

อัตราการจัดก่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลาย
กรดฟอสฟอริกด้วยความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน

นางสาววิรัชญา อสัมภินวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพันธุกรรมประติษฐ์ ภาควิชาพันธุกรรมประติษฐ์
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

THE CORROSION RATE OF ANODIZED TITANIUM-6ALUMINUM-4VANADIUM ALLOY IN
PHOSPHORIC ACID SOLUTION WITH DIFFERENT VOLTAGE

Miss Warittha Asumpinwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อัตราการจัดก่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-
4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรด
ฟอสฟอริกด้วยความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน

โดย

นางสาววิรัชญา อสมภินวงศ์

สาขาวิชา

ทันตกรรมประดิษฐ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.วิวิธพิพล ศรีมณีพงศ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่ว
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คนบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. สุจิต พูลทอง)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร. ปราวรภร ซาลิม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร.วิวิธพิพล ศรีมณีพงศ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชัยรัตน์ วิวัฒน์วรพันธ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร. วลัยภัทร์ แสนทวีสุข)

วิชา อสัมภินวงศ์ : อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกด้วยความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน. (THE CORROSION RESISTANCE OF ANODIZED TITANIUM-6ALUMINUM-4VANADIUM ALLOY IN PHOSPHORIC ACID SOLUTION WITH DIFFERENT VOLTAGE) อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ทพ.ดร.วิริทธิ์พล ศรีมณีพงศ์, 79 หน้า.

การศึกษานี้ทำขึ้นเพื่อประเมินความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม หลังจากการแอโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที ที่ความต่างศักย์ในช่วง 100 โวลต์ 150 โวลต์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ โดยศึกษาพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะผสมด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ด้วยเทคนิคโพเทนชิออสโตนามิกส์ โพลาริเซชัน ในสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้น 0.9 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์แล้วจะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วัดความขรุขระของผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งโพรบ และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกบนพื้นผิวชั้นออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน รวมถึงนำชิ้นงานมาตัดขวางเพื่อวัดความหนาของชั้นออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการประเมินศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนด้วยสถิติบราวน์ ฟอริชท์ โดยเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าโลหะผสมที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ต่ำกว่ากลุ่มที่ผ่านการแอโนไดส์ และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความต่างศักย์ที่ใช้ในการแอโนไดส์มีค่าสูงขึ้น ส่วนอัตราการกัดกร่อนพบว่า กลุ่มที่ใช้ความต่างศักย์ 300 โวลต์ มีค่าเฉลี่ยของอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด (5.77×10^{-4} มิลต่อปี) และมีความแตกต่างทางสถิติกับกลุ่มอื่น ๆ ตามมาด้วยกลุ่ม 200 โวลต์ (3.27×10^{-4} มิลต่อปี) ส่วนกลุ่มที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวกับกลุ่มที่ผ่านการทำแอโนไดส์เซชันที่ความต่างศักย์ 100 และ 150 โวลต์ พบว่าอัตราการกัดกร่อนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการศึกษาครั้งนี้ สรุปได้ว่าการแอโนไดส์สามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมได้ แต่การใช้ความต่างศักย์ 200 และ 300 โวลต์ ในกระบวนการนี้ทำให้พื้นผิวมีอัตราการกัดกร่อนสูง ดังนั้นการปรับค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการแอโนไดส์จึงมีความสำคัญ เพื่อที่จะได้พื้นผิวที่เหมาะสมต่อการนำมาทำรากเทียม

ภาควิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2555.....

5276126632 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEYWORDS : ANODIZE TITANIUM Ti-6Al-4V CORROSION VOLTAGE

WARITTHA ASUMPINWONG :THE CORROSION RATE OF ANODIZED TITANIUM-6ALUMINUM-4VANADIUM ALLOY IN PHOSPHORIC ACID SOLUTION WITH DIFFERENT VOLTAGE. ADVISOR : ASST. PROF. VIRITPON SRIMANEEPPONG, Ph.D., 79 pp.

The objective of this study was to investigate the corrosion resistance of Titanium-6Aluminum-4Vanadium alloy after anodization. Ti-6Al-4V alloy specimens were anodized in 0.5 M phosphoric acid solution for 30 minutes using voltages at 100 V, 150 V, 200 V and 300 V. The corrosion behavior of anodized Ti-6Al-4V alloys was observed by a potentiodynamic polarization technique in a 0.9% saline solution at 37°C. In addition, the surface morphology, surface roughness and crystal structure of anodized specimens were observed under scanning electron microscopy (SEM), scanning probe microscopy (SPM) and x-ray diffraction (XRD), respectively. Cross-sections of the specimens were polished and observed by SEM. The results of the corrosion potentials (E_{corr}) and corrosion rates were statistically analyzed with Brown Forsythe test and Tamhane multiple comparison ($\alpha=0.05$). This investigation showed that the corrosion potential of the as-received material was lower than that of the anodized groups. The corrosion potential of anodized Ti-6Al-4V alloy increased as the anodization voltage was increased. There was no significant difference ($P>0.05$) in corrosion rate among as-received material and Ti-6Al-4V alloy specimens anodized using 100 or 150 V. Titanium alloy anodized using 300 V had the highest mean corrosion rate (5.77×10^{-4} MPY) followed by the group receiving 200 V (3.27×10^{-4} MPY). From this study, increased voltage in the anodization of Ti-6Al-4V alloy led to an increased corrosion rate. The appropriate applied anodization voltage is necessary in order to generate the best implant surface.

Department : Prosthodontics Student's Signature

Field of Study : Prosthodontics Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. วิวิทธิพล ศรีมณีพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ นักวิจัยประจำสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคุณลาวัลย์ บุญประคอง เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก คุณศิรินทร์ ศรีโชติและคุณณัฐกร กীরติไพบูลย์ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คุณมานพ ธีรรัตนสมโภชน์ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยทันตวัสดุทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและการทดสอบชิ้นงาน รวมถึงคุณอรุณพร วัฒนวิสุทธ์ ผู้ช่วยผู้ว่าการโครงการธุรกิจเดินเครื่องและบำรุงรักษาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และคุณอดิศักดิ์ ถือพลอย เจ้าหน้าที่ประจำสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ที่กรุณาช่วยเหลือในเรื่องการตัดชิ้นงาน

ขอขอบพระคุณอาจารย์ นายแพทย์จปรัฐ ปรีชาพานิช ภาควิชาสูติศาสตร์-นรีเวชวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดลที่กรุณาให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณมูลนิธิกระจกไทยอาสาฮี ที่กรุณาสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	4
1.6 การให้นิยามเชิงปฏิบัติการ.....	4
1.7 การออกแบบการวิจัย.....	5
1.8 สมมติฐานการวิจัย.....	5
1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ.....	6
2.2 ชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม.....	7
2.3 การกักกรองของวัสดุปลูกฝัง.....	9
2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการกักกรอง.....	11
2.5 การวัดการกักกรอง.....	13

	หน้า
2.6 การปรับสภาพพื้นผิวด้วยการแอนโนไดส์.....	14
2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการแอนโนไดส์.....	17
2.8 การแอนโนไดส์และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	23
3.2 วิธีการวิจัย.....	24
3.2.1 เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	24
3.2.2 กระบวนการแอนโนไดส์.....	24
3.3.5 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน.....	26
3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นออกไซด์.....	27
3.3.2 การตรวจสอบความหนาของชั้นออกไซด์.....	27
3.3.3 การตรวจสอบความขรุขระของพื้นผิว.....	28
3.3.4 การวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างผลึกของชั้นออกไซด์.....	28
3.3 การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล.....	29
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	31
4.1 การกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียม ที่ผ่านการแอนโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว.....	31
4.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม ที่ผ่านการแอนโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว.....	36
4.3 ความหนาของชั้นออกไซด์ของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียม ที่ผ่านการแอนโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว.....	39
4.4 ความขรุขระพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียม ที่ผ่านการแอนโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว.....	40
4.5 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียม ที่ผ่านการแอนโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว.....	41

	หน้า
บทที่ 5 อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	42
5.1 อภิปรายวิธีการทดลอง.....	42
5.2 อภิปรายผลการทดลอง	44
5.3 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	48
รายการอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม ในรูปร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต.....	24
ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน.....	33
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน.....	34
ตารางที่ 4 ความขรุขระพื้นผิวของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีแอโนไดส์.....	40
ตารางที่ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว และชิ้นงานที่ได้รับการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ.....	57
ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ได้รับการแอโนไดส์ ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ.....	58
ตารางที่ 7 อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานที่ได้รับการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ.....	59
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของ ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอโนไดส์ ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบโคโลมิโกรอฟสเมอนอฟ.....	60
ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ของข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบลีวิน.....	62
ตารางที่ 10 การทดสอบข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์แบบบราวน์ ฟอริชท์.....	62

ตารางที่ 11	การทดสอบข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน.....	63
ตารางที่ 12	การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของ ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบโคโลมิโกรอฟสเมอนอฟ.....	64
ตารางที่ 13	การวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ของข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบลีวิน.....	66
ตารางที่ 14	การทดสอบข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์แบบบราวน์ ฟอริชท์.....	66
ตารางที่ 15	การทดสอบข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน.....	67
ตารางที่ 16	ความหนาของชั้นออกไซด์ที่วัดได้ในตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	69
ตารางที่ 17	ความหนาของชั้นออกไซด์ที่วัดได้ในตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	70

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 การประกอบชิ้นงานในตัวจับชิ้นงานเทพลอนเพื่อใช้ในการแอโนไดส์.....	25
รูปที่ 2 การแอโนไดส์โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม.....	26
รูปที่ 3 การประกอบชิ้นงานในตัวจับชิ้นงานเทพลอนเพื่อใช้ในการทดสอบ การกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนทีออสไตนาติกส์โพลาริเซชัน.....	27
รูปที่ 4 การหล่อชิ้นงานด้วยเรซินชนิดใสเพื่อนำมาวัดความหนาของชั้นออกไซด์.....	28
รูปที่ 5 เส้นโพลาริเซชันของตัวแทนชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	32
รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	33
รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้รับ การปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	35
รูปที่ 8 กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	35
รูปที่ 9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	37
รูปที่ 10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดสแกนนิ่งโพรบของชิ้นงาน ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	38
รูปที่ 11 ภาพตัดขวางของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงาน ที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	39
รูปที่ 12 ลักษณะกราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของชิ้นงานที่ไม่ได้รับ การปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	41
รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงานในกลุ่มควบคุม.....	71

รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงาน ในกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์.....	71
รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงาน ในกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 150 โวลต์.....	72
รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงาน ในกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์.....	72
รูปที่ 17 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงาน ในกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์.....	73
รูปที่ 18 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ.....	73
รูปที่ 19 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว.....	74
รูปที่ 20 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์.....	74
รูปที่ 21 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 150 โวลต์.....	75
รูปที่ 22 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์.....	75
รูปที่ 23 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์.....	76
รูปที่ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน ที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ ที่นำมาวัดความหนาของชั้นออกไซด์.....	77
รูปที่ 25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงาน ที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์ ที่นำมาวัดความหนาของชั้นออกไซด์.....	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อความก้าวหน้าทางการแพทย์เจริญมากขึ้น มีการนำเอาวัสดุฝังในกระดูก (orthopedic implant materials) มาใช้เพื่อทดแทนอวัยวะที่มีความบกพร่องหรือสูญเสียไป คุณสมบัติที่สำคัญมากประการหนึ่งของวัสดุที่นำมาใช้ทำวัสดุปลูกฝังคือ ต้องมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) เป็นอย่างดี [1] เพื่อส่งเสริมให้เกิดการยึดติดระหว่างกระดูกกับพื้นผิวของสิ่งปลูกฝัง และเกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายกับเนื้อเยื่อในร่างกายน้อยที่สุด อีกทั้งร่างกายไม่ปฏิเสธวัสดุที่ใส่มาแทนที่นั้น [2] ซึ่งความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุที่นำมาใช้ทำสิ่งปลูกฝังสามารถพิจารณาได้จากสมบัติการกัดกร่อน (corrosion) และลักษณะพื้นผิวของวัสดุ [3] เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้น สารประกอบของโลหะที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อในร่างกายและก่อให้เกิดการอักเสบเรื้อรังรอบบริเวณที่ฝังสิ่งปลูกฝังนั้น หรืออาจจะก่อให้เกิดอาการภูมิคุ้มกันไวเกิน (hypersensitivity) ต่อสารที่หลุดออกมาจากการกัดกร่อน [2] ซึ่งจะส่งผลต่อความสำเร็จในการรักษาได้ [4]

วัสดุที่นิยมนำมาทำสิ่งปลูกฝังในกระดูกชนิดหนึ่ง ได้แก่ ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม อย่างไรก็ตาม ความปลอดภัยในการนำโลหะผสม โดยเฉพาะโลหะผสมไทเทเนียม-6 อะลูมิเนียม-4วานาเดียม มาใช้เป็นสิ่งปลูกฝังในกระดูกยังเป็นประเด็นที่ถกเถียงกันอยู่ [5-7] เนื่องจากเกรงผลกระทบจากการกัดกร่อนของโลหะดังกล่าวเกิดขึ้นในร่างกาย จึงมีความพยายามในการพัฒนาพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้เกิดความเป็นพิษกับร่างกายน้อยที่สุดและมีความขรุขระที่ผิวเพิ่มการเกิดกระดูกเชื่อมประสาน (osseointegration) กับสิ่งปลูกฝังในกระดูก การแอนโนไดส์ (anodization) หรือการเคลือบผิวแอโนด (anodic oxidation) เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากมีจุดเด่นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นคือ ทำได้ง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก [8] การแอนโนไดส์ช่วยเพิ่มความหนาของชั้นออกไซด์ ซึ่งส่งผลให้โลหะและโลหะผสมไทเทเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น [9-12] มีการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ชั้นออกไซด์บนผิวของโลหะผสมไทเทเนียม-6 อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายที่เป็นกรดมีความเสถียร (stability) สูงกว่า

ชั้นออกไซด์ที่เกิดโดยธรรมชาติ [13] ข้อดีประการหนึ่งของการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการแอนโนไดส์คือ แอนไอออนที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถซึมผ่านชั้นออกไซด์ และรวมเป็นส่วนหนึ่งของชั้นออกไซด์ [14] โดยการวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า ฟอสฟอรัสในชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก สามารถกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มจำนวนเซลล์ (cell proliferation) บนชั้นออกไซด์ได้ [15] ซึ่งสมบัติของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการแอนโนไดส์จะต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เช่น ส่วนผสมและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ชิ้นงาน ความต่างศักย์ และสารเติมแต่ง (additives) เป็นต้น [16]

ผลการศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ยังมีความขัดแย้งกัน [11, 17, 18] และมีงานวิจัยไม่มากนักที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ใช้ในการแอนโนไดส์กับความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม โดยส่วนใหญ่เป็นการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมชนิดนี้ที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ต่ำกว่า 50 โวลต์ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม ที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน โดยใช้ความต่างศักย์ในช่วง 100 ถึง 300 โวลต์ รวมถึงลักษณะพื้นผิวของโลหะ ได้แก่ ลักษณะทางจุลภาค ความขรุขระของพื้นผิว ความหนาของชั้นออกไซด์ และโครงสร้างผลึกบนชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากการแอนโนไดส์ของโลหะชนิดดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกด้วยความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน
2. เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาเรื่องปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการแอนโนไดส์และการกัดกร่อนต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาสมบัติการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม ที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์ 150 โวลต์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ในสารละลายน้ำเกลือ ความเข้มข้น 0.9% เป็นหลัก โดยการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) และอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จากเส้นโพลาไรเซชัน โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ออโตแลบ โนวา (Autolab NOVA software) รุ่น 1.7 (Metrohm Autolab, Utrecht, Netherlands) และทำการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวด้วยวิธีการทางสถิติ รวมถึงพิจารณาลักษณะของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการแอนโนไดส์เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ ได้แก่ ลักษณะทางจุลภาคและความหนาของชั้นออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) วิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งโพรบ (scanning probe microscopy, SPM) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) นำข้อมูลมาวิเคราะห์แบบเชิงพรรณนา

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การทดลอง การเก็บข้อมูลและการแปลผลข้อมูลในการศึกษาแต่ละอย่าง ดำเนินการโดยบุคคลเพียงคนเดียว และใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันตลอดการทดลอง
2. ในการทดลองนี้ใช้โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมชนิดแท่ง เป็นตัวแทนของรากเทียม
3. พื้นผิวในการแอนโนไดส์และการทดสอบการกัดกร่อน ถูกควบคุมให้เท่ากันโดยใช้ยางไวตรอนรูปวงกลม (Vitron o-ring)
4. การออกแบบการทดลองนี้อ้างอิงจากมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล เล่ม 15 (ISO 10993-15 : 2000) แต่ปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงในขณะทำการทดลอง โดยปัญหาที่พบในขณะทดสอบและการปรับเปลี่ยนวิธีการทดสอบจากมาตรฐานได้อธิบายในบทที่ 5

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นเพียงการจำลองการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในร่างกายเท่านั้น ดังนั้นสภาวะที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในร่างกาย และอาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำผลที่ได้ไปอ้างอิงใช้ในสิ่งมีชีวิตต่อไป

1.6 การให้นิยามเชิงปฏิบัติการ

แอนโนไดส์เซชัน (anodization) หมายถึง กระบวนการอิเล็กโทรไลติก หรือระบบเซลล์กัลวานิกที่มีการผสมผสานกันระหว่างการใช้อิเล็กโทรไลต์และไฟฟ้า เพื่อกระตุ้นให้เกิดผิวเคลือบประเภทสารประกอบบนผิวโลหะด้วยกระบวนการออกซิเดชัน

อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) เป็นการแสดงการกัดกร่อนในเชิงปริมาณ โดยแสดงได้ในหลายหน่วย เช่น ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (percent weight loss), มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{day}$), กรัมต่อตารางนิ้วต่อชั่วโมง ($\text{g}/\text{inch}^2/\text{hour}$) หรือ มิลต่อปี (mils per year, MPY)

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) หมายถึง ค่าความต่างศักย์ที่มีอัตรารวมของปฏิกิริยาทั้งหมดทางแอโนดิกเท่ากับอัตรารวมของปฏิกิริยาทั้งหมดทางแคโทดิก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการสมดุลสำหรับการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยจะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, I_{corr})

ศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด (open-circuit potential) หมายถึง ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่วัดเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง หรือขั้วไฟฟ้าอื่น เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

โพเทนชิออสแตท (potentiostat) เป็นเครื่องมือที่รักษาค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่แช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้คงที่ หรือควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าให้เป็นไปตามขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติ

อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยเครื่องโพเทนชิออสแตท

1.7 การออกแบบการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (laboratory experimental research)

1.8 สมมติฐานการวิจัย

สมมติฐานว่าง(1): อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

สมมติฐานแย้ง(1): อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านกระบวนการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

สมมติฐานว่าง(2): ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

สมมติฐานแย้ง(2): ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นออกไซด์บนพื้นผิวโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่เกิดจากการแอนโนไดส์โดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ กัน
2. ทราบค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการแอนโนไดส์ด้วยกรดฟอสฟอริก ที่ทำให้โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี
3. เป็นพื้นฐานในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการแอนโนไดส์และการกัดกร่อนต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุ

วิวัฒนาการทางการแพทย์ที่เจริญก้าวหน้าส่งผลให้ประชากรมีอายุยืนยาวขึ้น อวัยวะบางส่วนในร่างกายอาจมีความบกพร่องหรือสูญเสียไปจากทั้งอาการของโรคต่าง ๆ ความเสื่อมของร่างกายเองหรือจากอุบัติเหตุ การนำเอาวัสดุเข้ามาฝังในร่างกายเพื่อทดแทนอวัยวะส่วนที่มีความบกพร่องหรือสูญเสียไปนั้นจึงมีความจำเป็นเพื่อทำให้บุคคลเหล่านั้นมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น วัสดุที่นำมาผลิตเป็นสิ่งปลูกฝัง (implant) ในร่างกายนี้ต้องมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานภายในร่างกายมนุษย์ วัสดุหลายชนิด ได้แก่ เซรามิก คอมพอสิต พอลิเมอร์ รวมถึงโลหะและโลหะผสมชนิดต่างๆ ถูกนำมาใช้เพื่อทำเป็นวัสดุปลูกฝัง (implant materials) [4] โดยวัสดุเหล่านี้ต้องมีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดี นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมากประการหนึ่ง เนื่องจากจะส่งผลทำให้ร่างกายตอบสนองต่อสิ่งที่น่าสนใจไปอย่างเหมาะสม และไม่เกิดผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ต่างๆ วัสดุที่จัดว่ามีความเข้ากันได้ทางชีวภาพควรมีลักษณะดังนี้[19]

1. ต้องไม่เป็นอันตรายกับเนื้อเยื่อที่อยู่โดยรอบ
2. ไม่มีส่วนประกอบที่เป็นพิษที่อาจจะถูกปล่อยออกมาและถูกดูดซึมเข้าไปในกระแสเลือด ก่อให้เกิดความเป็นพิษกับร่างกายทั้งระบบ
3. ไม่มีสารที่อาจก่อให้เกิดอาการแพ้
4. ไม่เหนียวนำให้มีการเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นมะเร็ง

ความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุที่นำมาทำวัสดุปลูกฝังพิจารณาได้จากลักษณะพื้นผิวของวัสดุ (surface characteristic) และการสลายของวัสดุ (degradation) [3]

- ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ

ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี รูปร่าง และโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งจะมีผลต่อการจัดเรียงโมเลกุล ปฏิกริยาที่พื้นผิว และการปนเปื้อนของวัสดุ ในกรณีพื้นผิวมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างจากเนื้อวัสดุ จะพิจารณาสมบัติของพื้นผิว เช่น ชั้นออกไซด์ของโลหะที่คลุมอยู่บนผิวมากกว่าจะ

พิจารณาจากเนื้อโลหะเอง [3] องค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อการตอบสนองของร่างกาย กล่าวคือ ลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมจะส่งเสริมให้เกิดการยึดเกาะของกระดูกกับวัสดุปลูกฝัง [20] นอกจากการเหนี่ยวนำให้เกิดกระดูกเชื่อมประสานแล้ว ลักษณะพื้นผิวส่งผลต่อสมบัติการกัดกร่อนของวัสดุด้วยเช่นกัน [14]

- การสลายของวัสดุ

การสลายของวัสดุอาจเกิดจากการกัดกร่อน (corrosion) หรือการสึก (wear) ทำให้มีอนุภาคของวัสดุนั้นหลุดออกมา โดยอาจจะส่งผลต่อร่างกายเฉพาะในบริเวณรอบสิ่งปลูกฝังนั้น หรืออาจส่งผลต่อระบบอื่น ๆ ที่อยู่ไกลออกไปจากบริเวณสิ่งปลูกฝังผ่านทางระบบไหลเวียนของเหลวในร่างกาย ซึ่งการตอบสนองนี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสิ่งปลูกฝัง ปริมาณ ส่วนประกอบ และรูปแบบของสารที่ถูกละลายออกมาจากกระบวนการดังกล่าว [16] โลหะมีแนวโน้มจะเกิดการละลายได้ง่ายกว่าเซรามิก [21] ดังนั้นการเลือกใช้โลหะหรือโลหะผสมเป็นวัสดุปลูกฝัง จึงต้องเลือกโลหะชนิดที่มีการสลายตัวได้ยาก เพื่อไม่ให้เกิดผลข้างเคียงในทางลบต่อร่างกาย การกัดกร่อนของโลหะที่ใช้ภายในร่างกายเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายประการ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของโลหะ โครงสร้างผลึก ความขรุขระของพื้นผิว การมีออกไซด์ปกคลุมบนพื้นผิว ลักษณะร่องหรือรูพรุน การปรับสภาพผิว การใช้งานโลหะต่างชนิดกันในพื้นที่ใกล้เคียงกัน รวมถึงระยะเวลาในการใช้งานโลหะนั้น เป็นต้น [22] การสลายตัวของวัสดุยังส่งผลต่อความสมบูรณ์ของโครงสร้างวัสดุ ทำให้ตัววัสดุเองมีสมบัติด้อยลง [23] การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นทำให้อายุการใช้งานของสิ่งปลูกฝังนั้นสั้นลง [4] ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยทั้งหมดนี้มีผลต่อความสำเร็จในการรักษาด้วยการฝังสิ่งปลูกฝังในกระดูกเป็นอย่างมาก

2.2 ชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม

โลหะที่สามารถนำมาทำวัสดุปลูกฝังมีหลายชนิด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมโคบอลต์ รวมถึงไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม ในจำนวนนี้ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม (Ti-6Al-4V) ที่มีธาตุผสมหลักได้แก่ อะลูมิเนียมร้อยละ 5.5 ถึง 6.5 โดยน้ำหนักและวานาเดียมร้อยละ 3.5 ถึง 4.5 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำวัสดุปลูกฝัง เนื่องจากสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ มีความ

แข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี และมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง [24] เมื่อโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน จะเกิดชั้นออกไซด์ขึ้นปกคลุมพื้นผิว โดยสามารถเกิดชั้นออกไซด์หนา 1 อังสตรอมได้ภายในเวลา 1 นาที [3] เมื่อพื้นที่บางส่วนของชั้นออกไซด์ถูกทำลาย เช่น เกิดการเสียดสีจนมีการสึก (wear) ชั้นออกไซด์ในบริเวณนั้นสามารถเกิดขึ้นใหม่ (repassivation) ได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native oxide layer) จะมีความหนาประมาณ 2-5 นาโนเมตร [1] ชั้นออกไซด์นี้มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) จะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นไม่ให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับสิ่งแวดล้อม จึงทำให้โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม [16] ออกไซด์ของไทเทเนียมที่ปกคลุมบนพื้นผิวของโลหะ เกิดขึ้นได้ 7 รูปแบบ ได้แก่ [25]

1. Amorphous oxide
2. Cubic titanium oxide (TiO)
3. Hexagonal titanium sesquioxide (Ti₂O₃)
4. Tetragonal titanium dioxide (TiO₂) ในรูปแบบ anatase
5. Orthorhombic titanium dioxide (TiO₂) ในรูปแบบ brookite
6. Tetragonal titanium dioxide (TiO₂) ในรูปแบบ rutile
7. Nonstoichiometric oxide (Ti_xO_y)

โดยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นออกไซด์ที่มีความเสถียรมากที่สุด [26] มีงานวิจัยกล่าวถึงโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของอะนาทาสว่ามีความสัมพันธ์กับการเกิดความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [17]

ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี เนื่องจากชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวมีเสถียรภาพทางเคมี (chemical stability) ในช่วงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) กว้าง และชั้นออกไซด์ดังกล่าวมีความเสถียรเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมภายในร่างกาย ออกไซด์ของไทเทเนียมมีการละลาย (solubility) ในน้ำต่ำ จึงมีแนวโน้มที่โลหะจะเกิดการละลายเป็นประจุของสารประกอบไทเทเนียม และเกิดปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อข้างเคียงและก่อให้เกิดความเป็นพิษในร่างกายได้น้อย ชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมมีความเปียกผิว (wettability)

สูง เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) และไฮเดรชัน (hydration) ที่ผิวพื้นผิว จึงทำให้พื้นผิวมีความเข้ากันได้กับของเหลวที่ดี ส่งผลให้ของเหลวในร่างกาย ซึ่งประกอบด้วยสารชีวโมเลกุล เช่น โปรตีน เป็นต้น สัมผัสกับพื้นผิวได้ดี เมื่อพิจารณาจากจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point, IEP) ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรดต่างที่ทำให้โลหะที่สัมผัสกับสารละลายมีค่ารวมของประจุบนพื้นผิวทั้งหมดเท่ากับศูนย์ จุดไอโซอิเล็กทริกของไทเทเนียมออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเป็นกรดต่างในร่างกาย กล่าวคือมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรดต่างในร่างกายเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมไม่มีประจุบนพื้นผิวเมื่ออยู่ภายในร่างกาย จึงเป็นการลดโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของโลหะกับประจุของสารชีวโมเลกุลในร่างกาย ส่งผลให้โลหะและโลหะผสมดังกล่าวมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [26]

ชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของวัสดุปลูกฝังที่ทำจากโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจะเป็นตัวสัมผัสกับเนื้อเยื่อในร่างกาย ด้วยเหตุนี้จึงมีการค้นคว้าวิจัยจำนวนมากในการพัฒนาสมบัติของพื้นผิวดังกล่าวเพื่อให้ได้ผลทางคลินิกที่ดี วัตถุประสงค์อย่างหนึ่งในการปรับสภาพพื้นผิวของชั้นออกไซด์คือ ทำให้พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มการยึดติดทางกล (mechanical bonding) ระหว่างกระดูกและวัสดุปลูกฝัง รวมถึงการสร้างพื้นผิวที่มีสารที่สามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างกระดูกเป็นส่วนประกอบ เช่น การใช้สารประกอบแมกนีเซียมในการฝังไอออน (ion implantation) [27] การแอนโดสในสารละลายที่ประกอบด้วยแคลเซียมและฟอสเฟต [28] และการเคลือบผิวด้วยสาร fibroblast growth factor-fibronectin (FGF-FN) [29] เป็นต้น

2.3 การกัดกร่อนของวัสดุปลูกฝัง

แม้ว่าโลหะและโลหะผสมไทเทเนียมจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่ในร่างกายประกอบไปด้วยโปรตีน น้ำ ออกซิเจนและไอออนต่าง ๆ หลายชนิด เช่น คลอไรด์ ไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้เกิดการกัดกร่อนในร่างกายได้ง่าย [16] ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีไอออนของไทเทเนียม วานาเดียมและอะลูมิเนียมหลุดออกมาเมื่อทดสอบการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม ใน fetal bovine serum [30] ซึ่งสิ่งที่หลุดออกมาจากกระบวนการกัดกร่อนนี้อาจส่งผลกระทบต่อร่างกายในทางใดทางหนึ่ง โดยสารประกอบของโลหะที่

เกิดขึ้นมีโอกาสทำปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อในร่างกาย ก่อให้เกิดการอักเสบเรื้อรัง (chronic inflammation) อาจก่อให้เกิดอาการภูมิไวเกิน (hypersensitivity) หรืออาจส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย [2] ซึ่งความปลอดภัยในการใช้โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมเป็นวัสดุปลูกฝัง ยังคงเป็นประเด็นที่หาข้อสรุปไม่ได้ แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการใช้โลหะผสมชนิดนี้ อย่างแพร่หลายก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีรายงานว่าไอออนของอะลูมิเนียมและวานาเดียมมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคสมองเสื่อม (Alzheimer) โรคปลายประสาทอักเสบ (neuropathy) และโรคกระดูกผุ (osteomalacia) [31] นอกจากนี้มีรายงานว่าประจุของไทเทเนียมและอะลูมิเนียมจากโลหะผสมดังกล่าวมีผลยับยั้งการสร้างโปรตีนออกสทิโอแคลซิน (osteocalcin) และยับยั้งการสร้างส่วนแมตริกซ์แร่ธาตุ (mineralized matrix) ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ต้นตอในไขกระดูก (bone marrow stromal cells) ไปเป็นเซลล์สร้างกระดูก (osteoblast) ในห้องปฏิบัติการ [5] นอกจากผลกระทบต่อร่างกายในด้านต่าง ๆ แล้ว การกัดกร่อนยังส่งผลกระทบต่อสมบัติของตัววัสดุเองด้วย โดยส่งผลกระทบต่ออายุการล้า (fatigue life) และความทนแตกหัก (ultimate strength) ทำให้เกิดความล้มเหลวทางกล (mechanical failure) ตามมา [32] การกัดกร่อนของวัสดุปลูกฝังเกิดได้หลายรูปแบบ ได้แก่ [33]

- การกัดกร่อนใต้รอยขีด (crevice corrosion)

การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดขึ้นบริเวณร่องที่ลึกและแคบ หรือผิวของโลหะที่ถูกปกคลุมอยู่บางส่วน ในวัสดุปลูกฝังมักจะเกิดในบริเวณหัวสกรูที่ยึดกับแผ่นโลหะ หรือบริเวณรอยต่อของชิ้นงานแต่ละชิ้น รวมถึงรอยแตกที่เกิดจากความล้า (fatigue crack) ทำให้บริเวณร่องและพื้นผิวภายนอกมีปริมาณออกซิเจนไม่สม่ำเสมอ บริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำจะเกิดเป็นขั้วแอโนด การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนี้มีส่วนช่วยให้รอยแตกขยายขนาดขึ้น

- การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (galvanic corrosion)

เกิดในโลหะสองประเภทที่มีความแตกต่างกันทางเคมีไฟฟ้าสัมผัสกันในตัวกลางที่สามารถนำประจุไฟฟ้าได้ ตัวอย่างของการกัดกร่อนชนิดนี้ในการใช้วัสดุปลูกฝัง เช่น เมื่อใช้สกรู กับแผ่นโลหะตามกระดูกเป็นโลหะต่างชนิดกัน หรือมีเศษโลหะจากไขควงที่ตกค้างอยู่บนหัวสกรู โดยมีสารน้ำในร่างกาย เช่น เซรั่ม หรือ ของเหลวที่อยู่ระหว่างเซลล์ (interstitial fluid) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

- การกัดกร่อนแบบฉุดครูด (fretting corrosion)

เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวที่แตกต่างกัน 2 ชนิดมีการเสียดสีกันอย่างต่อเนื่องในสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อนได้ ทำให้ฟิล์มที่ปกคลุมบนผิวโลหะถูกทำลายจากการเสียดสีและเกิดฟิล์มใหม่ไม่ได้ ตัวอย่างของการกัดกร่อนในลักษณะนี้ได้แก่ การกัดกร่อนของแผ่นโลหะตามกระดูก (bone plate) และหัวสกรู ซึ่งอาจเป็นจุดเริ่มต้นให้เกิด corrosion fatigue ในบริเวณรูสกรู

- การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion)

ชั้นฟิล์มที่ปกคลุมบนผิวโลหะ (protective film) ถูกทำลายจากแรง สารเคมี หรือสิ่งเจือปนในโลหะ เช่นมีความไม่สมบูรณ์แบบในชั้นออกไซด์ จึงเกิดการกัดกร่อนขึ้นเฉพาะจุดและมักจะตรวจสอบไม่พบ ในวัสดุปลูกฝัง การกัดกร่อนในลักษณะนี้มักจะเกิดขึ้นในบริเวณหัวสกรู โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีประจุคลอไรด์ การกัดกร่อนจะมีความรุนแรงขึ้น

- การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับกัดกร่อน (stress corrosion cracking)

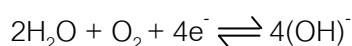
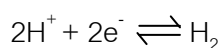
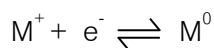
เกิดจากโลหะมีความเค้นและอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นอาจจะมีค่าน้อยมาก เช่น มีความเค้นตกค้าง (residual stress) จากการขัดแต่ง หรือความเค้นที่เกิดจากชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นร่องหลุม

2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการกัดกร่อน

การกัดกร่อนเป็นการสูญเสียเนื้อโลหะโดยการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม อาจเกิดขึ้นทั่วทั้งพื้นผิว (generalized corrosion) หรือเกิดเฉพาะที่ (localized corrosion) การกัดกร่อนเกิดขึ้นได้จากทั้งปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจัดเป็นการกัดกร่อนแบบแห้ง (dry corrosion) จากการที่โลหะสัมผัสกับสารที่ไม่ใช่โลหะในสภาวะที่ส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อน เช่น อุดหนุมิสูง เป็นต้น หรือเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นการกัดกร่อนแบบเปียก (wet corrosion) การกัดกร่อนแบบนี้ต้องมีสารละลายในกระบวนการเพื่อใช้ในการถ่ายเทประจุและอิเล็กตรอน การกัดกร่อนในร่างกายจัดเป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ แอโนด แคโทด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การกัดกร่อนจะเกิดในพื้นที่แอโนด โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งทำให้เกิดประจุบวกและมีการปล่อยอิเล็กตรอนอิสระออกมา ดังสมการ



ที่ด้านแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยรับอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากแอโนด ซึ่งสารที่จะมารับอิเล็กตรอนนี้มีหลายชนิด ขึ้นกับสภาพแวดล้อมในการเกิดการกัดกร่อนในขณะนั้น ตัวอย่างของสารดังกล่าว เช่น ประจุของโลหะ หรือประจุของไฮโดรเจน เป็นต้น



โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเป็นพาตัวประจุที่เกิดขึ้นในบริเวณแอโนดให้กระจายออกจากบริเวณนั้น และนำประจุที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันไปยังด้านแคโทด ซึ่งจะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการนี้ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ซึ่งถ้าเกิดขึ้นในร่างกายอาจก่อให้เกิดความรู้สึกทางกาย เช่น ความเจ็บปวด เป็นต้น [16, 34] สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการกัดกร่อนได้แก่ [35]

- แรงขับเคลื่อนโธดนามิกส์ (Thermodynamic driving force) หมายถึงพลังงานที่ใช้หรือที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน ซึ่งจะบ่งชี้ว่าจะเกิดการกัดกร่อนขึ้นภายใต้เงื่อนไขนั้นหรือไม่ โดยอาจพิจารณาในเบื้องต้นได้จากตารางค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (standard electromotion force series, EMF series) ซึ่งประจุของโลหะที่มีความต่างศักย์สูงกว่าสามารถกัดกร่อนโลหะที่มีความต่างศักย์ต่ำกว่าได้ โดยโลหะที่มีค่าความต่างศักย์สูงกว่าจะทำหน้าที่เป็นแคโทด ส่วนโลหะที่มีความต่างศักย์ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นแอโนด ความรุนแรงของปฏิกิริยาขึ้นกับผลต่างของความต่างศักย์ระหว่างโลหะสองชนิดนั้น

- สิ่งกีดขวางไคเนติก (Kinetic barriers) คือ ลักษณะทางกายภาพที่จำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เป็นปัจจัยที่ขัดขวางไม่ให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น เช่น การเกิดพาสซีเวชันหรือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์กับโลหะเป็นชั้นบาง ๆ เคลือบอยู่บนพื้นผิวของโลหะนั้น ซึ่งชั้นดังกล่าวจะเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโลหะกับสภาพแวดล้อม กล่าวคือ ป้องกันไม่ให้ประจุของโลหะเคลื่อนที่ออกจากผิวโลหะไปสู่สารละลายโดยรอบ และป้องกันไม่ให้ประจุในสารละลายเคลื่อนที่เข้าสู่โลหะ นอกจากนี้ยังเป็นตัวกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างโลหะกับสารละลาย

2.5 การวัดการกัดกร่อน [23]

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติอาจจะใช้เวลานาน ในการทดสอบการกัดกร่อนจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการกัดกร่อนในระยะเวลาสั้นลง โดยตัดช่วงที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลเร็วขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องไม่เปลี่ยนกลไกของปฏิกิริยา ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มความรุนแรงของสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน โดยการเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มความเข้มข้นของสารกัดกร่อน หรือการกระตุ้นทางกระบวนการไฟฟ้าเคมี

2.5.1 Immersion test

ทดสอบการกัดกร่อนโดยนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบมาแช่ในสารกัดกร่อน และนำชิ้นงานมาวัดน้ำหนักที่หายไปต่อช่วงเวลาหนึ่ง การวัดด้วยวิธีนี้เป็นการใช้เพื่อทดสอบในเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจ เนื่องจากวิธีการนี้มีใช้เวลาในการทำสั้น และมีค่าใช้จ่ายต่ำ อัตราการกัดกร่อนได้จากการคำนวณ โดยหน่วยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ มิลต่อปี (mils per year, MPY)

$$\text{อัตราการกัดกร่อน (มิลต่อปี)} = \frac{K W}{\text{DAT}}$$

โดยที่ K = ค่าคงที่ เท่ากับ 3.45×10^6

W = น้ำหนักที่หายไป (กรัม)

D = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

A = พื้นที่ของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

T = เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (ชั่วโมง)

2.5.2 Electrochemical test

วัดประจุของโลหะที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการกัดกร่อนโดยทางอ้อมคือ วัดจากการไหลของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมา ณ ตำแหน่งที่อัตรารวมของปฏิกิริยาออกซิเดชันเท่ากับอัตรารวมของปฏิกิริยารีดักชัน จะเกิดสมดุลของการกัดกร่อน เรียกศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตำแหน่งนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) และกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้ว่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current, i_{corr}) ปริมาณของการกัดกร่อนต่อหน่วยเวลาจะเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (corrosion current, i_{corr}) ตามกฎของฟาราเดย์ กล่าวคือ ปริมาณการกัด

กัดกร่อนต่อหน่วยเวลาและหน่วยพื้นที่หรืออัตราการกัดกร่อนสามารถแสดงในรูปของกระแสต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของการกัดกร่อนทำได้โดยการสร้างเส้นโพลาริเซชัน แสดงความสัมพันธ์ศักย์ไฟฟ้าในขณะที่เกิดการกัดกร่อนกับการถ่ายเทประจุไฟฟ้า สามารถบอกช่วงที่เกิดความต้านทานการกัดกร่อนจากการสร้างชั้นออกไซด์ การทำลายชั้นออกไซด์และตำแหน่งที่มีการกัดกร่อนของโลหะได้

2.5.3 Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)

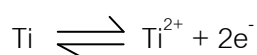
ใช้วัดปริมาณโลหะที่มีจำนวนเพียงเล็กน้อยในสารละลายที่เป็นของเหลว โดยตัวอย่างของเหลวจะถูกฉีดพ่นเข้าไปในอาร์กอนพลาสมา โลหะที่ละลายอยู่ในของเหลวจะถูกกระตุ้น และปล่อยคลื่นแสงช่วงที่มองเห็นได้และคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่มีลักษณะเฉพาะของธาตุนั้นออกมา ซึ่งจะถูกแยกโดยส่วนที่ทำหน้าที่คัดแยกแสง (monochromator) และตรวจสอบด้วยหลอดวัดแสงแบบสูญญากาศ (photomultiplier tube) จะใช้ความยาวคลื่นที่ได้เพื่อระบุชนิดของธาตุ และใช้ความเข้มของรังสีเพื่อหาความเข้มข้น ใช้ในการวัดปริมาณสารที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1 ppb (part per billion) ถึง 1,000 ppm (part per million) ข้อดีของการใช้เครื่องมือชนิดนี้คือใช้เวลาในการวัดสั้น และมีสารเคมีเจือปนน้อยกว่าการใช้เครื่องมืออะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (flame AAS) แต่อย่างไรก็ตาม อาจจะมีแถบแสงของธาตุหลายชนิดซ้อนทับกัน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการแปลผล

2.6 การปรับสภาพพื้นผิวด้วยการแอนโนไดส์

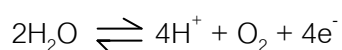
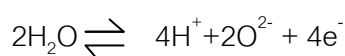
พื้นผิวของวัสดุปลูกฝังในกระดูกมีความสำคัญต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ดังนั้นการพัฒนาพื้นผิวของวัสดุที่นำมาใช้ทำวัสดุปลูกฝังจึงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อทำให้เกิดความขรุขระที่ผิว เพิ่มการเกิดกระดูกเชื่อมประสาน และเกิดผลข้างเคียงในทางลบกับร่างกายน้อยที่สุด ซึ่งการปรับสภาพพื้นผิวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การอบเหนียวด้วยความร้อน (thermal annealing) , การสังเคราะห์ทางเคมี (chemical synthesis), การกัดด้วยกรด (acid etching) และการแอนโนไดส์ (anodization) เป็นต้น จุดเด่นของการแอนโนไดส์เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ คือทำได้ง่าย สามารถสร้างชั้นออกไซด์ที่มีลักษณะต่างกันได้หลายแบบ สารที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์สามารถเข้าร่วมกับชั้นออกไซด์ได้ และวิธีการนี้ทำได้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างใดก็ได้ [8]

การแอโนไดส์หรือการเคลือบผิวแอโนด (anodic oxidation) คือ กระบวนการ อิเล็กโทรไลติก หรือระบบเซลล์กัลวานิก ที่กระตุ้นให้เกิดสารประกอบเคลือบบนผิวโลหะด้วย กระบวนการออกซิเดชัน โดยทั่วไปเซลล์อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่อยู่ในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์และสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้า ชิ้นงานที่ต้องการสร้างฟิล์ม แอโนดิกจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดหรือขั้วบวก และโลหะที่มีความเสถียร เช่น แพลทินัม ไทเทเนียม เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดหรือขั้วลบ [36] โลหะที่นิยมนำมาปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีแอโนไดส์ ได้แก่ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม แมกนีเซียมและสังกะสี เป็นต้น การแอโนไดส์ใช้ในวงการอุตสาหกรรม อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแอโนไดส์ในโลหะอะลูมิเนียม เพื่อปิดรูพรุนของเนื้อโลหะ ซึ่ง จะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น วิธีการดังกล่าวยังช่วยเพิ่มความต้านทานในการสึก (wear resistance) ทำให้โลหะเกิดความเงางามหรือใช้ในการทำสี ส่วนในกรณีของไทเทเนียมซึ่งเป็นโลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อนดีมากนั้น การแอโนไดส์มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความ ต้านทานการสึก เนื่องจากเมื่อไทเทเนียมเกิดการเสียดสี เนื้อโลหะสามารถยึดเกาะกันและหลุด ออกมาได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า กาลลิ่ง (galling) [16]

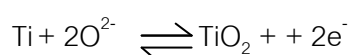
ไทเทเนียมที่ผ่านการแอโนไดส์ จะเกิดชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมปกคลุมบนพื้นผิวของ โลหะ โดยปฏิกิริยาที่เกิดที่พื้นผิวระหว่างไทเทเนียมและชั้นไทเทเนียมออกไซด์ ได้แก่



เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้า อิเล็กโทรไลต์จะแตกตัวได้ประจุลบ ปฏิกิริยาที่เกิดที่ผิว ระหว่างชั้นไทเทเนียมออกไซด์และอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่



ประจุลบที่แตกตัวมาจากอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งเข้าสู่ชิ้นงาน เกิดเป็นออกไซด์ของโลหะชั้นที่ผิว ของชิ้นงาน



ประจุของไทเทเนียมและออกซิเจนที่ถูกผลักเข้าไปในชั้นออกไซด์ด้วยสนามไฟฟ้าที่เข้าสู่ ระบบ ทำให้เกิดการเติบโตของชั้นออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นจนกระทั่งชั้นออกไซด์มี ความต้านทานใกล้เคียงกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์และส่วนของโลหะในวงจร ความต่างศักย์ที่ให้

ไปสู่ระบบจะเริ่มลดลงเมื่อผ่านชั้นออกไซด์ ถ้าสนามไฟฟ้ายังสูงพอที่จะผลักไอออนผ่านเข้าไปยังชั้นออกไซด์ได้ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านและทำให้เกิดออกไซด์เพิ่มขึ้น[8] โดยความหนาของชั้นออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ที่ให้สู่ระบบ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขที่ใช้ในการแอโนไดส์ [11] การทำแอโนไดส์สามารถทำได้โดยการใช้ความต่างศักย์คงที่ (potentiostatic process) หรือให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (galvanostatic process) สู่ระบบขณะเกิดปฏิกิริยา ถ้าทำแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์สูงกว่าขีดจำกัดการสลายตัว (breakdown limit) ชั้นออกไซด์จะไม่สามารถทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้ จะเกิดการปล่อยก๊าซมากขึ้นและมักจะทำให้เกิดการสปาร์คขึ้น ทำให้ได้ชั้นออกไซด์ที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ และเป็นรูพรุนมากขึ้น เรียกการทำแอโนไดส์แบบนี้ว่า anodic spark oxidation หรือ micro-arc oxidation นอกจากนี้ยังมีชื่อเรียกอื่นๆ อีก เช่น plasma electrolytic oxidation, spark anodizing, spark anodization, anodic spark deposition, micro-arc anodizing, micro-arc discharge oxidation, microplasma anodizing, microplasma oxidation, electroplasma oxidation [37]

ข้อดีอย่างหนึ่งของการแอโนไดส์คือแอนไอออนที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถซึมผ่านชั้นออกไซด์และรวมเป็นส่วนหนึ่งของชั้นออกไซด์ โดยพบว่าโลหะผสมไทเทเนียม-6 อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอโนไดส์ด้วยกรดฟอสฟอริก มีฟอสฟอรัสอยู่ในชั้นเคลือบผิว และจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการ แต่ฟอสฟอรัสที่พบมีปริมาณต่ำ คือต่ำกว่าร้อยละ 0.3 โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของไทเทเนียมที่เกิดขึ้นในสารละลายกรดฟอสฟอริก จะเกิดอยู่ในรูปของประจุของสารประกอบที่มีออกซิเจน (oxygenated anion) ซึ่งผลจากการทดสอบด้วย FTIR พบว่าเป็นฟอสเฟตของอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และวานาเดียม [14] ประโยชน์ที่ได้จากสมบัติดังกล่าว คือหากมีการดูดซึมสารทางชีวภาพ (biological species) เช่น ไอออนของฟอสเฟต เข้าไปบนผิววัสดุปลูกฝังจะทำให้มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อในร่างกาย ดังเช่นการวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า ฟอสฟอรัสในของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการทำแอโนไดส์ด้วยกรดฟอสฟอริก สามารถกระตุ้นให้เกิดการเจริญของเซลล์ (cell proliferation) บนชั้นออกไซด์ได้ [15] นอกจากนี้ยังพบว่าการทำแอโนไดส์ทำให้สมบัติทางกลของโลหะผสมไทเทเนียมดีขึ้นด้วย โดยพบว่าโลหะผสมไทเทเนียม-6 อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอโนไดส์ด้วยกรดซัลฟิวริกโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่จนถึงความต่างศักย์สูงสุดในช่วง 12 ถึง 100 โวลต์ มีความแข็งผิวนาโน (Nanohardness) และค่าโมดูลัสของ

ยัง (young's modulus) สูงขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการแอนโนไดส์เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงพันธะจากพันธะโลหะเป็นพันธะโคเวเลนต์ของออกไซด์ [13]

คุณสมบัติของฟิล์มจากกระบวนการแอนโนไดส์จะต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เช่น ส่วนผสมและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิอิเล็กโทรไลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ขั้วงานหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า สารเติมแต่ง (additives) เป็นต้น [8, 16]

2.7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการแอนโนไดส์

2.7.1 ชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นในบริเวณที่ชั้นออกไซด์สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นลักษณะของพื้นผิวและความหนาของชั้นออกไซด์จึงมีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับลักษณะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้กรดฟอสฟอริกผสมลงในกรดซัลฟิวริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดและลักษณะของพื้นผิว (surface morphology) เปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นอิเล็กโทรไลต์เพียงอย่างเดียว แต่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในกรดซัลฟิวริก และพบยังว่าขนาดของรูพรุนบนผิวและความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการแอนโนไดส์มากขึ้น [38]

เมื่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้มข้นมากขึ้น ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นกับระบบจะมีค่าต่ำลง โดยเมื่อทำการแอนโนไดส์โลหะไทเทเนียมด้วยกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.05 โมลาร์ ถึง 0.5 โมลาร์ พบว่ากรดฟอสฟอริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นออกไซด์สลายตัว (breakdown potential) ต่ำที่สุด [39] ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยพื้นฐานของ electrical double layer mode กล่าวคือ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่ผิวด้านในของชั้นออกไซด์จะต่ำกว่าผิวด้านนอกที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ หากเพิ่มความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่ผิวด้านในมีปริมาณเพียงพอ ปฏิกิริยาที่ผิวจะเกิดเร็วขึ้น ทำให้ความต้านทานของระบบลดลง เป็นผลให้ความต่างศักย์ของระบบลดลงด้วย [8] นอกจากนี้ยังพบว่า โลหะผสมไทเทเนียม-6 อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายแคลเซียมอะซิเตทโมโนไฮเดรตและ

แคลเซียมไกลโคฟอสเฟต มีจำนวนรูพรุนบนพื้นผิวมากขึ้น พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น และมีค่ามุมสัมผัสต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น [40] การศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า เมื่อใช้กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะได้ชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว และมีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส (anatase) แต่จะได้พื้นผิวเป็นพื้นผิวนูนสลับกับผิวเรียบและมีโครงสร้างผลึกเป็นชนิดรูไทล์ (rutile) เมื่อใช้สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ [41]

2.7.2 ปริมาณความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

ความต่างศักย์ที่ให้ขณะทำการแอโนไดส์ก็มีบทบาทสำคัญต่อการลักษณะพื้นผิวของชั้นออกไซด์ โดยทั่วไปความต่างศักย์ต่ำจะได้ชั้นออกไซด์ลักษณะบาง แน่นและเป็นอสัณฐาน ในทางตรงข้าม ถ้าใช้ความต่างศักย์สูงเกินขีดจำกัดการสลายตัวของชั้นออกไซด์ (dielectric breakdown limit) จะได้ชั้นออกไซด์ที่หนา เป็นรูพรุน และมีความเป็นผลึก การทดลองโดยใช้โลหะไทเทเนียมทำแอโนไดส์ โดยใช้กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ พบว่าที่ชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์ จะได้ชั้นออกไซด์ที่หนาและมีลักษณะที่เป็นอนุภาคนาโน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเคลือบรากฟันและเซลล์ยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี แต่ที่ชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 และ 300 โวลต์ จะได้ชั้นออกไซด์ที่หนาและมีรูพรุน [42] นอกจากนี้ความหนาของชั้นออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น การแอโนไดส์โลหะไทเทเนียมในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์จาก 25 โวลต์เป็น 35 โวลต์ ทำให้ชั้นออกไซด์หนาขึ้นจาก 0.4 ไมโครเมตรเป็น 0.8 ไมโครเมตร [10] ส่วนการแอโนไดส์โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมในสารละลายกรดฟอสฟอริกพบแนวโน้มดังกล่าวเช่นกัน โดยมีความสัมพันธ์เกือบจะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งพบว่ามีอัตราการเติบโตของชั้นออกไซด์ประมาณ 0.4 นาโนเมตรต่อโวลต์ [11]

เมื่อใช้ความต่างศักย์ที่มีค่าสูงขึ้น ทำให้แอนไอออนที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในชั้นออกไซด์ได้มากขึ้น ทดสอบกับไทเทเนียมบริสุทธิ์ที่ผ่านกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันในสารละลายแคลเซียมอะซิเตรทโมโนไฮเดรตและแคลเซียมไกลโคฟอสเฟตที่ความต่างศักย์ 270 โวลต์ พบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมและฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ใช้ใน

กระบวนการ [43] เมื่อความต่างศักย์สูงขึ้นไปจะได้ชั้นออกไซด์ที่หนาขึ้น เป็นรูปพุนขนาดใหญ่มากขึ้น มีความขรุขระมากขึ้น และมีแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่ผิวโลหะมากขึ้น

2.7.3 เวลาที่ใช้ในการแอนโนไดส์

การทดลองโดยการแอนโนไดส์โลหะไทเทเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ เวลาในการแอนโนไดส์ 30 วินาที 70 วินาที 100 วินาที และ 150 วินาที พบว่าเมื่อใช้เวลาในการ แอนโนไดส์มากขึ้นจะได้ชั้นออกไซด์ที่มีความหนาเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง สมการเชิง เส้นของชั้นงานที่แอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 25 โวลต์ คือ $y = 0.0018 t + 0.3414$ และ สมการ เชิงเส้นของชั้นงานที่แอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 35 โวลต์ คือ $y = 0.0058t + 0.6317$ [10]

2.7.4 ชนิดของโลหะที่ใช้ในการแอนโนไดส์

Song และคณะพบว่า เมื่อนำโลหะผสมมาผ่านกระบวนการแอนโนไดส์ จะได้ชั้นออกไซด์ที่มีพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ (inhomogeneous) เนื่องจากมีองค์ประกอบและการกระจายตัวของเฟสไม่ สม่ำเสมอ นอกจากนี้โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรดการค้า เกรด 3 ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสูง กว่า มีการเติบโตของชั้นออกไซด์ในช่วงแรกเร็วกว่า จึงได้ชั้นออกไซด์หนา เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะ ไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรดการค้า เกรด 2 [18]

2.8 การแอนโนไดส์และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่บ่งชี้ว่า การแอนโนไดส์ทำให้โลหะและโลหะผสมไทเทเนียมมีความเข้า กันได้ทางชีวภาพที่ดี โดยพบว่าการเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างแคลเซียมขึ้นที่ผิวของชั้นงานที่ผ่าน การแอนโนไดส์เมื่อนำไปแช่ในสารละลาย MEM [44] มากกว่าชั้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว นอกจากนี้การประเมินความเข้ากันได้ทางชีวภาพอาจทำได้โดยประเมินการทำงานของแอลคาไลน์ ฟอสฟาเทส (alkaline phosphatase activity) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการแปรสภาพของเซลล์สร้าง กระดูก (osteoblast differentiation) หรือประเมินจากการเลี้ยงเซลล์ (cell culture) โดยโลหะผสม ไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ให้ค่าการทำงานของแอลคาไลน์ฟอสฟา เทสสูงกว่า มีจำนวนเซลล์สร้างกระดูกมากกว่าและมีความหนาของชั้นไฟบรัสน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่ได้ ผ่านการแอนโนไดส์ ซึ่งแสดงถึงการมีการอักเสบเรื้อรังในบริเวณรอบ ๆ น้อยกว่า [45] นอกจากนี้การ ตอบสนองของเซลล์จะดีขึ้นถ้าโลหะมีพื้นผิวที่ขรุขระ มีพลังงานที่ผิวโลหะสูง และมีค่ามุมสัมผัส

(contact angle) ต่ำ ซึ่งไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีการตอบสนองของเซลล์ที่ดี เนื่องจากมีมุมสัมผัสต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกหรือกรดไฮโดรฟลูออริก [46] การทดลองในสิ่งมีชีวิตโดยศึกษาการฝังสิ่งปลูกฝังในกระต่าย พบว่าสิ่งปลูกฝังในกระดูกที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์สูง มีค่าแรงบิดในการถอนวัสดุออกจากกระดูก (removal torque) สูง และมีค่าสัมผัสระหว่างกระดูกและสิ่งปลูกฝัง (bone-to-implant contact) สูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ [47]

ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า โลหะที่ผ่านการแอนโนไดส์หรือกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชัน (การแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์สูงกว่าค่าขีดจำกัดการสลายตัวของชั้นออกไซด์) จะมีความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการ และกระดูกมีการตอบสนองต่อโลหะที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดีกว่าเมื่อเทียบกับโลหะที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว [48-50] แต่ยังไม่ชัดเจนถึงขีดถึงความหนาที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการตอบสนองทางชีวภาพที่ดี โดย Sul ทำการศึกษาการตอบสนองของกระดูกในสกรูโลหะไทเทเนียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดอะซิติกพบว่า สกรูที่ผ่านการแอนโนไดส์ซึ่งมีความหนาของชั้นออกไซด์ในช่วง 600 ถึง 1,000 นาโนเมตร มีการตอบสนองของกระดูกที่ดี โดยมีค่าสัมผัสระหว่างกระดูกและสิ่งปลูกฝัง และค่า alkaline phosphatase activity ดีกว่ากลุ่มควบคุม ซึ่งมีความหนาของชั้นออกไซด์อยู่ในช่วง 17 ถึง 200 นาโนเมตร [48] นอกจากนี้ Sul และคณะได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์กับการตอบสนองของกระดูก โดยศึกษาค่าแรงบิดในการถอน สกรูที่ทำจากโลหะไทเทเนียมที่ผ่านกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันในสารละลายที่มีแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบหลังจากการฝังสกรูในกระต่ายเป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและความหนาของชั้นออกไซด์ โดยชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชันมีความหนาอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 5,000 นาโนเมตร ชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว ซึ่งมีความหนา 17 นาโนเมตร มีค่าแรงบิดต่ำที่สุด ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นออกไซด์มีความหนาเพิ่มมากขึ้น และมีค่าสูงที่สุดเมื่อชิ้นงานมีความหนาของชั้นออกไซด์ 3,440 นาโนเมตร จากนั้นค่าแรงบิดจะลดลงในชิ้นงานที่มีความหนาเพิ่มขึ้น sul และคณะได้

สรุปว่า ความหนาของชั้นออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 5,000 นาโนเมตร ซึ่งทำให้กระดูกมีการตอบสนองที่ดี [51]

มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะและโลหะผสมไทเทเนียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ โดยผลการกัดกร่อนของสิ่งปลูกฝังที่มีฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบ (phosphate-enriched titanium oxide implant) ในภาวะจำลองการอักเสบและภาวะน้ำตาลในเลือดสูง โดยพบว่าอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าไทเทเนียมที่ผ่านการกลิ้งโดยไม่ได้ปรับสภาพผิว [52] Afshar และ Vezia ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะไทเทเนียมในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20 โมลาร์ โดยใช้ความต่างศักย์คงที่ที่ 25 โวลต์และ 35 โวลต์ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้นและอัตราการกัดกร่อนลดลง จากการมีชั้นออกไซด์ที่มีความแน่น (compactivity) และมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้ความต่างศักย์สูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลง [10] ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Karambakhsh และคณะที่พบว่า การแอนโนไดส์โลหะไทเทเนียมในสารละลายกรดซัลฟิวริกด้วยความต่างศักย์คงที่ในช่วง 5 โวลต์ถึง 80 โวลต์ ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้นและอัตราการกัดกร่อนลดลง แต่เมื่อใช้ความต่างศักย์ในการแอนโนไดส์เพิ่มขึ้น อัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Afshar และ Vezia โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่า อัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการมีรูพรุนบนพื้นผิวมากขึ้น [9] Song และคณะศึกษาการกัดกร่อนในไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้า โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม และโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-7ไนโอเบียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรพบว่า ในไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้า และโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-7ไนโอเบียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลุ่มควบคุม โดยไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้า เกรด 3 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงที่สุดแต่ได้ผลในทางตรงกันข้ามเมื่อทดสอบกับไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่ามีวานาเดียมออกไซด์เกิดขึ้นบนพื้นผิว ซึ่งมีการละลายตัวสูงกว่า ทำให้โลหะผสมโลหะไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม มีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำกว่ากลุ่มควบคุม และพบว่าหลังจากการกัดกร่อนแล้ว ขนาดของรูพรุนบนพื้นผิวมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนฝังอยู่ในรูพรุน ส่วนในโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม พบว่ามีหลุมที่

เกิดจากการละลายเฉพาะที่บนพื้นผิว ซึ่งเป็นการละลายของวานาเดียมออกไซด์ออกจากชั้นออกไซด์ [18] อย่างไรก็ตามมีการศึกษาอีกหลายชิ้นที่บ่งชี้ว่า ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ ที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า 100 โวลต์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการแอนโนไดส์ [11, 17] Karambakhsh และคณะได้ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ โดยการปรับสภาพผิวด้วยความต่างศักย์คงที่ในช่วง 10 โวลต์ ถึง 120 โวลต์ ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ และนำชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 20 โวลต์ และ 50 โวลต์มาเปรียบเทียบกับความต้านทานการกัดกร่อน โดยพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวที่อัตราการกัดกร่อนลดลงเมื่อทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายของจริงเกอร์และในน้ำลาย โดยพบว่ามีชั้นพาสซีฟเกิดขึ้น และชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์มีอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 20 โวลต์ [11] ส่วน Paul และ Yadav ได้ศึกษาการกัดกร่อนในโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ โดยใช้ความต่างศักย์คงที่ที่ 7 โวลต์ 13 โวลต์ 16 โวลต์ และ 25 โวลต์พบว่าความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมดังกล่าวดีขึ้นเมื่อได้รับการปรับสภาพพื้นผิว โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้นและมีอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าโลหะที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการพบโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสและรูไทล์บนพื้นผิวที่ของโลหะผสมทุกกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์ และเมื่อพิจารณากราฟ cyclic polarization พบว่า เมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับ (reverse scan) จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์มีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวมีความเป็นพาสซีฟมากขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวมีค่าสูงขึ้น ซึ่งบอกได้ว่ามีความเป็นพาสซีฟลดลงและเริ่มต้นเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized corrosion) โดยอาจเกิดในรูปของการกัดกร่อนแบบรูเข็มและการกัดกร่อนใต้ออยชั้น นอกจากนี้ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีพื้นที่ฮิสเทอรีซิสใหญ่กว่า ซึ่งแสดงว่ามีการขัดขวางการเกิดพาสซีวิตี ทำให้การสร้างชั้นพาสซีฟขึ้นใหม่ทำได้ยากขึ้น และเป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ [17]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมชนิดแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร (บริษัทแอลวีเอส ประเทศเวียดนาม)
2. โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรดการค้า เกรด 2 (บริษัทนาโนซิลด์ ประเทศไทย)
3. กระดาษทรายน้ำเบอร์ 400,600,800,1000 และ 1200
4. อะซิโตน (บริษัท ซีพีเอส อินดิเกอร์ชั่น ประเทศไทย)
5. สารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (บริษัทเมอร์ค ประเทศเยอรมัน)
6. สารละลายน้ำเกลือ ความเข้มข้น 0.9% (บริษัทไทยโอซูก้า ประเทศไทย)
7. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)
8. ยางไวตรอนโอริง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 6 มิลลิเมตร

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ (automatic polishing machine, DPS 3200, IMPTECH, South Africa)
2. เครื่องอัลตราโซนิกส์
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)
4. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
5. เครื่องกวนสารด้วยแรงแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
6. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอ (Stereomicroscope, BX60, Olympus, Japan)
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, JSM-6480LV, JEOL, Eching Munchen, Germany)

8. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (x-ray diffraction, XRD; D8 Discover, BRUKER-axs, Karlsruhe, Germany)
9. กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่งโพรบ (scanning probe microscopy, SPM; Nanoscope IV, Veeco, California, United State)
10. เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Autolab, μ Autolab type III, Metrohm Autolab, Utrecht, Netherlands)
11. ตัวจับชิ้นงานเทฟลอน (Teflon holder)

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 วิธีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

เตรียมชิ้นงานโดยนำโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมชนิดแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร (ผลิตโดยบริษัทแอลวีเอช ประเทศเวียดนาม นำเข้าโดยบริษัทเควีเอ็ม ฮีททิง อิลิเมนต์ ประเทศไทย) มาตัดให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 70 ชิ้น องค์ประกอบของโลหะผสมไทเทเนียมที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำมาขัดด้วยกระดาษทราย น้ำความละเอียด 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดผิววัสดุอัตโนมัติ แล้วนำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์ในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เป่าให้แห้ง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมในรูปร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Balance	6.2	4.1	0.18	0.03	0.027	0.008	0.12

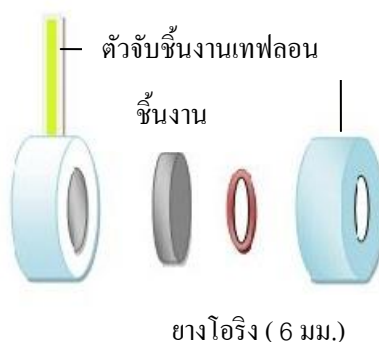
3.2.2 กระบวนการแอนโนไดส์

นำชิ้นงานทั้งหมดมาแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ด้วยวิธีการสุ่ม ดังนี้

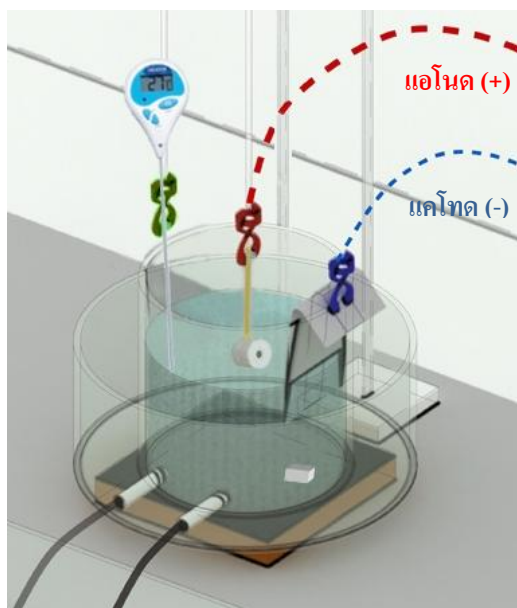
- กลุ่มที่ 1 : ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการแอนโนไดส์จำนวน 14 ชิ้น

- กลุ่มที่ 2: ชีงงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 100 โวลต์ จำนวน 14 ชิ้น
- กลุ่มที่ 3 : ชีงงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 150 โวลต์ จำนวน 14 ชิ้น
- กลุ่มที่ 4 : ชีงงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 200 โวลต์ จำนวน 14 ชิ้น
- กลุ่มที่ 5 : ชีงงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 300 โวลต์ จำนวน 14 ชิ้น

นำชีงงานในกลุ่มที่ 2 กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และกลุ่มที่ 5 มาปรับสภาพผิวด้วยการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยนำชีงงานใส่ในตัวจับชีงงานเทพลอน (รูปที่ 1) ใช้ยางโอริง (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงด้านในเท่ากับ 6 มิลลิเมตร) เป็นตัวกำหนดพื้นที่ผิวของชีงงานที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์และไม่ให้อิเล็กโทรไลต์รั่วซึมเข้าไปภายใน ต่อชีงงานเข้ากับขั้วบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และใช้ไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรดการค้าต่อเข้ากับขั้วลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยนำบีกเกอร์ที่ประกอบด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลต์ติดไปแช่ในภาชนะที่ต่อเข้ากับอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 2) ก่อนที่จะเปิดเครื่องให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าในการทำแอนโนไดส์แต่ละครั้ง ชีงงานจะถูกแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นเวลา 5 นาที ทำการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์คงที่ที่ระดับ 100 โวลต์ 150 โวลต์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ ตามลำดับ เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กวางด้านล่างของภาชนะที่ใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วนำชีงงานที่ปรับสภาพผิวแล้วมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและเป่าให้แห้ง เก็บชีงงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ไว้ในกล่องที่บรรจุสารดูดความชื้น (desiccators) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 1 การประกอบชีงงานเข้ากับตัวจับชีงงานเทพลอนเพื่อใช้ในการแอนโนไดส์

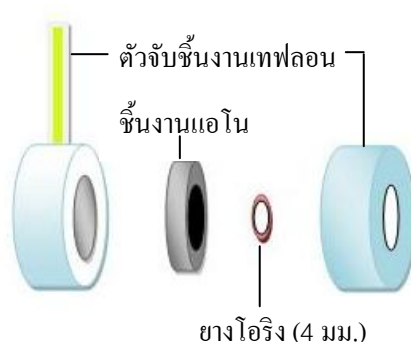


รูปที่ 2 การแอโนไดส์โลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมในสารละลายกรดฟอสฟอริก
ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์

3.2.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาอัตราการกัดกร่อนเป็นหลัก โดยสุ่มเลือกชิ้นงานทั้ง 5 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ชิ้น สำหรับทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิออสไตน์ไดนามิกส์โพลาไรเซชัน โดยดัดแปลงจากมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล ISO 10993-15:2000 นำชิ้นงานใส่ในตัวจับชิ้นงานเทฟลอน และใช้ยางโอริง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงด้านในเท่ากับ 4 มิลลิเมตร (รูปที่3) เพื่อกำหนดพื้นที่ผิวของชิ้นงาน และจำกัดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้สัมผัสชิ้นงานเฉพาะบริเวณที่ได้รับการแอโนไดส์เท่านั้น นำตัวจับชิ้นงานเทฟลอนไปต่อกับขั้วไฟฟ้าในเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนสองชั้นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ใช้สารละลายน้ำเกลือ ความเข้มข้น 0.9% เป็นสารละลายทดสอบ โดยมีแท่งแพลทินัมเป็นอิเล็กโทรดช่วย (auxiliary electrode) และคาโลเมลอิเล็กโทรดชนิดอิ่มตัว (saturated calomel electrode, SCE) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ฟังก์ชันไนโตรเจนในสารละลายที่อัตรา 50 ลบ.ซม./นาที เป็นเวลา 30 นาที และฟอนอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบ เริ่มทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential) เป็นเวลา 60 นาที แล้วป้อนศักย์ไฟฟ้าตั้งต้น เท่ากับ -500 มิลลิโวลต์ และศักย์ไฟฟ้าสิ้นสุดที่ 2000 มิลลิโวลต์จากค่า

ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที บนที่กและวิเคราะห์เส้นโพลาริเซชัน ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โนวา รุ่น 1.7 (Metrohm Autolab, Utrecht, Netherlands) โดยนำค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนมาเปรียบเทียบกันทางสถิติ



รูปที่ 3 การประกอบชิ้นงานในตัวจับชิ้นงานเทพลอนเพื่อใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีโพเทนชิออสแตติกโพลาริเซชัน

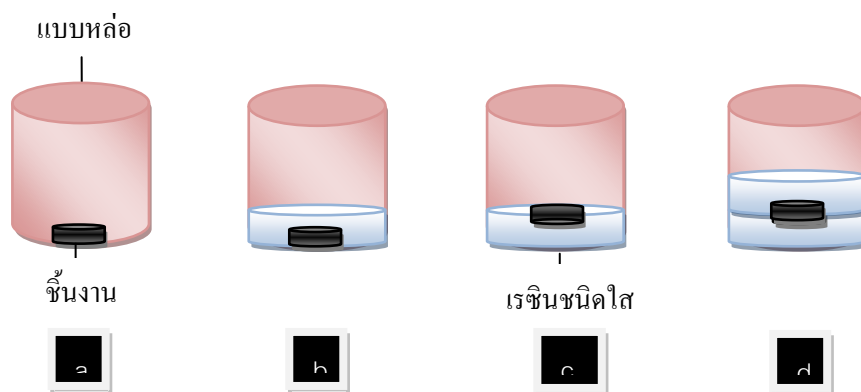
3.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นออกไซด์

สุ่มเลือกชิ้นทดสอบในทุกกลุ่ม กลุ่มละ 1 ชิ้น เพื่อมาตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, JSM-6480LV, JEOL, Eching Munchen, Germany) กำลังขยาย 2,000 เท่า ที่ 15 กิโลโวลต์

3.2.5 การตรวจสอบความหนาของชั้นออกไซด์

สุ่มเลือกชิ้นงานในทุกกลุ่ม กลุ่มละ 1 ชิ้น เตรียมชิ้นงานโดยวางชิ้นงานลงบนแบบหล่อในแนวราบ (ดังแสดงในรูปที่ 4a) เทเรซินชนิดใสทับบนชิ้นงาน (แสดงในรูปที่ 4b) จากนั้นนำแบบหล่อไปวางในเครื่องอัดความดันรอจนวัสดุแข็งตัว นำเรซินที่มีชิ้นงานติดอยู่มาใส่ในแบบหล่ออีกครั้งหนึ่ง โดยให้ด้านที่มีชิ้นงานอยู่หงายขึ้น (แสดงในรูปที่ 4c) จากนั้นเทเรซินทับ (แสดงในรูปที่ 4d) แล้วนำแบบหล่อไปวางในเครื่องอัดความดันอีกครั้งหนึ่ง รอจนวัสดุแข็งตัว นำชิ้นงานมาตัดตามแนวขวาง ชัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 400 จนถึงเบอร์ 2000 แล้วนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, JSM-6480LV,

JEOL, Eching Munchen, Germany) เพื่อวัดความหนาของชั้นออกไซด์ โดยชิ้นงานในแต่ละกลุ่มจะถูกบันทึกภาพของชั้นออกไซด์ 3 ตำแหน่ง นำภาพที่ได้ทั้ง 3 ภาพมาวัดความหนาของชิ้นงานด้วยเวอร์เนีย คาลิเปอร์ กำหนดตำแหน่งในการวัด 10 ตำแหน่งในแต่ละภาพด้วยวิธีการสุ่ม โดยการกำหนดระยะห่างในแต่ละตำแหน่งให้เท่ากันจนครบทั้ง 10 ตำแหน่ง



รูปที่ 4 วิธีการหล่อชิ้นงานด้วยเรซินชนิดใสเพื่อนำมาตรวจสอบความหนาของชั้นออกไซด์

3.2.6 การตรวจสอบความขรุขระของพื้นผิว

สุ่มเลือกชิ้นงานในทุกกลุ่ม กลุ่มละ 1 ชิ้น เพื่อตรวจสอบความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งโพรบ (Scanning probe microscopy, SPM; Nanoscope IV, Veeco, California, United State) โดยใช้แท่งซิลิกา (Si probe) แบบกึ่งสัมผัส (tapping mode) ในการวัดความขรุขระจะเลือกตำแหน่งที่ใช้ทดสอบด้วยวิธีการสุ่ม

3.2.7 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของชั้นออกไซด์

สุ่มเลือกชิ้นงานในทุกกลุ่ม กลุ่มละ 1 ชิ้น นำมาวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างผลึกของชั้นออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer, D8 Discover, BRUKER-axs, Germany) ด้วยเทคนิคเกรซิงอินซิดินซ์ดิฟแฟรคชัน (Grazing incidence diffraction, GID) ที่มุมคงที่ 3 องศา ระยะตั้งแต่ 20-80 องศา

3.3 การเก็บและการวิเคราะห์ข้อมูล

- สังเกตโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- วัดความหนาของชั้นออกไซด์จากรูปภาพ โดยในแต่ละกลุ่มใช้รูปภาพ 3 รูป กำหนดตำแหน่งในการวัดรูปละ 10 ตำแหน่ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
- บันทึกความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นาโนสโคป รุ่นที่ 4
- สังเกตลักษณะของกราฟที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน
- สังเกตพฤติกรรมการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบการกัดกร่อน
- คำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์โนวา รุ่นที่ 1.7 จากนั้นนำอัตราการกัดกร่อนที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS รุ่นที่ 17 โดยการตรวจสอบการกระจายของข้อมูลก่อนว่ามีการกระจายปกติหรือไม่ โดยทดสอบโคลโมโกรอฟสเมอนอฟ (Kolmogorov-Smirnov test) และตรวจสอบความแปรปรวนของประชากรแต่ละกลุ่มว่าเท่ากันหรือไม่ โดยทดสอบความเหมือนของค่าความแปรปรวน (Test of homogeneity of variance) ด้วยวิธีของลีวีเน (Levene statistic)
 - ถ้าประชากรมีการแจกแจงปกติและประชากรทุกกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากันจึงใช้สถิติแบบพาราเมตริกซ์ ชนิดวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบเชฟเฟ (Scheffe Multiple comparisons) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)
 - ถ้าประชากรมีการแจกแจงปกติและประชากรในแต่ละกลุ่มมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ใช้สถิติแบบบราวน์ ฟอริไซท์ (Brown-Forsythe) และวิเคราะห์ความ

แตกต่างกันระหว่างกลุ่มด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน (Tamhane multiple comparisons) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$)

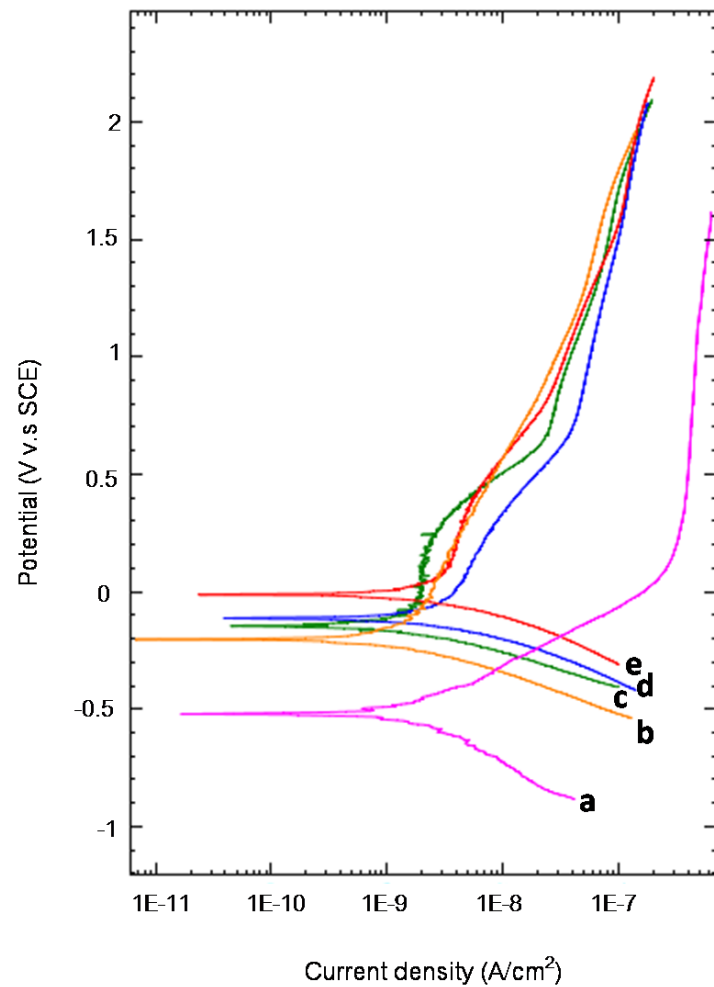
- ถ้าประชากรไม่มีการแจกแจงปกติใช้สถิติแบบไร้พารามิเตอร์ (Nonparametric statistics) โดยวิเคราะห์แบบทางเดียวใช้การทดสอบครัสคาลวาลิส (Kruskal-Wallis test) วิเคราะห์แบบสองทางใช้วิธีเฟรดแมน (Friedman test)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอโนไดส์ และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว

เมื่อพิจารณาจากเส้นโพลาริเซชันในรูปที่ 5 และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ในตารางที่ 2 จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธีการของบราวน์ ฟอไซท์ (Brown-Forsythe) และเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน (Tamhane multiple comparison) พบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในกลุ่มที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวมีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการแอโนไดส์ทั้ง 4 กลุ่ม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) และพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนกับค่าความต่างศักย์ที่ให้กับระบบ โดยมีแนวโน้มว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการแอโนไดส์มีค่าสูงขึ้น แต่ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) ในทุกกลุ่ม กล่าวคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์และ 150 โวลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 150 โวลต์ และ 200 โวลต์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > .05$) และชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($P < .05$) นอกจากนี้ยังพบลักษณะพาสซีฟเกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวทุกกลุ่มด้วย แต่ลักษณะดังกล่าวไม่ชัดเจนเมื่อพิจารณาจากชิ้นงานในกลุ่มควบคุม

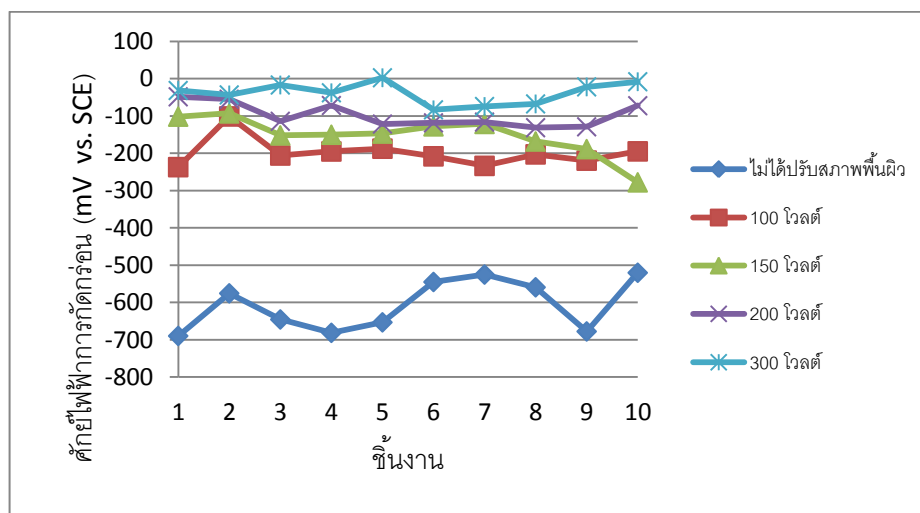


รูปที่ 5 เส้นโพลาริเซชันของ a) ตัวแทนชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ และตัวแทนชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ b) 100 โวลต์ c) 150 โวลต์ d) 200 โวลต์ และ e) 300 โวลต์

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

กลุ่ม	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (V vs. SCE)
ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว	-600.85 (63.70) ^A
100 โวลต์	-198.72 (37.92) ^B
150 โวลต์	-147.81 (40.50) ^{B,C}
200 โวลต์	-97.87 (32.07) ^C
300 โวลต์	-38.28 (29.01) ^D

หมายเหตุ V vs. SCE หมายถึง หน่วยโวลต์เมื่อวัดเทียบกับคาโลเมลลิติกโทรดชนิดอิ่มตัว
ตัวอักษรยกเดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$)



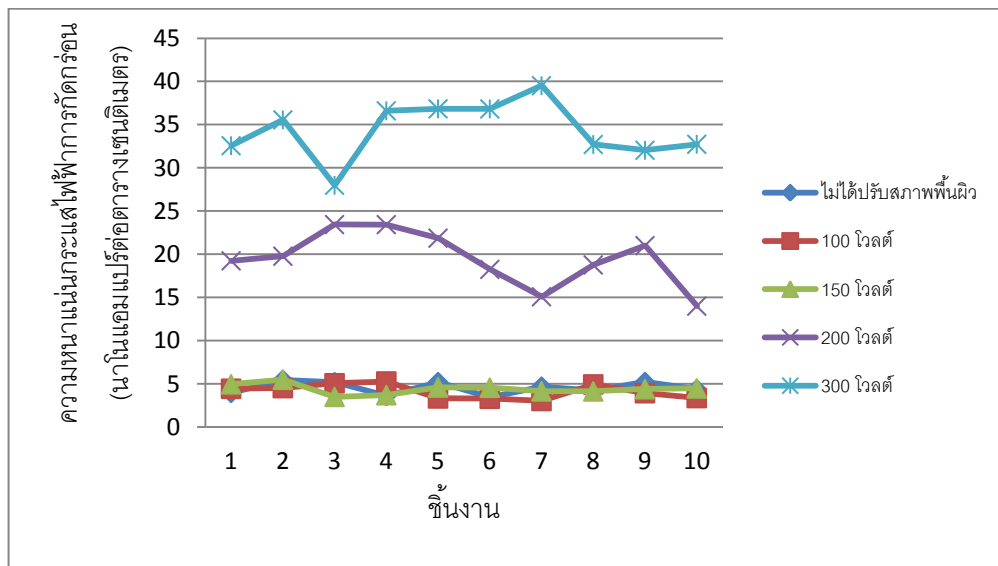
รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ค่าต่าง ๆ

ในส่วนของการวัดการกัดกร่อน เมื่อวิเคราะห์โดยใช้สถิติแบบบราวน์ ฟอไซท์และเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในกลุ่มของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการแอนโอดส์ที่ความต่างศักย์ 100 โวลต์ และ 150 โวลต์ ส่วนกลุ่มที่ปรับสภาพผิวด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ มีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าทั้ง 3 กลุ่มที่กล่าวมาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการแอนโอดส์ที่ความต่างศักย์ 300 โวลต์มีอัตราการกัดกร่อนสูงสุดโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากทุกกลุ่มที่เหลือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานแสดง รูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานแสดงในตารางที่ 3

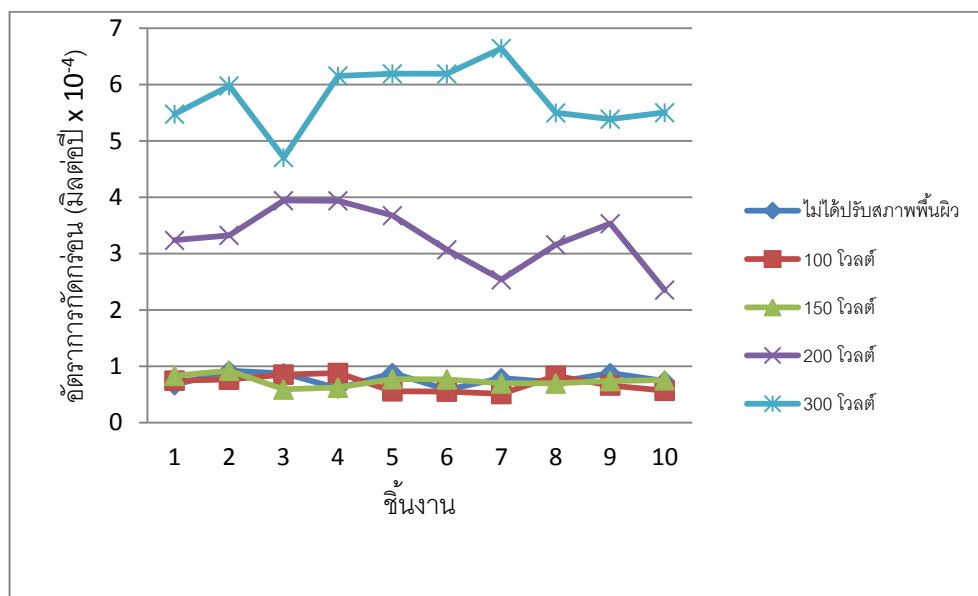
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน

กลุ่ม	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (นาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	อัตราการกัดกร่อน (มิลต่อปี)
ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว	4.54 (0.71)	7.64×10^{-5} (1.21×10^{-5}) ^A
100 โวลต์	4.12 (0.83)	6.92×10^{-5} (1.40×10^{-5}) ^A
150 โวลต์	4.39 (0.57)	7.39×10^{-5} (9.71×10^{-6}) ^A
200 โวลต์	19.49 (3.17)	3.27×10^{-4} (5.34×10^{-5}) ^B
300 โวลต์	34.34 (3.32)	5.77×10^{-4} (5.59×10^{-5}) ^C

หมายเหตุ ตัวอักษรยกเดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > .05$)



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความต่างศักย์ต่าง ๆ



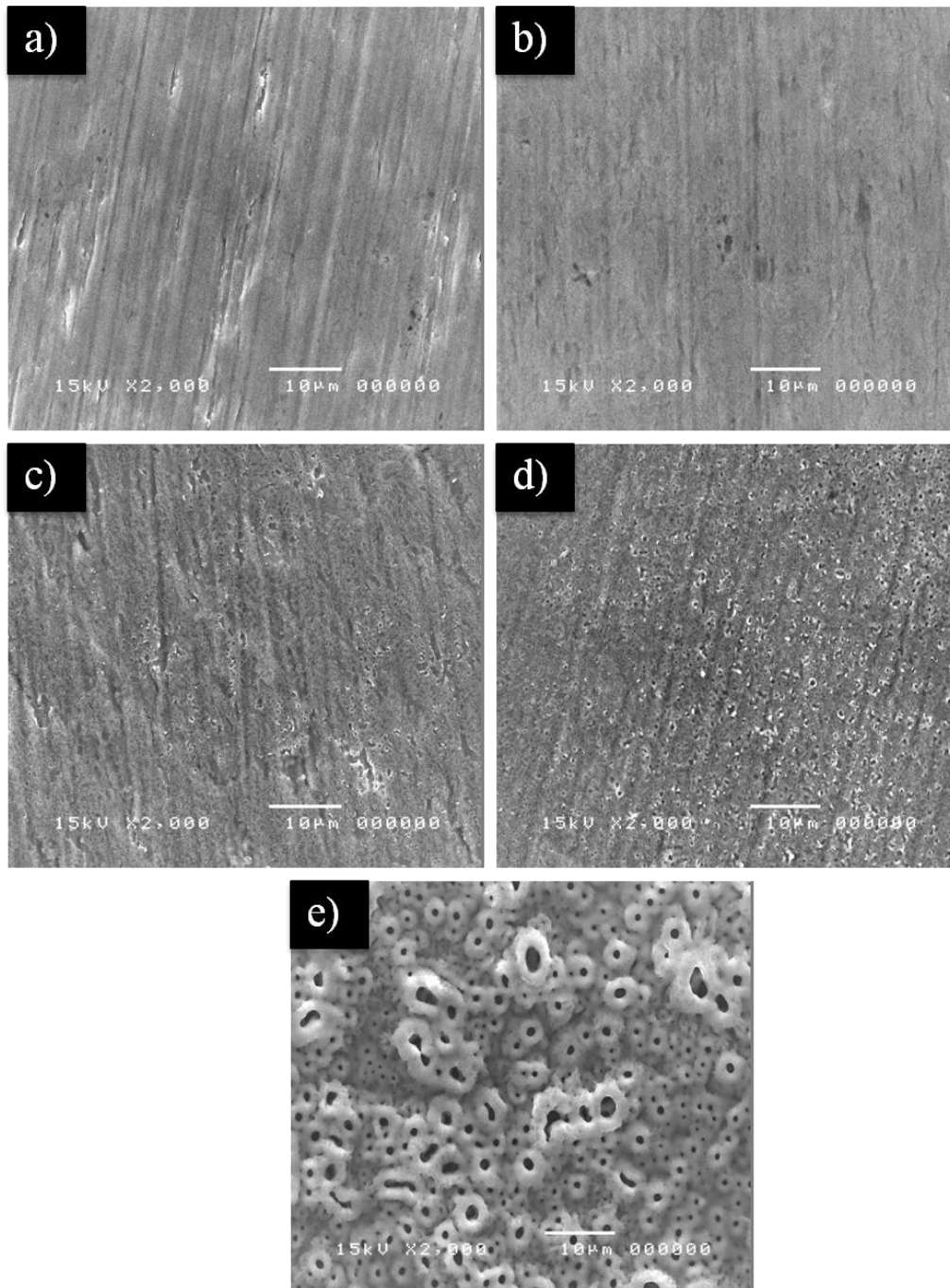
รูปที่ 8 กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความต่างศักย์ต่าง ๆ

4.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว

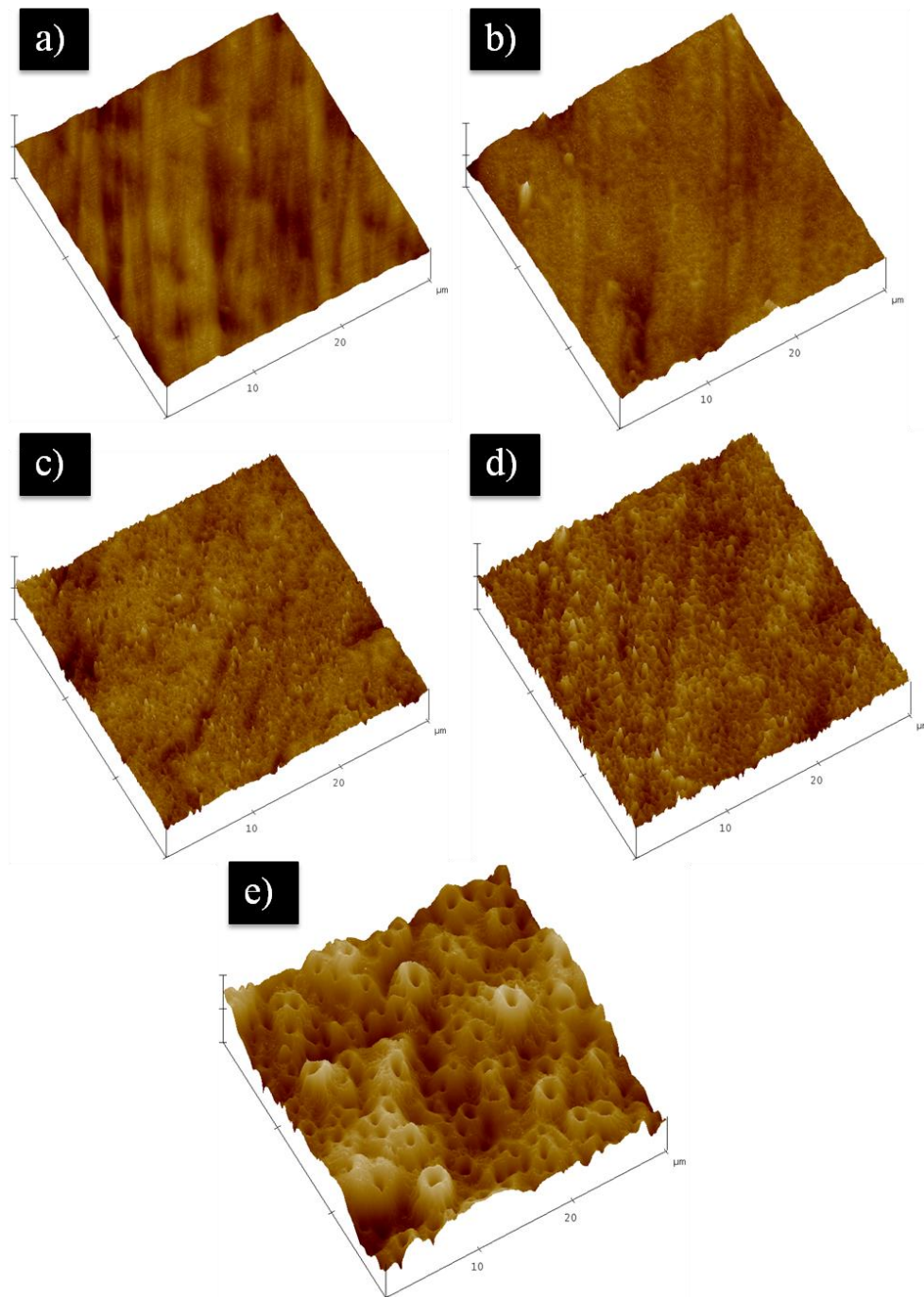
ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 9 ภาพที่ได้จากพื้นผิวของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการแอโนไดส์ จะเห็นแนวขีดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 100 โวลต์ จะเริ่มมีรูพรุนขนาดเล็กปรากฏขึ้นบนพื้นผิวในบางบริเวณของชิ้นงาน โดยยังคงเห็นแนวการขีดอยู่บนพื้นผิว ลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุนดังกล่าวเกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 150 โวลต์และ 200 โวลต์เช่นเดียวกัน แต่จำนวนรูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ค่าความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ได้รับการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 300 โวลต์ มีลักษณะแตกต่างจากชิ้นงานอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ มีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งพื้นผิว โดยไม่มีแนวการขีดหลงเหลืออยู่

ภาพสามมิติจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งโพรบของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ภาพที่ปรากฏมีความสอดคล้องกับภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในส่วนของขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานที่นำมาวัด ชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 300 โวลต์มีรูพรุนที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.3 ถึง 4.3 ไมโครเมตร ส่วนรูพรุนบนชิ้นงานที่ได้รับการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 100 โวลต์ 150 โวลต์และ 200 โวลต์ มีขนาดใกล้เคียงกัน คือมีค่า 0.7 ไมโครเมตร



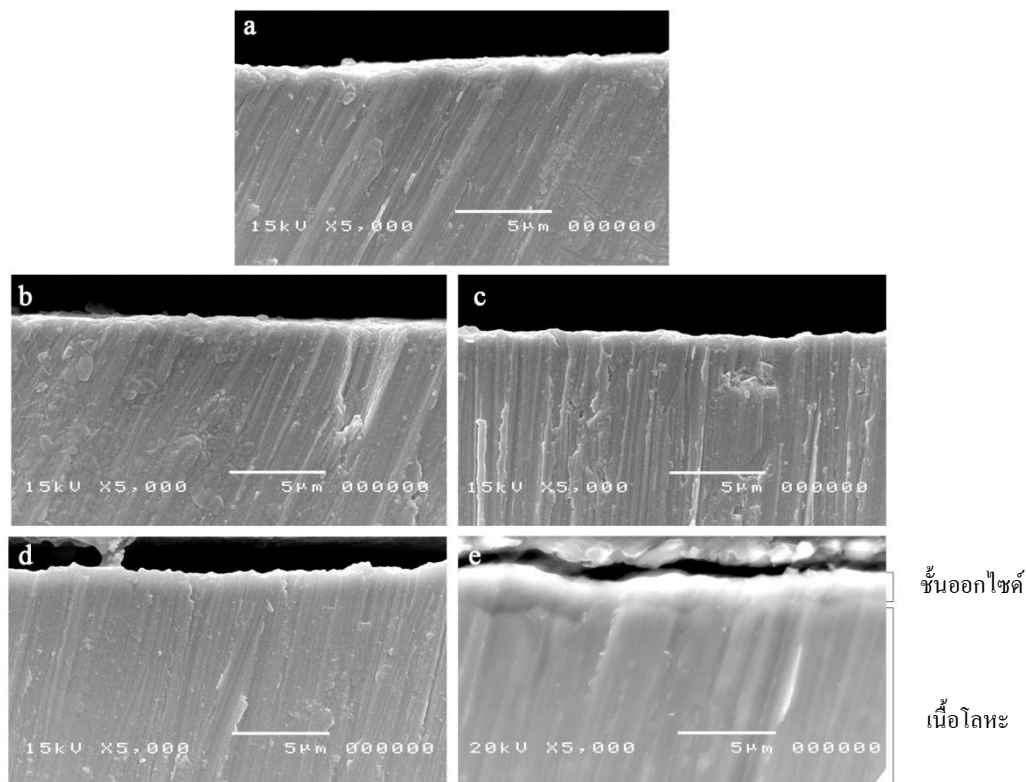
รูปที่ 9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2,000 เท่าของ a) ชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ด้วยความต่างศักย์ b) 100 โวลต์ c) 150 โวลต์ d) 200 โวลต์ และ e) 300 โวลต์



รูปที่ 10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดสแกนนิ่งโพรบของ a) ชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว และชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ด้วยความต่างศักย์ b) 100 โวลต์ c) 150 โวลต์ d) 200 โวลต์ และ e) 300 โวลต์

4.3 ความหนาของชั้นออกไซด์ของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว

ความหนาของชั้นออกไซด์ได้จากการวัดจากภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 11 จากในรูปภาพ ไม่สามารถระบุความหนาที่ชัดเจนของชั้นออกไซด์บนชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว รวมถึงชิ้นงานที่ผ่านปรับสภาพพื้นผิวด้วยการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 100 โวลต์ และ 150 โวลต์ ส่วนชิ้นงานที่ได้รับการแอโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ มีความหนาของชั้นออกไซด์โดยเฉลี่ยในชิ้นงานที่นำมาวัดเท่ากับ 1.14 ไมโครเมตร และ 2.30 ไมโครเมตรตามลำดับ



รูปที่ 11 ภาพตัดขวางของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่าของ a) ชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ และชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ b) 100 โวลต์ c) 150 โวลต์ d) 200 โวลต์ และ e) 300 โวลต์

4.4 ความขรุขระพื้นผิวของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว

จากค่าความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงานจากตารางที่ 4 จะพบว่า ความขรุขระของพื้นผิวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีค่าน้อยที่สุด และการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีแอนโนไดส์ทำให้ได้พื้นผิวที่มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น โดยมีแนวโน้มว่าความขรุขระพื้นผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความต่างศักย์ในการแอนโนไดส์เพิ่มมากขึ้น แต่ความขรุขระของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 100 โวลต์และ 150 โวลต์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

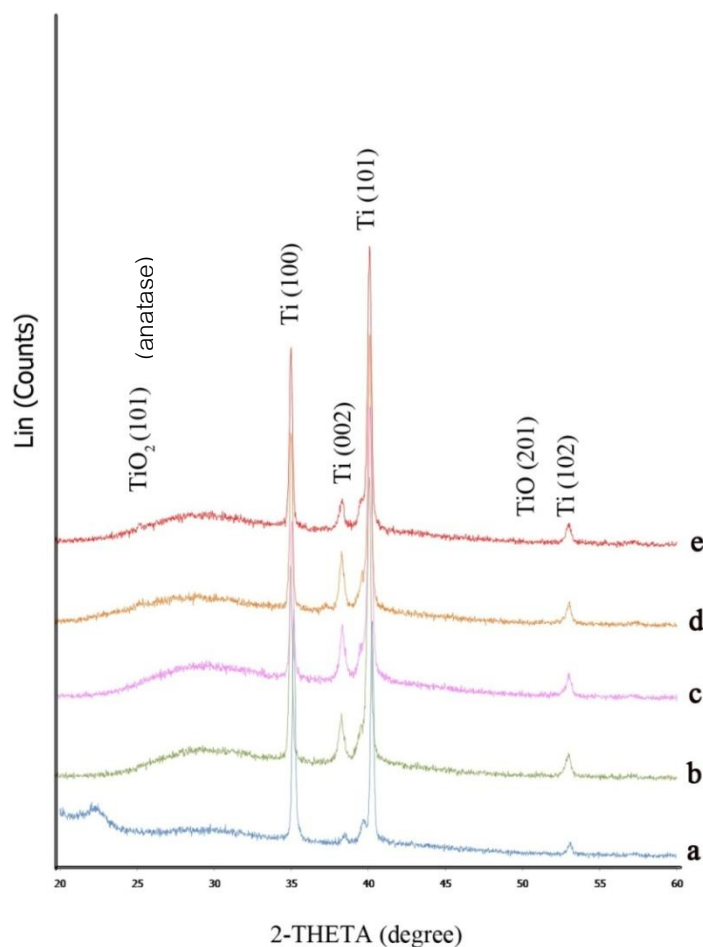
ตารางที่ 4 ความขรุขระพื้นผิวของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีแอนโนไดส์

ชิ้นงาน	ความขรุขระพื้นผิว (Ra) (ไมโครเมตร)
ไม่ปรับสภาพพื้นผิว	38.517
100 โวลต์	44.113
150 โวลต์	45.350
200 โวลต์	60.456
300 โวลต์	172.410

หมายเหตุ ค่าที่ได้วัดจากการสุ่มชิ้นงานกลุ่มละ 1 ชิ้น

4.5 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์และโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว

ลักษณะกราฟที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันแสดงในรูปที่ 12 ไม่พบโครงสร้างผลึกออกไซด์ของไทเทเนียมบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์ และ 150 โวลต์ พบโครงสร้างผลึกเป็นแบบไทเทเนียมออกไซด์ (TiO) บนพื้นผิว สำหรับชิ้นงานที่ได้รับการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ พบว่ามีโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ในรูปแบบอะนาทาสเกิดขึ้น แต่มีความเข้มข้น ซึ่งแสดงว่ามีอะนาทาสในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 12 ลักษณะกราฟจากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ a) ชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ และ ชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ b) 100 โวลต์ c) 150 โวลต์ d) 200 โวลต์ และ e) 300 โวลต์

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 อภิปรายวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เลือกใช้ความต่างศักย์ในการแอนโนไดส์ในช่วง 100 ถึง 300 โวลต์ จากแนวคิดที่อ้างอิงมาจากผลการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งพบว่า วัสดุปลูกฝังที่มีรูพรุนขนาด 1 ถึง 2 ไมโครเมตรมีแรงยึดกับกระดูกที่ดี [12] โดยกระดูกที่สร้างขึ้นในรูพรุนเป็นตัวยึดกับผิวของวัสดุปลูกฝัง เป็นการเพิ่มการยึดติดทางกล (mechanical bonding) Itala และคณะพบว่า รูพรุนบนพื้นผิวของโลหะไทเทเนียมที่มีขนาด 50 ไมโครเมตร มีขนาดเพียงพอที่กระดูกสามารถเจริญเข้าไปภายในได้ เช่นเดียวกับรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า [53] จากงานวิจัยที่ผ่านมา ชิ้นงานที่มีความเป็นรูพรุนมักจะเกิดจากการแอนโนไดส์ภายใต้ความต่างศักย์สูง [42, 54] ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดตั้งแต่ 0.57 ไมโครเมตร จนถึง 104 ไมโครเมตร [12, 14, 48-51] แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขที่ใช้ในการแอนโนไดส์ Chen และคณะพบว่า โลหะไทเทเนียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์ จะได้พื้นผิวที่มีลักษณะคล้ายเคลือบรากฟัน และเซลล์สร้างกระดูกยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี ส่วนชิ้นงานที่แอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ ได้ชั้นออกไซด์หนาและเป็นรูพรุน [42] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความต่างศักย์ตั้งแต่ 100 โวลต์ และใช้ความต่างศักย์สูงสุดที่ 300 โวลต์ตามข้อจำกัดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง

การวัดการกัดกร่อนในการศึกษานี้ ได้ดัดแปลงวิธีการวัดจากมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล ISO 10993-15:2000 โดยมีการตัดเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าออก เนื่องจากมีสัญญาณไฟฟ้ารบกวนต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์ในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งทำให้ได้เส้นโพลาริเซชันไม่เรียบและมีคลื่นรบกวน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิก่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้ารบกวนระบบได้เช่นเดียวกัน ซึ่งในกรณีนี้สามารถแก้ไขปัญหาได้โดยการเว้นระยะห่างระหว่างเซลล์อิเล็กทรอนิกส์และอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ในการทดลองนี้เว้นระยะห่างประมาณ 2 เมตร ในการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ตามมาตรฐานกำหนดให้วัดไม่ต่ำกว่า

2 ชั่วโมง แต่จากการศึกษานำร่องพบว่าศักยภาพไฟฟ้าวงจรเปิดเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จึงลดเวลาในการวัดความต่างศักย์ลงเหลือเพียง 1 ชั่วโมง

เนื่องด้วยการวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการกักความร้อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6 อะลูมิเนียม-4 วานาเดียมที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก ส่วนการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของชั้นออกไซด์ใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนิงโพรบ รวมถึงวิธีการหาความหนาของชั้นออกไซด์ในการทดลองนี้ เป็นการทดสอบแบบทำลายชิ้นงาน ซึ่งทำให้พื้นผิวของชั้นออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลง จึงไม่สามารถนำมาทดสอบด้วยวิธีอื่น ๆ ต่อได้ ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองในการตรวจสอบอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากการทดสอบการกักความร้อน โดยการใช้ชิ้นงานกลุ่มละ 1 ชิ้นในการตรวจสอบแต่ละวิธี ผลการศึกษาที่ได้จึงไม่ใช่ข้อสรุปสำหรับกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด และอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยการทำซ้ำในปริมาณที่มากพอ เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนในประเด็นดังกล่าวอีกครั้งหนึ่ง

ในการตรวจสอบความหนาของชั้นออกไซด์ แม้ว่าจะลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจนสามารถสังเกตเห็นรอยต่อระหว่างชั้นออกไซด์บนชิ้นงานตัดขวางเมื่อมองด้วยตาเปล่า และเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุโดยปริมาณ (energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS) พบว่า ในบริเวณขอบซึ่งเป็นบริเวณที่ผ่านการแอนโนไดส์มีปริมาณออกซิเจนมากกว่าเนื้อโลหะซึ่งอยู่ลึกลงไป แต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์ และ 150 โวลต์ รอยต่อดังกล่าวไม่ชัดเจนเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือในการวัด เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวไม่สามารถตรวจสอบความหนาของออกไซด์ที่มีความหนาอยู่ในช่วงนาโนเมตรได้ และผู้วิจัยไม่สามารถหาเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวัดสูงมาทดแทนเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงไม่นำชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 100 และ 150 โวลต์ รวมถึงชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวมาวัดความหนาของชั้นออกไซด์

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

ความสำเร็จในการรักษาด้วยวิธีการฝังสิ่งปลูกฝังในกระดูก เพื่อทดแทนอวัยวะที่สูญเสียไปนั้น นอกจากการเกิดกระดูกเชื่อมประสานระหว่างกระดูกกับรากเทียมแล้ว การที่ร่างกายไม่ปฏิเสธวัสดุที่ใส่มาแทนที่นั้นและวัสดุดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ ก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน อย่างไรก็ตามรากเทียมนั้นต้องฝังในร่างกายเป็นเวลานาน และต้องสัมผัสกับสารต่าง ๆ ในร่างกายซึ่งจัดว่ามีฤทธิ์ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้เป็นอย่างมาก โลหะสามารถสร้างสารประกอบกับโปรตีนในร่างกาย ซึ่งอาจก่อให้เกิดอาการแพ้หรืออาการไม่พึงประสงค์อื่น ๆ ขึ้นได้ [2] นอกจากนี้การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของวัสดุปลูกฝังนั้นด้วย [55] ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีความพยายามในการพัฒนาพื้นผิวเพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนให้กับวัสดุที่นำมาใช้ทำวัสดุปลูกฝัง มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการแอนโนไดส์ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนให้กับโลหะไทเทเนียม [9, 10, 12] และโลหะผสมไทเทเนียม [11, 14, 17] โดยการศึกษาเหล่านี้ได้หาความสัมพันธ์ของลักษณะชั้นออกไซด์กับความต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว แต่โดยทั่วไปแล้วมีแนวโน้มว่าชั้นออกไซด์ที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้พื้นผิวมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้น [11] อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสก็มีผลต่อความกัดกร่อนของพื้นผิวที่ผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายที่มีแคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบเช่นเดียวกัน โดยพบว่าพื้นผิวที่มีแคลเซียมปริมาณมากจะมีอัตราการละลายสูง [28] นอกจากนี้รูปร่างพื้นผิวของชั้นออกไซด์ (surface morphology) [12] โครงสร้างผลึก (crystalline structure) [17] องค์ประกอบของชั้นออกไซด์ (composition) [18] และความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองของรูพรุน (self-healing pores) [14, 56] ก็ถูกพิจารณาว่ามีความเกี่ยวข้องกับการเกิดการกัดกร่อนเช่นกัน อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่นอนว่าปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้โลหะและโลหะผสมที่ผ่านการแอนโนไดส์มีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานทุกกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์ ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานโลหะผสมที่ผ่านการแอนโนไดส์จะเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการแอนโนไดส์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการแอนโนไดส์สามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนให้กับโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมได้เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่น ๆ [11, 12, 14] โดยชิ้นงานที่

แอนโดไซด์ที่มีความต่างศักย์ 300 โวลต์ มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกักต้อนสูงที่สุดน่าจะเกี่ยวข้องกับชั้นออกไซด์ที่มีความหนามากที่สุด ซึ่งชั้นออกไซด์นี้จะเป็นตัวกั้นไม่ให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเนื้อโลหะด้านใน อย่างไรก็ตาม Song และคณะพบว่าโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมที่ผ่านการแอนโดไซด์มีความต้านทานการกักต้อนด้อยลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม [18] โดยผู้ทำวิจัยกลุ่มนี้ให้เหตุผลว่าพบวานาเดียมออกไซด์บนพื้นผิวซึ่งออกไซด์ชนิดนี้มีการนำไฟฟ้า (electric conductivity) สูงและมีการละลาย (solubility) สูง แต่ในงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยไม่พบวานาเดียมออกไซด์บนพื้นผิวเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าไม่มีวานาเดียมออกไซด์เกิดขึ้น บนพื้นผิว หรืออาจจะมีในปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบจากเครื่องมือดังกล่าว

ในแง่ของรูปร่างพื้นผิวของชั้นออกไซด์ การเกิดรูพรุนบนชิ้นงานจากการแอนโดไซด์ด้วยความต่างศักย์สูงทำให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวสูงขึ้น [12] ลักษณะรูพรุนเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการเกิดการกักต้อน การมีรูพรุนที่มีขนาดพอเหมาะที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถซึมเข้าไปและขังอยู่ในรูพรุนนั้นจะส่งเสริมให้เกิดการกักต้อนที่รุนแรงขึ้นบนพื้นผิว แม้ว่าไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจะมีความต้านทานการกักต้อนที่ดีเยี่ยมจากการมีชั้นออกไซด์ปกคลุมและสามารถทนต่อการเกิดการกักต้อนเฉพาะที่ได้ดี แต่หากโลหะนี้ต้องอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีประจุของคลอไรด์และไฮโดรเจนในปริมาณสูง ชั้นออกไซด์จะถูกทำลายได้เช่นกัน [23] โดยรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะไม่มีกรไหลเวียนของประจุอย่างอิสระ ทำให้อัตราการกักต้อนสูงกว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่ [57] การละลายของโลหะจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในรูพรุน ทำให้มีประจุบวกของโลหะเกิดขึ้นมากเกินไปในบริเวณนี้ ซึ่งจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุลบ เช่น ประจุคลอไรด์เข้ามาในรูพรุน ประจุลบของคลอไรด์จะรวมกับประจุบวกของโลหะเกิดเป็นคลอไรด์ของโลหะ ซึ่งสารประกอบดังกล่าวจะแตกตัวในน้ำกลายเป็นกรดอิสระภายในรูพรุน ซึ่งจะเร่งให้โลหะและโลหะผสมนั้นมีอัตราการกักต้อนรุนแรงขึ้น ในการทดลองนี้ ชิ้นงานที่ผ่านการแอนโดไซด์ที่มีความต่างศักย์ 300 โวลต์ มีอัตราการกักต้อนสูงที่สุด และแตกต่างจากกลุ่มอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ น่าจะเกิดจากลักษณะที่มีรูพรุนจำนวนมากทั่วทั้งพื้นผิว และมีความขรุขระของพื้นผิวสูง จากการแอนโดไซด์ด้วยความต่างศักย์สูงกว่าค่าขีดจำกัดการสลายตัว (dielectric breakdown limit) ของชั้นออกไซด์ ซึ่งรูพรุนดังกล่าวน่าจะมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึมเข้าไปในรู

พจนแต่เล็กเกินไปที่จะทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลายอย่างอิสระในรูปพจน จึงส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่อย่างรุนแรง ซึ่งจะเห็นได้ว่าแม่โลหะผสมที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ 300 โวลต์ จะเกิดการกัดกร่อนได้ยาก แต่เมื่อใดที่เกิดการกัดกร่อนขึ้นแล้ว จะเกิดการละลายอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานในกลุ่มอื่น ๆ ในการทดลองนี้มีการให้ก๊าซไนโตรเจนสู่ระบบทดสอบ เพื่อให้ก๊าซออกซิเจนเหลือน้อยที่สุด แต่หากกระบวนการนี้เกิดขึ้นภายในรูปร่าง ซึ่งจัดว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนได้ดี โดยประกอบด้วยน้ำ ออกซิเจน และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ จึงมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ในลักษณะดังกล่าวได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัสดุที่มีลักษณะดังกล่าวอยู่ภายในเนื้อเยื่อที่มีการอักเสบหรือภาวะน้ำตาลในเลือดสูง ซึ่งมีรายงานว่าการกัดกร่อนของรากฟันเทียมในการจำลองสภาวะดังกล่าวมีความรุนแรงกว่าในสภาวะปกติ [58]

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ใช้ในการแอนโนไดส์กับความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียมมีจำนวนไม่มากนัก [11, 17] ทั้งหมดเป็นงานวิจัยเชิงพรรณนา (descriptive studies) และทำที่ความต่างศักย์ไม่สูงกว่า 50 โวลต์ งานวิจัยของ Karambasksh และคณะเปรียบเทียบชิ้นงานที่แอนโนไดส์เซชันด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ และ 50 โวลต์ โดยพบว่าชิ้นงาน 50 โวลต์ มีอัตราการกัดกร่อนน้อยกว่า เนื่องจากมีความหนามากกว่า [11] ส่วนงานวิจัยของ Paul และ Yadav ทำการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 7 โวลต์ 13 โวลต์ 16 โวลต์ และ 25 โวลต์ ไม่พบแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ให้สู่ระบบกับอัตราการกัดกร่อน โดยชิ้นงาน 7 โวลต์มีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุดและชิ้นงาน 16 โวลต์มีอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุด [17] ในงานวิจัยนี้พบแนวโน้มว่า อัตราการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความต่างศักย์ที่ให้สู่ระบบมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความต่างศักย์สูงในการทดลองนี้ทำให้เกิดพื้นผิวที่มีรูปพจนขนาดพอเหมาะที่จะส่งเสริมให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ในการศึกษาที่ผ่านมา ยังคงไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจากการแอนโนไดส์กับการกัดกร่อนได้ การศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า การเกิดโครงสร้างผลึกจะส่งเสริมให้เกิดให้เกิดปฏิกิริยาแอโนดิกได้ เนื่องจากขณะที่เกิดผลึกจะมีแรงอัดภายใน (internal compressive stress) ทำให้เกิดการเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron conductive

path) ผ่านชั้นออกไซด์ [59] ซึ่งทำให้โลหะเกิดการละลายได้ง่าย อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า โลหะที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่มีชั้นออกไซด์ประกอบด้วยโครงสร้างผลึกเป็น Ti_2O_3 มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเมื่อเทียบกับพื้นผิวที่ผ่านการแอนโนไดส์ที่มีออกไซด์ของไทเทเนียมในรูปแบบออสตรา โดย Narayanan และ Seshadri ได้สรุปว่า ลักษณะโครงสร้างผลึกมีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นออกไซด์น้อยกว่ารูปร่างของพื้นผิวและการมีรูพรุนที่มีขนาดพอเหมาะที่จะซ่อมแซมตัวเองได้ [14] หรือการทดลองของ Paul และ Yadav ที่สรุปผลการทดลองว่า ชั้นออกไซด์ที่ผ่านการแอนโนไดส์มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ซึ่งเป็นผลมาจากพบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในรูปแบบอะนาเทสบนพื้นผิว [17] ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ มีการตรวจพบไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบอะนาเทสเหมือนกัน แต่กลับมีอัตราการกัดกร่อนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลการทดลองนี้ยังไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ของลักษณะโครงสร้างผลึกกับความต้านทานการกัดกร่อนชั้นออกไซด์ได้ และต้องมีการศึกษาในประเด็นนี้เพิ่มเติมต่อไป

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่า การแอนโนไดส์โดยใช้ความต่างศักย์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ในการทดลองนี้ มีอัตราการกัดกร่อนสูง แต่เนื่องจากพื้นผิวที่เกิดจากการแอนโนไดส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับเปลี่ยนสภาพแวดล้อมที่ใช้ในกระบวนการ ดังนั้นการหาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการแอนโนไดส์มีความจำเป็นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีทั้งในแง่สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้า รวมถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพด้วย

5.3 สรุปผลการทดลอง

1. การปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการแอนโนไดส์ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนให้กับโลหะผสมไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม เมื่อพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานที่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว
2. ความต่างศักย์ที่ใช้ในการแอนโนไดส์มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน โดยเมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการแอนโนไดส์เพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มตัวอย่างทุกกลุ่ม ส่วนอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่

ผ่านการแอนโดสด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์ในการทดลองนี้มีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าชิ้นงานในกลุ่มอื่น ๆ ที่ผ่านการแอนโดสด้วยความต่างศักย์ต่ำกว่า

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การหาความหนาของชั้นออกไซด์จากการประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการทดลองนี้ไม่เห็นชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโดสด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์และ 150 โวลต์ รวมถึงชั้นออกไซด์ของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว ซึ่งอาจจะใช้วิธีอื่น ๆ ในการตรวจสอบความหนาร่วมด้วย เช่น การวัดความยาวคลื่นที่มีความเข้มมากที่สุดที่ชั้นออกไซด์ดูดซับไว้ด้วยเครื่องวัดแสง (spectrophotometry) และนำมาคำนวณหาความหนา เป็นต้น

2. จากผลการศึกษาในครั้งนี้รวมถึงงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ลักษณะพื้นผิวของชั้นออกไซด์มีผลอย่างมากต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุนส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะ รวมถึงการยึดเกาะของเซลล์ และการเจริญของกระดูกเข้าไปภายในรูพรุนนั้น ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับความสำเร็จในการรักษาด้วยการฝังวัสดุปลูกฝัง จากการทดลองในครั้งนี้ แม้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการแอนโดสด้วยความต่างศักย์สูงจะเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่า แต่เมื่อใดที่เกิดการกัดกร่อนขึ้นแล้ว การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับโลหะที่ได้รับการปรับสภาพผิวด้วยความต่างศักย์ต่ำกว่า ดังนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อปรับเงื่อนไขที่ใช้ในการแอนโดสให้เหมาะสม ทั้งในแง่ของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน รวมถึงการทดลองเพื่อประเมินการตอบสนองของเซลล์ และการยึดเกาะกับกระดูกในห้องปฏิบัติการและในสัตว์ทดลอง เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุที่นำมาใช้ทำวัสดุปลูกฝังต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] Misch, C.E. Contemporary implant dentistry. Missouri: Mosby Elsevier, 2008.
- [2] Singh, R. and Dahotre, N. Corrosion degradation and prevention by surface modification of biometallic materials. J Mater Sci Mater Med. 18 (2007): 725-751.
- [3] Power, J.M. and Sakaguchi, R.L. Craig' s restorative dental materials. Missouri: Mosby, 2006.
- [4] Manivasagum, G., Dhinasekaran, D. and Rajamanickam, A. Biomedical implants: corrosion and its prevention - a review. Rec Pat Corros Sci. 2 (2010): 40-54.
- [5] Thompson, G.J. and Puleo, D.A. Ti-6Al-4V ion solution inhibition of osteogenic cell phenotype as a function of differentiation timecourse in vitro. Biomaterials. 17 (1996): 1949-1954.
- [6] Goodman, S.B., Davidson, J.A., Song, Y., Martial, N. and Fornasier, V.L. Histomorphological reaction of bone to different concentrations of phagocytosable particles of high density polyethylene and Ti-6Al-4V alloy in vivo. Biomaterials. 17 (1996): 1943-1947.
- [7] Bianco, P.D., Ducheyne, P. and Cuckler, J.M. Titanium serum and urine levels in rabbits with a titanium implant in the absence of wear. Biomaterials. 17 (1996): 1937-1942.
- [8] Kim, K.H. and Narayanan, R. Electrochemical surface modification of titanium in dentistry. Dent Mater J. 28 (2009): 20-36.
- [9] Karambakhsh, A., Afshar, A., Ghahramani, S. and Malekinejad, P. Pure Commercial Titanium Color Anodizing and Corrosion Resistance. J Mater Eng Perform. 20 (2011): 1690-1696.
- [10] Afshar, A. and Veziã, M.R. Anodizing of titanium in NaOH solution and its corrosion resistance in PBS physiologic solution. Scientia Iranica. 10 (2003): 361-366.

- [11] Karambakhsh, A., Afshar, A. and Malekinejad, P. Corrosion Resistance and Color Properties of Anodized Ti-6Al-4V. *J Mater Eng Perform.* 21 (2011): 121-127.
- [12] Park, I.S., Woo, T.G., Lee, M.H., Ahn, S.G., Park, M.S., Bae, T.S. and Seol, K.W. Effects of anodizing voltage on the anodized and hydrothermally treated titanium surface. *Met Mater Int.* 12 (2006): 505-511.
- [13] Lewandowska, M., Pisarek, M., Ronziatowski, K., Gradzka-Dahlke, M., Janik-Czachor, M. and Kurzydowski, K.J. Nanoscale characterization of anodic oxide films on Ti-6Al-4V alloy. *Thin Solid Films.* 515 (2007): 6460-6464.
- [14] Narayanan, R. and Seshadri, S.K. Phosphoric acid anodization of Ti-6Al-4V - Structural and corrosion aspects. *Corros Sci.* 49 (2007): 542-558.
- [15] Kim, S.E., Lim, J.H., Lee, S.C., Nam, S.C., Kang, H.G. and Choi, J. Anodically nanostructured titanium oxides for implant applications. *Electrochim Acta.* 53 (2008): 4846-4851.
- [16] อุมารินทร์ พงศ์โสภิตานันท์, อีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล และธนาภรณ์ โกราษฏร์. กรณีศึกษาในงานวิเคราะห์ปัญหาด้านโลหะวิทยาจากอุตสาหกรรม เล่ม 2. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550.
- [17] Paul, S. and Yadav, K. Corrosion Behavior of Surface-Treated Implant Ti-6Al-4V by Electrochemical Polarization and Impedance Studies. *J Mater Eng Perform.* 20 (2011): 422-435.
- [18] Song, H.J., Kim, M.K., Jung, G.C., Vang, M.S. and Park, Y.J. The effects of spark anodizing treatment of pure titanium metals and titanium alloys on corrosion characteristics. *Surf Coat Tech.* 201 (2007): 8738-8745.
- [19] Renner, M.A. The versatile use of titanium in implant prosthodontics. *QDI.* 24 (2001): 188-197.

- [20] La Guehenec, L., Soueidan, A., Layrolle, P. and Amouriq, Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. Dental Materials. 23 (2007): 844-854.
- [21] เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์. วัสดุศาสตร์มูลฐาน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [22] Schmalz, G. and Arenholt-Bindslev, D. Biocompatibility of dental material. Leipzig: Springer, 2009.
- [23] Fontana, M.G. Corrosion Engineering. New York: McGraw Hill, 1986.
- [24] Jones, A. Titanium from Mining to Biomaterials. Fyshwick: national capital printing, 1991.
- [25] Lim, Y.J., Oshida, Y., Andres, C.J. and Barco, M.T. Surface characterizations of variously treated titanium materials. Int J Oral Maxillofac Implants. 16 (2001). 333-342.
- [26] Brunette, D.M., Tengvall, P., Textor, M. and Thomsen, P. Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications. Germany: Springer, 2001.
- [27] Cho, L.R., Kim, D.G., Kim, J.H., Byon, E.S., Jeong, Y.S. and Park, C.J. Bone response of Mg ion-implanted clinical implants with the plasma source ion implantation method. Clin Oral Impl Res. 21 (2010): 848-856.
- [28] Narayanan, R. and Seshadri, S.K. Point defect model and corrosion of anodic oxide coatings on Ti-6Al-4V. Corros Sci. 50 (2008): 1521-1529.
- [29] Park, J.M., Koak, J.Y., Jang, J.H., Han, C.K., Kim, S.K. and Heo, S.J. Osseointegration of anodized titanium implants coated with fibroblast growth factor-fibronectin (FGF-FN) fusion protein. Int J Oral Maxillofac Implants. 21 (2006): 859-866.

- [30] Branzoi, I.V., Iordoc, M. and Branzoi, F. Surface characterization and corrosion behavior of Ti based alloys in fetal bovine serum. U.P.B. Sci. Bull.,series B 7(2009): 131-140.
- [31] Oshida, Y. Bioscience and bioengineering of titanium material. Oxford: Elsevier, 2007.
- [32] Adya, N., Alam, M., Ravindranath, T., Mubeen, A. and Saluja, B. Corrosion in titanium dental implants: literature review. J Indian Prosth Soc. 5 (2005): 126-131.
- [33] Mudali, U.K., Sridhar, T.M. and Raj, B. Corrosion of bio implants. Sadhana. 28 (2003): 601-637.
- [34] Anusavice, K.J. Phillips' science of dental materials. Saunders, 2003.
- [35] Jacobs, J.J., Gilbert, J.L. and Urban, R.M. Current concepts review - corrosion of metal orthopaedic Implants. J Bone Joint Surg Am. 80 (1998): 268-282.
- [36] Lui, X., Chu, P.K. and Ding, C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. Mater Sci Eng. 47 (2004): 49-121.
- [37] Yerokhin, A.L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A. and Dowey, S.J. plasma electrolysis for surface engineering. Surf Coat Tech. 122 (1999): 73-93.
- [38] Oh, H.J., Lee, J.H., Jeong, Y.S., Kim, Y.J. and Chi, C.S. Microstructural characterization of biomedical titanium oxide film fabricated by electrochemical method. Surf Coat Tech. 198 (2005): 247-252.
- [39] Krasicka-Cydzik, E. Gel-like layer development during formation of thin anodic films on titanium in phosphoric acid solutions. Corros Sci. 46 (2002): 2487-2502.
- [40] Shi, X.L., Wang, Q.L., Wang, F.S. and Ge, S. Effect of electrolytic concentration on properties of micro-arc film on Ti6Al4V alloy. Min Sci Tech. 19 (2009): 220-224.

- [41] บุศรินทร์ ล็อกตระกูล. การเกิดแคลเซียมฟอสเฟตบนพื้นผิวคอมเมอร์เชียลไทเทเนียมที่ผ่านการอะโนไดซ์ในสารละลายสึมูเลตเต้ดบอดีฟลูอิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [42] Chen, Z.X., Takao, Y., Wang, W.X., Matsubara, T. and Ren, L.M. Surface characteristics and in vitro biocompatibility of titanium anodized in a phosphoric acid solution at different voltages. *Biomed Mater* [Online]. 4 (2009): 065003.
- [43] Li, L.H., Kong, Y.M., Kim, H.W., Kim, Y.W., Kim, H.E., Heo, S.J. and Koak. Y.J.. Improved biological performance of Ti implants due to surface modification by micro-arc oxidation. *Biomaterials*. 25 (2004): 2867-2875.
- [44] Song, H.J., park, S.H., S.H., J. and park, Y.J. Surface characteristics and bioactivity of oxide films formed by anodic spark oxidation on titanium in different electrolyte. *J Mater Process Tech*. 209 (2009): 864-870.
- [45] Lee, Y.M., Lee, E.J., Yee, S.T., Kim, B.I., Choe, S.E. and Cho, H.W. In vivo and in vitro response to electrochemically anodized Ti-6Al-4V alloy. *J Mater Sci Mater Med*. 19 (2008): 1851-1859.
- [46] Das, K, Bose, S. and Bandyopadhyay, A. Surface modifications and cell-materials interactions with anodized Ti. *Acta Biomaterialia*. 3 (2007): 573-585.
- [47] Park, K.H., Heo, S.J., Koak, J.Y., Kim, S.K., Lee, J.B. and Kim, S.H. Osseointegration of anodized titanium implants under different current voltages:a rabbit study. *J Oral Rehab*. 34 (2007): 517-527.
- [48] Sul, Y.T., Johansson, C., Roser, K. and Albrektsson, T. Qualitative and quantitative observations of bone tissue reactions to anodised implants. *Biomaterials*. 23 (2002): 1809-1917.

- [49] Sul, Y.T., Johansson, C., Byon, E. and Albrektsson, T. The bone response of oxidized bioactive and non-bioactive titanium implants. Biomaterials. 26 (2005): 6720-6730.
- [50] Sul, Y.T. The significance of the surface properties of oxidized titanium to the bone response: special emphasis on potential biochemical bonding of oxidized titanium implant. Biomaterials. 24 (2003): 3893-3907.
- [51] Sul, Y.T., Johansson, C., Wennerberg, A., Cho, L.R., Chang, B.S. and Albrektsson, T. Optimum surface properties of oxidized implants for reinforcement of osseointegration: surface chemistry, oxide thickness, porosity, roughness and crystal structure. Int J Oral Maxillofac Implants. 20 (2005): 349-359.
- [52] Messer, R.L., Seta, F., Mickaloins, J., Brown, Y., Lewis, J.B. and Wataha, J.C. Corrosion of phosphate-enriched titanium oxide surface dental implants (TiUnite) under in vitro inflammatory and hyperglycemic conditions J Biomed Mater Res part B: Appl biomater. 92 (2010): 525-534.
- [53] Itala, A.I., Yianen, H.O., Ekholm, C., Karlson, K.H. and Aro, H.T. Pore diameter of more than 100 micron is not requisite for bone ingrowth in rabbit. J Biomed Mater Res. 58 (2001): 679-683.
- [54] Kuromoto, N.K., Simao, R.A. and Soares, G.A. Titanium oxide films produced on commercially pure titanium by anodic oxidation with different voltage. Materials Characterization. 58 (2007): 114-121.
- [55] Okazaki, Y. and Gotoh, E. Comparison of metal release from various metallic biomaterials in vitro. Biomaterials. 26 (2005): 11-21.
- [56] Narayanan, R., Mukherjee, P. and Seshadri, S. Synthesis, corrosion and wear of anodic oxide coatings on Ti-6Al-4V. J Mater Sci Mater Med. 18 (2007): 779-786.
- [57] Seah, K.H.W., Thampuran, R. and Teoh, S.H. The influence of pore morphology on corrosion. Corros Sci. 40 (1998): 547-556.

- [58] Messer, R.L., Takacs, G., Mickalonis, J., Brown, Y., Lewis, J.B. and Wataha, J.C. Corrosion of machined titanium dental implants under inflammatory condition. J Biomed Mater Res B Appl Biomater. 88 (2009): 474-481.
- [59] Milosev, I., Metikos-Hukovic, M. and Strehblow, H.H. Passive film on orthopaedic TiAlV alloy formed in physiological solution investigated by X-ray photoelectron spectroscopy. Biomaterials. 21 (2000): 2103-2113.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวและชิ้นงานที่ได้รับการ
แอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ

ชิ้นงาน	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (V vs. SCE)				
	กลุ่มไม่ผ่าน การปรับ สภาพผิว	กลุ่ม 100 โวลต์	กลุ่ม 150 โวลต์	กลุ่ม 200 โวลต์	กลุ่ม 300 โวลต์
1	-689.570	-237.070	-101.690	-48.501	-31.601
2	-575.370	-101.240	-93.032	-55.179	-43.436
3	-645.410	-205.890	-151.990	-114.260	-16.949
4	-618.220	-195.120	-150.230	-71.890	-37.733
5	-653.090	-187.600	-147.340	-121.610	2.543
6	-544.930	-208.160	-127.720	-118.350	-83.395
7	-525.030	-233.740	-121.220	-116.270	-74.520
8	-559.190	-202.920	-168.300	-131.310	-67.618
9	-677.530	-219.640	-188.750	-128.950	-22.028
10	-520.220	-194.840	-227.860	-72.418	-8.141
ค่าเฉลี่ย	-600.856	-198.622	-147.813	-97.873	-38.287
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	63.708	37.928	40.504	32.071	29.011
สัมประสิทธิ์ ของความ แปรผัน	-10.602	-19.095	-27.402	-32.767	-75.772

ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักก่อนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวและ
ชิ้นงานที่ได้รับการแอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักก่อน				
	(นาโนแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)				
	กลุ่มไม่ผ่าน การปรับ สภาพผิว	กลุ่ม 100 โวลต์	กลุ่ม 150 โวลต์	กลุ่ม 200 โวลต์	กลุ่ม 300 โวลต์
1	3.971	4.44	4.962	19.251	32.575
2	5.460	4.523	5.488	19.78	35.562
3	5.197	5.075	3.503	23.445	27.994
4	3.620	5.282	3.701	23.435	36.610
5	5.210	3.324	4.595	21.870	36.842
6	3.464	3.288	4.57	18.255	36.830
7	4.687	3.031	4.142	15.090	39.518
8	4.240	4.943	4.137	18.775	32.713
9	5.218	3.932	4.398	21.013	32.045
10	4.375	3.372	4.484	14.003	32.736
ค่าเฉลี่ย	4.544	4.121	4.398	19.491	34.343
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.719	0.837	0.577	3.176	3.329
สัมประสิทธิ์ ของความแปรผัน	15.823	20.310	13.119	16.294	9.693

ตารางที่ 7 อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวและชิ้นงานที่ได้รับการ
แอนโนไดส์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ

ชิ้นงาน	อัตราการกัดกร่อน (มิล/ปี)				
	กลุ่มไม่ผ่าน การปรับ สภาพผิว	กลุ่ม100 โวลต์	กลุ่ม150 โวลต์	กลุ่ม 200 โวลต์	กลุ่ม 300 โวลต์
1	6.67×10^{-5}	7.46×10^{-5}	8.34×10^{-5}	3.23×10^{-4}	5.47×10^{-4}
2	9.19×10^{-5}	7.64×10^{-5}	9.22×10^{-5}	3.32×10^{-4}	5.97×10^{-4}
3	8.73×10^{-5}	8.53×10^{-5}	5.88×10^{-5}	3.94×10^{-4}	4.70×10^{-4}
4	6.09×10^{-5}	8.81×10^{-5}	6.22×10^{-5}	3.93×10^{-4}	6.15×10^{-4}
5	8.79×10^{-5}	5.58×10^{-5}	7.72×10^{-5}	3.67×10^{-4}	6.19×10^{-4}
6	5.82×10^{-5}	5.52×10^{-5}	7.68×10^{-5}	3.06×10^{-4}	6.19×10^{-4}
7	7.87×10^{-5}	5.09×10^{-5}	6.96×10^{-5}	2.53×10^{-4}	6.64×10^{-4}
8	7.12×10^{-5}	8.31×10^{-5}	6.95×10^{-5}	3.15×10^{-4}	5.49×10^{-4}
9	8.77×10^{-5}	6.61×10^{-5}	7.39×10^{-5}	3.53×10^{-4}	5.38×10^{-4}
10	7.35×10^{-5}	5.66×10^{-5}	7.53×10^{-5}	2.35×10^{-4}	5.55×10^{-4}
ค่าเฉลี่ย	7.64×10^{-5}	6.92×10^{-5}	7.39×10^{-5}	3.27×10^{-4}	5.77×10^{-4}
ส่วนเบี่ยงเบน					
มาตรฐาน	1.21×10^{-5}	1.40×10^{-5}	9.71×10^{-6}	5.34×10^{-5}	5.59×10^{-5}
สัมประสิทธิ์					
ของความ					
แปรผัน	14.659	20.231	13.139	16.330	9.688

หมายเหตุ อัตราการกัดกร่อนได้จากการคำนวณโดย

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเท่ากับ 4.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ค่ามวลสมมูลเท่ากับ 22.72 กรัมต่อโมล

พื้นที่ผิวของชิ้นงานเท่ากับ 0.125 ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการ
ปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบ
โคลโมโกรอฟสเมอนอฟ

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Specimens		Ecor	
control	N	10	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-600.85600
		Std. Deviation	63.708616
	Most Extreme Differences	Absolute	.158
		Positive	.158
		Negative	-.155
	Kolmogorov-Smirnov Z	.499	
Asymp. Sig. (2-tailed)	.965		
100 V	N	10	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-198.62200
		Std. Deviation	37.928082
	Most Extreme Differences	Absolute	.286
		Positive	.286
		Negative	-.155
	Kolmogorov-Smirnov Z	.903	
Asymp. Sig. (2-tailed)	.388		
150 V	N	10	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-147.81320
		Std. Deviation	40.504863
	Most Extreme Differences	Absolute	.159
		Positive	.095
		Negative	-.159
	Kolmogorov-Smirnov Z	.503	
Asymp. Sig. (2-tailed)	.962		

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการ
ปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการศึกษาทดสอบแบบ
โคลโมโกรอฟสเมอนอฟ (ต่อ)

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Specimens		Ecor
200 V	N	10
	Normal Parameters ^{a,b}	
	Mean	-97.87380
	Std. Deviation	32.071092
	Most Extreme Differences	
	Absolute	.295
	Positive	.295
	Negative	-.186
	Kolmogorov-Smirnov Z	.934
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.348
300 V	N	10
	Normal Parameters ^{a,b}	
	Mean	-38.28780
	Std. Deviation	29.011352
	Most Extreme Differences	
	Absolute	.144
	Positive	.144
	Negative	-.130
	Kolmogorov-Smirnov Z	.455
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.986

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ของข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกักตัวของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบลิวันของอัตราการกักตอน

Test of Homogeneity of Variances

Ecor

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
3.793	4	45	.010

ตารางที่ 10 การทดสอบข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกักตัวของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์แบบบราวน์ ฟอริชท์

Robust Tests of Equality of Means

Ecor

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	275.581	4	31.752	.000

a. Asymptotically F distributed.

ตารางที่ 11 การทดสอบข้อมูลศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและ
ที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน

Multiple Comparisons

Ecor

Tamhane

(I) specimens	(J) specimens	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
control	100 V	-402.234000	23.446380	.000	-479.30732	-325.16068
	150 V	-453.042800	23.873483	.000	-531.00826	-375.07734
	200 V	-502.982200	22.555138	.000	-578.46115	-427.50325
	300 V	-562.568200	22.136952	.000	-637.44943	-487.68697
100 V	control	402.234000	23.446380	.000	325.16068	479.30732
	150 V	-50.808800	17.547602	.093	-106.75032	5.13272
	200 V	-100.748200	15.706987	.000	-150.98106	-50.51534
	300 V	-160.334200	15.100324	.000	-208.89751	-111.77089
150 V	control	453.042800	23.873483	.000	375.07734	531.00826
	100 V	50.808800	17.547602	.093	-5.13272	106.75032
	200 V	-49.939400	16.337683	.069	-102.36770	2.48890
	300 V	-109.525400	15.755324	.000	-160.43955	-58.61125
200 V	control	502.982200	22.555138	.000	427.50325	578.46115
	100 V	100.748200	15.706987	.000	50.51534	150.98106
	150 V	49.939400	16.337683	.069	-2.48890	102.36770
	300 V	-59.586000	13.675575	.004	-103.21725	-15.95475
300 V	control	562.568200	22.136952	.000	487.68697	637.44943
	100 V	160.334200	15.100324	.000	111.77089	208.89751
	150 V	109.525400	15.755324	.000	58.61125	160.43955
	200 V	59.586000	13.675575	.004	15.95475	103.21725

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบโคลโมโกรอฟสเมอนอฟ

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Specimens		rate	
control	N	10	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.0000764572
		Std. Deviation	.00001212210
	Most Extreme Differences	Absolute	.216
		Positive	.101
		Negative	-.216
	Kolmogorov-Smirnov Z	.684	
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.738	
100 V	N	10	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.0000692620
		Std. Deviation	.00001400295
	Most Extreme Differences	Absolute	.215
		Positive	.215
		Negative	-.150
	Kolmogorov-Smirnov Z	.681	
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.743	
150 V	N	10	
	Normal Parameters ^{a,b}	Mean	.0000739505
		Std. Deviation	.00000971199
	Most Extreme Differences	Absolute	.166
		Positive	.166
		Negative	-.126
	Kolmogorov-Smirnov Z	.526	
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.945	

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบโคลโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (ต่อ)

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Specimens	rate
200 V N	10
Normal Parameters ^{a,b}	
Mean	.0003276940
Std. Deviation	.00005340799
Most Extreme Differences	
Absolute	.149
Positive	.117
Negative	-.149
Kolmogorov-Smirnov Z	.470
Asymp. Sig. (2-tailed)	.980
300 V N	10
Normal Parameters ^{a,b}	
Mean	.0005773660
Std. Deviation	.00005597999
Most Extreme Differences	
Absolute	.185
Positive	.185
Negative	-.152
Kolmogorov-Smirnov Z	.586
Asymp. Sig. (2-tailed)	.883

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variance) ของข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการทดสอบแบบลิวันของอัตราการกัดกร่อน

Test of Homogeneity of Variances

Rate

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
8.938	4	45	.000

ตารางที่ 14 การทดสอบข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์แบบบราวน์ ฟอริชท์

Robust Tests of Equality of Means

Rate

	Statistic ^a	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	396.673	4	20.601	.000

a. Asymptotically F distributed.

ตารางที่ 15 การทดสอบข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและ
ที่ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน

Multiple Comparisons

Rate

Tamhane

(I) specimens	(J) specimens	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
control	100 V	7.19520000000E-6	5.8568591 4842E-6	.932	-.0000115176	.0000259080
	150 V	2.50670000000E-6	4.9119034 4877E-6	1.000	-.0000132450	.0000182584
	200 V	-2.51236800000E-4	1.7318658 1459E-5	.000	-.0003131465	-.0001893271
	300 V	-5.00908800000E-4	1.8112716 2812E-5	.000	-.0005658022	-.0004360154
100 V	control	-7.19520000000E-6	5.8568591 4842E-6	.932	-.0000259080	.0000115176
	150 V	-4.68850000000E-6	5.3889273 2730E-6	.994	-.0000221491	.0000127721
	200 V	-2.58432000000E-4	1.7459944 5080E-5	.000	-.0003203514	-.0001965126
	300 V	-5.08104000000E-4	1.8247855 5818E-5	.000	-.0005729984	-.0004432096
150 V	control	-2.50670000000E-6	4.9119034 4877E-6	1.000	-.0000182584	.0000132450
	100 V	4.68850000000E-6	5.3889273 2730E-6	.994	-.0000127721	.0000221491
	200 V	-2.53743500000E-4	1.7166061 2439E-5	.000	-.0003156749	-.0001918121
	300 V	-5.03415500000E-4	1.7966864 7721E-5	.000	-.0005683365	-.0004384945

ตารางที่ 15 การทดสอบข้อมูลอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและที่
ได้รับการแอนโนไดส์ในกลุ่มต่าง ๆ ด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน (ต่อ)

Multiple Comparisons

Rate

Tamhane

(I) specimens	(J) specimens	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
200 V	control	2.51236800000E-4	1.731865814 59E-5	.000	.0001893271	.0003131465
	100 V	2.58432000000E-4	1.745994450 80E-5	.000	.0001965126	.0003203514
	150 V	2.53743500000E-4	1.716606124 39E-5	.000	.0001918121	.0003156749
	300 V	-2.49672000000E-4	2.446665801 09E-5	.000	-.0003276491	-.0001716949
300 V	control	5.00908800000E-4	1.811271628 12E-5	.000	.0004360154	.0005658022
	100 V	5.08104000000E-4	1.824785558 18E-5	.000	.0004432096	.0005729984
	150 V	5.03415500000E-4	1.796686477 21E-5	.000	.0004384945	.0005683365
	200 V	2.49672000000E-4	2.446665801 09E-5	.000	.0001716949	.0003276491

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

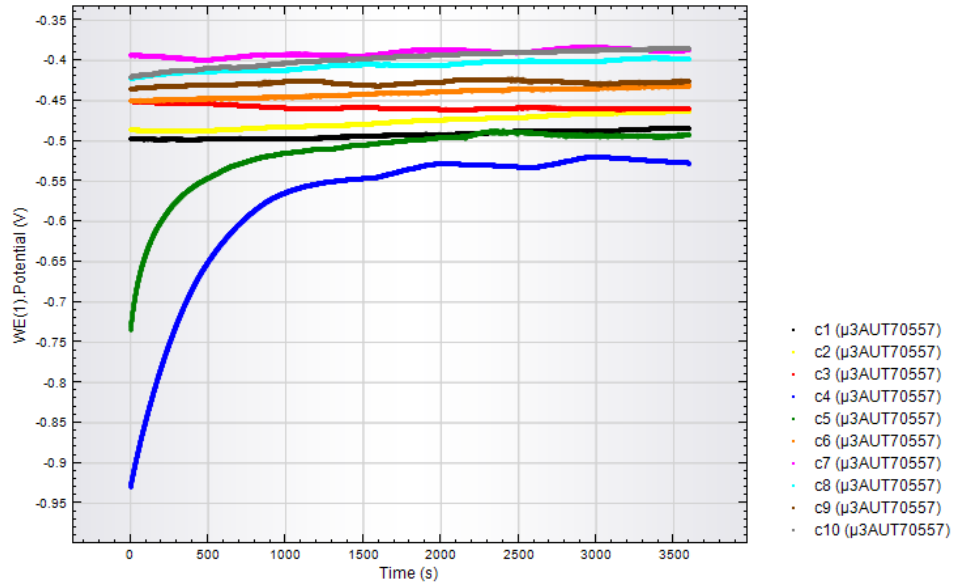
ตารางที่ 16 ความหนาของชั้นออกไซด์ที่วัดได้ในตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วย
ความต่างศักย์ 200 โวลต์ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตำแหน่ง	ความหนาของชั้นออกไซด์ (ไมโครเมตร)		
	รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
1	1.19	1.22	1.12
2	1.69	1.35	1.12
3	1.20	1.29	1.38
4	1.37	0.90	1.29
5	1.24	1.29	0.95
6	0.08	1.04	1.08
7	1.07	1.27	1.45
8	1.32	1.09	1.48
9	0.81	1.24	0.96
10	1.04	1.04	0.91
ค่าเฉลี่ย	1.101	1.173	1.174
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.426	0.145	0.212
สัมประสิทธิ์ของความ แปรผัน	38.692	12.361	18.057

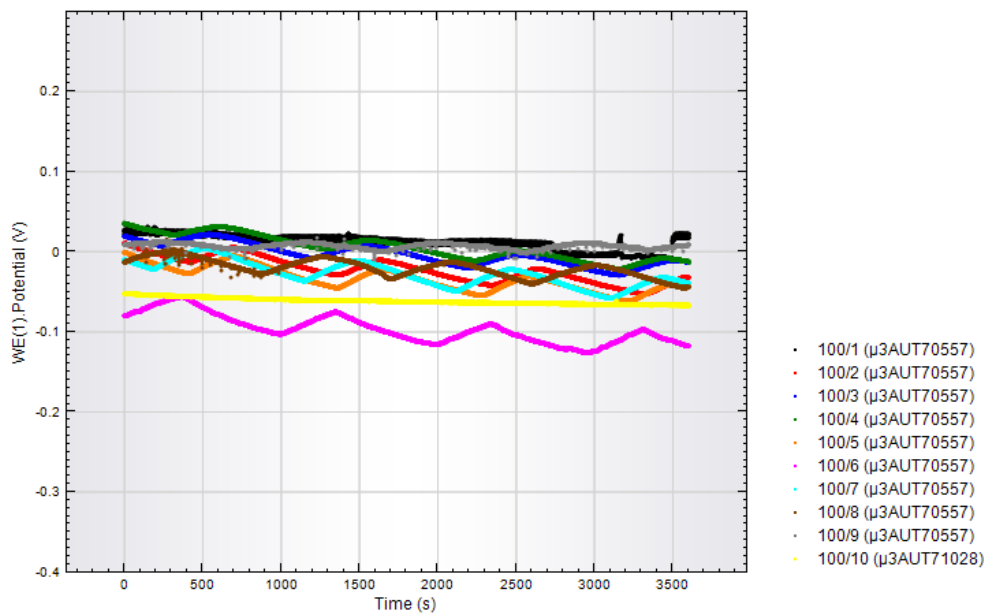
ตารางที่ 17 ความหนาของชั้นออกไซด์ที่วัดได้ในตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ด้วย
ความต่างศักย์ 300 โวลต์ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตำแหน่ง	ความหนาของชั้นออกไซด์ (ไมโครเมตร)		
	รูปที่ 1	รูปที่ 2	รูปที่ 3
1	0.80	1.77	1.37
2	1.93	1.12	1.61
3	3.22	1.61	2.90
4	2.90	1.45	2.75
5	3.02	2.25	3.30
6	1.69	1.80	2.25
7	2.74	2.66	2.17
8	2.82	2.98	2.58
9	1.95	2.41	2.74
10	2.58	2.74	2.98
ค่าเฉลี่ย	2.365	2.079	2.465
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.753	0.617	0.613
สัมประสิทธิ์ของความ แปรผัน	31.839	29.677	24.868

ภาคผนวก ข

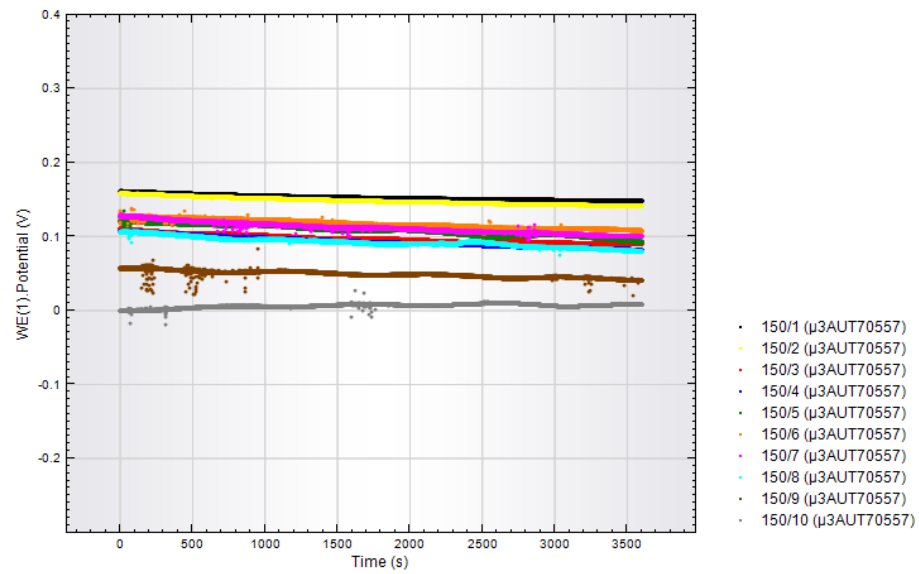


รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดเทียบกับเวลาของชิ้นงานในกลุ่มควบคุม

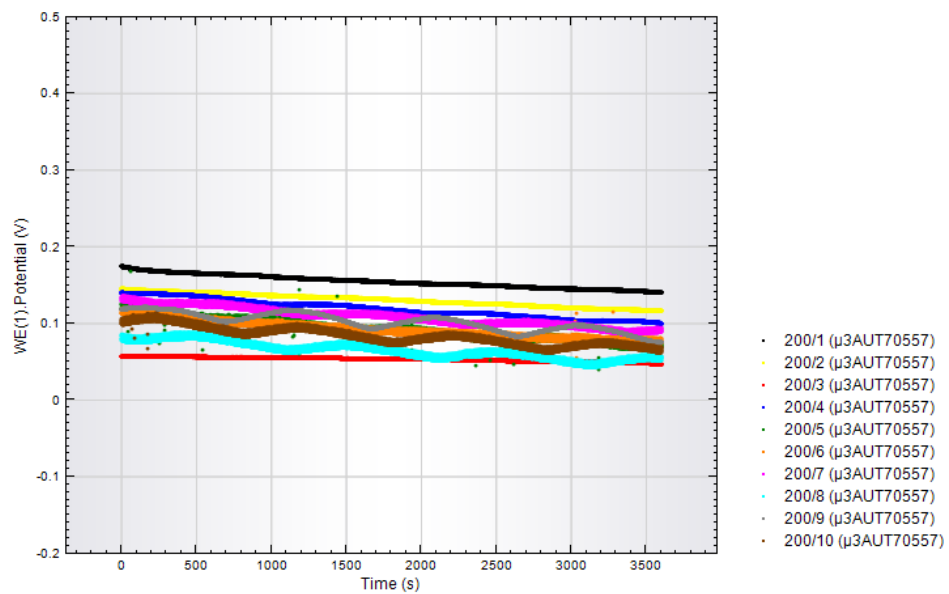


รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดเทียบกับเวลาของชิ้นงานในกลุ่มที่ผ่านการแอนโอดส์

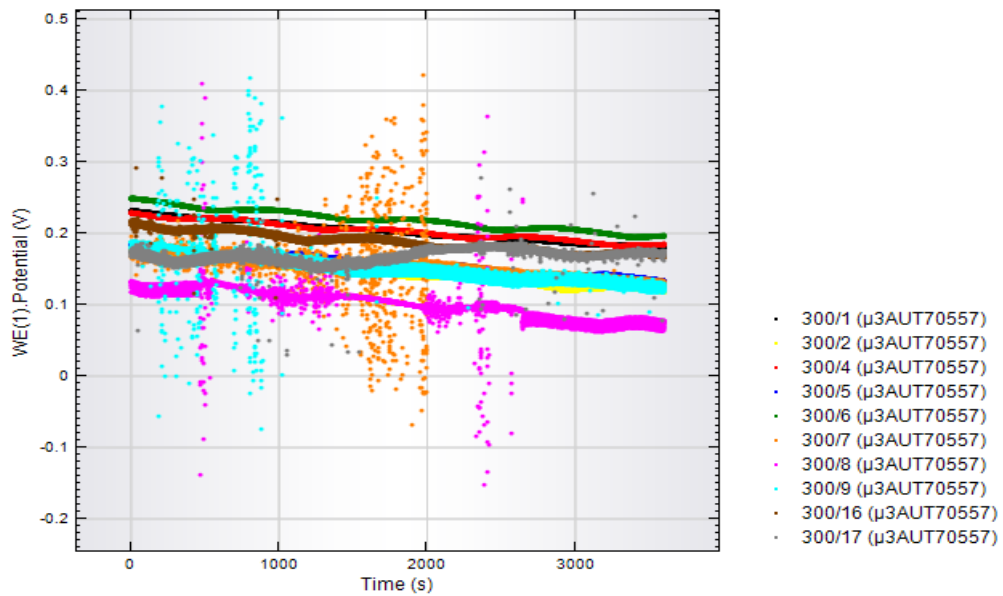
ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์



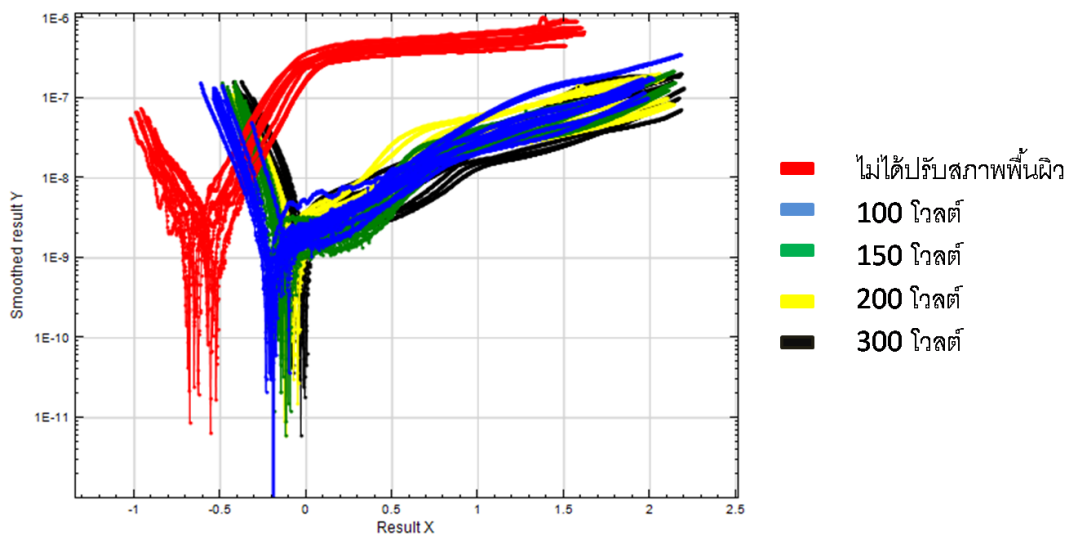
รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืดเทียบกับเวลาของชิ้นงานในกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์
ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 150 โวลต์



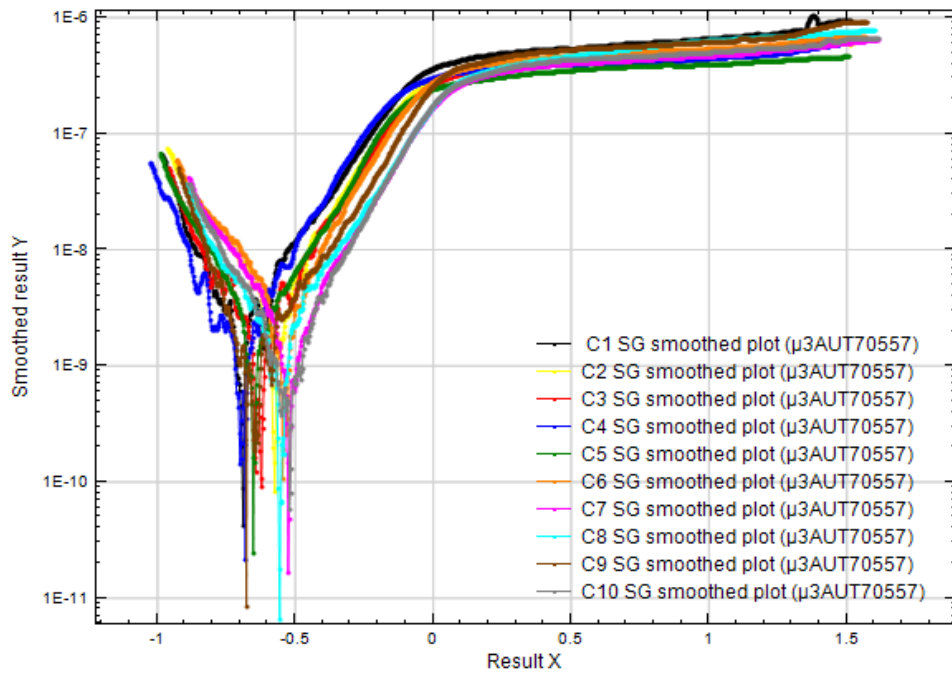
รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืดเทียบกับเวลาของชิ้นงานในกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์
ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์



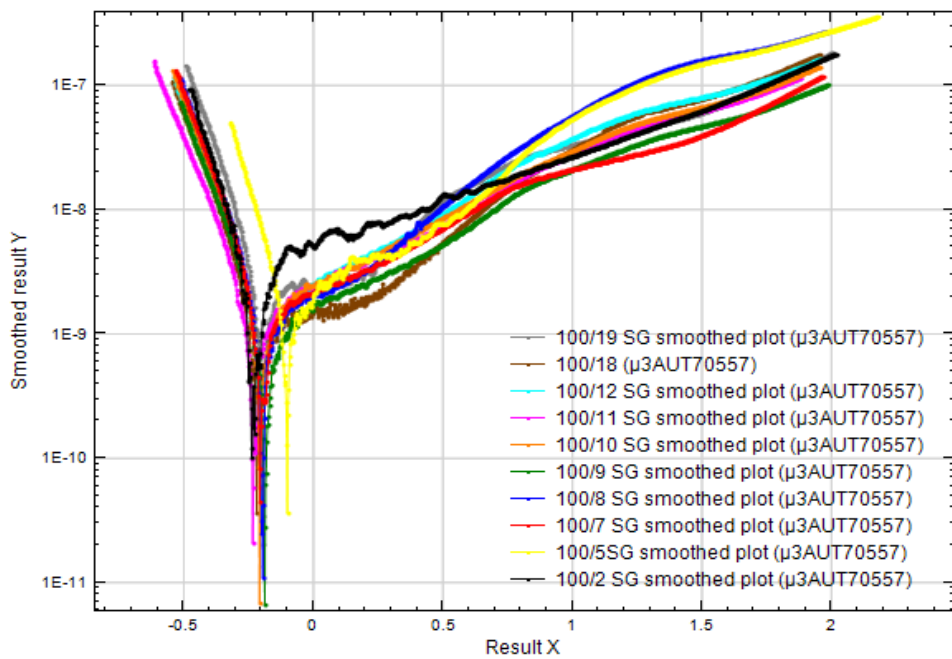
รูปที่ 17 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดเทียบกับเวลาของชิ้นงานในกลุ่มที่ผ่านการแอนโนไดส์
ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์



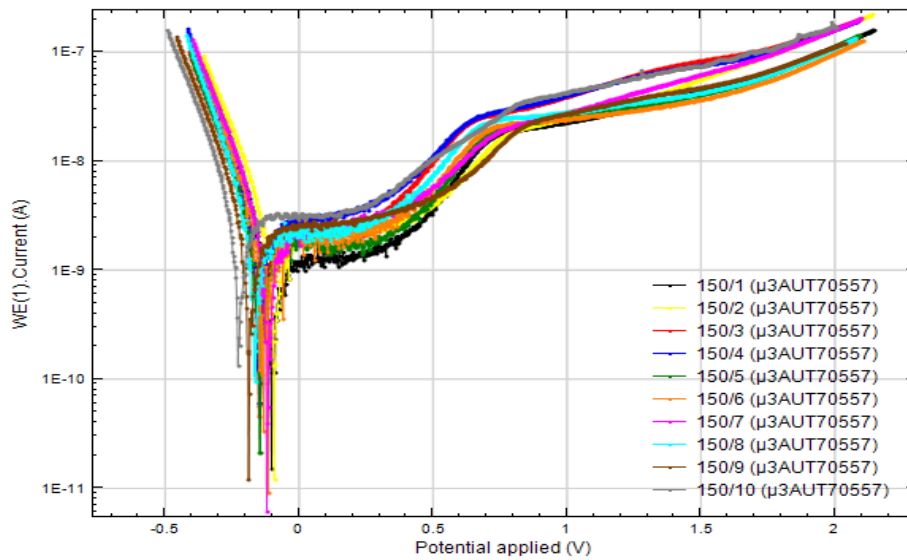
รูปที่ 18 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวและชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์
ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์ 150
โวลต์ 200 โวลต์ และ 300 โวลต์



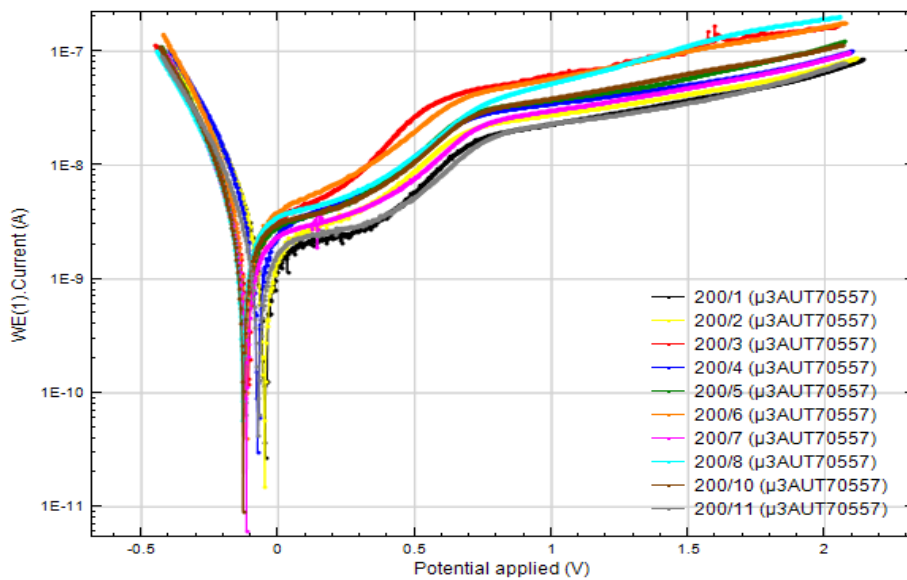
รูปที่ 19 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ไม่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิว



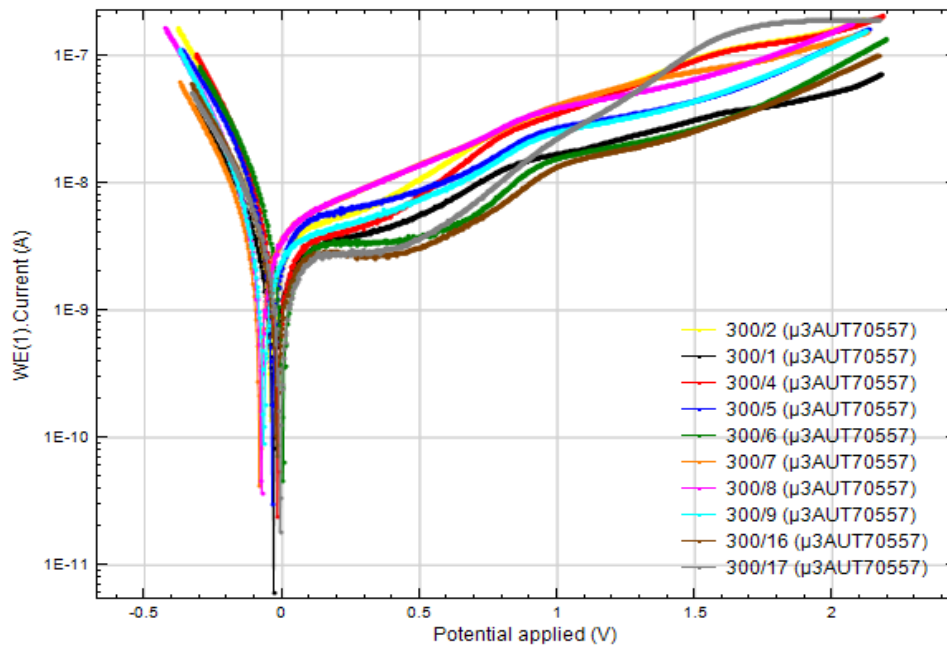
รูปที่ 20 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 100 โวลต์



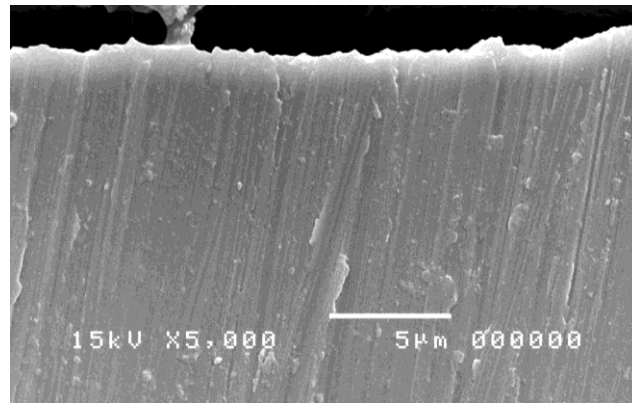
รูปที่ 21 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 150 โวลต์



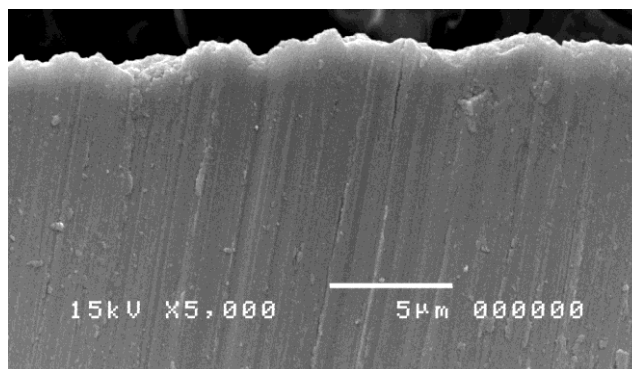
รูปที่ 22 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์



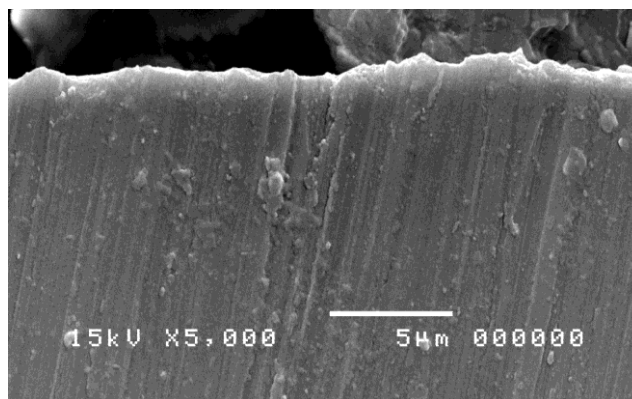
รูปที่ 23 เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานผ่านการแอนโนไดส์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์



รูปที่ 1

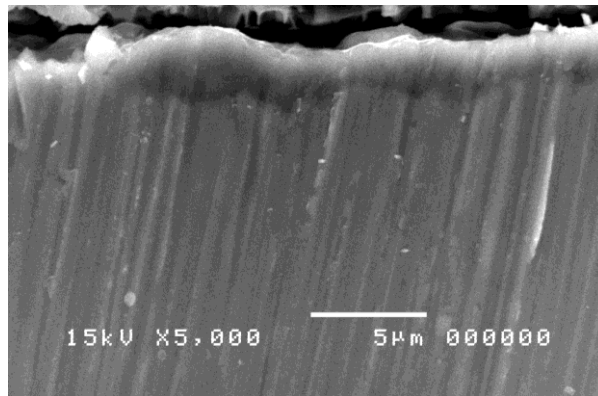


รูปที่ 2

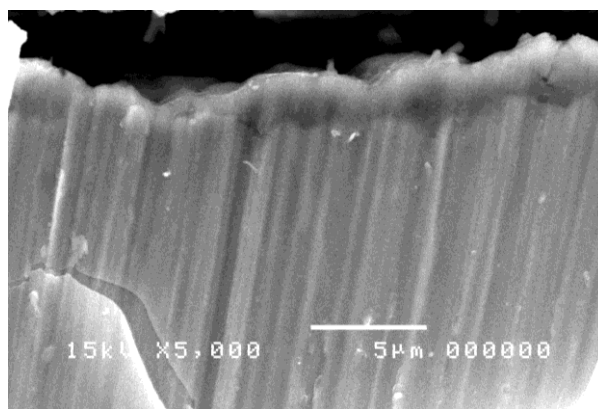


รูปที่ 3

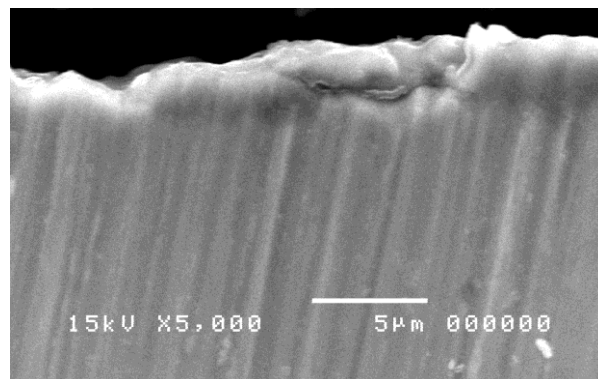
รูปที่ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ ด้วยความต่างศักย์ 200 โวลต์ที่นำมาวัดความหนาของชั้นออกไซด์



รูปที่ 1



รูปที่ 2



รูปที่ 3

รูปที่ 25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดส์ ด้วยความต่างศักย์ 300 โวลต์ที่นำมาวัดความหนาของชั้นออกไซด์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิรัชฐา อสัมภินวงศ์ เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทันตแพทยศาสตรบัณฑิต จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพ.ศ. 2549 และได้รับราชการในตำแหน่งทันตแพทย์ที่โรงพยาบาล เขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี ระหว่างพ.ศ. 2549 – 2551 ปัจจุบันสังกัดที่โรงพยาบาลพระปกเกล้า จังหวัดจันทบุรี