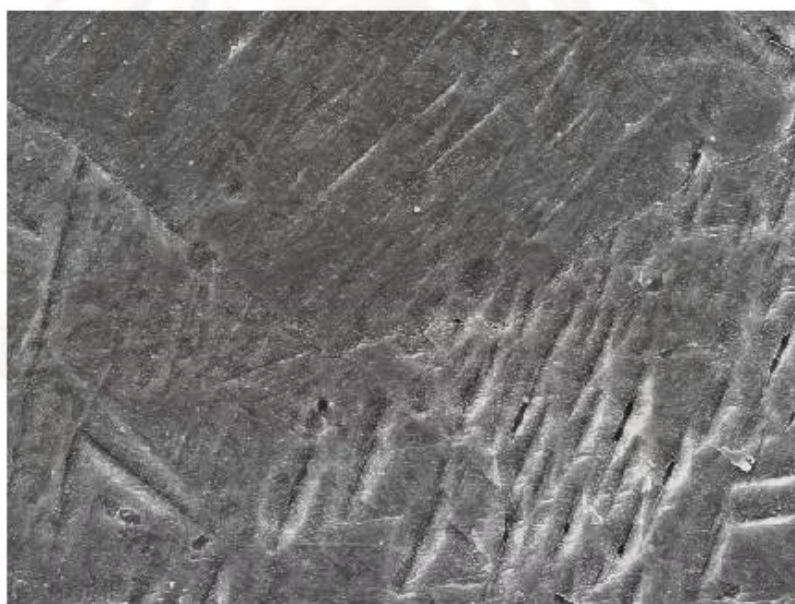
30µm

รูปที่ ๕.28 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานรหัส F3



30µm

รูปที่ ๕.29 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F4



30µm

รูปที่ ๕.30 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรหัส F5

ภาคผนวก ฅ

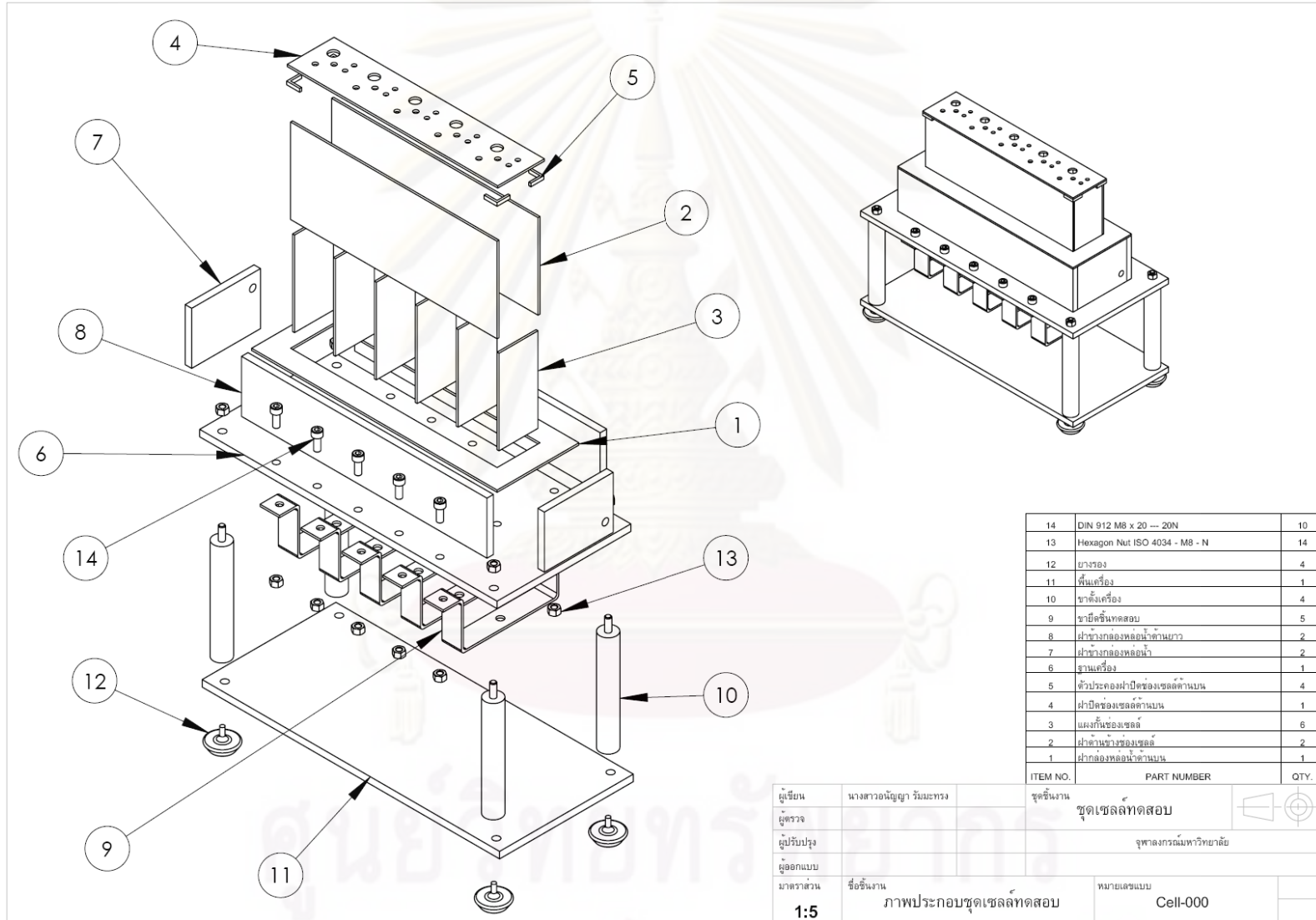
แบบสำหรับประกอบเซลล์

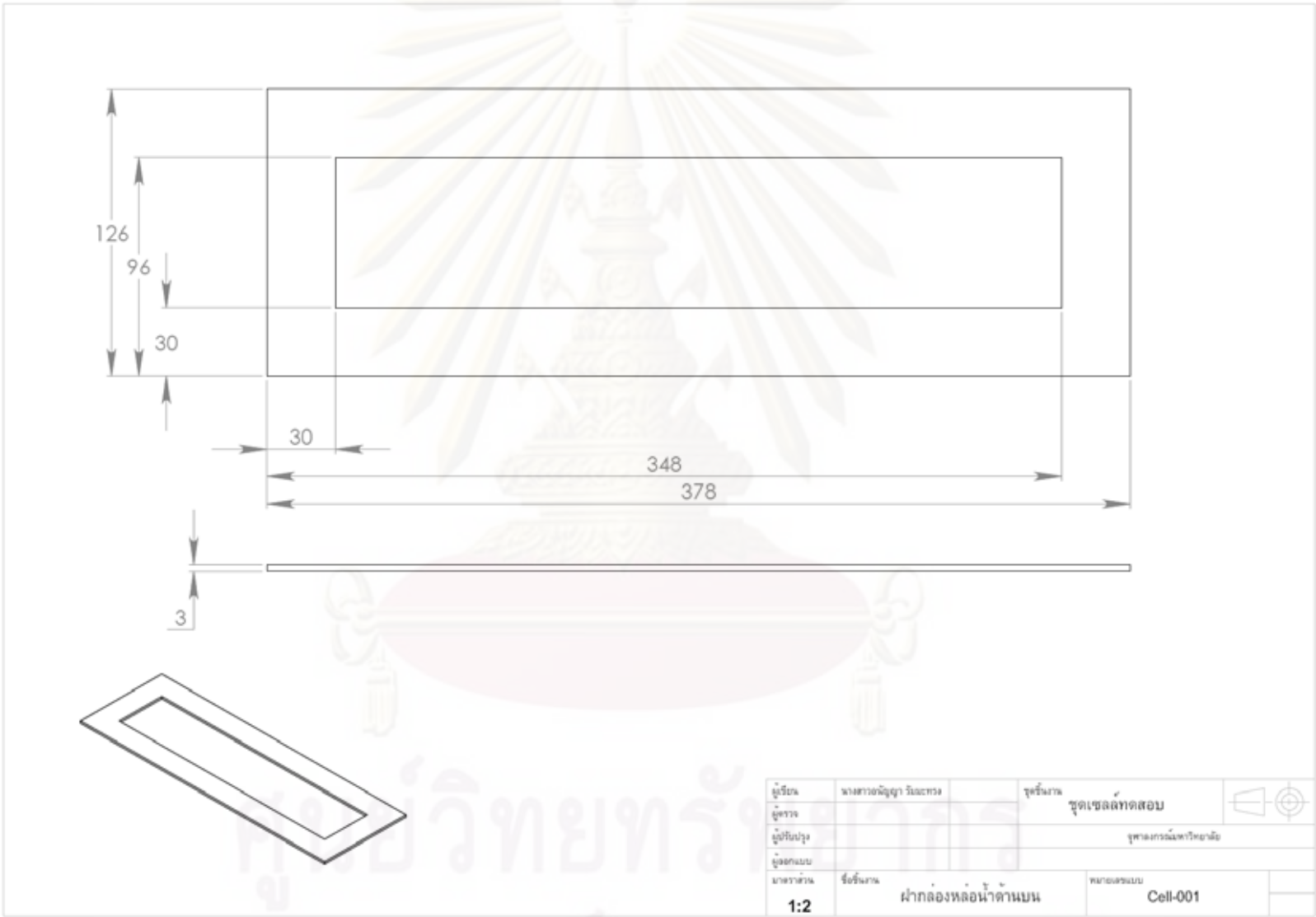
ฅ.1 แบบสำหรับประกอบเซลล์

แบบสำหรับประกอบเซลล์ปรากฏดังหมายเลขแบบที่ Cell-000 ถึง Cell-011



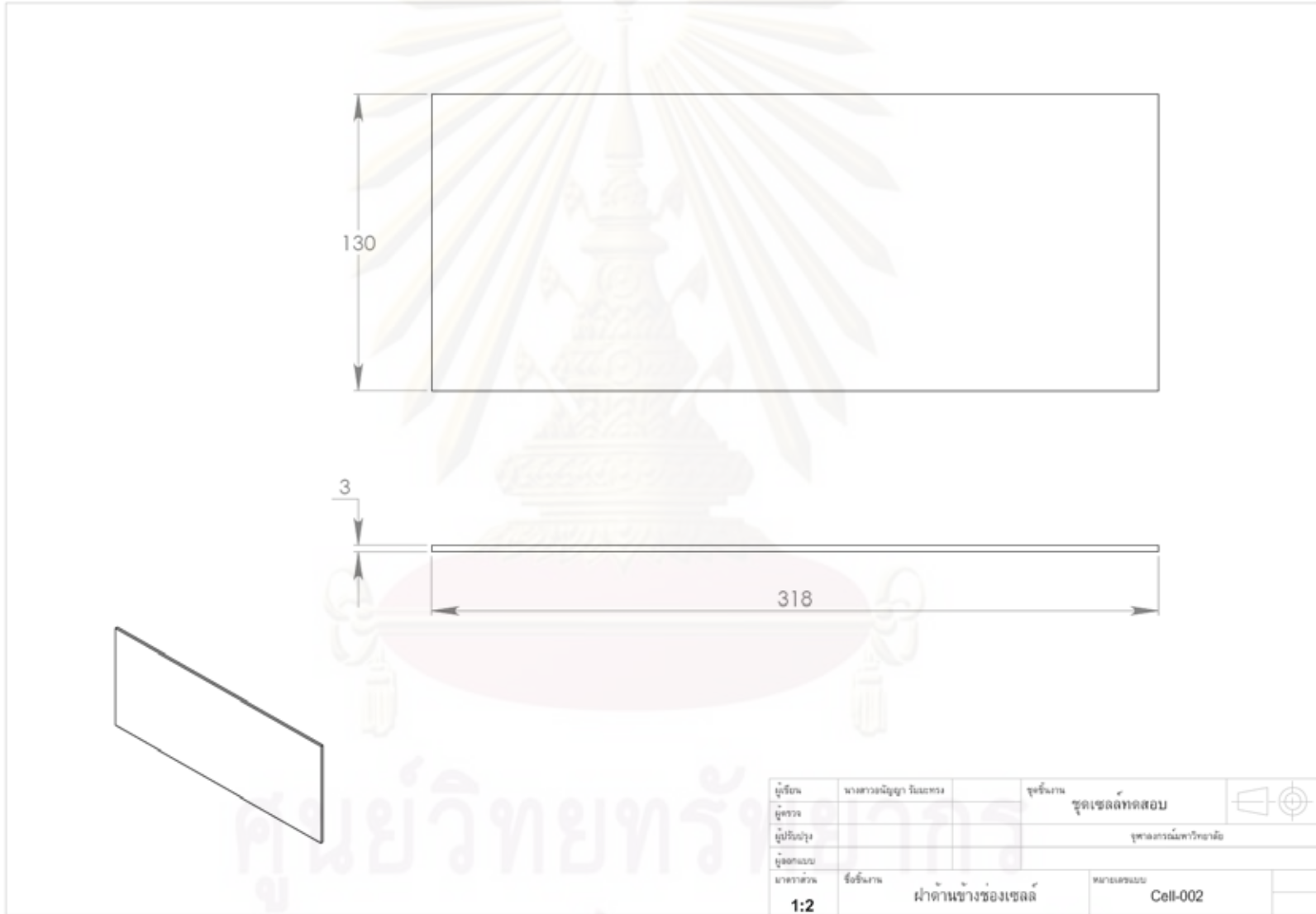
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



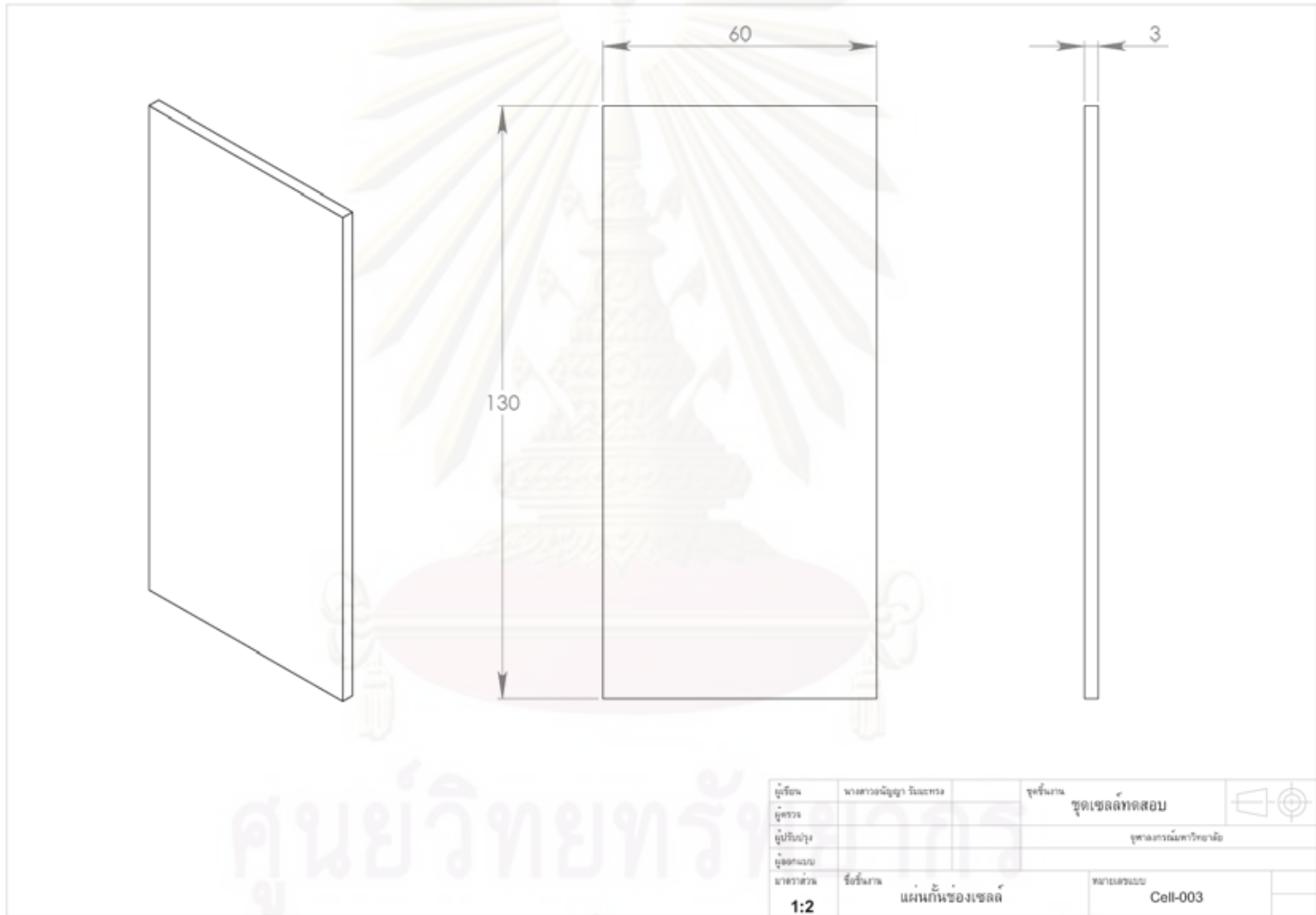


ผู้เขียน	นางสาวอัญญา วิมลทรง	จุดรับภาพ	จุดเซลล์ทดสอบ	
ผู้ตรวจ		จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย		
ผู้พิมพ์				
ผู้ออกแบบ				
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
1:2	ฝักล่องหล่อน้ำदानบน	Cell-001		

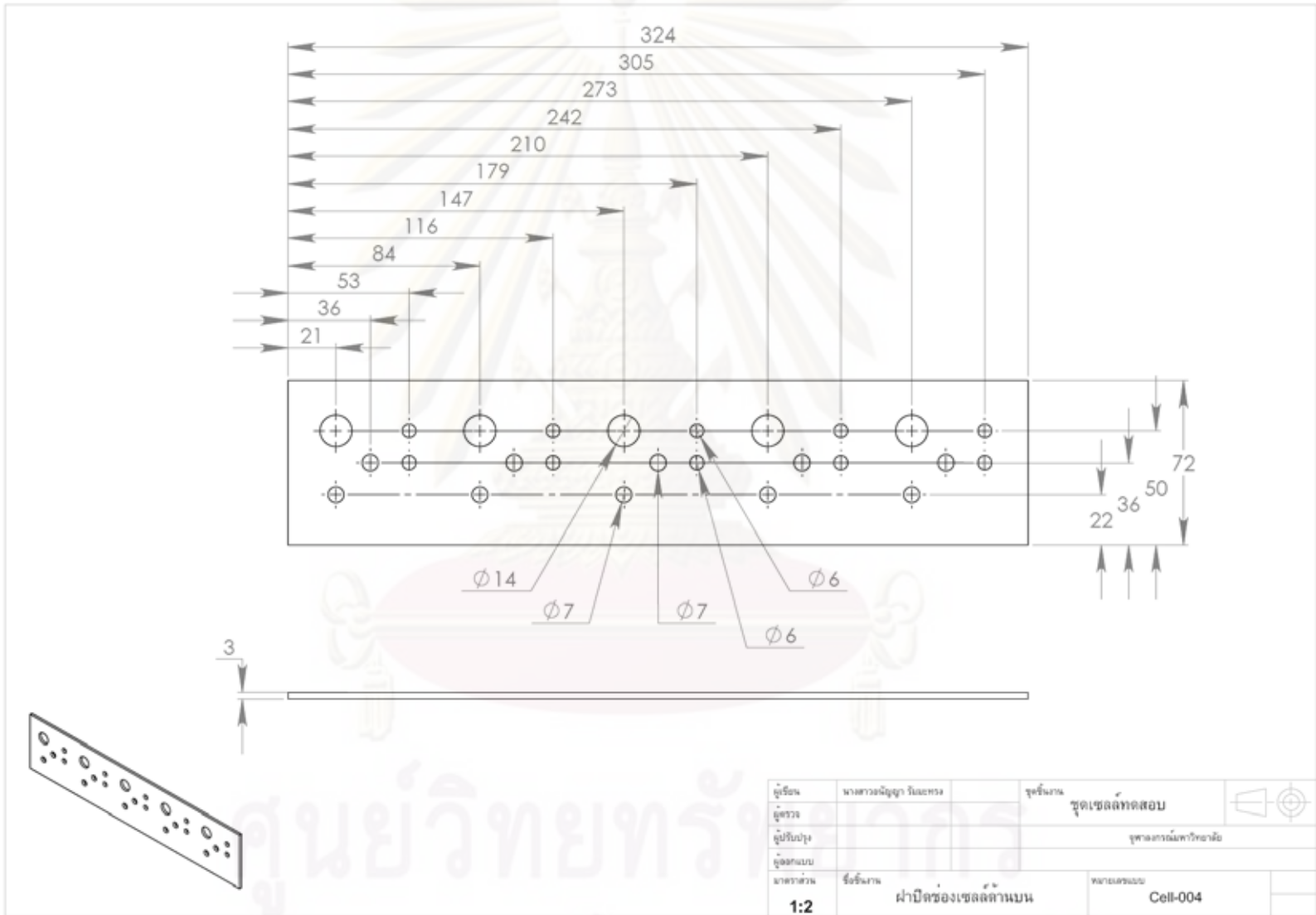
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



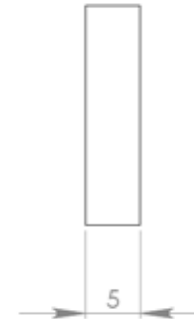
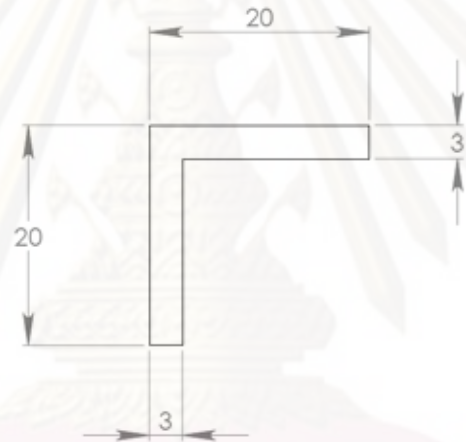
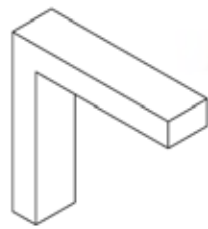
ศูนย์วิทยพักรังษากกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยพักรังษากกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

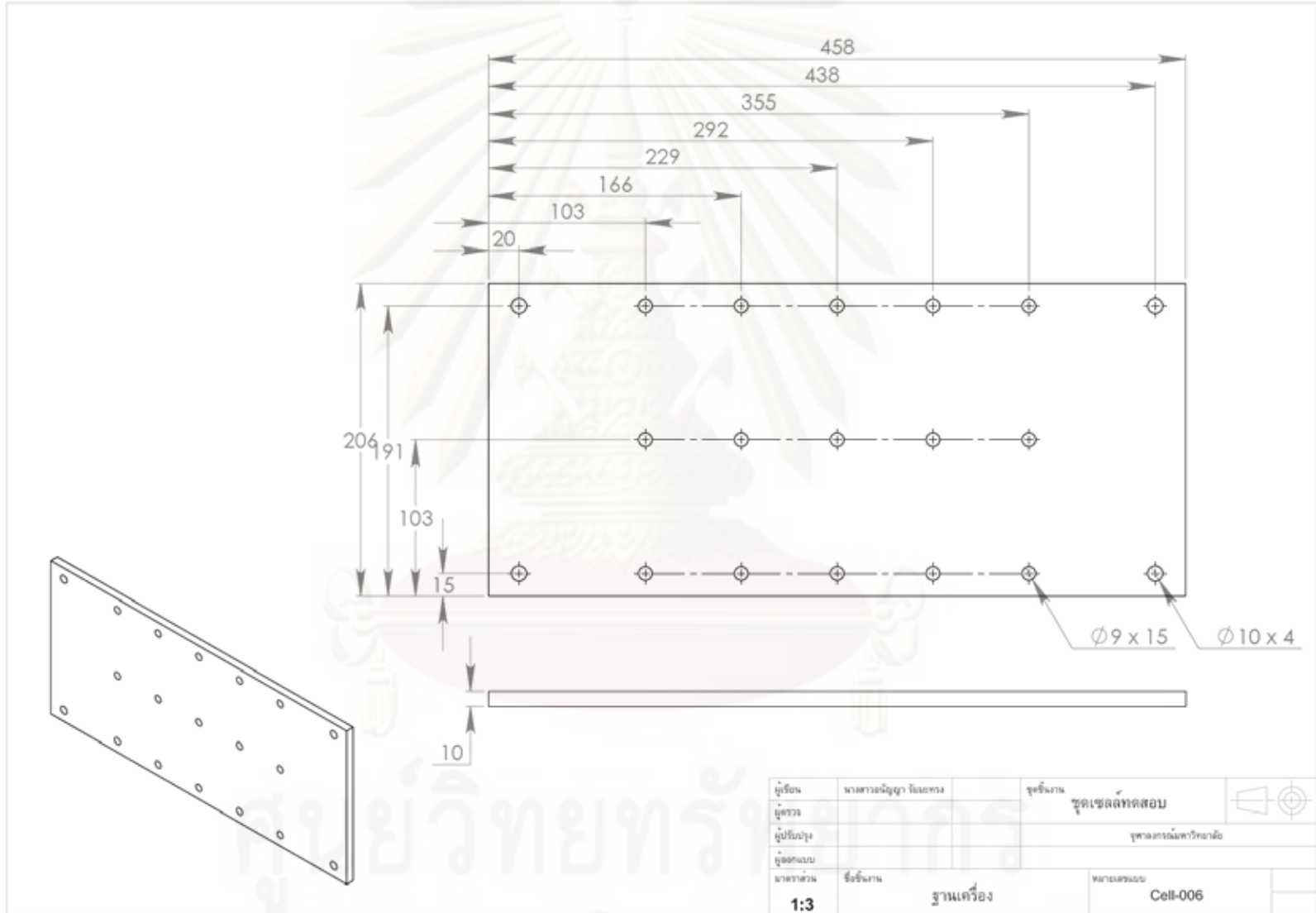


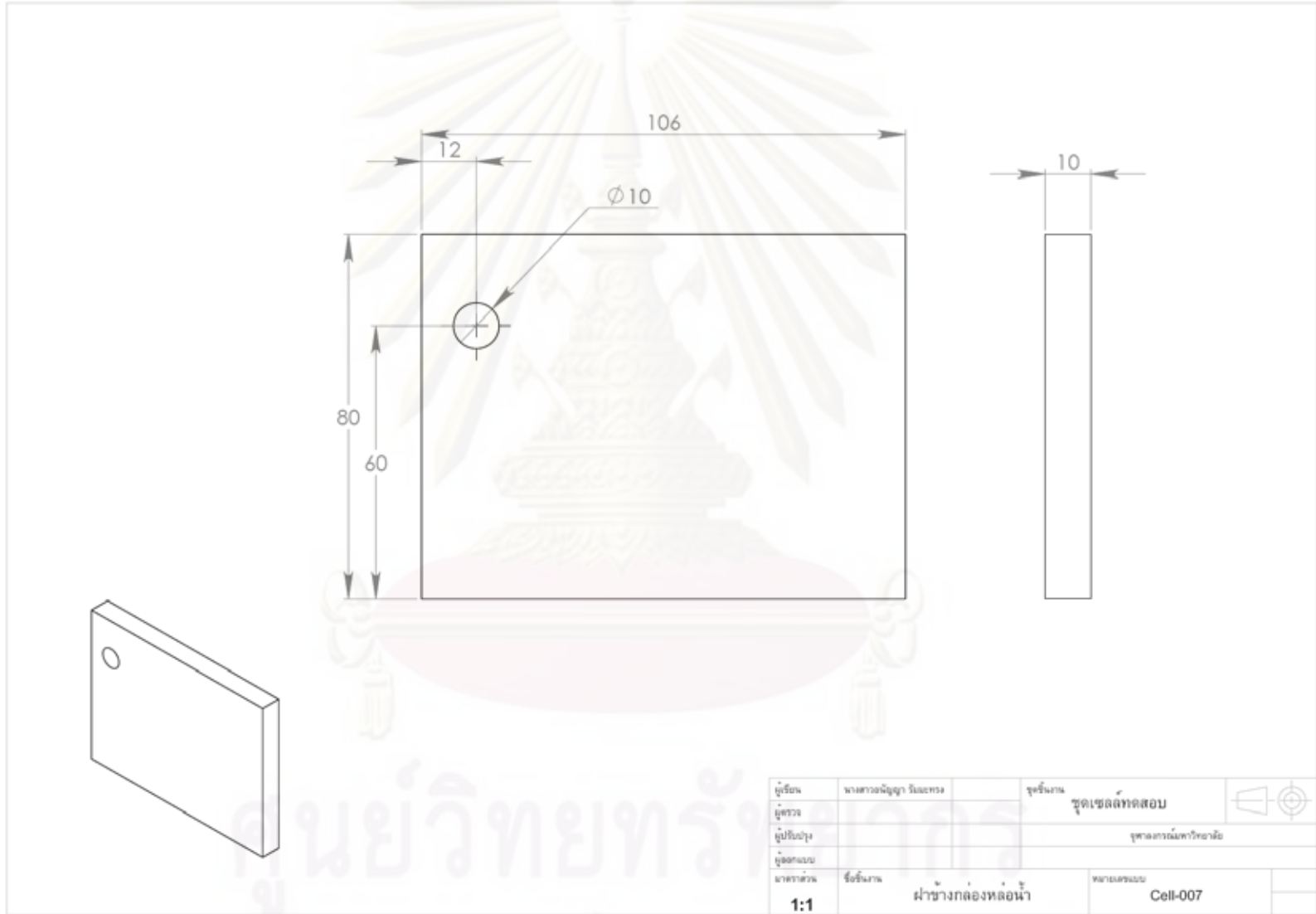


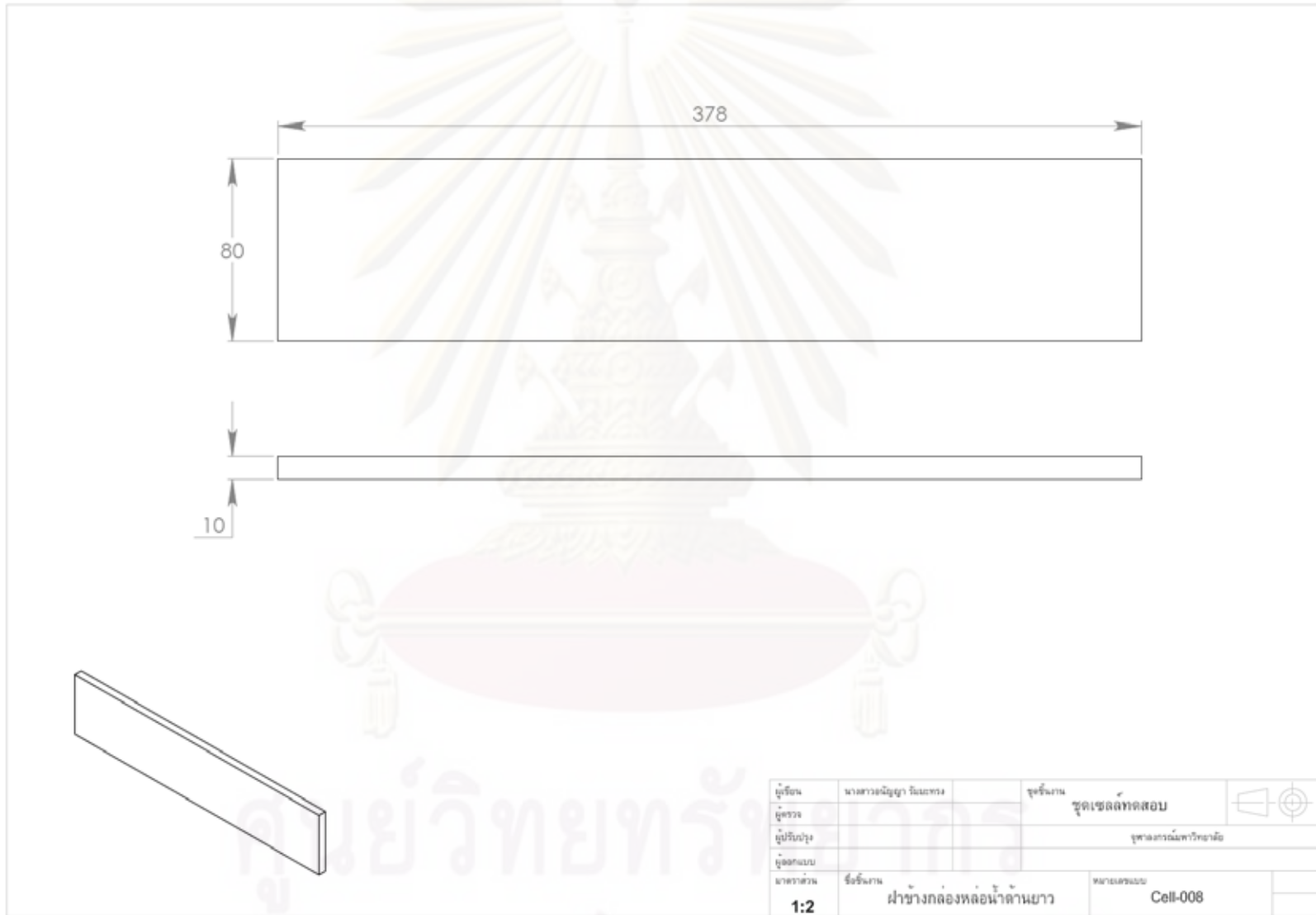


ผู้เขียน	นางสาวณิษฐา นิเมทอง	จุดรับงาน	ชุดเซลล์ทดสอบ	
ผู้ตรวจ				
ผู้ปรับปรุง			จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
ผู้ออกแบบ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ		
<b>2:1</b>	ตัวประกอบฝาปิดช่องเซลล์	Cell-005		

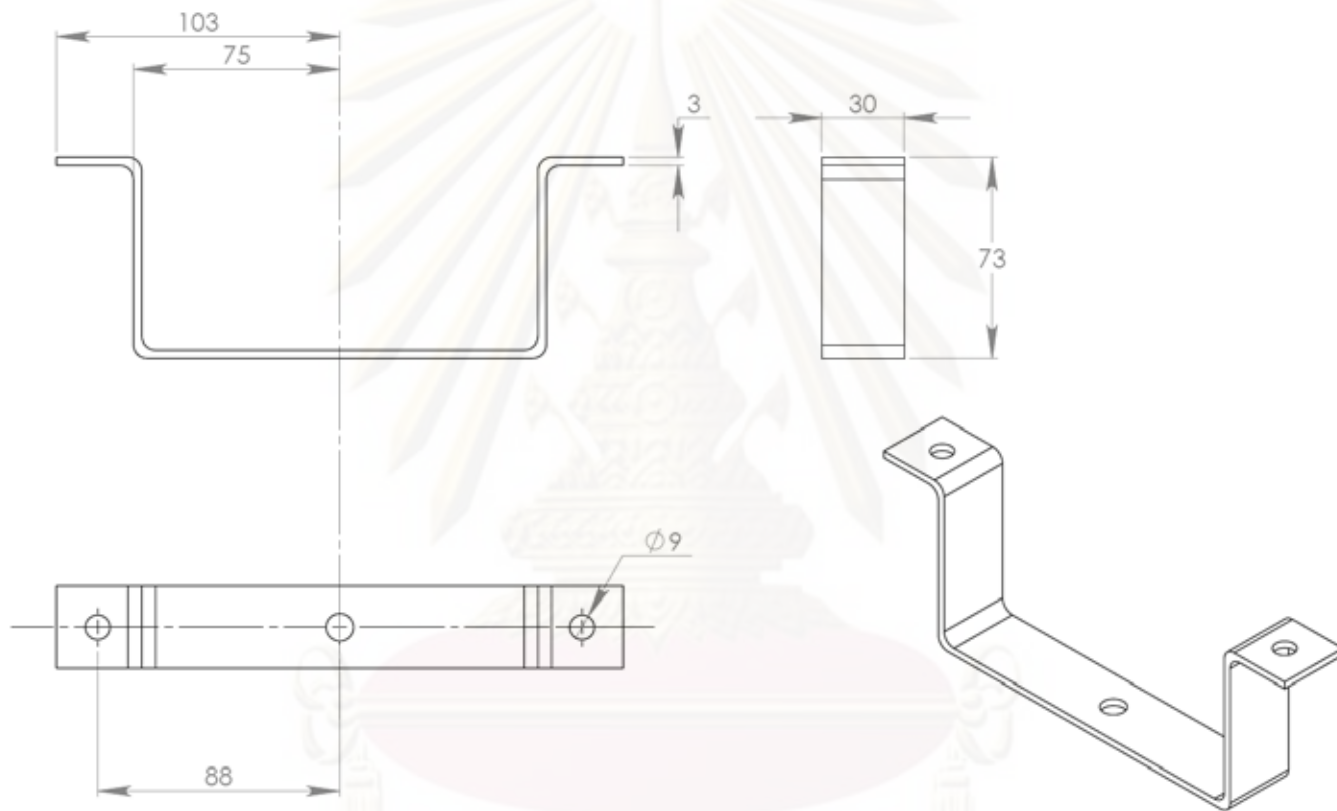
ศูนย์วิทยพัสดุภัณฑ์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





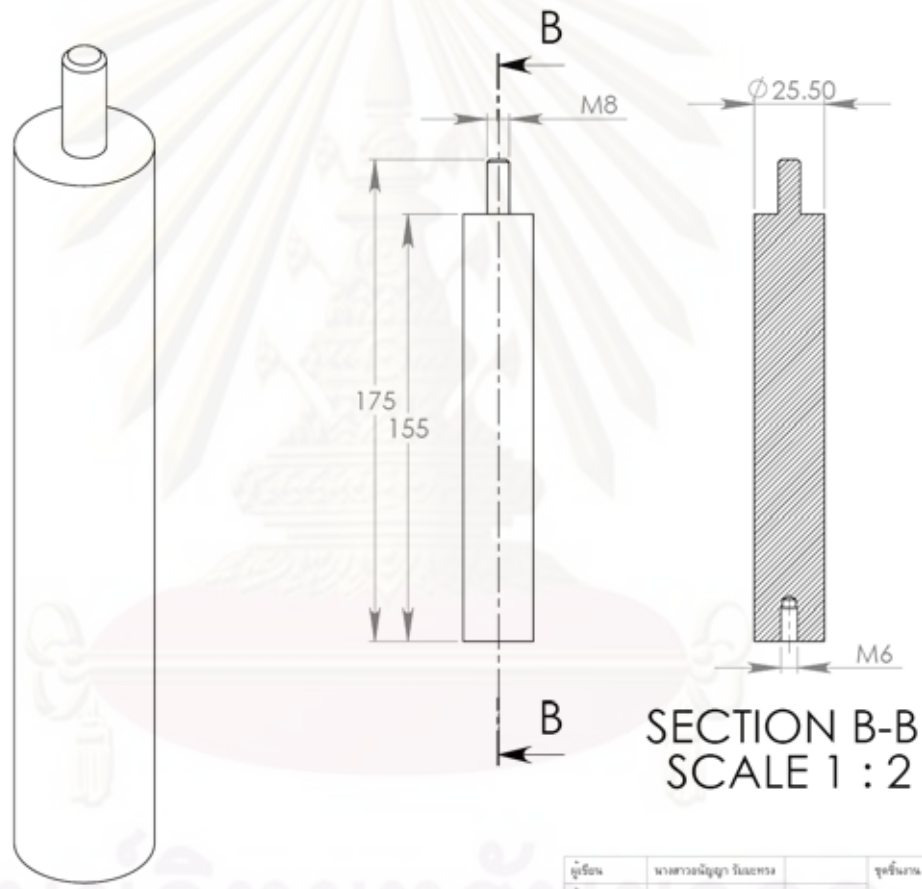


ศูนย์วิทยพักรังษากกร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



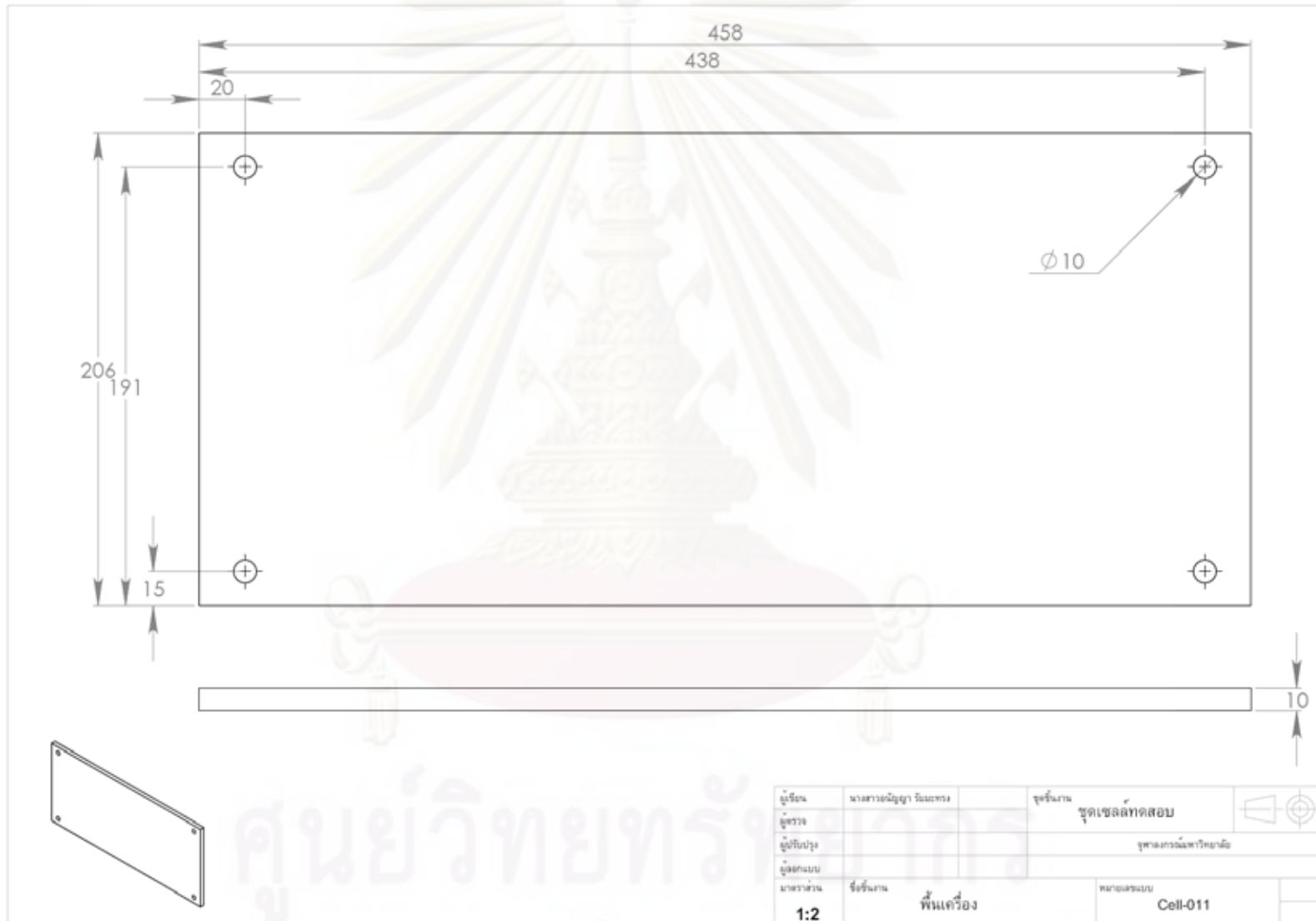
ผู้เขียน	นางสาวณิษฐา นิเมตง	จุดตรวจ	ชุดเซลล์ทดสอบ	
ผู้ตรวจ				
ผู้ปรับปรุง			จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
ผู้ออกแบบ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลขแบบ	Cell-009	
1:2	ขาไม้ตรึงทดสอบ			

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



SECTION B-B  
SCALE 1 : 2

ผู้เขียน	นางสาวณิษฐา วัฒนะ	ผู้รับงาน	ชุดเซลล์ทดสอบ	
ผู้ตรวจ				
ผู้ปรับปรุง			จุดประสงค์การเรียนรู้	
ผู้ออกแบบ				
มาตรฐาน	ชื่อชิ้นงาน	หมายเลข	Cell-010	
1:2	ขวดทดสอบ			



ศูนย์วิทยพักรังษากกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ญ

### ส่วนผสมสารละลายแอสค

#### ญ.1 ส่วนผสม

ตารางที่ ญ.1 ส่วนผสมสารละลายแอสค (Hank's balance salt solution)

ส่วนผสม	ปริมาณ (กรัม/ลิตร)
NaCl	8.00
CaCl <sub>2</sub>	0.14
KCl	0.40
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.10
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.10
NaHCO <sub>3</sub>	0.35
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	0.048
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.06
Glucose	1.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวอัญญา รั่มมะทอง
วัน-เดือน-ปีเกิด	วันที่ 3 เมษายน พ.ศ.2526
ที่อยู่	338/43 ซ.ลาดพร้าว 87 ถ.ลาดพร้าว วังทองหลาง กทม. 10310
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีการศึกษา 2548 ภาควิชา วิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  เข้าศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ปีการศึกษา 2548 ภาคการศึกษา ตอนปลาย ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  ทุนการศึกษา
ทุนการศึกษา	โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย