

ผลของความหยาบผิวของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติต่อลักษณะทาง
สัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และความต้านทานการกัดกร่อน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE MORPHOLOGY OF ANODIZED TiO₂
NANOTUBE AND CORROSION RESISTANCE OF 3D PRINTED Ti-6Al-4V



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering
Department of Metallurgical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2021
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของความหยาบผิวของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และความต้านทานการกัดกร่อน
โดย	น.ส.ปานิสรา พุทธสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.จิราภรณ์ คำวรรณะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.จิราภรณ์ คำวรรณะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชษฐา พันธุ์เครือบุตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แคทเธียา ทวีทรัพย์)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปาณิสรา พุทธสุวรรณ : ผลของความหยาบผิวของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วย
 วิธีการพิมพ์สามมิติต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และ
 ความต้านทานการกัดกร่อน. (EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON
 THE MORPHOLOGY OF ANODIZED TiO₂ NANOTUBE AND CORROSION
 RESISTANCE OF 3D PRINTED Ti-6Al-4V) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ดร.จิราภรณ์ คำวรรณะ,
 อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

นอกจากวัสดุไทเทเนียมจะนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกหรือข้อต่อที่เสียหาย
 เนื่องจากมีสมบัติที่ดีในเรื่องของความแข็งแรงสูง มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงและมีความเข้ากันได้
 ได้ทางชีวภาพแล้ว การสร้างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ก็ใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับสภาพ
 ผิววัสดุเช่นกัน เนื่องจากช่วยส่งเสริมการยึดเกาะของเซลล์และให้การตอบสนองของเซลล์ได้ดีกว่า
 พื้นผิวโลหะเอง แม้มีการศึกษาหลายชิ้นได้รายงานความสัมพันธ์ระหว่างท่อนาโนไทเทเนียมได
 ออกไซด์กับอัตราการเชื่อมประสานของเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการกัดกร่อนของชั้นท่อนาโน
 ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้สภาวะการใช้งานนั้น ๆ ก็มีความจำเป็นที่ต้องศึกษาเช่นกัน ในงานนี้เรา
 ได้ศึกษาผลจากการปรับสภาพผิวที่ถูกเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุ
 Ti-6Al-4V และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชั้นท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งการศึกษาจะ
 แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ทำการปรับสภาพผิวด้วยการขัดและกลุ่มที่ทำการปรับสภาพผิวด้วยการ
 ขัดต่อด้วยการแอนโนไดซ์ โดยจะทำการวัดความหยาบพื้นผิวที่เตรียมได้ก่อนการแอนโนไดซ์โดย
 เครื่องวัดความหยาบผิวและศึกษาลักษณะพื้นผิวหลังแอนโนไดซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
 ส่องกราดและศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายฟอสเฟตโซลีนโดยเทคนิคโพเทน
 ชิโวลตาเมตริกโพลาริเซชัน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าก่อนการแอนโนไดซ์ความหยาบผิวที่เตรียมได้ไม่มี
 ความสัมพันธ์กับอัตราการกัดกร่อนโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามหลังจากแอนโนไดซ์พบว่าความหยาบผิว
 ตั้งต้นจากการเตรียมผิวก่อนแอนโนไดซ์มีผลต่อลักษณะการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
 รวมถึงอัตราการกัดกร่อนมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและลักษณะการเรียงตัวของท่อที่เกิดขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
 ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6170211321 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: Titanium alloy, titanium nanotube, Corrosion

Panisara Buddhasuwan : EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE MORPHOLOGY OF ANODIZED TiO₂ NANOTUBE AND CORROSION RESISTANCE OF 3D PRINTED Ti-6Al-4V.

Advisor: Jirapon Khamwannah, Ph.D. Co-advisor: Prof. GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.Ing.

Ti and its alloys have been widely used in many medical implant applications since they have excellent properties such as high strength, good corrosion resistance, and good biocompatibility. TiO₂ nanotubes are widely applied on the surface of titanium implants too because the nanoscale tubes help promote cell adhesion and provide better cell response more than the metal surface itself. Although several studies have reported the relationship between TiO₂ nanotubes and cell osseointegration rate; however, the corrosion rate of the TiO₂ nanotubes under the circumstance of usage is to be accomplished. In this work, we investigated the effects of surface preparing conditions on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V and the morphology of TiO₂ nanotubes. The surface of the Ti-6Al-4V substrate was prepared by different methods followed by one-step anodization to obtain the TiO₂ nanotubes. The surface roughness tester and the scanning electron microscope were used to characterize the surface roughness and surface morphology of the as-received, mechanically ground, and mechanically polished substrate both pre and post-anodization. The corrosion behavior of the prepared substrates was also investigated in Phosphate Buffered Saline solution using the potentiodynamic polarization technique. Before anodization, the results suggest that the surface roughness of the prepared surfaces has no relation to corrosion properties. However, after anodization, the initial surface roughness and the corrosion properties have a relationship with the morphology of TiO₂ includes the tube diameter and the standard deviation of the tube diameter.

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Student's Signature

Academic Year: 2021 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ หากขาดความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลายภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็นองค์กรและบุคลากรที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ คำวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดการดำเนินงานด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ทั้งสองท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐม วิสุทธิพิทักษ์กุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชษฐา พันธุ์เครือบุตรและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แคทเทรียา ทวีทรัพย์ ที่ได้ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและช่วยชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒนและบริษัทเมตาคูลี จำกัด ที่ให้ความเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการสำหรับดำเนินงานวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ในการผลิตชิ้นงานทดสอบ รวมถึงขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์และบริษัทโคแอกซ์ กรุ๊ป คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่สำหรับดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการเตรียมชิ้นงานและให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์บางส่วนในการทำวิจัย รวมถึงคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา น้องชายและครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา ขอขอบพระคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่เคยอบรมสั่งสอน ตั้งแต่อดีต ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนนิสิตมหาบัณฑิตและดุษฎีบัณฑิตทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและร่วมสร้างประสบการณ์ที่ตีร่วมกับผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปาณิสรา พุทธสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1	2
บทนำ.....	2
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม.....	5
2.1.1 สมบัติของไทเทเนียม	6
2.1.2 โลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V	12
2.2 แอโนไดเซชัน (Anodization).....	15
2.3 ท่อนาโนไทเทเนียหรือท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	16
2.3.1 วิธีการขึ้นรูปฟิล์มท่อนาโนไทเทเนีย	17
2.3.2 กลไกการเกิดท่อนาโนไทเทเนีย.....	17

2.3.3	ขั้นตอนที่ทำให้เกิดท่อนาโนไทเทเนีย	18
2.3.4	ประโยชน์ของฟิล์มท่อนาโนไทเทเนีย	20
2.4	กระบวนการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (3D printing).....	20
2.4.1	หลักการทำงาน.....	22
2.4.2	การศึกษาสมบัติเชิงกลของการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (Mechanical characterization) .	24
2.5	การวัดความหยาบผิว	25
2.6	การวัดการกัดกร่อน.....	26
2.6.1	หลักการทางไฟฟ้าเคมีและการวัด Potentiodynamic polarization.....	27
2.7	การวัดมุมสัมผัสของของเหลว	28
2.7.1	Sessile drop method.....	29
2.8	ทบทวนวรรณกรรม.....	30
2.8.1	อิทธิพลของการเตรียมผิวและ/หรือความหยาบผิวชิ้นงานต่อผลของการกัดกร่อนของโลหะ.....	30
2.8.2	อิทธิพลของความหยาบผิวชิ้นงานต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนีย	32
2.8.3	อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่อความสามารถในการเปียก.....	33
2.8.4	อิทธิพลของการสร้างท่อไทเทเนียต่อผลของการกัดกร่อน	34
2.8.5	อิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ในการสร้างท่อไทเทเนียต่อผลของการกัดกร่อนและ/หรือสัณฐานวิทยาของท่อไทเทเนีย	35
บทที่ 3	42
วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง.....		42
3.1	วัสดุ อุปกรณ์.....	42
3.2	เงื่อนไขการทดลอง	44
3.3	ขั้นตอนการทดลอง	46
บทที่ 4	51

วิเคราะห์ผลการทดลอง	51
4.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ	51
4.2 ผลการเตรียมชิ้นงาน	52
4.2.1 Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ	52
4.2.2 การปรับสภาพผิวด้วยการแอนโนไดซ์	53
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว	54
4.3.1 ชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัด.....	54
4.3.2 ชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อโดยการแอนโนไดซ์	56
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ	57
4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อโดยการแอนโนไดซ์.....	57
4.4.2 มุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิว Ti-6Al-4V หลังผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการแอนโนไดซ์	69
4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อน	71
4.5.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัด	71
4.5.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อด้วยการแอนโนไดซ์	77
บทที่ 5	84
สรุปผลการทดลอง.....	84

5.1 อภิปรายผลการทดลอง	84
5.2 สรุปผลการทดลอง	85
5.3 ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	119



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันโลหะผสมไทเทเนียมได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมในหลาย ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรมการยานยนต์ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง จึงเป็นวัสดุที่ช่วยเสริมสมรรถนะของเครื่องยนต์ให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้โลหะผสมไทเทเนียมยังได้เข้ามามีบทบาทในด้านการแพทย์มากขึ้น โดยนำมาทำเป็นวัสดุที่ใช้ฝังในร่างกายเพื่อใช้ทดแทนอวัยวะหรือส่วนต่าง ๆ ของร่างกายที่มีความบกพร่องหรือสูญเสียไป เช่น กระดูกและข้อต่อต่าง ๆ เป็นต้น เพราะโลหะผสมไทเทเนียมนอกจากจะมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูงและมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงแล้ว ยังมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพหรือเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อเป็นอย่างดี ทั้งยังมีความสามารถในการยึดติดระหว่างกระดูกกับพื้นผิวของโลหะที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนและไม่เกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายกับอวัยวะโดยรอบหรือเนื้อเยื่อในร่างกาย ซึ่งความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุที่นำมาทำเป็นวัสดุทดแทนและฝังในร่างกาย นอกจากพิจารณาจากการเชื่อมประสานและการเจริญเติบโตของเซลล์แล้ว อาจพิจารณาได้จากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น [1] [2] เพราะเมื่อนำชิ้นส่วนทดแทนที่เป็นโลหะมาใช้งานภายในร่างกายซึ่งมีสภาพแวดล้อมประกอบไปด้วยของเหลว ไอออนต่าง ๆ สารอินทรีย์และออกซิเจนที่ละลายอยู่ในของเหลวจะส่งผลให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ ดังนั้นเมื่อโลหะถูกกัดกร่อนโดยสิ่งแวดล้อมภายในร่างกาย เศษโลหะที่หลุดออกมาอาจก่อให้เกิดผลอันไม่พึงประสงค์ได้ เช่น เกิดความเป็นพิษหรือการอักเสบบริเวณนั้น จากสมบัติที่กล่าวมาจึงเป็นผลทำให้โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมนิยมมาทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุชิ้นส่วนทดแทนหรือปลูกฝังในร่างกาย เช่น รากฟันเทียม กระดูกสะโพก กระดูกนิ้ว กระดูกข้อมือ เป็นต้น ซึ่งโลหะผสมไทเทเนียมที่ถูกนำมาใช้ในปัจจุบันนั้นมีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดหรือแต่ละเกรดจะถูกนำไปในใช้งานที่แตกต่างกันไปตามสมบัติของโลหะและโลหะผสมนั้น ๆ [3] นอกจากนี้โลหะผสมไทเทเนียมจะมีหลายเกรดแล้ว กระบวนการขึ้นรูปก็มีหลายแบบเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นการหล่อ การตีขึ้นรูป การขึ้นรูปแบบสามมิติ โดยชนิดของโลหะและรูปแบบกระบวนการขึ้นรูปที่สนใจและศึกษาในงานวิจัยนี้คือโลหะผสมไทเทเนียมเกรด 23 หรือโลหะผสมไทเทเนียมเกรดไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม (Ti-6Al-4V) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติ (3D printing) ซึ่งเป็นชนิดและเทคนิคที่นิยมนำไปใช้งานด้านการแพทย์ เนื่องจากจุดเด่นของกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้คือสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ชิ้นรูปขึ้นงานได้รวดเร็ว ชิ้นงานที่ได้มีขนาด รูปร่างที่แม่นยำและใกล้เคียงกับชิ้นส่วนที่ต้องการผลิต

มากกว่าการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบปกติ อีกทั้งยังสามารถออกแบบขนาดและรูปทรงให้เหมาะสมกับแต่ละบุคคลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วย [4] ซึ่งวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานที่ต่างกันก็มีผลทำให้สมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพต่างกันไปและเนื่องจากชิ้นส่วนที่ศึกษาถูกนำไปใช้ทดแทนกระดูกภายในร่างกายที่มีของไหลๆ เวียนอยู่ในร่างกาย ทำให้ชิ้นส่วนมีความเสี่ยงที่จะเกิดการกักความร้อนหรือติดเชื้อจากการที่มีเศษวัสดุที่เกิดการกักความร้อนหลุดออกมา จึงมีความพยายามในการพัฒนาพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายหรือมีความเป็นพิษกับร่างกายน้อยที่สุดและยังคงมีความขรุขระของผิวชิ้นงานที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเชื่อมประสานของกระดูกกับตัววัสดุปลูกฝังซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติเหล่านั้นด้วยการปรับปรุงพื้นผิววัสดุ ทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการแอนโนไดซ์หรือการเคลือบผิวด้วยแอนโนดในการปรับปรุงพื้นผิวเนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการเคลือบหรือปรับปรุงผิวด้วยวิธีการอื่น [2] [5] โดยการแอนโนไดซ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับสภาพพื้นผิววัสดุเนื่องจากมีการศึกษาว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทางชีวภาพและเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุทดแทน รวมถึงยืดระยะเวลาการใช้งานของชิ้นส่วนกระดูกเทียม แต่ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดว่าหลังจากทำการปลูกท่อไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านวิธีการแอนโนไดซ์ลงไปบนโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ โดยมีเงื่อนไขในการเตรียมผิวซึ่งทำให้มีความหยาบผิวก่อนทำแอนโนไดซ์ที่ต่างกันจะส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา รวมถึงสมบัติด้านความต้านทานการกักความร้อนของวัสดุอย่างไร จึงมีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับความหยาบผิวชิ้นงานก่อนการทำแอนโนไดซ์ของโลหะ Ti-6Al-4V ที่ผ่านการพิมพ์สามมิติ (3D printing) ที่มีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และผลที่มีต่อความต้านทานการกักความร้อนของชิ้นงานที่ผ่านการทำแอนโนไดซ์โดยมีความหยาบผิวเริ่มต้นที่ต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อเปรียบเทียบผลของความหยาบผิวของโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติก่อนการแอนโนไดซ์ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
2. ศึกษาสมบัติความต้านทานการกักความร้อนของโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติหลังการทำแอนโนไดซ์ที่ความหยาบผิวเริ่มต้นที่ต่างกัน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

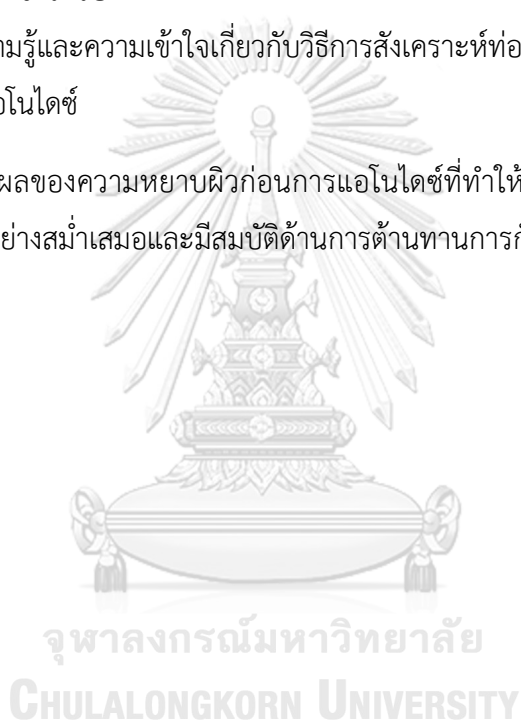
1. วัดความหยาบผิวเฉลี่ยก่อนการทำแอนโนไดซ์ด้วยเครื่องมือวัดความหยาบผิว (Surface roughness tester) และทำการวิเคราะห์ลักษณะของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

- ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนหลังผ่านการแอโนไดซ์ของโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน (Phosphate Buffer Saline, PBS) ที่ค่า pH ประมาณ 7.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของไหลในร่างกายมนุษย์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization test)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้รับความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการแอโนไดซ์
- ทราบถึงผลของความหนาแน่นก่อนการแอโนไดซ์ที่ทำให้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เรียงตัวอย่างสม่ำเสมอและมีสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี



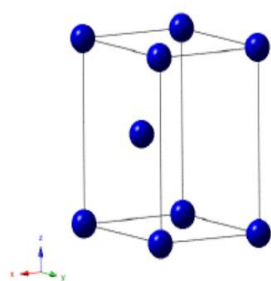
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

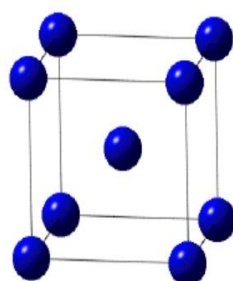
ปัจจุบันมีวัสดุหลายชนิดที่เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมทางการแพทย์มากขึ้นและโลหะก็เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นกระดูกเทียมหรือชิ้นส่วนทดแทนภายในร่างกาย โดยโลหะนั้นมีหลายประเภทแบ่งใช้งานตามคุณสมบัติต่าง ๆ และหนึ่งในประเภทของโลหะที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นวัสดุปลูกฝังในร่างกายคือโลหะไทเทเนียม เนื่องจากโลหะไทเทเนียมมีสมบัติด้านการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ไม่เป็นพิษกับร่างกาย มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนรวมถึงมีสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพที่ดี

2.1 โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม

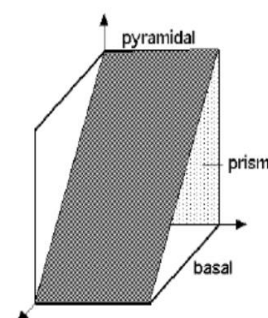
ไทเทเนียม (Titanium, Ti) เป็นธาตุที่ในลำดับที่ 22 ในตารางธาตุและจัดอยู่ในกลุ่มธาตุทรานซิชัน สามารถพบได้มากเป็นอันดับ 4 ของธาตุในกลุ่มโลหะรองจากอะลูมิเนียม เหล็กและแมกนีเซียม [1] [2] ไทเทเนียมที่พบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของออกไซด์ (Oxide) โดยเฉพาะในรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) เมื่อโลหะไทเทเนียมอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 883 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกจะอยู่ในลักษณะรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal closed pack, HCP) ซึ่งเรียกว่าแอลฟาเฟส (α phase) แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงกว่า 883 องศาเซลเซียส จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกไปเป็นแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมอยู่ตรงกลาง (Body center cubic, BCC) เรียกว่าเฟสเบต้า (β phase) และจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1668 องศาเซลเซียส [2] [3]



Crystal structure of α -titanium.



Crystal structure of β -titanium.



The slip planes in α -titanium

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของโลหะไทเทเนียม [3]

2.1.1 สมบัติของไทเทเนียม

1. สมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพ

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับเหล็ก อีกทั้งยังมีความแข็งแรงและความเหนียวสูงทั้งที่อุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง โดยสมบัติของไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ [1] [2]

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของโลหะไทเทเนียม [1] [5]

สมบัติไทเทเนียม		
ความหนาแน่น	4.54 g/cm ²	
จุดเดือด	3,287 °c	
จุดหลอมเหลว	1,725 °c	
การนำความร้อน	21.9 W/(m•k)	
การต้านทานไฟฟ้า	0.420 μΩ•m ที่อุณหภูมิ 20 °c	
ระบบผลึก	ต่ำกว่า 882 °c	HCP
	สูงกว่า 882 °c	BCC

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติเชิงกลของโลหะผสมไทเทเนียม [6]

ชนิดวัสดุ (Materials)	เกรด (Grade)	ความ แข็งแรง (Yield strength) [MPa]	ค่าความ ยืดหยุ่น (Elongation) [%]	ค่ามอดูลัส ยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) [GPa]	ค่าความ แข็งแรงดึง (Tensile strength) [MPa]	ความ หนาแน่น (Density) [g/cm ²]
CP Ti	1	170	24	102	240	4.5
	2	275	20	102	345	4.5
	3	380	18	102	450	4.5
	4	483	15	104	550	4.5
Ti-6Al-4V		860	10	113	930	4.4
Ti-6Al-4V Eli		795	10	113	860	4.4

* ASTM Standard : Minimum values

จากตารางจะเห็นได้ว่าสมบัติหลักๆ ของโลหะไทเทเนียมคือมีความแข็งแรงเชิงกลสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำทำให้ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมานี้จึงทำให้ปัจจุบันไทเทเนียมมีความสำคัญและได้รับความนิยมในงานทางอุตสาหกรรมอย่างมาก ซึ่งไทเทเนียมถูกนำมาใช้ในงานหลายๆ ด้าน เช่น งานทางอวกาศ เรือเดินสมุทร งานทางเคมีและหนึ่งในด้านที่กำลังได้รับความสนใจคือด้านงานทางการแพทย์ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนปลูกฝังต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น กระดูกเทียม ข้อต่อเทียม ขาเทียม และงานทันตกรรม เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ต้องการความแข็งแรงเชิงกลที่สูงเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหักเกิดขึ้นเมื่อถูกฝังเข้าไปในร่างกาย [7]

2. ความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ (Biocompatibility)

ความเข้ากันได้คือความสามารถของวัสดุที่จะตอบสนองอย่างเหมาะสมต่อสิ่งต่าง ๆ ในการใช้งานประเภทนั้น ๆ ดังนั้นวัสดุที่นำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนทดแทนฝังเข้าไปในร่างกาย (Implant) จะต้องมีความสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานภายในร่างกายมนุษย์ ซึ่งนอกจากจะต้องมีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีแล้ว การยอมรับจากร่างกายหรือที่เรียกว่าความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อก็เป็นสมบัติที่สำคัญลำดับต้น ๆ ที่นำมาใช้พิจารณาในการนำมาทำวัสดุปลูกฝัง เนื่องจากความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีจะส่งผลให้ร่างกายตอบสนองต่อวัสดุที่นำเข้าไปอย่างเหมาะสมและไม่เกิดผลข้างเคียงใด ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น โรคมุมิแพ้ การอักเสบและความเป็นพิษทันทีหลังการผ่าตัด [8] [9] โลหะผสมไทเทเนียมมีความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อเนื่องจากชั้นออกไซด์บนผิวของไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมมีความแข็งแรงและยึดแน่นกับผิวของไทเทเนียม โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไม่ทำปฏิกิริยาที่รุนแรงหรือมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาและสภาพแวดล้อมแวดล้อมภายในร่างกาย รวมทั้งมีความสามารถในการสร้างชั้นออกไซด์ขึ้นมาใหม่เองอย่างรวดเร็วเมื่อถูกทำลาย ทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีและการที่ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เป็นพิษหรือเป็นอันตรายต่อร่างกาย นอกจากนี้ยังยอมให้เนื้อเยื่อ โปรตีนและของเหลวในร่างกายเข้ามายึดเกาะได้ดีอีกด้วย [2] จากเหตุผลที่กล่าวมานี้ทำให้ไทเทเนียมมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ โดยวัสดุที่จัดว่ามีความเข้ากันได้ทางชีวภาพจะต้องไม่ส่งผลที่เป็นพิษหรือเป็นอันตรายกับเนื้อเยื่อและอวัยวะที่อยู่โดยรอบ รวมถึงต้องไวต่อปฏิกิริยาทางชีวภาพ ซึ่งถ้าวัสดุทดแทนที่ปลูกฝังไปในร่างกายมีสมบัติตามที่กล่าวมาจะทำให้เมื่อทำการปลูกฝังวัสดุนั้นไปแล้วจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุ เกิดเป็นแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างวัสดุและเนื้อเยื่อ [10, 11]

ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมเป็นโลหะมีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพกับร่างกายเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น ๆ เนื่องจากโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจะเกิดการออกซิไดส์ได้เป็นชั้นฟิล์มออกไซด์บาง ๆ ชั้นที่ผิวซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นพาสซีฟปกคลุมอยู่ที่ผิวเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่เนื้อวัสดุเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมภายในร่างกาย นอกจากนี้โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมยังมีความเสถียรทางเคมีในช่วงค่าความเป็นกรดเบส (pH) ที่กว้าง รวมถึงมีการปลดปล่อยของไอออนที่ค่า pH ต่ำกว่าค่า pH ในร่างกายมาก [10-12] ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาที่เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อหรืออวัยวะโดยรอบได้น้อย นอกจากนี้ชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมมีความสามารถในการเปียกสูง (Wettability) เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสของของเหลวต่ำจึงทำให้พื้นผิวมีอันตรกิริยาที่อ่อนโยนกับโมเลกุลทางชีวภาพและทำให้ของเหลวในร่างกายสัมผัสกับพื้นผิวได้ดีและทำให้เซลล์ที่เกิดขึ้นมาเกาะที่พื้นผิวโลหะได้ดีขึ้น [7, 9, 10]

โดยความเข้ากันได้ทางชีวภาพอาจพิจารณาเพิ่มเติมได้จากความหยาบผิว ลักษณะพื้นผิว ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้าง รวมถึงการสลายตัวของวัสดุ เป็นต้น โดยสิ่งเหล่านี้จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวซึ่งจะส่งผลต่อการตอบสนองของร่างกาย ดังนั้นลักษณะพื้นผิวที่มีความเหมาะสม จะช่วยให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างกระดูกหรือเนื้อเยื่อกับตัววัสดุทดแทนที่ฝังลงไป นอกจากนี้ความหยาบผิว ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างของวัสดุ รวมถึงการสลายตัวของวัสดุ ยังอาจส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุนั้น ๆ อีกด้วย [10, 13] ซึ่งการสลายตัวของวัสดุ อาจเกิดได้จากหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนหรือการสึกหรอ การสลายตัวที่เกิดขึ้นจะทำให้มีอนุภาคหรือเศษบางส่วนของวัสดุปลุกฝังหลุดออกมาซึ่งอาจจะส่งผลต่อเนื้อเยื่อหรือกระดูกบริเวณใกล้เคียง ๆ วัสดุทดแทนที่ฝังลงไปหรือบางครั้งการสลายตัวของวัสดุอาจส่งผลกระทบต่อระบบอื่น ๆ ในร่างกาย เช่น ระบบไหลเวียนของเหลว เป็นต้น ซึ่งการสลายตัวของวัสดุมักจะก่อให้เกิดผลข้างเคียงในทางลบต่อร่างกายไม่มากนักน้อย ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้วัสดุที่มีการสลายตัวได้ยาก เพื่อให้ส่งผลกระทบต่อร่างกายน้อยที่สุด [13]

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาการสลายตัวของวัสดุจากพฤติกรรมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้ภายในร่างกายเกี่ยวข้องกับหลายประการ เช่น

- ส่วนผสมทางเคมี (โดยเฉพาะบริเวณผิว)
- โครงสร้างของเฟส
- โครงสร้างของพื้นผิว เช่น ความหยาบ ความหนาและลักษณะการเรียงตัวของชั้นออกไซด์
- ซอกและรู
- การผ่านกระบวนการทางความร้อน
- การผสมกันของธาตุผสม เช่น การเคลือบทอง การเชื่อมโลหะ
- ระยะเวลาในการใช้งาน

ซึ่งการสลายตัวหรือพฤติกรรมการกัดกร่อนจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของโลหะนั้น ๆ ด้วย เนื่องจากถ้ามีการกัดกร่อนหรือสลายตัวเกิดขึ้นจะส่งผลให้วัสดุปลูกฝังมีอายุการใช้งานที่สั้นลง จากการศึกษาพบว่า มีหลายปัจจัยที่ถูกนำมาใช้พิจารณาเพื่อเลือกประเภทวัสดุที่จะไปใช้งาน [13] [14]

3. สมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อน

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศแล้วเกิดการฟอร์มของชั้นออกไซด์ที่เสถียรขึ้นได้อย่างรวดเร็ว [15] ซึ่งชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นมักจะเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ปกคลุมพื้นผิวโลหะเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนจากสารเคมีหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีความแข็งแรงและยึดแน่นกับพื้นผิวไทเทเนียมได้เป็นอย่างดีและเมื่อชั้นออกไซด์บางส่วนถูกทำลายหรือได้รับความเสียหายก็จะเกิดการฟอร์มขึ้นใหม่ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ไทเทเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงเมื่อเทียบกับโลหะหลาย ๆ ชนิด เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น [1] [7]

พฤติกรรมและความรุนแรงในการกัดกร่อนของวัสดุจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ สภาพแวดล้อมและประเภทของการกัดกร่อน ซึ่งการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมแล้วมีการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ โดยการกัดกร่อนอาจเกิดทั่วทั้งพื้นผิว (Uniform corrosion) ทำให้โลหะได้รับผลกระทบสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวหรือเกิดการกัดกร่อนขึ้นเฉพาะที่ (Localized corrosion) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งตามการเกิดปฏิกิริยาออกได้เป็น 2 แบบใหญ่คือ

1. การกัดกร่อนแบบแห้ง (Dry corrosion) จะเป็นการกัดกร่อนที่เกิดโดยไม่มีการสัมผัสกับของเหลว สารกัดกร่อนมักจะมีอยู่ในรูปไอและแก๊ส การกัดกร่อนประเภทนี้มักจะเกี่ยวข้องกับสถานะที่มีอุณหภูมิสูง [13]
2. การกัดกร่อนแบบเปียก (Wet corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะได้รับการเปียกชื้นจากน้ำหรือสารละลาย ซึ่งการถ่ายเทอิเล็กตรอนและประจุโดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลาง โดยด้านแอโนดจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนออกมา ส่วนปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นที่ด้านแคโทดโดยจะรับอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากด้านแอโนด โดยตัวที่จะมารับอิเล็กตรอนจะต่างออกไปตามสภาพแวดล้อมขณะที่เกิดปฏิกิริยา [16]

การกัดกร่อนในร่างกายเป็นการกัดกร่อนแบบเปียกซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยมีของเหลวในร่างกาย เช่น เลือด น้ำ โปรตีน เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และวัสดุปลูกฝังเป็นแอโนด

ถึงแม้ว่าโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจะมีสมบัติในเรื่องการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี แต่ก็ยังอาจเกิดการกัดกร่อนได้เนื่องจากในร่างกายประกอบด้วย เลือด น้ำ โปรตีน ออกซิเจนและไอออนต่าง ๆ หลายชนิด เช่น ไฮดรอกไซด์ คลอไรด์ เป็นต้น โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอาจทำให้เนื้อวัสดุบางส่วนถูกทำลายและหลุดออกมาปนกับของไหลในร่างกาย ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นนี้อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายหรือเนื้อเยื่อโดยรอบ การกัดกร่อนนอกจากจะมีผลกระทบต่อร่างกายหรือเนื้อเยื่อในด้านต่าง ๆ แล้วยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของตัววัสดุอีกด้วย นอกจากนั้นบางครั้งอาจมีปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าเกิดร่วมกับแรงทางกล ซึ่งจะไปเร่งการสลายตัวของโลหะและไอออนทำให้อายุการใช้งานของวัสดุนั้น ๆ สั้นลง ไม่ว่าจะเป็นในด้านการลำคือทำให้วัสดุเสียหายจากความล้าได้เร็วขึ้น มีความสามารถในการทนต่อการแตกหักและการเสียหายลดลง โดยการกัดกร่อนที่มีโอกาสเกิดขึ้นในวัสดุปลูกฝังอาจเกิดได้หลายรูปแบบ ได้แก่ [16]

1. การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) [17]

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดบางบริเวณของผิววัสดุ โดยจะเกิดจากการที่ชั้นฟิล์มป้องกันที่ปกคลุมผิวโลหะถูกทำลายแล้วเกิดเป็นหลุมหรือรูลึกลงจากชั้นฟิล์มป้องกัน ซึ่งเกิดได้จากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นสารเคมี สภาพแวดล้อมที่มีประจุคลอไรด์ แรงกระทำ สิ่งเจือปนในเนื้อวัสดุหรือความไม่สมบูรณ์ของผิววัสดุ เช่น ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีความไม่สมบูรณ์ทำให้บริเวณนั้นเป็นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายและเกิดการกัดกร่อนขึ้นเฉพาะจุด เมื่อเกิดไปเรื่อย ๆ อาจทำให้การกัดกร่อนเกิดรุนแรงขึ้นและวัสดุเสียหายในที่สุด

2. การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Galvanic corrosion)

เกิดจากการที่โลหะต่างกัน 2 ชนิดมาสัมผัสกันแล้วเกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเกิดเป็นขั้วแอโนดและแคโทดขึ้น โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดเป็นขั้วแอโนดและแคโทดเกิดจาก

- ความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีในเนื้อโลหะ (Chemical composition couples) โดยพิจารณาได้จากตาราง Galvanic series
- ความแตกต่างของแรงเค้น (Stress couples) โดยบริเวณที่มีความเค้นต่ำกว่าจะเป็นแคโทดและบริเวณที่มีความเค้นสูงกว่าจะเป็นแอโนด
- ความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration couples) บริเวณที่มีออกซิเจนน้อยกว่าจะเป็นแอโนดและบริเวณที่มีออกซิเจนมากกว่าจะเป็นแคโทด

ในวัสดุทดแทนการกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดในกรณีที่ใช้วัสดุที่ใช้ยึดกับแผ่นโลหะที่ใช้ทำกระดูกเป็นคนละชนิดกันหรือมีเศษโลหะที่เกิดจากการไขควงตักค้างอยู่บนหัวสกรู โดยที่มีของเหลวในร่างกายเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากที่กล่าวมานี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเกิดขึ้น

3. การกัดกร่อนในซอก (Crevice corrosion)

การกัดก่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นบริเวณที่แคบ ๆ หรือเป็นร่องทำให้เกิดความแตกต่างทางความเข้มข้นและปริมาณของสาร ในวัสดุปลูกฝังการกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของแต่ละชิ้นงานหรือบริเวณที่มีการยึดระหว่างตัวสกรูกับแผ่นโลหะที่ใช้ทำกระดูกหรือวัสดุปลูกฝัง ทำให้ในแต่ละบริเวณซึ่งก็คือภายในซอกหรือรอยต่อและพื้นผิวด้านนอกมีปริมาณออกซิเจนไม่เท่ากันโดยบริเวณซอกหรือรอยต่อจะมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าภายนอกหรือพื้นผิวจะเกิดเป็นขั้วแอโนด ถ้าเป็นรอยแยกที่เกิดจากวัสดุมีองค์ประกอบต่างกันหรือมีการนำไฟฟ้าต่างกัน ทำให้การกัดกร่อนในซอกอาจเกิดร่วมกับการกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า

4. การกัดกร่อนแบบฉุดครูด (Fretting corrosion)

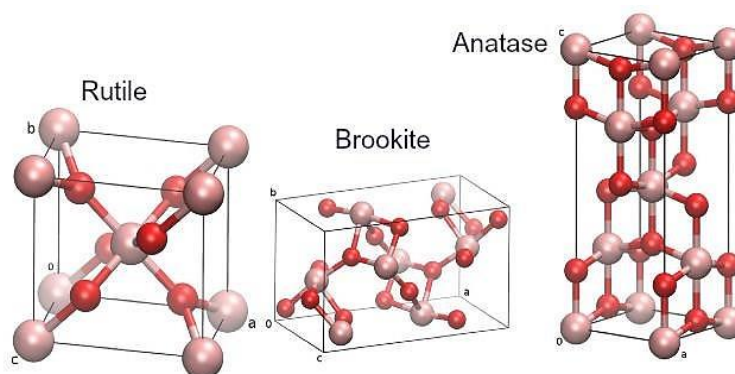
การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อมีวัสดุต่างชนิดกันมาสัมผัสกันแล้วเกิดการเคลื่อนที่ไปมาเล็กน้อยอย่างต่อเนื่องทำให้มีการสั่นที่ผิวสัมผัสเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ๆ ในสภาพแวดล้อมที่การกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ ทำให้ฟิล์มที่ปกคลุมบนผิวโลหะถูกทำลายจากการสั่นและฟิล์มไม่สามารถเกิดใหม่ได้ทันทำให้ผิววัสดุเกิดความเสียหาย ในวัสดุทดแทนการกัดกร่อนประเภทนี้จะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการยึดการของแผ่นโลหะตามกระดูกและตัวสกรู

5. การกัดกร่อนร่วมกับแรงเค้น (Stress corrosion cracking)

การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดจากการที่วัสดุได้รับแรงเค้นในสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งจะมี 2 แบบคือ ความเค้นภายนอก ที่กระทำกับโลหะเนื่องจากการใช้งาน และความเค้นภายในที่เกิดจากการขึ้นรูปเปลี่ยนรูปหรือการเชื่อม การกัดกร่อนประเภทนี้มักจะเริ่มจากการกัดกร่อนที่อาจจะเกิดขึ้นเริ่มต้นขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งก่อนและเมื่อมีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น จะทำให้โลหะนั้นแยกออกจากกันได้อย่างเร็วขึ้น เป็นผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

โลหะที่สามารถนำมาทำเป็นวัสดุปลูกฝังมีหลายชนิด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มโลหะมีค่า เช่น ทอง เงิน หรือแพลทินัม รวมถึงโลหะกลุ่มไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่สนใจศึกษาคือ โลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้กันในปัจจุบันเพราะมีสมบัติเด่นในเรื่องของการมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี มีความเข้ากันได้กับร่างกายที่ดี มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงและมีความเสถียรทางเคมีภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนเพราะเมื่อโลหะกลุ่มไทเทเนียมสัมผัสกับออกซิเจนจะเกิดการก่อตัวของชั้นออกไซด์ปกคลุมชั้นที่ผิวโลหะเป็นลักษณะฟิล์มป้องกันบาง ๆ หรือที่เรียกว่า พาสซีฟฟิล์ม (Passive film) และเมื่อชั้นออกไซด์บางส่วนถูกทำลายก็จะสามารถเกิดขึ้นใหม่เองได้อย่างรวดเร็ว (Spontaneously covered) จึงเป็นผลทำให้โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมมีสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [10] [18] [19] และไทเทเนียมออกไซด์ที่พบบ่อยคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งเป็นออกไซด์ของไทเทเนียมที่มีความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์และมีค่าพลังงานอิสระของกิ๊บส์สำหรับการก่อตัวของชั้นออกไซด์มีค่าลบ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึก 3

รูปแบบคือ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไลท์ (Brookite) ซึ่งลักษณะที่ต่างกันได้เกิดมาจากการเรียงตัวของอ็อกเตฮีดรอล ($\text{TiO}_2^6^-$) ที่ต่างกัน [9]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบบ่อย 3 รูปแบบคือ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) บรูคไลท์ (Brookite) [20]

ส่วนที่เนื้อเยื่อในร่างกายสัมผัสกับวัสดุปลูกฝังที่ทำจากโลหะไทเทเนียมหรือโลหะผสมไทเทเนียมคือบริเวณชั้นนอกไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวโลหะ จึงมีการศึกษาและปรับปรุงลักษณะพื้นผิวให้มีความเหมาะสมเพื่อให้เกิดการยึดติดที่ดีระหว่างวัสดุและเนื้อเยื่อ รวมถึงเพิ่มสมบัติในด้านอื่น ๆ เช่น ความต้านทานการกัดกร่อน ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ดังนั้นการปรับปรุงหรือปรับสภาพพื้นผิวจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยความขรุขระของพื้นผิวอาจเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการเพิ่มการยึดติดทางกล (Mechanical bonding) ระหว่างเนื้อเยื่อและวัสดุปลูกฝัง [21]

2.1.2 โลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V

โลหะไทเทเนียมสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามธาตุผสม โดยธาตุผสมชนิดต่าง ๆ ก็จะทำให้สมบัติของโลหะไทเทเนียมก็จะเปลี่ยนไป ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะไทเทเนียมจึงสามารถทำได้โดยการเติมธาตุบางชนิดลงไปเพื่อเปลี่ยนแปลงหรือและเพิ่มคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านความแข็งแรง การทนต่อสภาพอุณหภูมิ ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป ความสามารถในการผ่านกระบวนการทางความร้อน ความสามารถในการเชื่อม รวมถึงความสามารถในการขึ้นรูป โดยในสภาวะอุณหภูมิห้องโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแอลฟาแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 883 องศาเซลเซียส จะทำให้ไม่สามารถรักษาความเสถียรของโครงสร้างผลึกไว้ได้ จึงต้องทำการปรับปรุงให้โครงสร้างผลึกมีความเสถียรโดยทำการเติมธาตุบางอย่างลงไป เช่น อะลูมิเนียม โบรอน แกลเลียม เป็นต้น ซึ่งธาตุเหล่านี้จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอน

ทำให้สามารถทนต่อสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้โดยที่ยังคงโครงสร้างผลึกเป็นแอลฟาอยู่ ดังนั้นธาตุที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคงตัวของเฟสแอลฟาจึงเรียกว่าแอลฟาเสตบิลไลเซอร์ ส่วนธาตุที่เติมลงไปแล้วลดอุณหภูมิเพื่อป้องกันไม่ให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปเป็นแอลฟาจะเรียกว่าเบต้าเสตบิลไลเซอร์ โดยส่วนใหญ่ธาตุที่เป็นเบต้าเสตบิลไลเซอร์จะเป็นธาตุในกลุ่มทรานซิชันหรือกลุ่มโลหะมีค่าเช่น เงิน ทอง ทองแดง วานาเดียมและเหล็ก เป็นต้น ซึ่งธาตุผสมเหล่านี้จะทำให้โลหะผสมที่ได้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ไม่เปราะแตกง่ายและมีความสามารถในการขึ้นรูป

โดยปกติโลหะผสมที่ได้มาอยู่อุณหภูมิห้องจะมีโครงสร้างทั้งเฟสแอลฟาและเฟสเบต้าเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในประเภทที่แตกต่างกัน โลหะไทเทเนียมสามารถหลอมรวมกับธาตุชนิดต่าง ๆ แล้วออกมาเป็นโลหะไทเทเนียมผสมที่จะมีโครงสร้างและสมบัติที่เปลี่ยนหรือแตกต่างไปจากเดิมโดยจะขึ้นกับชนิดและปริมาณของธาตุที่เติมลงไป

ไทเทเนียมจะมีปฏิกิริยากับธาตุตัวอื่น ๆ เช่น ทอง อะลูมิเนียม อาร์กอน ทองแดง เหล็ก วานาเดียมและสังกะสีเพื่อที่จะฟอร์มขึ้นเป็นโลหะผสม เพื่อเกิดเป็นโลหะตัวใหม่ โดยโครงสร้างผลึกโลหะผสมไทเทเนียมจะมี 3 ฟอร์ม คือ แอลฟา เบต้า แอลฟา+เบต้า สำหรับในงานวิจัยนี้โลหะผสมไทเทเนียมที่สนใจคือ Ti-6Al-4V เป็นโลหะผสมไทเทเนียมที่มีการเติมธาตุอะลูมิเนียมและวานาเดียมลงไปร้อยละ 6 และ 4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อไทเทเนียมบริสุทธิ์ถูกให้ความร้อนพร้อมกับธาตุอะลูมิเนียม วานาเดียม ในปริมาณที่เหมาะสมแล้วเย็นตัวลงจะเกิดเป็นโลหะผสมไทเทเนียมประเภท Ti-6Al-4V โดยธาตุพวกนี้จะทำตัวเป็นเหมือนเงื่อนไขในการเกิดเฟสต่าง ๆ โดยอะลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นแอลฟาเสตบิลไลเซอร์ ซึ่งจะไปช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดน้ำหนักของโลหะผสม แต่ในทางกลับกันก็จะทำให้ค่าความเหนียวของวัสดุลดลง ส่วนวานาเดียมนอกจากจะเป็นเบต้าเสตบิลไลเซอร์แล้วยังช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนอีกด้วย โดยอุณหภูมิในการแปลงรูปของแอลฟาและเบต้าจะมีการเปลี่ยนช่วงอุณหภูมิ เมื่อมีการเติมอะลูมิเนียมหรือวานาเดียมลงไปในไทเทเนียมและเนื่องจากโลหะผสมชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นแบบอัลฟาและเบต้าจึงทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าไทเทเนียมบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.3 แสดงส่วนผสมของโลหะผสม Ti-6Al-4V [22]

Chemical composition	Weight (%)
V	4.22
Al	5.48
Sn	0.0625
Zr	0.0028
Mo	0.005
C	0.369
Si	0.0222
Cr	0.0099
Ni	<0.001
Fe	0.112
Cu	<0.02
Nb	0.0386
Ti	Bal.

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V

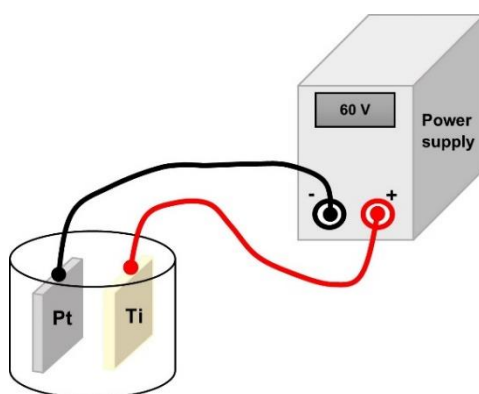
Density	4.43 g/cm ³
Ultimate tensile strength	887
Modulus of elasticity	11.3
Hardness (HRC/12 mm/150 Kgf)	28-32

โลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวัสดุปลูกฝังในกระดูก และในงานทันตกรรมเนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีคุณสมบัติในเรื่องความเข้ากันดีทางชีวภาพ มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี มีความหนาแน่นต่ำ มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง มีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเกิดความเป็นพิษ แม้ว่าโลหะผสมชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่ดีทางชีวการแพทย์ เช่น ความหยابผิว ส่วนผสมทางเคมี ความสามารถในการตอบสนองต่อเซลล์ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในบางเรื่อง จึงมีการพัฒนาข้อจำกัดเหล่านั้นด้วยวิธีการปรับปรุงพื้นผิว โดยทั่วไปการพอร์มขึ้นไทเทเนียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มความเฉื่อยและความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุ อย่างไรก็ตามมีการรายงานว่าชั้นออกไซด์จะถูกทำลายได้ง่ายจากการสึกหรอและผลจากการสึกหรอจะทำให้เกิดเศษสึกหรอและไอออนหลุดออกมารวมกับของเหลวในร่างกายซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ จึงต้องมีการ

ปรับปรุงผิวเพื่อให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการใช้งานมากขึ้น ในบรรดาวิธีการปรับปรุงพื้นผิวที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความหยาบผิวหรือการพอร์มของโครงสร้างระดับนาโนบนพื้นผิวได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดกับเนื้อเยื่อ ซึ่งกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยวิธีการทำแอนโนไดซ์เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมในการทำให้ได้โครงสร้างระดับนาโนจากการพอร์มเป็นท่อระดับนาโนบนพื้นผิวของโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม วิธีนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นใหม่สำหรับการใช้งานด้านในวิศวกรรมชีวการแพทย์และเนื้อเยื่อ โดยท่อนาโนไทเทเนียมสร้างขึ้นจากชั้นไทเทเนียมออกไซด์ผ่านการทำแอนโนไดซ์ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่มีฟลูออรีนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ความสม่ำเสมอและการเรียงตัวของท่อสามารถควบคุมได้โดยความต่างศักย์ ส่วนผสมทางเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ ระยะเวลาในการแอนโนไดซ์ อุณหภูมิ การเตรียมผิวก่อนการแอนโนไดซ์ ฯลฯ [1] [13] [15]

2.2 แอนโนไดเซชัน (Anodization)

วิธีแอนโนไดเซชันหรือการแอนโนไดซ์ด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical anodization) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวสำหรับงานชิ้นส่วนหรือกระดูกทดแทนที่ต้องปลูกฝังลงในร่างกาย การแอนโนไดซ์เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากและทำให้ได้ออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะท่อในระดับนาโน โดยท่อออกไซด์ระดับนาโนที่เกิดขึ้นสามารถเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการทำแอนโนไดซ์ สิ่งที่มีผลต่อกระบวนการนี้คือการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นความต่างศักย์ ความเข้มข้นของสารละลาย เวลาที่ใช้ โดยการพอร์มและการจัดเรียงตัวของท่อไทเทเนียมนาโนทิวบ์จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไทเทเนียมไอออน 2. เกิดการสลายตัวทางเคมีของชั้นออกไซด์บริเวณชั้นรอยต่อของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [23]



รูปที่ 2.3 การจำลองกระบวนการทำแอนโนไดซ์และเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้ความต่างศักย์คงที่ [23]

ในมุมมองของการกัดกร่อน วัสดุปลูกฝังอาจเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้จากการสัมผัสโดยตรงกับของเหลวในร่างกายแต่การพอร์มตัวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แบบดั้งเดิมจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ ทำให้โลหะผสมไทเทเนียมมีความเสถียรสูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่ถึงแม้ว่าชั้นออกไซด์ป้องกันนี้จะมีเสถียรทางอุณหพลศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามโลหะอาจสามารถถูกปล่อยออกมาผ่านกลไกการสลายตัวแบบพาสซีฟ (Passive) ดังนั้นการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมเหล่านี้จึงมีความสำคัญมาก มีรายงานว่าเมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลายแอสคเป็นเวลา 7 วัน พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยการทำแอนโนไดซ์แล้วได้พื้นผิวที่เป็นท่อนาไทเทเนียมซึ่งเป็นโครงสร้างระดับนาโนมีความสามารถทางชีวภาพและมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าพื้นผิวดั้งเดิมที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิว เนื่องจากอาจเกิดจากการเติบโตของชั้นไฮดรอกซีอะพาไทต์บนพื้นผิว [23]

เหตุที่ไม่ใช้เซรามิกในร่างกายเนื่องจากชิ้นส่วนที่จะใช้ปลูกฝังต้องมีความแกร่งในการต้านทานการแตกหักสูง ซึ่งพบว่าโลหะผสมไทเทเนียมมีความแกร่งสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะผสม Ti-6Al-4V มีคุณสมบัติเชิงกลสูงเนื่องจากธาตุผสมที่เติมลงไป [19]

วิธีการ Anodized oxidation หรือการทำแอนโนไดซ์ของโลหะผสมในอิเล็กโทรไลต์นั้นทำเพื่อสร้างชั้นกั้นระหว่างโลหะผสมและสภาพแวดล้อมโดยรอบ โดยไม่มีผลกระทบต่อความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ในการแอนโนไดซ์ด้วยการใช้แรงดันไฟฟ้าคงที่ในระหว่างกระบวนการจะมีผลต่อการเกิดชั้นออกไซด์ ความหนาของชั้นออกไซด์นั้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า โดยเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ความหนาของชั้นออกไซด์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งการแอนโนไดซ์นี้จะทำให้โลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้นเนื่องจากการแอนโนไดซ์จะช่วยเพิ่มความหนาของชั้นออกไซด์ โดยสมบัติของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะต่างกันไปตามเงื่อนไขในกระบวนการทำแอนโนไดซ์ ไม่ว่าจะเป็นความต่างศักย์ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ชิ้นงาน ส่วนผสม ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิ เป็นต้น [24] แต่ก็ยังมีบางส่วนพบว่าการทำแอนโนไดซ์แม้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดกับกระดูกแต่กลับทำให้สมบัติด้านการกัดกร่อนลดลงเนื่องจากการสร้างท่อนาโนไทเทเนียมเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารละลาย ดังนั้นเราจึงมีความสนใจที่จะศึกษาว่าเงื่อนไขในการเตรียมผิวและทำแอนโนไดซ์ในงานวิจัยนี้จะส่งผลต่อสมบัติการกัดกร่อนอย่างไร

2.3 ท่อนาโนไทเทเนียหรือท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันวัสดุจำพวกท่อนาโนได้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายตามชนิดและคุณสมบัติของวัสดุประเภทนั้น ๆ โดยท่อนาโนมีหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นท่อนาโนคาร์บอน ท่อนาโนไทเทเนีย ซึ่งท่อนาโนไทเทเนียเป็นท่อที่เราสนใจในงานวิจัยนี้ การสร้างท่อนาโนไทเทเนียได้มีการ

พัฒนาปรับปรุงมาเรื่อย ๆ มีงานวิจัยที่มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ฟิล์มที่ยาวขึ้นจึงได้มีความพยายามที่จะปรับเปลี่ยนชนิดของกรดและส่วนผสมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเป็นกรดสูงในการทำแอนโนไดซ์จะส่งผลให้ออกไซด์ของไทเทเนียมเกิดการละลายทางเคมีเร็วขึ้นทำให้ยากในการที่จะได้ท่อที่สูง รวมถึงมีการปรับเปลี่ยนชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จากการใช้สารละลายน้ำไปเป็นสารละลายอินทรีย์เพื่อช่วยลดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ให้ช้าลง โดยเฉพาะอัตราการสลายตัวของไทเทเนียมออกไซด์ จากการปรับปรุงส่วนผสมต่าง ๆ ส่งผลให้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มที่มีความยาวมากขึ้น โดยมีงานวิจัยหนึ่งพบว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสารอินทรีย์ประเภทเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) สามารถสังเคราะห์ฟิล์มท่อไทเทเนียได้สูงถึง 1000 ไมครอนหรือประมาณ 1 มิลลิเมตร

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาปรับปรุงเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มท่อไทเทเนียอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความสูงที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ [25]

2.3.1 วิธีการขึ้นรูปฟิล์มท่อนาโนไทเทเนีย

ฟิล์มท่อนาโนไทเทเนียสามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คือ ขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของไอออน

การทำแอนโนไดซ์เป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยกระแสไฟฟ้า แล้วทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่เสถียรและมีรูพรุนขนาดเล็กเคลือบอยู่บนผิวของโลหะ ในระหว่างการทำแอนโนไดซ์ที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยที่ไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทด ส่วนไอออนลบจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนดแล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดออกไซด์เคลือบอยู่บนผิวของโลหะไทเทเนียม [25]

2.3.2 กลไกการเกิดท่อนาโนไทเทเนีย [24]

การทำแอนโนไดซ์ของโลหะไทเทเนียมที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีฟลูออรีนและทำในสภาวะที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่จะมีปฏิกิริยาต่าง ๆ เกิดขึ้นพร้อมกันหลายปฏิกิริยา ดังนี้

1. มีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นเป็นออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม (Field assisted oxidation)
2. โลหะไทเทเนียมละลายเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ (Field assisted dissolution)
3. โลหะไทเทเนียมและออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมเกิดการละลายทางเคมี (Chemical dissolution) เนื่องจากการกัดเซาะ (Etching) ของไอออนฟลูออไรด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

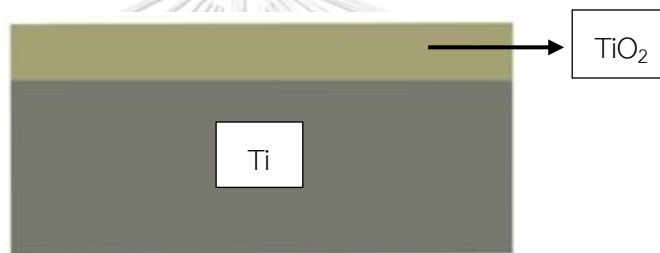
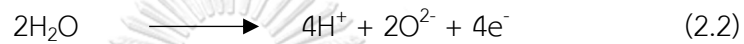
2.3.3 ขั้นตอนที่ทำให้เกิดท่อนาโนไทเทเนียม

ขั้นตอนหลักๆ ที่ทำให้เกิดท่อนาโนไทเทเนียมขึ้นที่ขั้วแอโนดประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก คือ

1. จะเกิดชั้นฟิล์มบางของไทเทเนียมเคลือบอยู่บนผิวโลหะ เนื่องจากมีการให้ความต่างศักย์แก่ระบบ ทำให้ที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยไทเทเนียมเกิดการแตกตัวเป็นไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) กับอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด ดังสมการที่ 2.1 [25] [26]

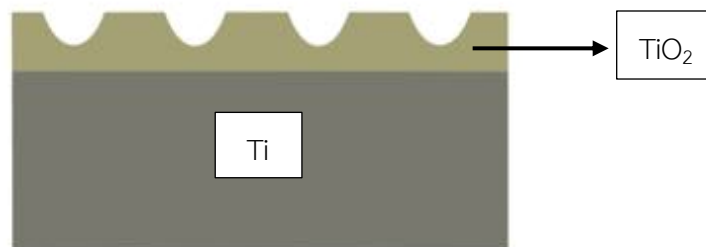


จากนั้น Ti^{4+} จะทำปฏิกิริยากับ O^{2-} ไอออน ซึ่งเป็นผลจากความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไปทำให้สารละลายมีการแตกตัวของน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดที่ผิวระหว่างชั้นไทเทเนียมออกไซด์และอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ทำให้มี TiO_2 เกิดขึ้นที่ผิวของโลหะไทเทเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.4



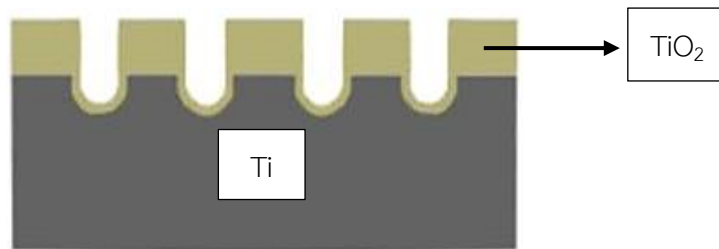
รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นที่ผิวโลหะ

2. เกิดรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่บนชั้นฟิล์มบางของ TiO_2 ที่เกิดบนพื้นผิวโลหะไทเทเนียม เนื่องจากเกิดการกัดเซาะของอนุภาคขนาดเล็กของฟลูออไรด์ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการที่ (2.4) และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดการกัดเซาะบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

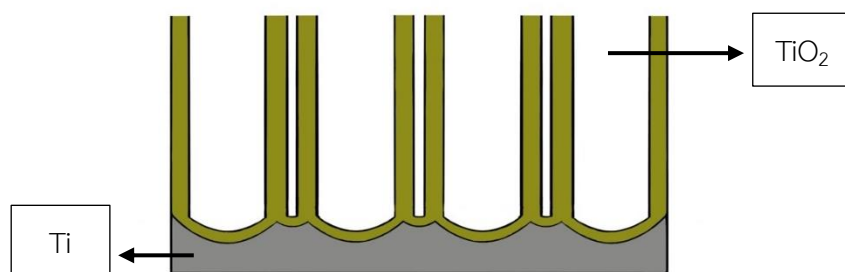
3. ผลจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้ขณะทำแอโนไดซ์จะทำให้เกิดสลายตัวของชั้นออกไซด์ที่บริเวณระหว่างชั้นออกไซด์กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์บริเวณข้างรูและเมื่อเวลาผ่านไปผลของความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไปนั้นจะทำให้รูพรุนขนาดเล็กบนผิวชั้นฟิล์ม TiO_2 มีขนาดใหญ่และหนาแน่นมากขึ้นและเกิดเป็นชั้น TiO_2 ที่มีความหนาลงไปบนแผ่นโลหะไทเทเนียม



รูปที่ 2.6 แสดงชั้น TiO_2 ที่มีความหนาเพิ่มขึ้นและการกัดเซาะบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ลึกขึ้น

4. ในขณะที่รูถูกกัดเซาะลึกลงไปเรื่อย ๆ สนามไฟฟ้าบริเวณข้างรูจะมากขึ้น ทำให้ฟลูออไรด์ไอออน F^- สามารถเริ่มกัด TiO_2 ที่บริเวณข้างรูทำให้เกิดเป็นช่องว่าง แต่เมื่อเวลาผ่านไปความหนา ขนาดรูและช่องว่างของ TiO_2 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้จะเพิ่มเวลาในการทำแอโนไดซ์

5. การทำแอโนไดซ์ในสภาวะที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เมื่อกระบวนการเกิดและสลายของ TiO_2 ดำเนินต่อไปจนทำให้ชั้นออกไซด์กั้นขวางมีค่าคงที่หรือมีความหนาเท่า ๆ กันทั้งพื้นผิวที่ถูกแอโนไดซ์ แล้วเกิดการพัฒนาไปเป็นท่อนาโนไทเทเนียมที่กระจายตัวบนพื้นผิวโลหะไทเทเนียม จากนั้นระบบจะพยายามปรับตัวเข้าสู่สมดุลโดยทำให้ชั้นความหนาของผนังท่อนาโนไทเทเนียมไม่เปลี่ยนแปลงแม้จะเพิ่มเวลาในการทำแอโนไดซ์ ในขณะที่ความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมจะมากขึ้นตามเวลาในการทำแอโนไดซ์ [25] [26]



รูปที่ 2.7 แสดงท่อนาโนไทเทเนียมบนพื้นผิวโลหะไทเทเนียมและช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างท่อ ดัดแปลง

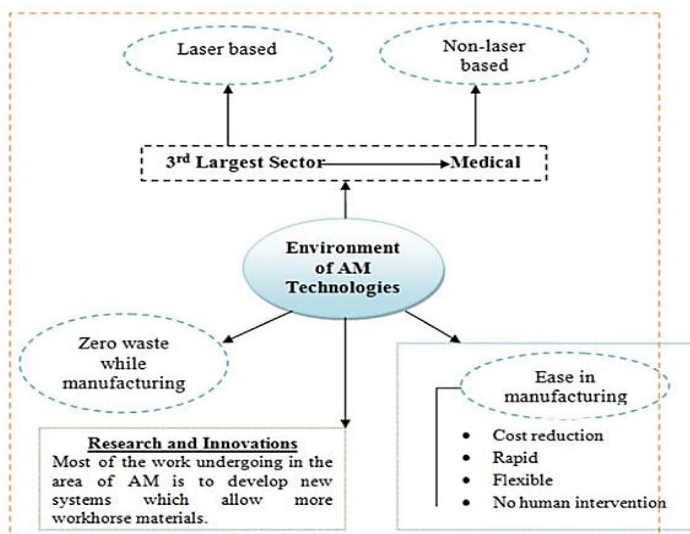
2.3.4 ประโยชน์ของฟิล์มท่อนานาโทเทเนีย

ฟิล์มท่อนานาโทเทเนียเป็นฟิล์มที่เกิดจากการประกอบด้วยท่อนานาโทเทเนียมหลายท่อมาเรียงชิดกัน โดยที่โครงสร้างของท่อนานาโทเทเนียจะมีลักษณะเป็นท่อที่ตรงกลางกลวง ด้านบนเปิด ด้านล่างที่อยู่ติดกับเนื้อโลหะปิด ทำให้ท่อนานาโทเทเนียมีพื้นที่ผิวสูงทั้งด้านในและด้านนอกตัวท่อ โดยหลังจากการทำแอโนไดซ์ท่อนานาโทเทเนียที่ได้จะมีความเป็นผลึกต่ำ แต่เมื่อนำไปทำการอบที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) จะทำให้ท่อนานาโทเทเนียมีความเป็นผลึกสูงขึ้น ส่งผลให้ประจุสามารถไหลผ่านหรือมีการแลกเปลี่ยนในแนวตัวท่อได้ดีและเนื่องจากความสามารถในการขนส่งประจุที่ดีจึงทำให้ฟิล์มท่อนานาโทเทเนียถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในหลายด้าน เช่น ใช้สร้างไฮโดรเจนแก๊สเซ็นเซอร์ ใช้ในงานทางชีวภาพและชีวการแพทย์ เช่น ใช้เป็นวัสดุในการขนส่งตัวยา เป็นต้น และถ้าหากสามารถควบคุมลักษณะโครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาดของท่อ ความยาวของท่อ ความหนาของฟิล์มได้อย่างแม่นยำและตรงตามความเหมาะสมของการใช้งานในแต่ละด้านก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานสูงขึ้น [10] [26]

สำหรับงานทางการแพทย์ การสร้างท่อนานาโทเทเนียขึ้นด้วยการแอโนไดซ์จะช่วยให้ความสามารถในการยึดเกาะของเซลล์และกระดูกเพิ่มขึ้น ช่วยปรับปรุงการโตของไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้ดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มท่อนานาโทเทเนียที่ปกคลุมผิววัสดุยังช่วยปรับปรุงเรื่องความต้านทานการกัดกร่อนได้ รวมถึงสนับสนุนวิทยาหรือลักษณะของฟิล์มท่อนานาโทเทเนียที่เกิดขึ้นก็มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเช่นกัน [26]

2.4 กระบวนการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (3D printing)

กระบวนการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ อาจเรียกได้อีกอย่างว่า Additive manufacturing (AM) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัสดุโดยการเติมเนื้อวัสดุและทำให้เกิดรูปร่างหรือรูปทรงตามต้องการโดยสร้างเป็นวัตถุจากโมเดล 3 มิติ ซึ่งสร้างขึ้นโดยการให้ความร้อนแก่วัสดุผงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยวิธีนี้จะลดปริมาณการเกิดขยะและเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงได้ รวมทั้งชิ้นงานที่ผลิตได้จะมีขนาดและรูปร่างที่มีความแม่นยำสูงอีกด้วย



รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังเกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยเทคนิค AM

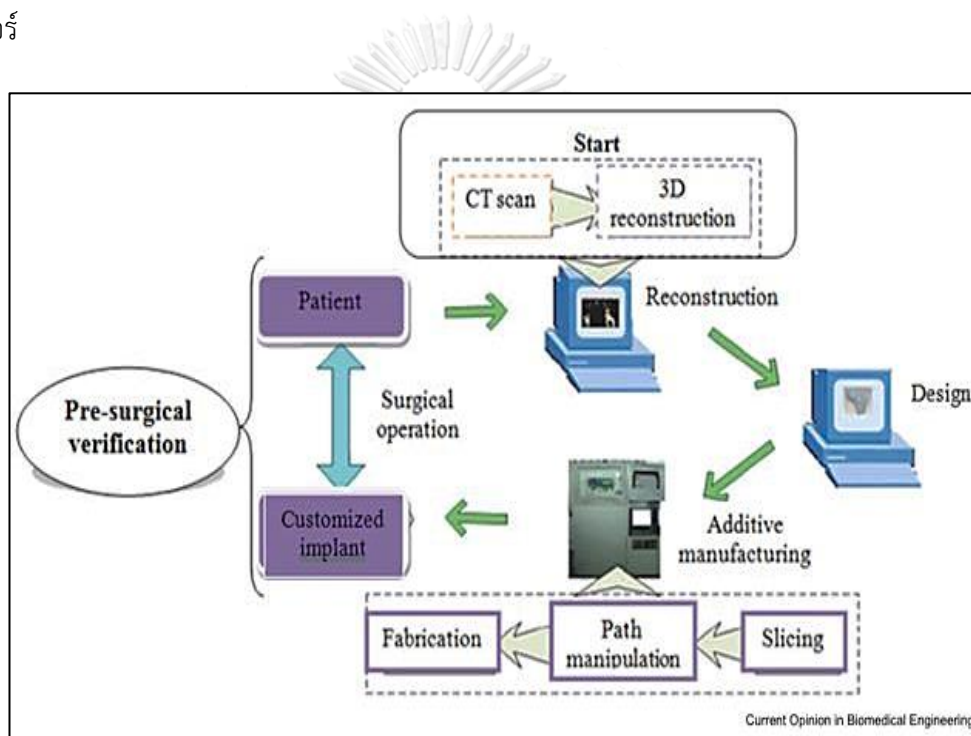
ปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาความสามารถในการเข้าทางได้ทางชีวภาพของวัสดุหลายชนิด เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานทางการแพทย์ในด้านต่าง ๆ ตามความเหมาะสมของสมบัติวัสดุเหล่านั้น ไม่ว่าจะเป็นกระดูกสะโพก กระดูกหัวเข่า ข้อต่อ กระดูกอ่อนและงานด้านทันตกรรม เป็นต้น โดยตารางที่ 2.5 แสดงความหลากหลายในการใช้วัสดุในงานชีวการแพทย์และการประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมชีวการแพทย์

ตารางที่ 2.5 แสดงความหลากหลายในการใช้วัสดุในงานชีวการแพทย์

วัสดุ	การนำไปใช้งาน
CP Ti	สกรู ตัวค้ำ
Ti-6Al-4V	วาล์วเทียม ขดลวด ตัวยึดกระดูก
Ti-6Al-7Nb	ครอบฟัน ข้อเข่า ข้อสะโพก
Ti-5Al-2.5Fe	กระดูกสันหลังเทียม
316L	ครอบฟัน สะพานฟัน ฟันปลอม
Ni-Ti	สาย/ท่อสวน ท่อขดลวด
PMMA, PE, PEEK	สะพานฟัน ข้อสะโพก แบริ่งข้อเข่า
Zirconia	กระดูกเทียมแบบมีรูพรุน รากฟันเทียม
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	วัสดุเคลือบวัสดุปลูกฝัง

2.4.1 หลักการทำงาน

กระบวนการทำงานเริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลทางการแพทย์ภายในร่างกายของผู้ป่วยผ่านเทคโนโลยี Computed Tomography (CT) และเทคโนโลยีการถ่ายภาพด้วยคลื่นสนามแม่เหล็ก (MRI) จากนั้นภาพที่รวบรวมจะถูกแปลงเป็นแบบจำลองการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย (CAD) ผ่านทาง Digital Imaging โดยแบบจำลองขั้นสุดท้ายของ CAD จะถูกจำลองผ่าน MIMICS หรือซอฟต์แวร์การแพทย์แบบ 3 มิติ สำหรับการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน คุณภาพของชิ้นงานจะต่างกันตามตัวแปรที่กำหนด เช่น ความหนาของชิ้นงาน ความหนาของแต่ละชั้น ความเร็วในการพิมพ์ รูพรุน อุณหภูมิ ประเภทของกระแสที่ใส่เข้าไป ชนิดของเลเซอร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเลเซอร์



รูปที่ 2.9 แสดงแผนผังของการแปลงข้อมูลเฉพาะของมนุษย์เป็นชิ้นส่วนที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ

เทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ มีหลากหลายเทคนิคขึ้นกับประเภทวัสดุ การนำไปใช้งาน และข้อจำกัดต่าง ๆ ในกระบวนการ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ 2.7 [4]

ตารางที่ 2.6 แสดงกระบวนการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ [4]

กระบวนการ	สถานะเริ่มต้น ของวัสดุ	การเตรียมวัสดุ	วิธีการสร้าง ชั้นวัสดุ	ประเภทวัสดุ
Electron beam melting (EBM)	ผง	Powder in bed	E-beam scanning	โลหะ
Selective laser sintering (SLS)	ผง	Powder in bed	Laser scanning	โลหะ เซรามิกส์ เทอร์โมพลาสติก
Selective laser melting (SLM)	ผง	Powder in bed	Laser scanning	โลหะ
Stereolitho-graphy system (SLA)	ของเหลว	Resin in vat	Laser scanning	UV curable resin, เซรามิกส์
Direct energy deposition	ผง	-	Electron /laser beam	โลหะ
Binder jetting	ผง	Powder in bed	Liquid adhesion supply	โลหะ เซรามิกส์

ตารางที่ 2.7 แสดงกระบวนการขึ้นรูปแบบ 3 มิติและการนำไปใช้งาน [4]

กระบวนการ	การนำไปใช้	การนำไปใช้ในการทางชีวการแพทย์
Electron beam melting (EBM)	อุปกรณ์และเครื่องมือ	งานออกแบบที่กำหนดเองในการศัลยกรรมกระดูก
Selective laser sintering (SLS)	ตัวต้นแบบ แบบหล่อ	การแปรรูปวัสดุใหม่โดยอาศัยการหลอมด้วยเลเซอร์
Selective laser melting (SLM)	อุปกรณ์และเครื่องมือ	เทคนิคการถ่ายภาพทางชีวการแพทย์
Stereolithography system (SLA)	ตัวต้นแบบ แบบหล่อ	สร้างขดลวดที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
Direct energy deposition	ตัวต้นแบบ อุปกรณ์	-
Binder jetting	ตัวต้นแบบ แบบหล่อ	-

แต่ถึงแม้กระบวนการขึ้นรูปแบบสามมิติจะเป็นเทคโนโลยีใหม่แต่ก็ยังคงมีปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการผลิต เช่น ลักษณะพื้นผิวไม่ดี ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ปัญหาโครงสร้างจุลภาค ฯลฯ เป็นต้น ทำให้มีหลากหลายงานวิจัยที่สนใจอย่างยิ่งที่จะศึกษาผลของตัวแปรหรือเงื่อนไขในกระบวนการขึ้นรูปต่อการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ การเพาะเลี้ยงเซลล์ ซึ่งลักษณะพื้นผิวก็เป็นอีกตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมประสานกับกระดูกทั้งในระดับมหภาค ระดับจุลภาคและระดับนาโน ซึ่งจะพบว่าปฏิกิริยาการเชื่อมประสานของเซลล์จะแตกต่างกันไปตามความขรุขระของพื้นผิว จึงมีหลายงานวิจัยที่ทำการปรับสภาพพื้นผิวเหล่านั้นโดยวิธีการเชิงเคมี เชิงกล รวมถึงเชิงเคมีไฟฟ้าหรือทำร่วมกันทั้งสามอย่างเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ

2.4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (Mechanical characterization)

ข้อต่อของมนุษย์จำเป็นต้องมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างสะดวกและสามารถใช้งานได้นานตลอดชีวิต จากการศึกษาพบว่า ค่าโมดูลัสยัง ค่าความแข็งแรงดึง ค่า

ความแข็งแรงอัดและค่าความแกร่งของกระดูกมนุษย์ เกี่ยวข้องกับอายุ เพศ ตำแหน่งของกระดูก ปริมาณของน้ำในร่างกายและประวัติการเจ็บป่วย สมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบการพิมพ์สามมิติ สามารถเทียบได้กับการขึ้นรูปแบบหล่อ (แสดงดังตารางที่ 2.8) และค่าความแข็งแรงดึงจะแปรผันตามการเรียงตัวและตำแหน่งในร่างกายนที่วัสดุถูกนำไปใช้ เนื่องจากแต่ละบริเวณของร่างกายจะได้รับแรงไม่เท่ากัน ซึ่งการปรับปรุงพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตจะช่วยพัฒนาคุณภาพของชิ้นส่วนทดแทนได้ [4]

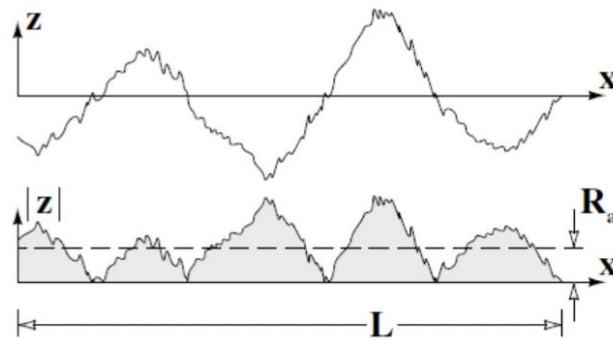
ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบหล่อและแบบการพิมพ์สามมิติ [4]

Material	AM setup	Cast/wrought component			Additive manufacturing		
		TS (MPa)	Elongation (%)	Yield strength (MPa)	TS (MPa)	Elongation (%)	Yield strength (MPa)
Inconel718	SLM	<1000	23		1400	>18	
Ti-6Al-4V	-do-	897	15	828	1095	8.1	890
SS 316L	-do-	560	40	<290	555	13.5	465
Ti-6Al-4V	DMLS	979		945	1133		1096
ss-316L	-do-	563		343	717		496

2.5 การวัดความหยาบผิว

ความหยาบผิวของวัสดุถือเป็นอีกหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุทดแทน ไม่ว่าจะเป็นด้านความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุทดแทนและเนื้อเยื่อ สมบัติด้านการกัดกร่อน รวมถึงความสามารถในการเปื่อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาความหยาบผิวของชิ้นงานก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวโดยการขัด ร่วมกับการทดสอบในด้านอื่น ๆ ด้วย โดยปกติการวัดค่าคุณสมบัติของผิวหรือ Surface parameters มีมากมายหลายค่าตามวิธีการเก็บข้อมูลจากการวัดด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Surface profilometer หรือ Surface roughness tester

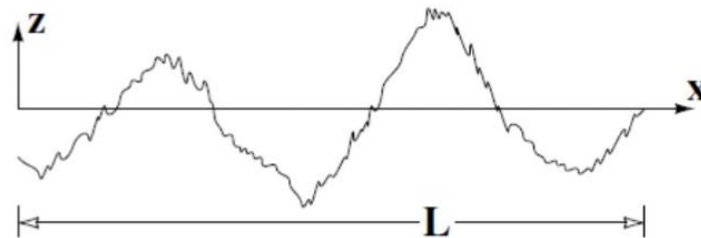
การวัดความหยาบผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ความหยาบผิวโดยเฉลี่ยและความหยาบผิวโดยขนาด ซึ่งการวัดความหยาบผิวที่นิยมใช้กันทั่วไปรวมถึงใช้ศึกษาในงานนี้จะเป็นการวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (R_a – Average surface roughness) ซึ่งเป็นการแสดงความหยาบด้วยค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวที่วัดได้ [27, 28] รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ย [28]

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z| dx$$

ส่วนอีกค่าที่ใช้ในงานนี้คือ ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (R_q, R_{rms} – Root mean square roughness) ซึ่งเป็นการแสดงความหยาบผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความหยาบผิวที่วัดได้ [28] รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การวัดความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง [28]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2 dx}$$

2.6 การวัดการกัดกร่อน

ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่ามีวัสดุทดแทนอาจเกิดการกัดกร่อนได้หากมีการสัมผัสหรือถูกใช้ในสารละลายและสภาพแวดล้อมต่าง ๆ กัน ซึ่งวัสดุทดแทนแต่ละชนิดจะพฤติกรรมและความสามารถในการทนการกัดกร่อนที่แตกต่างกันไปตามประเภทวัสดุ กระบวนการผลิตและกระบวนการปรับปรุงผิว โดยเราสามารถตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนและความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุที่สนใจได้

จากการทดสอบการกัดกร่อน ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้จะทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุด้วยวิธีโพเทนชิโอดีนามิก โพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) สามารถอธิบายปรากฏการณ์การกัดกร่อนได้หลายอย่างในแง่ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าสามารถใช้ศึกษาสิ่งเหล่านี้ได้ ซึ่งปรากฏการณ์ รวมถึงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์และกระแสภายใต้สภาวะควบคุมสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการกัดกร่อน ชั้นเคลือบและฟิล์ม ความสามารถในการเกิดฟิล์มป้องกันแนวโน้มการกัดกร่อนแบบรูเข็มและข้อมูลสำคัญอื่น ๆ ได้ [29, 30]

เทคนิค Potentiometric anodic polarization คือ การหาลักษณะเฉพาะของโลหะตัวอย่างจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้า การวัดด้วยวิธีนี้จะใช้เพื่อหาลักษณะการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่างในสภาพแวดล้อมของสารละลายนั้น ๆ ซึ่งการวัดด้วยเทคนิคนี้สามารถทำเสร็จได้ภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมงหรือในบางกรณีอาจใช้เวลาไม่กี่นาทีและเทคนิคนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบ เช่น แนวโน้มการเกิดการกัดกร่อน รวมถึงพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุหรือชั้นเคลือบบนชิ้นงานทดสอบได้และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ประเมินและเปรียบเทียบสมบัติการกัดกร่อนของโลหะและโลหะผสมต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยสำหรับการใช้งานระยะยาว [29]

2.6.1 หลักการทางไฟฟ้าเคมีและการวัด Potentiodynamic polarization

หลากหลายปรากฏการณ์การกัดกร่อนสามารถอธิบายได้ในรูปของปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ภายใต้การควบคุมตัวแปรและเงื่อนไขที่มีความสำคัญต่ออัตราการกัดกร่อน เมื่อโลหะถูกแช่อยู่ในสารละลายตัวกลางจะเกิดทั้งปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันที่ผิวชิ้นงาน โดยทั่วไปชิ้นงานจะถูกออกซิไดซ์หรือเกิดการกัดกร่อนและตัวกลาง (สารละลาย) จะถูกรีดิวซ์

ในการทดลองวัดการกัดกร่อนโดยอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า เราทำการวัดประจุของโลหะที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการกัดกร่อนหรือก็คือการวัดอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมา ณ ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการกัดกร่อน คือ อัตรารวมปฏิกิริยาออกซิเดชันเท่ากับรีดักชันนั่นเอง

ศักย์สมดุลที่เกิดจากโลหะในกรณีที่ไม่มีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับโลหะเรียกว่า ศักยภาพของวงจรถูกเปิด (E_{ocp}) ในการทดลองการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าเคมีส่วนใหญ่ ขั้นตอนแรกคือการวัดค่า E_{ocp} โดยใช้เวลาที่เพียงพอเพื่อทำให้มีความเสถียรก่อนเริ่มการทดลองทางเคมีไฟฟ้าซึ่งค่า E ที่เสถียรถูกนำมาใช้เพื่อบ่งชี้ว่าระบบที่กำลังศึกษาอยู่ใน "สถานะคงที่" กล่าวคือปฏิกิริยาการกัดกร่อนต่าง ๆ จะถือว่าอัตราคงที่

ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่เกิดสมดุลการกัดกร่อนซึ่งเป็นจุดตัดของปฏิกิริยาแอโนดิก และแคโทดิกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}) ซึ่งค่า E_{corr} สามารถประมาณค่าได้เลยจากการอ่านจากกราฟโพลาริเซชันที่ได้จาก Tafel Plot ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิด ณ ตำแหน่งที่เกิดสมดุลการกัดกร่อนการกัดกร่อนจะเรียกว่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current, i_{corr}) ส่วนปริมาณการกัดกร่อนต่อหน่วยเวลาและพื้นที่หรืออัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) สามารถพิจารณาจากกระแสต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current density, I_{corr}) ตามกฎของฟาราเดย์ โดยอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานสามารถหาได้โดยคำนวณจากนำค่า I_{corr} มาใช้คำนวณ [14, 29, 30] โดยใช้สมการ

$$CR = \frac{K \cdot I_{corr} \cdot EW}{d}$$

CR = อัตราการกัดกร่อน

I_{corr} = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน

K = ค่าคงที่ซึ่งมาจากหน่วยอัตราการกัดกร่อนที่ใช้

EW = น้ำหนักสมมูล

D = ความหนาแน่น

ซึ่งอัตราการกัดกร่อนมีความเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นประเภทของวัสดุ องค์ประกอบของสารละลายและอุณหภูมิ เป็นต้น

2.7 การวัดมุมสัมผัสของของเหลว

มุมสัมผัสเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันทั่วไปในการวัดความสามารถในการเปียกของพื้นผิวหรือวัสดุ ซึ่งการศึกษาความสามารถในการเปียกหมายถึง การศึกษาว่าของเหลวที่สะสมอยู่บนพื้นผิวที่เป็นของแข็งหรือของเหลวการกระจายออกไปอย่างไร ความสามารถในการเปียกดังกล่าวถูกกำหนดโดยการวัดมุมสัมผัสของของเหลวที่ก่อตัวขึ้นเมื่อสัมผัสกับของแข็งหรือของเหลว โดยแนวโน้มของความสามารถในการเปียกจะมากขึ้นเมื่อมุมสัมผัสเล็กหรือแรงตึงผิวน้อยลง ของเหลวเปียกเป็นของเหลวที่สร้างมุมสัมผัสกับของแข็งที่มีขนาดมุมสัมผัสเล็กกว่า 90 องศา ส่วนของเหลวที่ไม่เปียกจะสร้างมุมสัมผัสระหว่าง 90 ถึง 180 องศากับของแข็ง [31, 32]

มุมสัมผัสเป็นมุมที่ของเหลวสร้างขึ้นกับพื้นผิวแข็งหรือ Capillary wall ของพื้นผิวหรือวัสดุที่มีรูพรุนเมื่อทั้งสองมีการสัมผัสกัน โคนมุมสัมผัสนี้จะกำหนดโดยสมบัติของของแข็งและของเหลว รวมถึงปฏิกิริยาและแรงผักระหว่างของเหลวกับของแข็งรวมถึงสมบัติของ Interface ของ 3 เฟส (แก๊สของเหลวและของแข็ง) ปฏิกิริยาเหล่านี้อธิบายด้วยแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive) และแรงยึดเกาะ

(Adhesion) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุล ซึ่งความสมดุลระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลที่คล้ายคลึงกันและแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลที่ไม่เหมือนกันจะเป็นตัวกำหนดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นในบริเวณส่วนต่อประสาน (Interface) ที่เป็นของแข็งและของเหลว

Capillarity คือ คือความสามารถในการดึงสารอื่นเข้าไปและเกิดขึ้นเมื่อแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลระหว่างของเหลวกับสสารมีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายในของเหลว โดยปรากฏการณ์นี้จะทำให้ของเหลวที่สัมผัสกับวัตถุมีมุมสัมผัสที่มีลักษณะต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของแรงยึดเกาะและแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้น [31, 32]

2.7.1 Sessile drop method

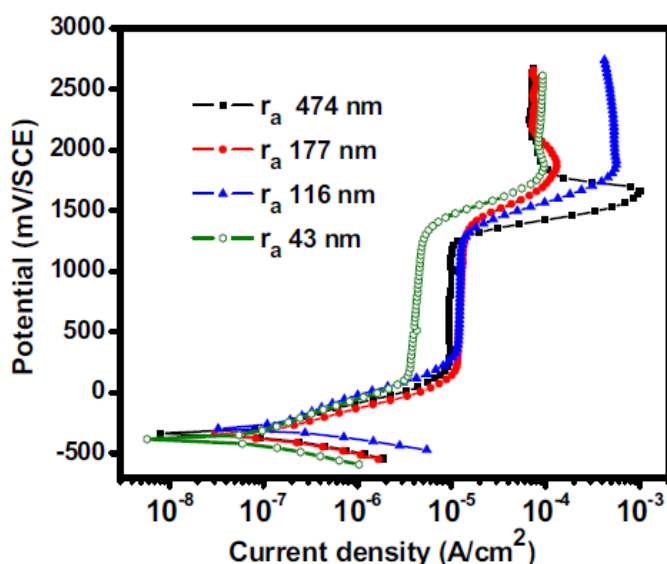
วิธีวัดมุมสัมผัสมีหลายวิธีแต่หนึ่งในวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายรวมถึงถูกนำมาใช้ในงานนี้คือ Sessile drop ซึ่งเป็นการศึกษาลักษณะมุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิวหรือของเหลวอีกชนิดจากการกล้องจุลทรรศน์เพื่อวัดมุมสัมผัสโดยตรง ซึ่งการวัดด้วยวิธี Sessile drop จะมี 2 แบบคือ

1. แบบคงที่ (Static) จะทำการวัดมุมสัมผัสเมื่อของเหลวหยดลงที่พื้นผิว ณ ขณะใดขณะหนึ่ง
2. แบบไดนามิก (Dynamic) จะคล้ายกับแบบ Static แต่จะเป็นการวัดมุมสัมผัสของของเหลวโดยมีการเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการทดสอบ โดยการวัดมุมสัมผัสของของเหลวที่หยดลงมาเมื่อเวลาผ่านไป โดยผลที่ได้จะออกมาเป็นมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นที่เวลาต่าง ๆ [31, 32]

2.8 ทบทวนวรรณกรรม

2.8.1 อิทธิพลของการเตรียมผิวและ/หรือความหยาบผิวชิ้นงานต่อผลของการกัดกร่อนของโลหะ

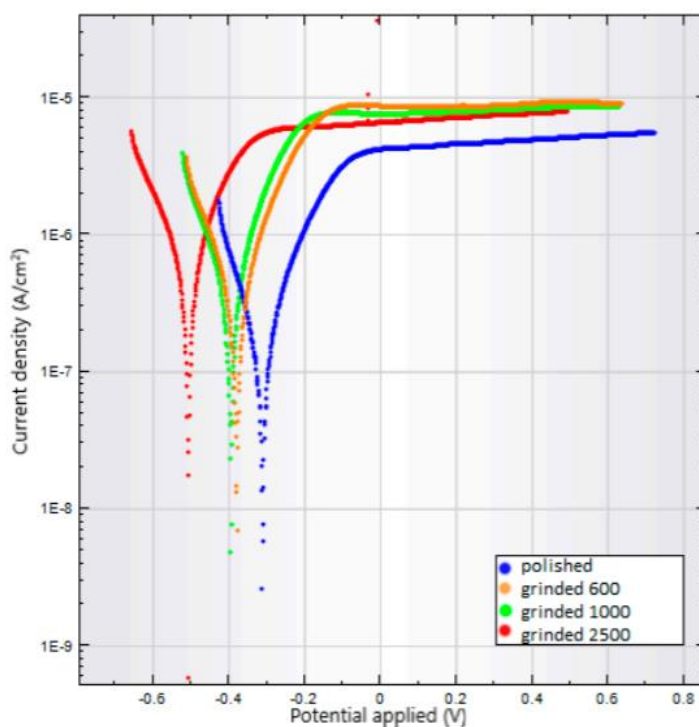
Bose Sivakumar และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับชิ้นงานไทเทเนียมบริสุทธิ์เกรด 2 ที่มีค่าความหยาบผิวต่างกันต่อพฤติกรรมกัดกร่อนในสารละลายรีจเจอร์โดยใช้เทคนิค Potentiodynamic ในการวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าค่าศักย์การกัดกร่อน (E_{corr}) ของชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิว 43 116 177 474 นาโนเมตร จะมีค่า -383 -257 -344 -333 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีความหยาบผิวเฉลี่ย 43 นาโนเมตร จะดีกว่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่มากกว่า 43 นาโนเมตร ค่าความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน (i_{corr}) และอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 116 ไปถึง 474 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.10 [33] ผู้วิจัยจึงสรุปไว้ว่าความหยาบผิวมีผลต่อค่าความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ



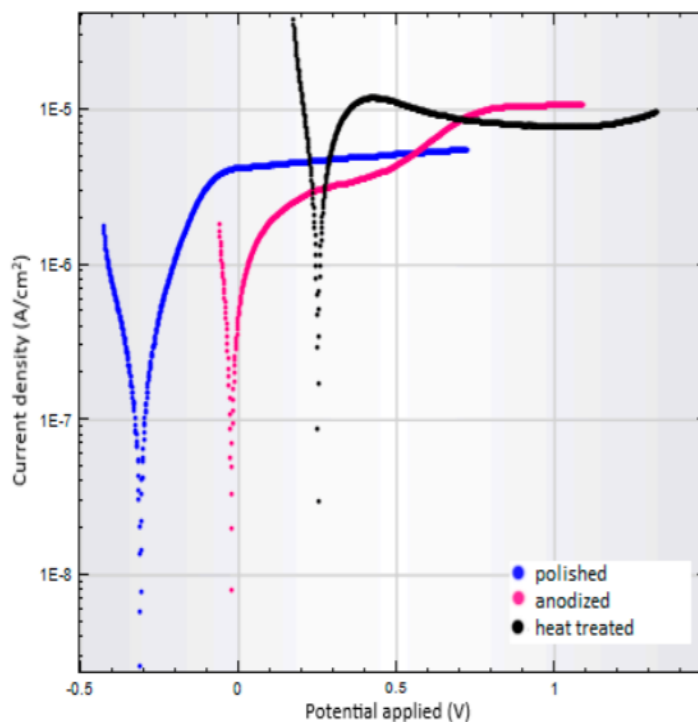
รูปที่ 2.12 แสดงผลการที่ได้จากทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีความหยาบผิวต่างกัน [33]

Verronika Jordanovava และคณะ ได้ทำการศึกษาผลจากการปรับปรุงผิวโลหะ Ti-6Al-4V ต่อสมบัติการกัดกร่อน โดยในการทดลองนี้ได้ทำการปรับปรุงผิวทั้งหมด 6 เงื่อนไขได้แก่ ขัดหยาบจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 600 1000 2500 ขัดเงาด้วยผงอะลูมินาตั้ง 1 0.3 และ 0.05 ไมครอนตามลำดับ ทำแอนโนไดซ์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบสารละลาย EG น้ำ DI และ NH_4F ในสัดส่วน 89:10:1 ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ เป็นเวลา 60 นาทีและทำแอนโนไดซ์ต่อด้วยการปรับปรุงด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที ผล

จากวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อนจากกราฟโพลาริเซชันในรูปแบบที่ 2.11 และ 2.12 ด้วยเทคนิค Tafel extrapolation พบว่ายิ่งขัดกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้น (เบอร์ 600 1000 และ 2500) อัตราการกัดกร่อนจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น โดยมีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.0116 0.0122 และ 0.0219 มิลลิเมตรต่อปีตามลำดับ เนื่องจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้นจะไปสร้าง Active area ที่ใหญ่ขึ้นทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น แต่เมื่อทำการขัดเงาอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเหลือ 0.0043 มิลลิเมตรต่อปี เพราะการขัดเงาจนผิวเรียบจะทำให้บริเวณ Active area ลดลง และอัตราการกัดกร่อนจะกลับมาสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อทำการแอนโนไดซ์เนื่องจากทำให้เกิดท่อขนาดเล็กบนผิวชิ้นงานซึ่งท่อขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะไปเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและสารละลายทดสอบและอัตราการกัดกร่อนจะสูงที่สุดเมื่อทำการแอนโนไดซ์แล้วต่อด้วยการทำ Heat treatment เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงเฟสของชิ้นท่อนานาโนไทเทเนียม โดยมีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.0182 และ 0.0998 มิลลิเมตรต่อปีตามลำดับ [34]



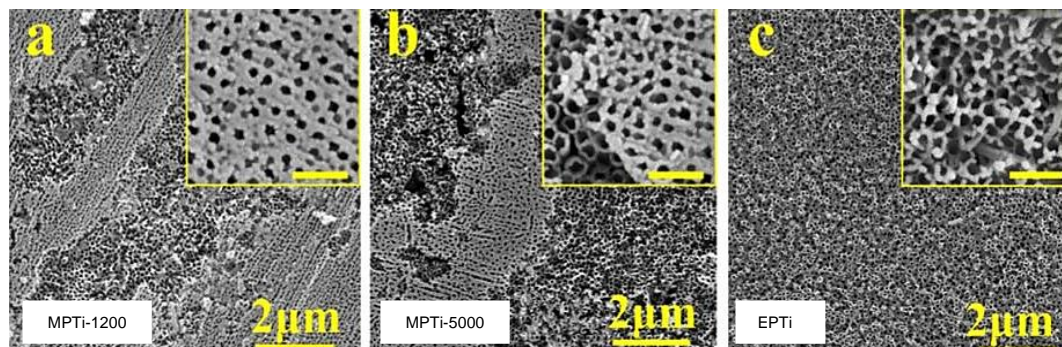
รูปที่ 2.13 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ผ่านการขัดเงาและขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 1000 และ 2500 [34]



รูปที่ 2.14 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ผ่านการขัดเงา การแอโนไดซ์และการแอโนไดซ์แล้วต่อด้วยการปรับปรุงด้วยกระบวนการทางความร้อน [34]

2.8.2 อิทธิพลของความหนาผิวชิ้นงานต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียม

Amin Pourandarjani และคณะ ทำการศึกษาผลของความหนาผิวไทเทเนียมต่อลักษณะการเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการแอโนไดซ์ โดยความหนาผิวที่จากกันได้จากการเตรียมผิวด้วยการขัดที่มีเงื่อนไขต่างกัน 3 กลุ่มคือ 1.การขัดเงาเชิงกลด้วยกระดาษทรายถึงเบอร์ 1200 (MPTi-1200) 2.การขัดเงาเชิงกลด้วยกระดาษทรายถึงเบอร์ 5000 (MPTi-5000) 3.การขัดเงาเชิงไฟฟ้า (EPTi) จากการศึกษาลักษณะท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า ความหนาผิวสูงจะมีร่องที่กว้างและลึกอยู่บนผิว ซึ่งการโตของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวที่ไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้พื้นผิวที่ได้มีสัณฐานวิทยาที่ไม่สม่ำเสมอ โดยสัณฐานวิทยาจะประกอบด้วย 2 บริเวณคือบริเวณที่มีผนังท่อหนาและบริเวณที่มีผนังท่อบาง ถ้าความหนาของพื้นผิวลดลงจะทำให้บริเวณที่เป็นผนังบางลดลงและสัณฐานวิทยามีความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งหมายถึงชิ้นงาน MPTi-5000 มีสัณฐานวิทยามีความสม่ำเสมอมากกว่าชิ้นงาน MPTi-1200 ส่วนชิ้นงาน EPTi จะมีการกระจายตัวของท่อที่สมบูรณ์และท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผนังบาง [35] ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะพื้นผิวจากกล้อง SEM ของชิ้นงานที่เตรียมผิวมาต่างกัน a) MPTi-1200 b) MPTi-5000 c) EPTi [35]

Fahimeh Behzadi และคณะ ได้ทำการศึกษาการเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้จากการแอนโนไดซ์ต่อความต่างของสัณฐานวิทยาของพื้นผิว โดยในการทดลองนี้จะแบ่งชิ้นงาน ออกเป็นสามกลุ่มใหญ่คือ 1.กลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมผิว 2.กลุ่มที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดเงา ทางไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วย Perchloric acid และ Glacial acetic acid ใน สัดส่วน 1:9 โดยปริมาตร 3.กลุ่มที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดเงาทางไฟฟ้าโดยใช้สารละลาย อิเล็กโทรไลต์เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 2 แต่เพิ่มเอทานอลลงไปร้อยละ 15 โดยปริมาตร จากผลการศึกษา พบว่าเมื่อนำชิ้นงานไปวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องจะได้ ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (R_{rms}) ของ ชิ้นงานกลุ่ม 1 2 3 เท่ากับ 25.95 11.43 และ 8.14 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อทำการแอนโนไดซ์ บนชิ้นงานทั้งสามกลุ่มจะได้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 125 120 และ 92 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานที่มีความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองตั้งต้นมากที่สุดจะได้ท่อนา โนไทเทเนียมที่มีเส้นที่ผ่านศูนย์กลางมากที่สุดตามไปด้วย นอกจากนี้ในงานวิจัยยังพบว่าการที่ความ หยาบผิวตั้งต้นของชิ้นงานลดลงจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลดลง รวมถึงการกระจายตัว ของขนาดท่อที่มีความสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นและท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีการเรียงตัวที่ เป็นระเบียบมากขึ้นและมีความหนาแน่นมากขึ้นด้วย [36]

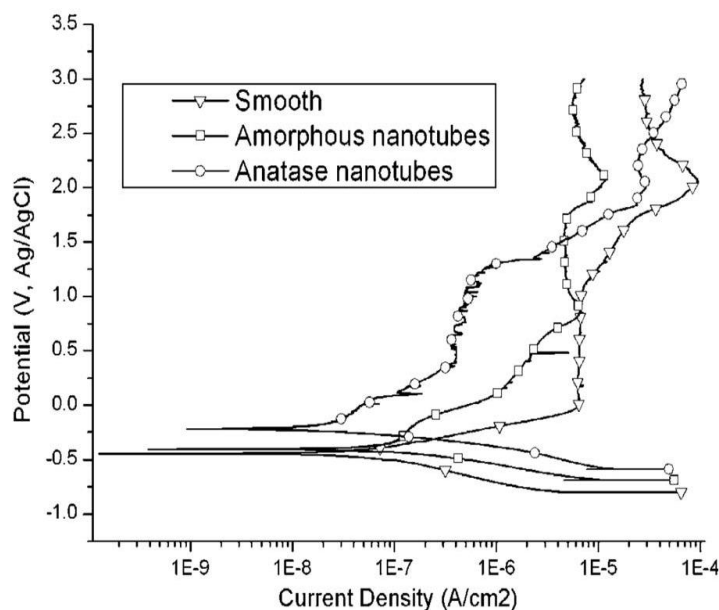
2.8.3 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่อความสามารถในการเปียก

Guohua Liu และคณะได้ทำการศึกษาความสามารถในการเปียกของพื้นผิวที่มีการเรียงตัว ของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการแอนโนไดซ์ ในการทดลองนี้จะทำการแอนโนไดซ์ในสาร อิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วย EG ร้อยละ 99.8 โดยปริมาตร NH_4F ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรและ DI ร้อยละ 0.3 โดยปริมาตร โดยได้แบ่งชิ้นงานออกเป็น 4 กลุ่มภายใต้ความต่างศักย์ที่ต่างกันคือ 20 40

60 และ 80 โวลต์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเอาไปทำการอบอ่อนต่อที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความหนาของชั้นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจะเพิ่มขึ้นเมื่อความต่างศักย์ที่ใช้เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความชอบน้ำ (Hydrophilicity) พบว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมากขึ้น โดยท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะมีค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างของเหลวและพื้นผิวน้อยกว่าท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก โดยทำให้ค่ามุมลดลงจาก 35 องศาไปเป็น 2 องศาจากการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจาก 30 เป็น 190 นาโนเมตรและนอกจากนั้นยังพบอีกว่าชั้นงานที่เกิดท่อที่มีขนาดรูปร่างและการเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอจะมีแรงดึงที่เกิดจากการดึงดูระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเองอ่อนกว่าแรงยึดติดของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวจากบริเวณที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบทำให้มีพื้นที่ในการแทรกซึมของเหลวมากขึ้นด้วย โดยการทดลองนี้ผู้เขียนสรุปไว้ว่าการควบคุมสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมของออกไซด์มีความสำคัญและมีความเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเปียก (Wettability) ของวัสดุ [37]

2.8.4 อิทธิพลของการสร้างท่อไทเทเนียมต่อผลของการกัดกร่อน

Wei-qiang Yu และคณะได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นท่อไทเทเนียมออกไซด์บนโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ในสารละลายแอสคและกลูโคส สำหรับงานวิจัยนี้จะการสร้างท่อไทเทเนียมออกไซด์ด้วยวิธีการทำแอโนไดซ์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โดยทำที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง งานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ 1. ชั้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทำแอโนไดซ์ 2. ชั้นงานที่ผ่านการทำแอโนไดซ์ 3. ชั้นงานที่ผ่านการทำแอโนไดซ์และอบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบและวิเคราะห์ผลของแต่ละเงื่อนไข ผู้วิจัยพบว่าชั้นท่อนาโนไทเทเนียมมีผลต่อความต้านทานของชั้นแพสซีฟโดยการมีชั้นท่อนาโนไทเทเนียมจะทำให้ความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อนลดลง เมื่อเทียบกับชั้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทำแอโนไดซ์ ดังแสดงดังรูปที่ 2.14 ส่วนชิ้นงานที่ทำการอบอ่อนหลังการทำแอโนไดซ์พบว่าค่าความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นท่อไทเทเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากมันไปลดค่าความหนาแน่นของกระแสที่จุดเกิดฟิล์มป้องกัน (Passive film) ของวัสดุ จากที่กล่าวมาผู้วิจัยพบว่าชั้นท่อไทเทเนียมออกไซด์สามารถปรับปรุงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุทางการแพทย์ได้ [38]

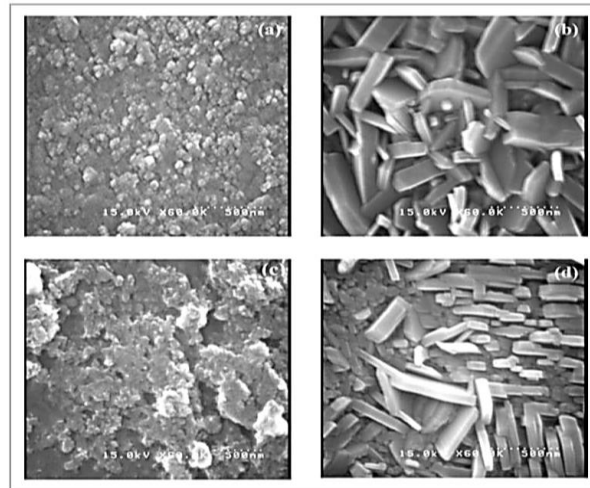


รูปที่ 2.16 แสดงผลจากการทำ Potentiodynamics polarization บนผิวของตัวอย่างแบบที่ผ่านการทำแอนโนไดซ์และไม่ได้ทำ [38]

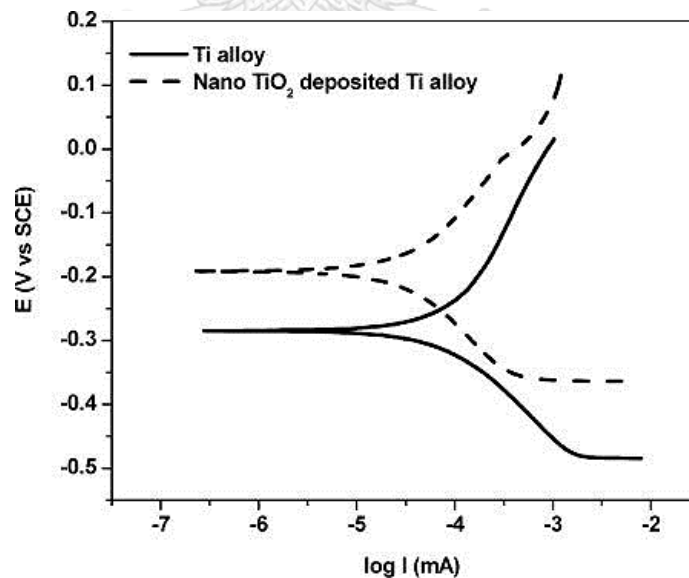
2.8.5 อิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ในการสร้างท่อไทเทเนียมต่อผลของการกัดกร่อนและ/หรือสัณฐานวิทยาของท่อไทเทเนียม

Ramji Karpagavalli และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนและความเข้ากันได้ทางชีวภาพของฟิล์มนาโนไทเทเนียมออกไซด์บนวัสดุโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V โดยเริ่มทำการทดลองจากการนำไทเทเนียมที่ตัดเป็นแผ่นมาขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 120 ถึง 1000 แล้วทำการขัดเงาด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.05 ไมครอน จากนั้นทำการสร้างฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ด้วยวิธีการเคลือบผิวทางไฟฟ้าโดยทำในสารละลาย $TiCl_4$ (Fluka) 0.05 โมลาร์ และ H_2O_2 โมลาร์ ใน เมทานอล/น้ำ (ในอัตราส่วนร้อยละ 3:1 โดยปริมาตร) โดยใช้กระแสต่างกัันดังนี้ 4 30 40 มิลลิแอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปส่องดูโครงสร้างของชิ้นงานก่อนอบและหลังอบโดยกล้อง SEM และนำไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลายแอสค ผลที่ได้จะพบว่าชิ้นงานที่แอนโนไดซ์โดยใช้กระแสสูงและไม่ผ่านการอบอ่อนจะพบอนุภาคที่ไม่มีผลึกและมีการเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ชิ้นที่ผ่านการอบจะมีโครงสร้างเป็นผลึกคล้ายก้อนอิฐ (bricklike) ส่วนชิ้นงานที่โดยใช้กระแสต่ำจะพบว่าอนุภาคของโครงสร้างนาโนไทเทเนียมออกไซด์จะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงดังรูปที่ 2.15 หลังทำการอบอ่อนจะพบว่าอนุภาคของไทเทเนียมออกไซด์จะใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนโครงสร้างจากอนาเทสไปเป็นรูไทล์และชิ้นที่ทำการสร้างฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์จะมีค่าความ

ต้านทานการกัดกร่อนและความเข้ากันได้ทางชีวภาพมากกว่าชั้นที่ไม่ได้ทำการแอนโนไดซ์ [39] ดังแสดงดังรูปที่ 2.16

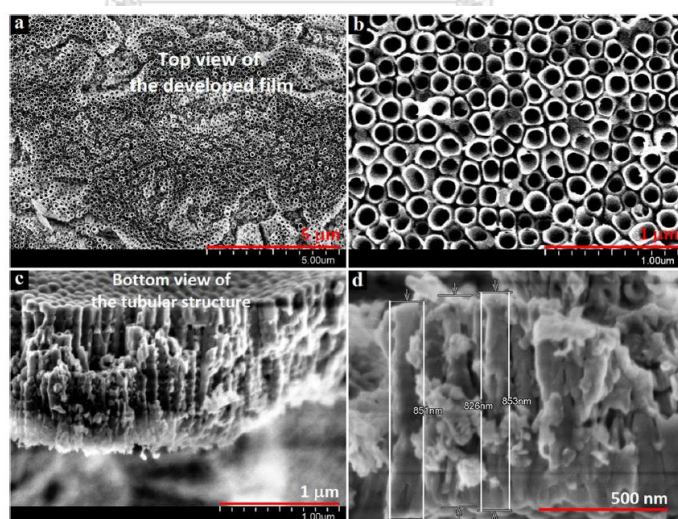


รูปที่ 2.17 แสดงภาพถ่ายจาก SEM ของโครงสร้างระดับนาโนของ TiO_2 ที่เคลือบบนผิว Ti6Al4V: (a,c) ชั้นงานที่มีการเคลือบผิว และ (b,d) หลังการอบที่ 500°C . ความหนาแน่นของกระแสที่ใช้เคลือบ: 22 (a,b) 30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ (c,d) 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร [39]

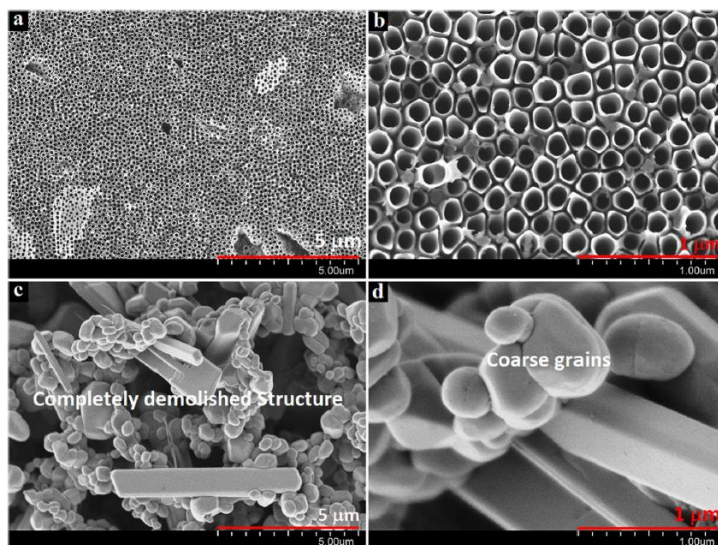


รูปที่ 2.18 แสดงกราฟที่ได้จากการทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของ TiO_2 บนผิว Ti-6Al-4V และผิวที่ไม่มี TiO_2 ในสารละลายแองค์ [39]

M. Sarraf และคณะได้ทำการศึกษาเรื่องการออกฤทธิ์ทางชีวภาพและการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V โดยการสร้างท่อนาโนไทเทเนียมขึ้นที่ผิว ในงานวิจัยนี้จะแบ่งชิ้นงานเป็น 3 กลุ่มคือ ชิ้นงานดั้งเดิม ชิ้นงานที่ทำการแอนโนไดซ์ ชิ้นงานที่ทำการแอนโนไดซ์แล้วนำไปอบต่อ โดยการทดลองจะเริ่มจากการนำโลหะไทเทเนียมมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 ถึง 2400 จากนั้นทำการขัดเงาด้วยผงเพชร จากนั้นทำการแอนโนไดซ์ด้วยสารละลาย NH_4F ร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก โดยมีเอทิลีนไกลคอลและน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 90:10 และใช้แท่งกราไฟท์เป็นขั้วแคโทด จากนั้นทำการแอนโนไดซ์โดยใช้ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ที่ 1 ชั่วโมง สำหรับชิ้นงานที่ทำการอบจะทำที่ 500 หรือ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างและผลการกัดกร่อนในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาลิน (PBS) โดยพบว่าหลังจากการทำแอนโนไดซ์ที่ 1 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญจากรูพรุนระดับนาโนไปเป็นท่อระดับนาโน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และเมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จะมีโครงสร้างเป็นอนาเทสและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบอ่อนเป็น 700 องศาเซลเซียส ผลที่ได้คือท่อจะถูกทำลายและทำให้มีโครงสร้างหยาบพอร์มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และเมื่อนำไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนจะพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการทำแอนโนไดซ์และอบอ่อนที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จะช่วยทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าการพอร์มขึ้นของท่อนาโนไทเทเนียมบนวัสดุไทเทเนียมชนิด Ti-6Al-4V จะช่วยพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ [22]



รูปที่ 2. 19 แสดงภาพจาก FESEM ของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดซ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย 0.35% NH_4F โดย a,b จะเป็นภาพที่ได้จากมุมมองด้านบนและ c,d จะเป็นภาพที่ได้จากการตัดตามขวางที่กำลังขยายต่างกัน [22]

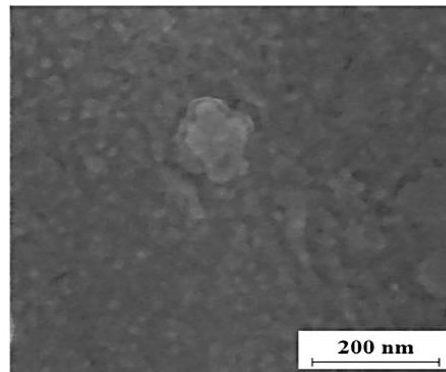


รูปที่ 2.20 แสดงภาพจาก FESEM ของชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดซ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสารละลาย NH_4F ร้อยละ 0.35 โดยน้ำหนักและตามด้วยการอบ โดย a,b เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C และ c,d เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700°C [22]

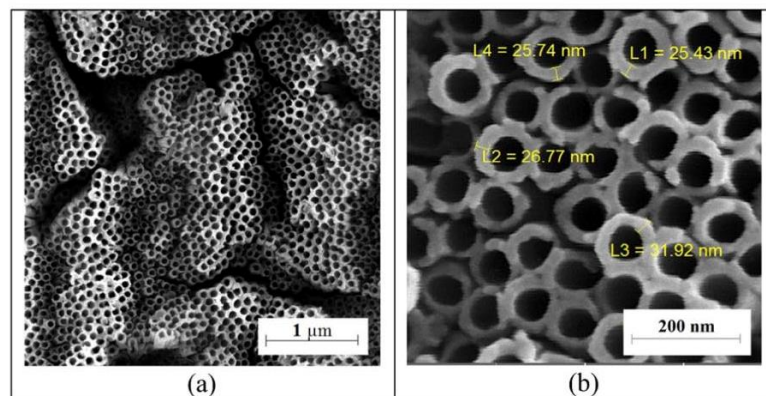
งานวิจัยนี้ Sepideh Minagar และคณะได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการทำแอโนไดซ์สำหรับสร้างท่อนาโนไทเทเนียมบนผิวของโลหะที่ใช้ทำวัสดุปลูกฝัง ซึ่งวิธีการทำแอโนไดซ์เป็นการปรับปรุงผิวโดยการเพิ่มความหนาและความยูนิฟอร์มของออกไซด์และการปรับปรุงผิวด้วยวิธีนี้จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุกับร่างกายและเนื้อเยื่อ ในบทความนี้ได้กล่าวไว้ว่า ชั้นของท่อนาโนไทเทเนียมมีความสำคัญในเรื่องการเพิ่มความสามารถในการยึดติดของกระดูกหรือเนื้อเยื่อโดยการปรับปรุงความสามารถในการยึดติดของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) กับชั้น TiO_2 โดยการยึดติดจะเพิ่มขึ้นจากการเกิดการยึดติดทางกลแบบ Interlocking ระหว่างชั้น HAP และชั้น TiO_2 โดยขนาดของท่อและความหนาของชั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความต่างศักย์และเวลาที่ใช้และการทำแอโนไดซ์สามารถสร้างท่อที่เปิดด้านบนและปิดด้านล่างที่มีขนาดต่าง ๆ กันได้โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นประเภทของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เวลาและความต่างศักย์ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าสมบัติและลักษณะของท่อไทเทเนียมที่ได้จากการทำแอโนไดซ์จะต่างกันไปตามการควบคุมตัวแปรในกระบวนการ โดยตัวแปรที่สำคัญและมีผลอย่างมีนัยยะสำคัญต่อการทำแอโนไดซ์ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า เวลา อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ประเภทและความเข้มข้นของสารละลายในการทำแอโนไดซ์ โดยในงานวิจัยพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ (โดยที่ pH ค่าคงที่และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ขึ้นกับค่า pH) ส่วนในกรณีที่ค่าความต่างศักย์คงที่ ความยาวของท่อหรือ

ความหนาของชั้นท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำแอโนไดซ์ แต่เมื่อเพิ่มถึงค่า ๆ หนึ่ง ความหนาจะไม่เพิ่มขึ้นอีกแม้จะเพิ่มเวลาในการทำแอโนไดซ์และจากที่กล่าวมาสามารถพูดได้ว่าการมีชั้นท่อนาโนไทเทเนียมจะช่วยเพิ่มการยึดเกาะของวัสดุปลูกฝังกับเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยต้านทานการเกิดแบคทีเรียโดยการใส่ยาฆ่าเชื้อเข้าไปในท่อที่สร้างบนพื้นผิวโลหะของวัสดุปลูกฝัง ซึ่งถือเป็นการช่วยยืดระยะเวลาการใช้งานของวัสดุอีกด้วย [40]

M. Mansoorianfar และคณะ ได้ศึกษาขั้นตอนการเตรียมการเพื่อสร้างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวโลหะไทเทเนียมเกรด Ti-6Al-4V โดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงเซลล์ สำหรับงานวิจัยนี้จะสร้างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยอาศัยการทำแอโนไดซ์ในสารละลายเอทิลีนไกลคอล โดยมีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ร้อยละ 0.5 และน้ำปราศจากไอออนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และใช้ความต่างศักย์ตั้งแต่ 25 ถึง 100 โวลต์ หลังจากทำการทดลองเสร็จจะนำไปวิเคราะห์ผลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง (SEM) พบว่าการทำแอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์ ไม่พบการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิววัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์นี้ไม่เพียงพอสำหรับการก่อตัวอย่างต่อเนื่องของ TiO_2 และการเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ (จนถึง 75 โวลต์) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการก่อตัวของ $[\text{TlF}_6]^{2-}$ จะเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้จะนำไปสู่การก่อตัวของโครงสร้างที่ไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบบนพื้นผิว โดยแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำแอโนไดซ์เพื่อสร้างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวโลหะผสมไทเทเนียมจะอยู่ในช่วง 25 ถึง 75 โวลต์ ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 25 และสูงกว่า 75 โวลต์ ไม่สามารถสังเกตเห็นท่อนาโนได้ ซึ่งการทำแอโนไดซ์ที่ใช้ความต่างศักย์ช่วง 50-75 โวลต์ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ถึง 2.22 นอกจากนี้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนทิวบ์ยังสัมพันธ์กับจำนวนหลุมที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการแอโนไดซ์ โดยที่ความต่างศักย์ต่ำการสลายตัวของสนามไฟฟ้าจะน้อยลงทำให้เกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย จากการศึกษาผลของความต่างศักย์ที่ใช้ต่อโครงสร้างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้พบว่าการเรียงตัวของท่อที่สม่ำเสมอและมีความสามารถในการเปียก (Wettability) ที่ดีสามารถสร้างได้จากการทำแอโนไดซ์โดยใช้ความต่างศักย์ในช่วง 25 ถึง 75 โวลต์ ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 60 โวลต์ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของการเปียก ความมีชีวิตและการตอบสนองของเซลล์ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอื่น [41]

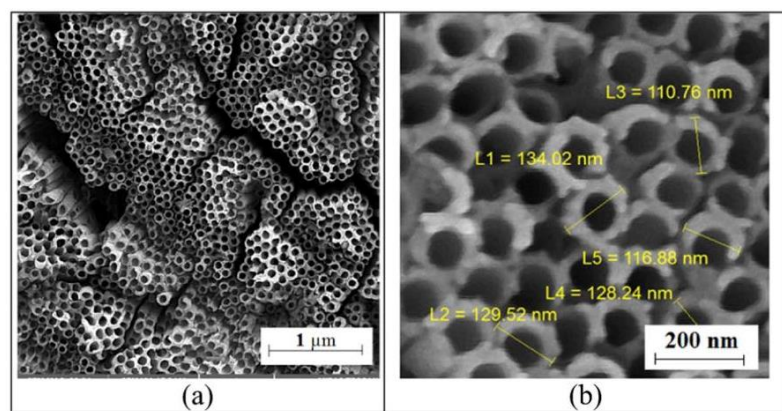


รูปที่ 2.21 โครงสร้างพื้นผิว Ti-6Al-4V หลังการแอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์ [41]

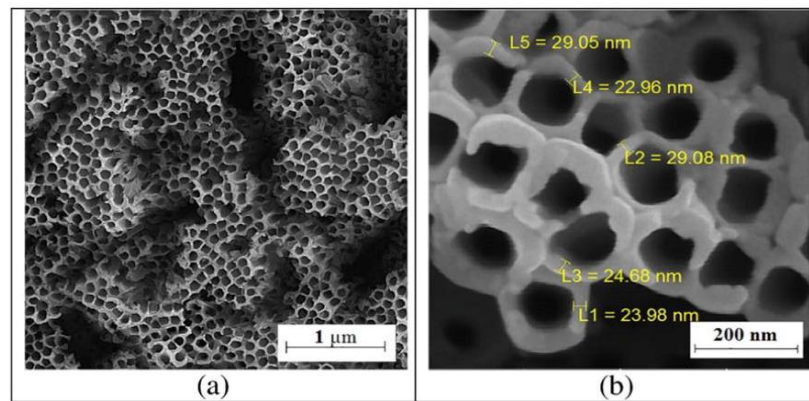


รูปที่ 2.22 โครงสร้างพื้นผิว Ti-6Al-4V หลังการแอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ [41]

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.23 โครงสร้างพื้นผิว Ti-6Al-4V หลังการแอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ [41]



รูปที่ 2.24 โครงสร้างพื้นผิว Ti-6Al-4V หลังการแอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 75 โวลต์ [41]



บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

3.1 วัสดุ อุปกรณ์

1. ชิ้นงานไทเทเนียม-6อะลูมิเนียม-4วานาเดียม ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบการพิมพ์สามมิติ ขนาด กว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร (บริษัท Meticuly)
2. กระดาษทรายน้ำเบอร์ 80 120 240 320 600 800 1000 1500 (บริษัท TOA)
3. ผงขัดขนาด 9 3 1 ไมครอน (DP-Suspension) บริษัท Struers
4. เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุน (บริษัท Struers)
5. ผ้ากำมะหยี่สำหรับการขัดเงา
6. เครื่องซั่งสารแบบละเอียด
7. ปีกเกอร์
8. ไมโครปิเปตต์
9. ปิเปตต์
10. ซ้อนตักสาร
11. แท่งแก้วคนสาร
12. โถดูดความชื้น
13. ซิลิกาเจล
14. แหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง
15. เครื่องกวนสารละลายด้วยแรงแม่เหล็ก
16. แท่งแม่เหล็ก
17. สายไฟ
18. แพลตทินัมอิเล็กโทรด
19. สารละลายเอทิลีนไกลคอล (EG, บริษัท QREC)
20. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F , บริษัท EMSURE)
21. น้ำปราศจากไอออน
22. อะซิโตน (บริษัท QREC)
23. แอลกอฮอล์ (บริษัท EMSURE)
24. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric 37%, HCl บริษัท QREC)
25. เครื่องอัลตราโซนิก

26. เครื่อง Autolab Potentiogalvanostat 302N (PGSTAT 302N, บริษัท Metrohm Siam)
27. ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl reference electrode, บริษัท Metrohm Siam)
28. แพลตทินัมเคาท์เตอร์อิเล็กโทรด (Platinum counter electrode, บริษัท Metrohm Siam)
29. ชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบการกัดกร่อน (Working electrode)
30. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลิน (PBS solution บริษัท SIGMA)
31. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
32. เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบสัมผัส (Contact-surface roughness stylus tester)
33. เครื่องวัดมุมสัมผัสของเหลว (Contact angle meter, บริษัท KYOWA)



3.2 เงื่อนไขการทดลอง

การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมและสมบัติการกักกร่อน

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขการทดลอง

ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทำแอนโนไดซ์					
การเตรียมผิวด้วย การขัด	สารละลายอิเล็กโทรไลต์			เวลาที่ใช้ในการ การแอนโนไดซ์ (นาที)	สารละลายที่ ใช้ทดสอบการ กักกร่อน
	สารละลาย	NH ₄ F (wt%)	H ₂ O (wt%)		
ไม่ผ่านการเตรียม ผิวด้วยการขัด	-	-	-	-	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 320	-	-	-	-	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 600	-	-	-	-	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 1000	-	-	-	-	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 1000 และ ขัดเงาด้วยผงเพชร ถึง 1 ไมครอน	-	-	-	-	PBS

ชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดซ์					
การเตรียมผิว	สารละลายอิเล็กโทรไลต์			เวลาที่ใช้ในการแอนโนไดซ์ (นาที)	สารละลายที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน
	สารละลาย	NH ₄ F (wt%)	H ₂ O (wt%)		
ไม่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัด	EG	0.5	1.5	60	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 320	EG	0.5	1.5	60	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 600	EG	0.5	1.5	60	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 1000	EG	0.5	1.5	60	PBS
ขัดกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 80 ถึง เบอร์ 1000 และ ขัดเงาด้วยผงเพชร ถึง 1 ไมครอน	EG	0.5	1.5	60	PBS

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

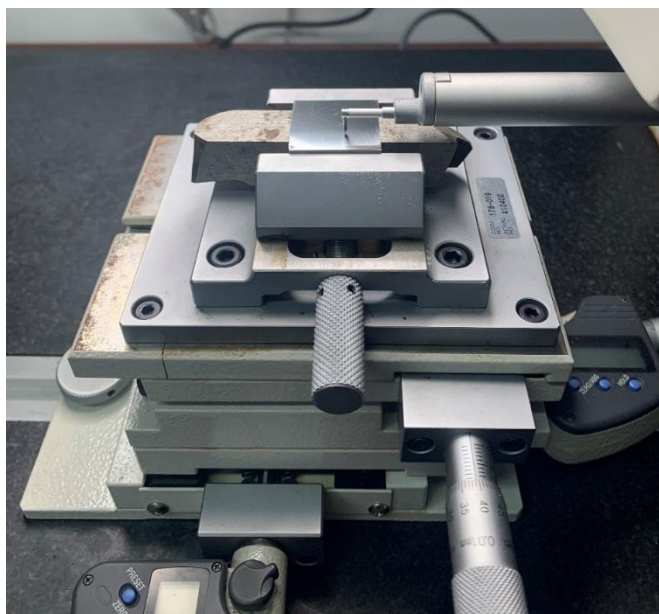
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม

- ชิ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติโดยมีความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตรและความหนา 2 มิลลิเมตร
- ขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดด้วยกระดาษทรายโดยเริ่มตั้งแต่เบอร์ 80 120 240 320 600 800 1000 1500 ตามลำดับ และขัดละเอียดหรือขัดเงาด้วยผงเพชรขนาด 9 3 1 ไมครอน



รูปที่ 3.1 เครื่องขัดชิ้นงาน

- #### 3.3.2 วัดความขรุขระหรือความหยาบผิวโดยใช้เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบสัมผัสหัวลาก Stylus (Contact-surface roughness stylus tester) เพื่อหาความหยาบผิวเฉลี่ย (Average surface roughness, R_a) และความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square average, R_q) ของชิ้นงานแต่ละชิ้น



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบสัมผัส

3.3.3 การทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการแอนโนไดซ์

นำชิ้นงานไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน ตามด้วยแอลกอฮอล์และอะซิโตนตามลำดับด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลาอย่างละ 5 นาที จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนแล้วนำไปเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์

3.3.4 การแอนโนไดซ์

การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะประกอบด้วย

1. สารละลายเอทิลีนไกลคอล (EG) ร้อยละ 98
2. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ร้อยละ 0.5
3. น้ำปราศจากไอออน (DI) ร้อยละ 1.5

ซึ่งเหตุผลที่เลือกทำในสารละลายเอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นสารละลายอินทรีย์เป็นอิเล็กโทรไลต์ เพราะจะช่วยลดอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ให้ช้าลง โดยเฉพาะอัตราการละลายทางเคมีของออกไซด์ไทเทเนียม ทำให้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความยาวและมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ [26]

หลังจากเตรียมสารตามสัดส่วนดังกล่าว จะทำการกวนสารด้วยความเร็ว 500 rpm ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และจะทำการแอโนไดซ์ด้วยเครื่อง DC power supply โดยนำแผ่นไทเทเนียมต่อเข้ากับขั้วแอโนด (+) ส่วนแผ่นแพลตทินัมจะต่อเข้ากับขั้วแคโทด (-) โดยขั้วบวกและลบจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการทดลองนี้จะใช้ความต่างศักย์ 60 โวลต์และใช้เวลาในการทำแอโนไดซ์ 1 ชั่วโมง ซึ่งในระหว่างการทำแอโนไดซ์จะทำการกวนสารด้วยความเร็ว 150 rpm เมื่อทำเสร็จจะทำชิ้นงานที่ได้มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เอทิลแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง

3.3.5 การทำความสะอาดผิวชิ้นงานหลังการแอโนไดซ์

หลังทำการแอโนไดซ์เสร็จจะมีชั้นฟิล์มที่เป็นสิ่งตกค้างติดอยู่บริเวณด้านบนของท่อนาโนไทเทเนียม ทำให้เมื่อนำไปส่องด้วยกล้อง SEM จะมองไม่เห็นปากท่อจึงต้องมีการทำความสะอาดสิ่งตกค้างนั้นออกไป โดยจะแช่ชิ้นงานลงใน 0.1 M กรดไฮโดรคลอริกแล้วใช้เครื่องอัลตราโซนิกสั่นเป็นเวลา 30 วินาที

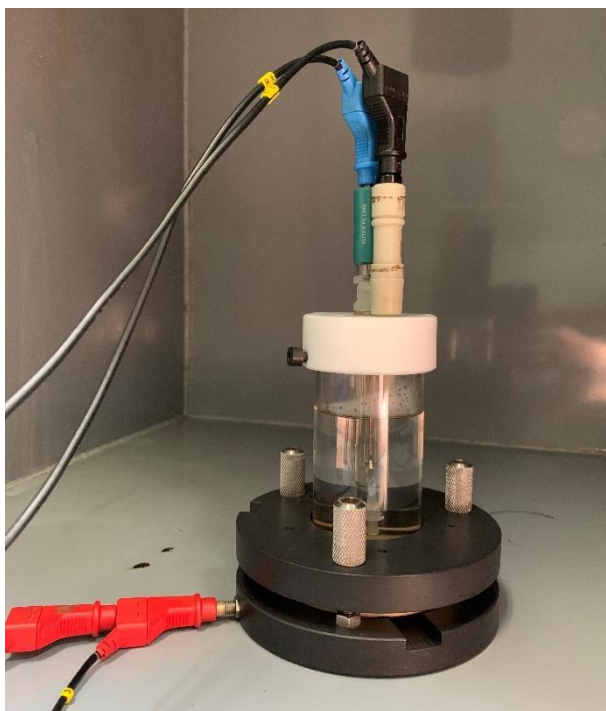
3.3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาหลังการแอโนไดซ์

หลังการจะแอโนไดซ์จะมีชั้นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะผสม โดยในงานนี้จะทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โดยดูจากการเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ความหนาของผนังท่อและความสม่ำเสมอของขนาดท่อและความหนาแน่นของท่อของชิ้นงานที่มีความหยาบผิวเริ่มต้นที่ต่างกันก่อนการทำแอโนไดซ์

3.3.7 การทดสอบการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อนจะทำโดยเครื่อง Autolab PGSTAT302N ด้วยเทคนิคที่ชื่อว่า Potentiodynamic polarization ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาลีน (PBS solution) เป็นสารละลายทดสอบเนื่องจากสารละลาย PBS มีค่า pH ประมาณ 7.4 ถึง 7.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของไหลในร่างกาย [12] โดยมีแท่งแพลตทินัมเป็นแคโทดอิเล็กโทรด (Counter electrode) และซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยเริ่มจากการวัดศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential) เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นให้ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ -1000 มิลลิโวลต์ และสิ้นสุดที่ 1500 มิลลิโวลต์

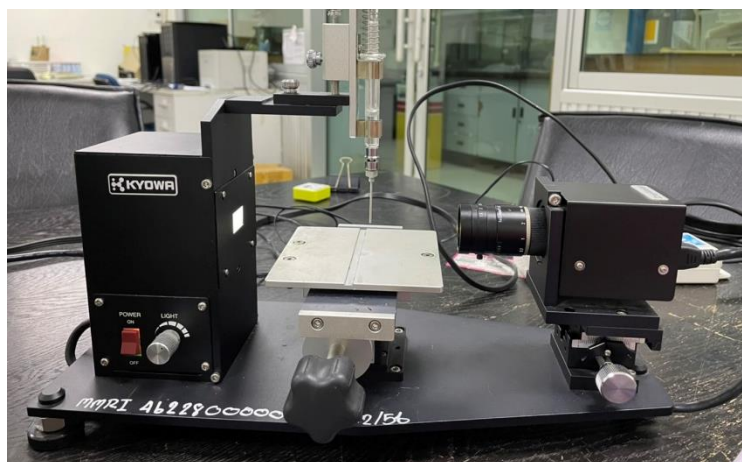
โดยมีอัตราการให้ศักย์ไฟฟ้า 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที (Scan rate 1 mV/s) โดยข้อมูลจะแสดงผลและถูกบันทึกผ่านซอฟต์แวร์ Nova 1.11 จากนั้นนำข้อมูลในรูปของกราฟโพลาริเซชันมาวิเคราะห์ผลร่วมกับการทำ Tafel extrapolation เพื่อนำข้อมูลเชิงสถิติที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.3 เซลล์ที่ใช้สำหรับวัดการกัดกร่อน

3.3.8 การวัดมุมสัมผัสของของเหลว

การวัดมุมสัมผัสของของเหลว (Contact angle) จะทำด้วยเครื่อง Contact angle meter โดยใช้โหมดการหยดของเหลวแบบ Sessile drop ในโหมด Dynamic และทำการวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นจากภาพถ่ายหยดของเหลวที่สัมผัสกับพื้นผิวเมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที โดยใช้ปริมาตรของเหลว 2 ไมโครลิตรต่อ 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดมุมสัมผัสของของเหลว

3.3.9 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ศึกษาวิเคราะห์ภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยา วัดขนาดท่อและผนังท่อนาโนไทเทเนียมที่ได้จากการแอนโนไดซ์ด้วยซอฟต์แวร์ Image J
- วิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ได้จากเทคนิคการทำ Tafel extrapolation ในซอฟต์แวร์ Nova 1.11

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ

ในทางทฤษฎี Ti-6Al-4V ต้องประกอบไปด้วย Ti 90% โดยมวล Al 6% โดยมวล และ V 4% โดยมวล โดยผลการตรวจสอบปริมาณส่วนผสมทางเคมีของผง Ti-6Al-4V โดยใช้เทคนิค EDS แสดงดังตารางที่ 4.1 จากการตรวจสอบปริมาณส่วนผสมทางเคมีของผง Ti-6Al-4V ก่อนขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติพบว่าซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีทางทฤษฎี

ตารางที่ 4. 1 ส่วนประกอบทางเคมีของ Ti-6Al-4V

ธาตุ	มวล%	อะตอม%
Ti	89.41	85.53
Al	6.29	10.52
V	4.29	3.95
รวม	100	100

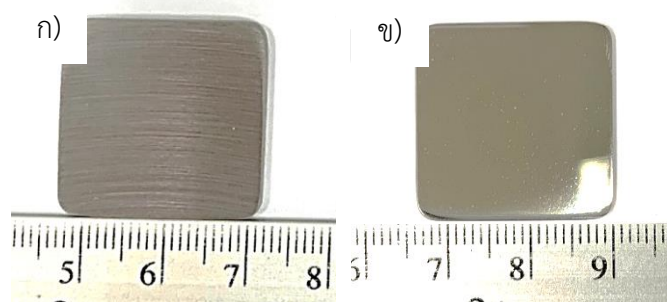
4.2 ผลการเตรียมชิ้นงาน

4.2.1 Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ

นำชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติจากผง ขนาดชิ้นงาน 25 x 25 x 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มาขัดเตรียมผิวเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัดหยาบและขัดเงา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก่อนนำไปทำแอนโนไดซ์ต่อ



รูปที่ 4.1 ชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติก่อนเตรียมผิว

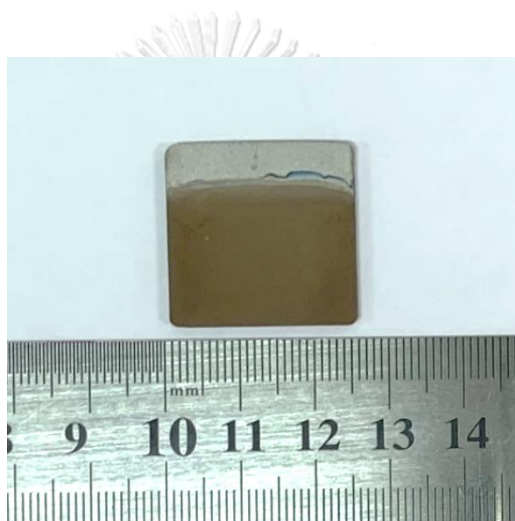


รูปที่ 4.2 ชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติหลังจากเตรียมผิวด้วยการ ก) ขัดหยาบ และ ข) ขัดเงา

4.2.2 การปรับสภาพผิวด้วยการแอนโนไดซ์

นำชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดมาทำการแอนโนไดซ์ตามหัวข้อที่ 3.5

ซึ่งหลักการแอนโนไดซ์พบว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจะทำให้ผิวชิ้นงานเปลี่ยนจากที่เทาเงินไปเป็นสีเหลืองอมเทาทั่วบริเวณที่ทำแอนโนไดซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งฟิล์มที่เกิดขึ้นคือชั้นของไทเทเนียมระดับนาโนนั่นเอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะไม่สามารถเห็นท่อนาโนไทเทเนียมที่เกิดขึ้นได้ด้วยตาเปล่าเนื่องจากเป็นโครงสร้างในระดับนาโนจึงต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์ต่อกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต่อไป



รูปที่ 4.3 ชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติหลังจากผ่านการแอนโนไดซ์

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว

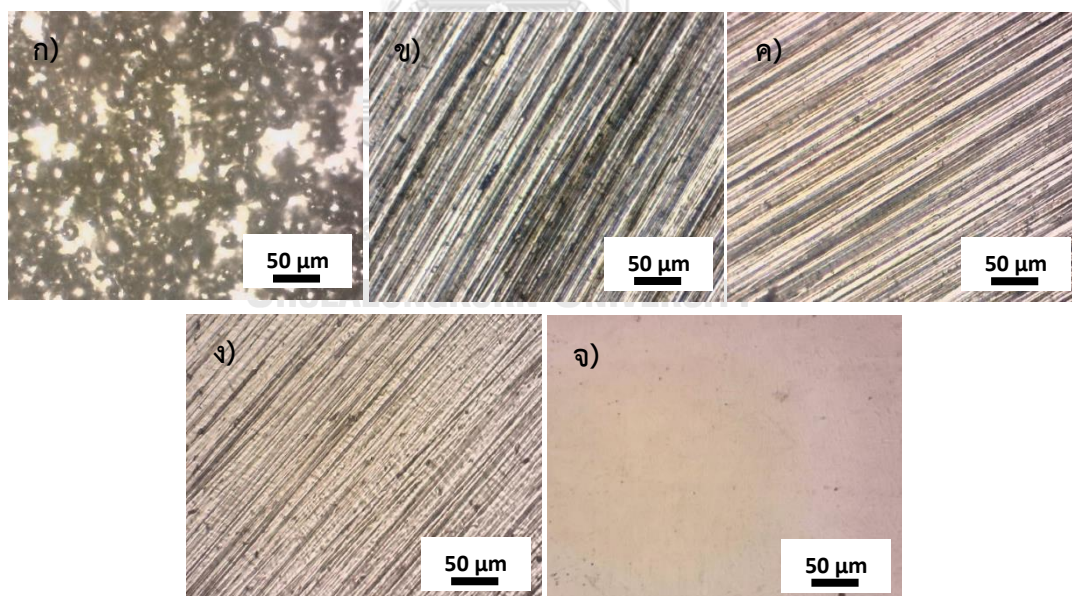
4.3.1 ชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัด

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติและนำไปผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยวิธีการขัดไปทำการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติและไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัด (AR) มีความขรุขระบนพื้นผิวจากกระบวนการขึ้นรูปจึงทำให้มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) และความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (R_q) มากที่สุดเท่ากับ 10.391 และ 13.073 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 320 (G320) ซึ่งหลังการขัดจะมีรอยกระดาษทรายที่ไปในทางเดียวกันปรากฏอยู่บนผิวชิ้นงาน จะมีความหยาบผิวเฉลี่ยมากรองลงมาโดยมีค่า R_a เท่ากับ 0.210 และ R_q เท่ากับ 0.269 ไมครอนและตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 600 (G600) และเบอร์ 1000 (G1000) จะพบรอยจากการขัดด้วยกระดาษทรายเช่นเดียวกับชิ้นงาน G320 แต่รอยกระดาษทรายที่พบจะมีความถี่และละเอียดกว่า รวมถึงรอยการขัดของชิ้นงาน G600 และ G1000 จะดูไม่ลึกเท่าชิ้นงานกลุ่ม G320 ทำให้ชิ้นงาน G600 และ G1000 มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยกว่า โดยมีค่า R_a เท่ากับ 0.127 0.098 ไมครอน และ R_q เท่ากับ 0.165 0.141 ไมครอนตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1500 แล้วขัดเงาต่อด้วยผงเพชรขนาด 9 ถึง 1 ไมครอน (P1) จะได้พื้นผิวที่เรียบ ไม่มีรอยการขัดกระดาษทรายและผิวชิ้นงานจะมีความเงาคล้ายผิวกระจก ทำให้ชิ้นงานกลุ่มนี้มีความหยาบผิวเฉลี่ยน้อยที่สุดโดยมีค่า R_a และ R_q เท่ากับ 0.029 และ 0.035 ไมครอน ตามลำดับ โดยค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานทุกชิ้นแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานก่อนการทำแอนโนไดซ์

ตัวอย่าง	ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : μm)	ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (R_q : μm)
AR	10.391 (± 0.610)	13.073 (± 0.913)
G320	0.210 (± 0.015)	0.269 (± 0.018)
G600	0.128 (± 0.003)	0.165 (± 0.004)
G1000	0.098 (± 0.013)	0.141 (± 0.031)
P1	0.029 (± 0.004)	0.035 (± 0.007)

จากการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการขัดพบว่ายิ่งขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้นไป เส้นกระดาษทรายจะบางลงและระยะห่างของรอยขีดกระดาษทรายจะน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทำให้มองเห็นรอยกระดาษที่มีความถี่มากขึ้นและเมื่อวัดความหยาบผิวพบว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (R_q) ที่วัดได้มีค่าน้อยลงและค่าความหยาบผิวจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อทำการปรับสภาพผิวด้วยการขัดหยาบต่อด้วยการขัดละเอียดหรือขัดเงา



รูปที่ 4.4 ผิวหน้าชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการแอนโนไดซ์หลังผ่านการขัด ก) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการขัด ข) ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ถึง 320 ค) ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ถึง 600 ง) ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ถึง 1000 จ) ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ถึง 1500 แล้วขัดเงาต่อด้วยผงเพชร

4.3.2 ชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อโดยการแอนโนไดซ์

เมื่อนำชิ้นงานที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อโดยการแอนโนไดซ์ไปทำการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้นหลังทำแอนโนไดซ์ โดยชิ้นงานที่มีความหยาบผิวตั้งต้นมากกว่าเมื่อนำมาทำแอนโนไดซ์จะได้ความหยาบผิวที่มากกว่าตามไปด้วย โดยสามารถเรียงลำดับค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสองจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $ARA > G1000A > G600A > G320A > P1A$

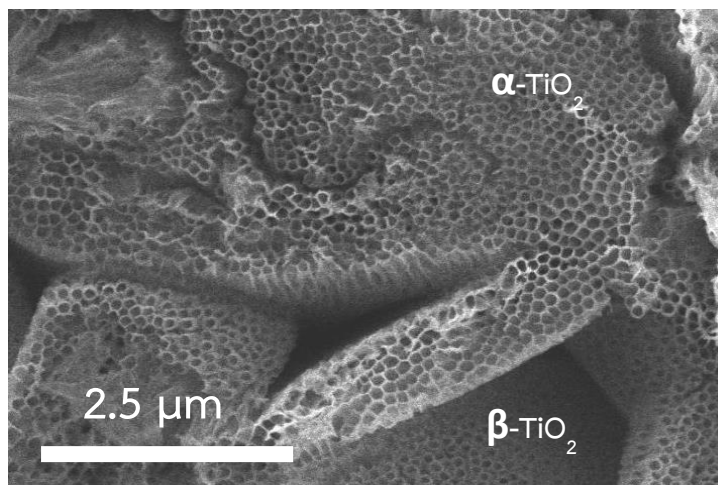
ตารางที่ 4.3 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานหลังผ่านการทำแอนโนไดซ์

ตัวอย่าง	ความหยาบผิวเฉลี่ย ($R_a : \mu\text{m}$)	ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง ($R_q : \mu\text{m}$)
ARA	12.276 (± 1.010)	14.967 (± 1.060)
G320A	0.451 (± 0.014)	0.606 (± 0.031)
G600A	0.363 (± 0.005)	0.477 (± 0.010)
G1000A	0.294 (± 0.007)	0.398 (± 0.011)
P1A	0.122 (± 0.009)	0.165 (± 0.018)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 พบว่าพื้นผิวที่ได้หลังการทำแอนโนไดซ์จะมีลักษณะมีชั้นฟิล์มสีเหลืองอมเทาเกิดขึ้นบนพื้นผิวและจะมีลักษณะพื้นผิวที่ปรากฏแบบเดียวกันในทุก ๆ ชิ้นงานหลังผ่านการแอนโนไดซ์ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความต่างจากรูปดังกล่าวได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาในระดับที่มีความละเอียดขึ้นนั่นคือการศึกษากาภาพถ่าย SEM ในลำดับถัดไป

4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ

4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อโดยการแอโนไดซ์



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของโลหะ Ti-6Al-4V หลังผ่านการแอโนไดซ์

จากรูป 4.5 แสดงสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะ Ti-6Al-4V หลังผ่านการแอโนไดซ์ พบว่าจะมี 2 บริเวณคือส่วนที่เกิดอยู่ด้านล่างซึ่งเป็นบริเวณ V rich (β -TiO₂) และส่วนที่อยู่ด้านบนซึ่งเป็นบริเวณของ Al rich (α -TiO₂) ซึ่งเหตุผลที่เกิดเป็น 2 บริเวณที่ต่างกันเป็นผลมาจากส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน ทำให้ท่อที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมการเกิดที่ต่างกัน [42]

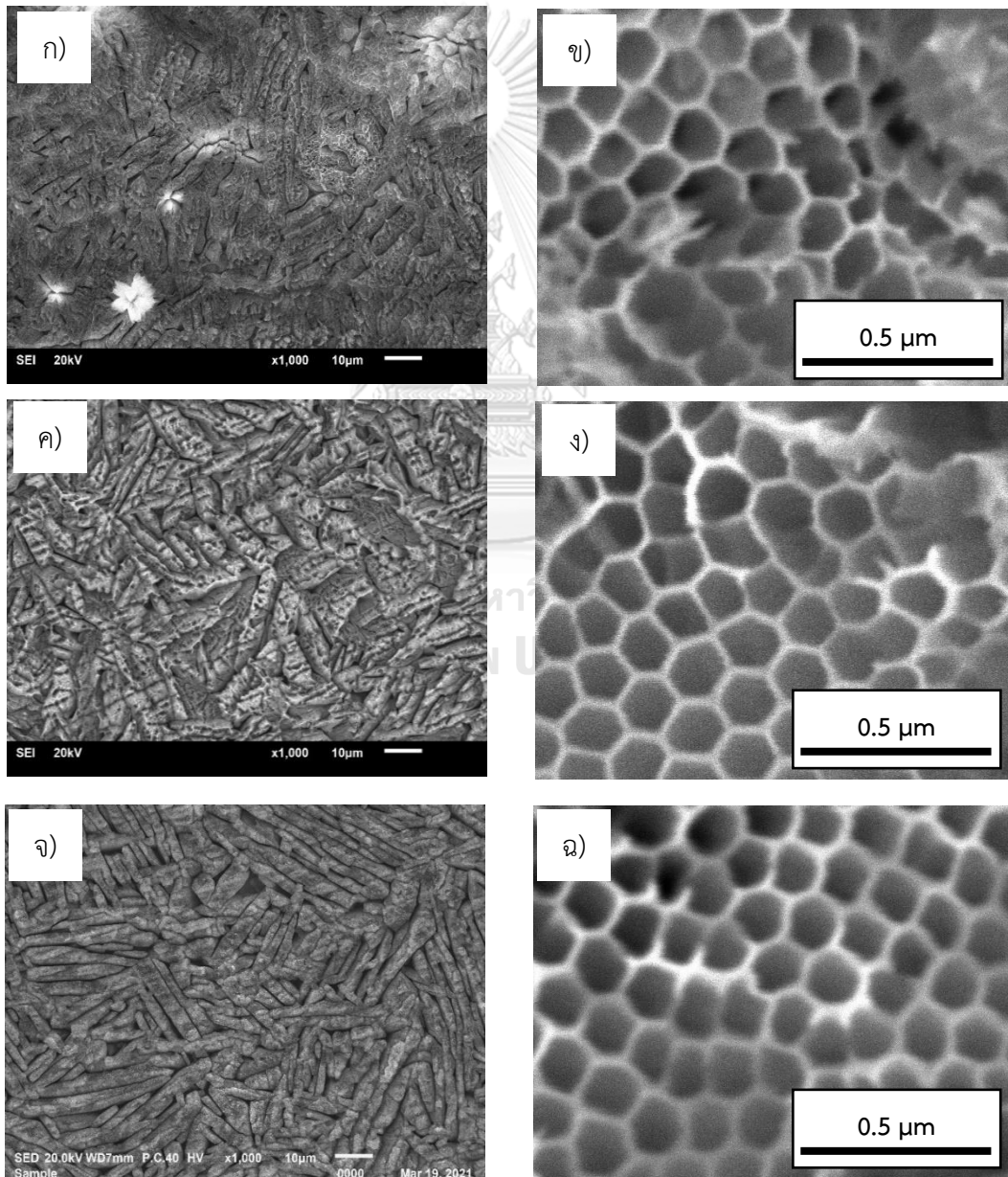
ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4.5 โดยจะเป็นภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัดหลังผ่านการแอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าหลังการปรับสภาพผิวโดยการแอโนไดซ์จะมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งรูพรุนที่เห็นจากภาพถ่ายด้านบนนั้นคือท่อนาโนไทเทเนียมที่ได้จากการแอโนไดซ์ แต่เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของจำนวนและขนาดท่ออันเนื่องมาจากการเตรียมผิวด้วยการขัดเพื่อปรับสภาพผิวก่อนการแอโนไดซ์ที่ต่างกัน

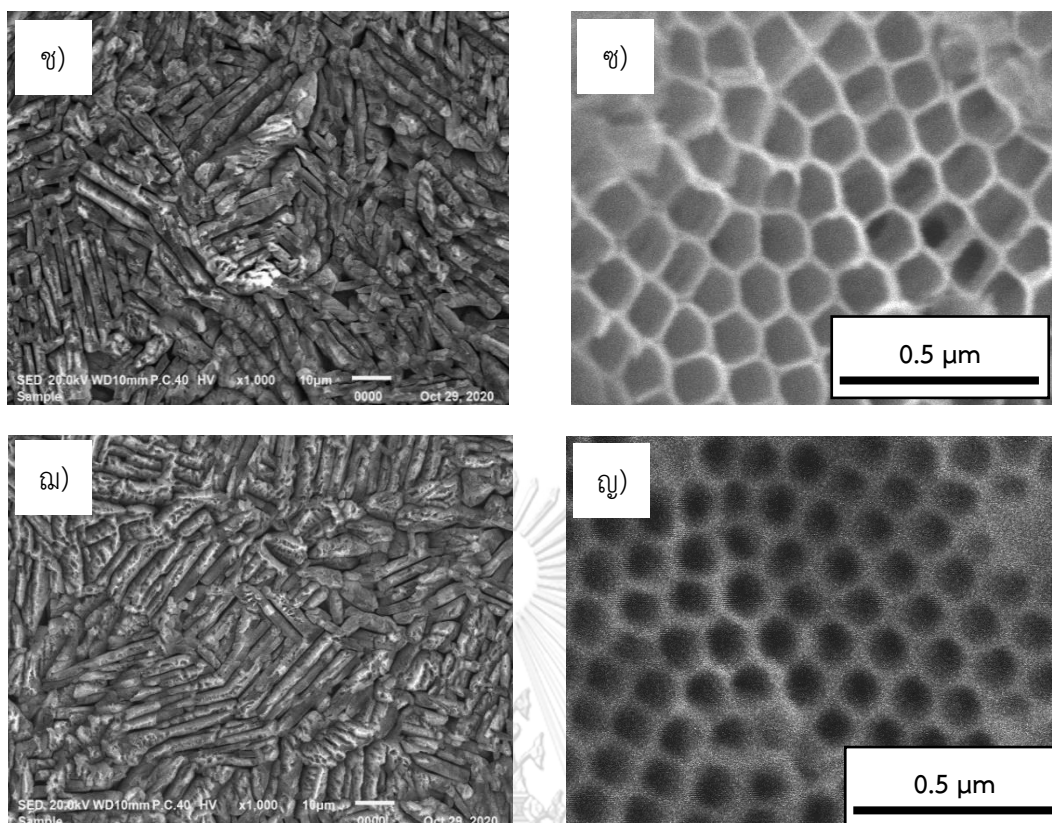
จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1500 แล้วขัดเงาต่อด้วยผงเพชรขนาด 9 ถึง 1 ไมครอนแล้วนำไปทำแอนโอดซ์ (P1A) จะมีท่อเกิดขึ้นจำนวนมากที่สุดเท่ากับ 72.8 ท่อต่อตารางไมครอนและชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1000 แล้วนำไปทำแอนโอดซ์ (G1000A) จะมีจำนวนท่อที่เกิดขึ้นมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 600 และ 320 แล้วนำไปทำแอนโอดซ์ โดยมีจำนวนท่อเท่ากับ 64.7 57.5 52.7 ท่อต่อตารางไมครอน ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวโดยวิธีการขัดแล้วนำไปทำแอนโอดซ์ (ARA) เป็นกลุ่มที่มีท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีความบิดเบี้ยวรวมถึงมีความไม่สม่ำเสมอมากกว่าชิ้นอื่นและเมื่อวัดปริมาณท่อที่เกิดขึ้นในขนาดพื้นที่เท่ากันโดยมีค่าเท่ากับ 51.2 ท่อต่อตารางไมครอน

ในส่วนของขนาดท่อซึ่งวัดจากด้านในของท่อพบว่าชิ้นงานที่ชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1500 แล้วขัดเงาต่อด้วยผงเพชรขนาด 9 ถึง 1 ไมครอนแล้วนำไปทำแอนโอดซ์ (P1A) มีขนาดท่อเฉลี่ยที่เล็กที่สุดเท่ากับ 93.6 นาโนเมตร ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1000 และ 600 แล้วนำไปทำแอนโอดซ์ (G1000A G600A) จะมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานกลุ่ม P1A เล็กน้อยโดยจะมีขนาดเฉลี่ยของท่อด้านในใกล้เคียงกันเท่ากับ 127.0 และ 114.0 นาโนเมตรตามลำดับ แต่ท่อที่ได้จากการขัดจนถึงเบอร์ 1000 แล้วนำไปทำแอนโอดซ์จะมีลักษณะรูปร่างที่มีความสม่ำเสมอและมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันมากกว่าขนาดท่อที่ได้จากการขัดจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 600 ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 320 แล้วนำไปทำแอนโอดซ์ (G320A) จะมีขนาดท่อที่ใหญ่กว่า 3 กลุ่มแรกที่กล่าวมา โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 136.0 นาโนเมตร ส่วนชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวโดยวิธีการขัดแล้วนำไปทำแอนโอดซ์ (ARA) จะมีขนาดท่อเฉลี่ยเล็กกว่าชิ้นงาน G320A แต่จะมีขนาดเท่าใหญ่มากกว่าชิ้นงาน G600A G1000A และ P1A โดยมีขนาดเท่ากับ 129.2 นาโนเมตร

จากตารางที่ 4.4 พบว่าชิ้นงานกลุ่ม G320A จะเป็นกลุ่มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมากที่สุดเท่ากับ 136.0 นาโนเมตร และมีผนังท่อหนา 25.7 นาโนเมตร ส่วนชิ้นงาน G600A จะเกิดท่อนาโนไทเทเนียมขึ้นบนผิวเช่นเดียวกับชิ้นอื่น โดยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมากกว่าจากชิ้น G320A และ ARA โดยมีค่าเท่ากับ 127.0 นาโนเมตร และมีผนังท่อหนาประมาณ 27.2 นาโนเมตร กลุ่มต่อมาคือชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 1000 แล้วนำมาแอนโอดซ์ (G1000A) พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเท่ากับ 114.0 นาโนเมตร และมีผนังท่อหนาประมาณ 30.3 นาโนเมตร ส่วนชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเล็กที่สุดคือชิ้นงาน

ที่ผ่านการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายและขัดเงาต่อจนถึงผงเพชรขนาด 1 ไมครอน แล้วจึงนำไปแอโนไดซ์ต่อ (P1A) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่ออยู่ที่ 93.6 นาโนเมตร และมีผนังท่อหนาประมาณ 31.2 นาโนเมตร จากรูป 4.5 ง) ฉ) และ จ) พบว่าท่อที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะรูปร่างของท่อที่คล้ายกันเป็นส่วนใหญ่จะต่างกันเพียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ แต่ไม่ได้มีรูปร่างท่อที่ต่างกันมากนักเหมือนชิ้นงานกลุ่ม ARA ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ข) ซึ่งแต่ละท่อที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานจะมีลักษณะรูปร่างที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอมีทั้งเล็กและใหญ่ปนกัน รวมถึงมีท่อที่เกิดเอียงและมีการบิดเบี้ยวผิดรูปเกิดขึ้น โดยชิ้นงาน ARA จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 129.2 นาโนเมตรและมีผนังท่อหนาประมาณ 26.8 นาโนเมตร



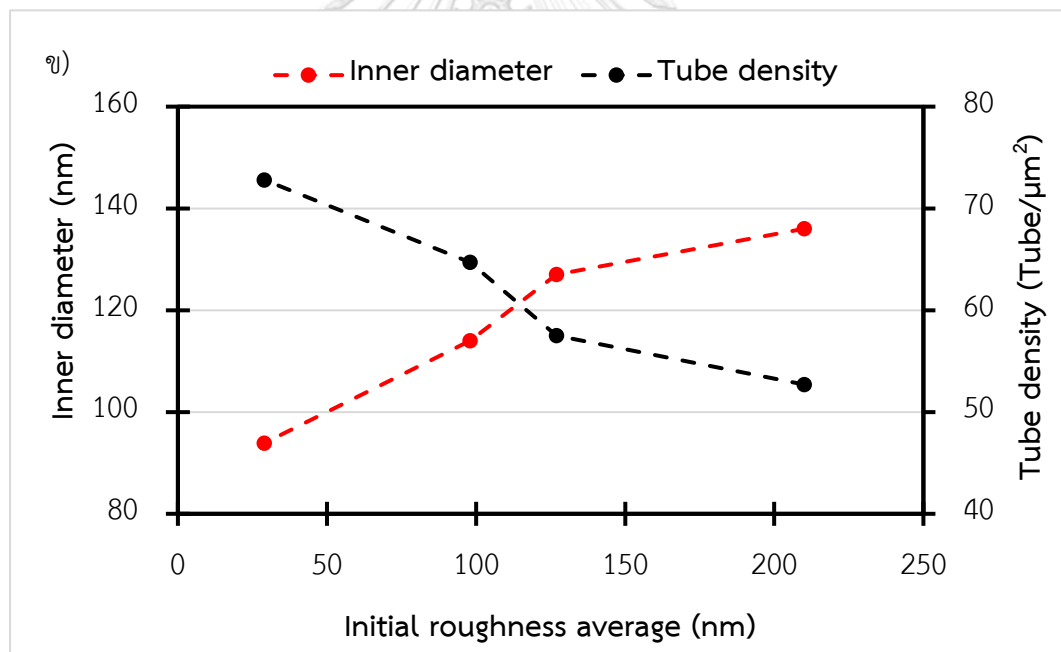
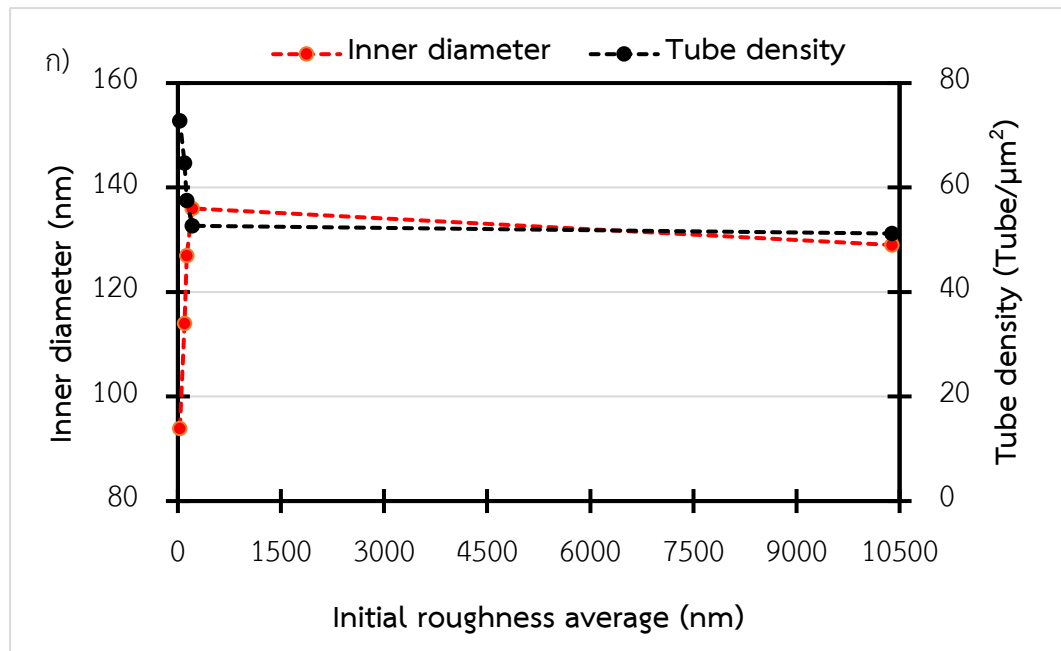


รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการแอโนไดซ์ ก,ข) ชิ้น ARA ค,ง) G320A จ,ฉ) G600A
ช,ซ) G1000A ฅ,ญ) P1A

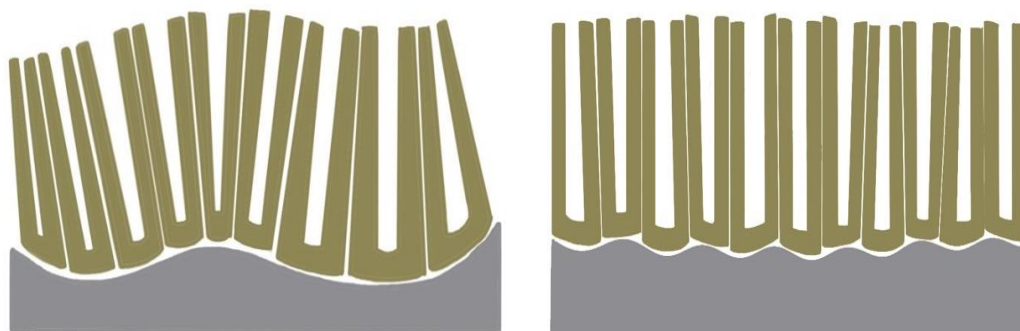
ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความหนาผนังท่อและความหนาแน่นของท่อ

ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (นาโน เมตร)	ความหนาของผนังท่อ (นาโนเมตร)	ความหนาแน่นของท่อ (ท่อต่อตาราง ไมครอน)
ARA	129.2 (± 30.3)	26.8(± 6.1)	51.2(± 8.5)
G320A	136.0 (± 13.2)	25.7(± 3.9)	52.7(± 5.9)
G600A	127.0 (± 7.7)	27.2(± 3.3)	57.5(± 4.7)
G1000A	114.6 (± 6.5)	30.3(± 2.3)	64.7(± 3.7)
P1A	93.6 (± 5.8)	31.2(± 3.2)	72.8(± 2.8)

จากรูปที่ 4.7 จะสังเกตได้ว่าชิ้นงานส่วนใหญ่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือยิ่งขัดเตรียมชิ้นงานจนชิ้นงานมีความหยาบผิวตั้งต้นน้อย ($P1A < G1000A < G600A < G320A$) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจะน้อยลง ความหนาแน่นของท่อที่เกิดก็จะมากตามไปด้วย ยกเว้นชิ้น ARA ที่มีแนวโน้มต่างจากชิ้นอื่นคือแม้จะเป็นชิ้นที่มีความหยาบผิวตั้งต้นมากที่สุดแต่กลับไม่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากที่สุด เนื่องจากชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวก่อนแอนโอดีซ์มีความหยาบผิวที่สูงกว่าชิ้นงานอื่นมากและความหยาบผิวที่มากนี้ส่งผลให้ท่อที่เกิดขึ้นมีขนาดและรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอกัน ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดจนมีความหยาบผิวตั้งต้นน้อยกว่าจะได้ท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอมากกว่า [43] ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยชิ้น ARA มีทั้งท่อที่ขนาดใหญ่และเล็กปะปนกันไปทำให้ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่วัดได้น้อยกว่าชิ้น G320A จึงไม่สามารถใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมาใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเตรียมผิว ความหยาบผิวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร่วมกับชิ้นอื่นได้จึงต้องพิจารณาที่ตัวแปรอื่น เช่น ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดท่อ (Standard deviation, SD) ซึ่งจะบอกได้ถึงความสม่ำเสมอของท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอมากกว่า [43] ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยชิ้น ARA มีทั้งท่อที่ขนาดใหญ่และเล็กปะปนกันไปทำให้ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่วัดได้น้อยกว่าชิ้น G320A จึงไม่สามารถใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมาใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเตรียมผิว ความหยาบผิวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร่วมกับชิ้นอื่นได้จึงต้องพิจารณาที่ตัวแปรอื่น เช่น ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดท่อ (Standard deviation, SD) ซึ่งจะบอกได้ถึงความสม่ำเสมอของขนาดและการกระจายตัวของท่อได้



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวตั้งต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความหนาแน่นของท่อ ก) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านและผ่านการขัดเตรียมผิว ข) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดเตรียมผิว

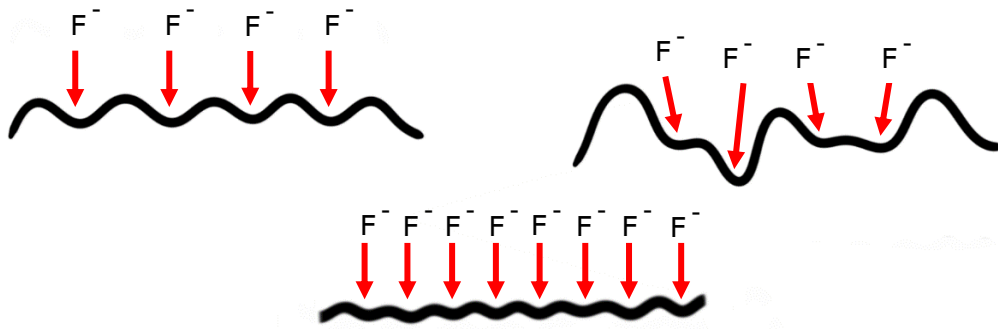


รูปที่ 4.8 จำลองการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวที่มีลักษณะและความหยาบผิวต่างกัน ดัดแปลง [43]

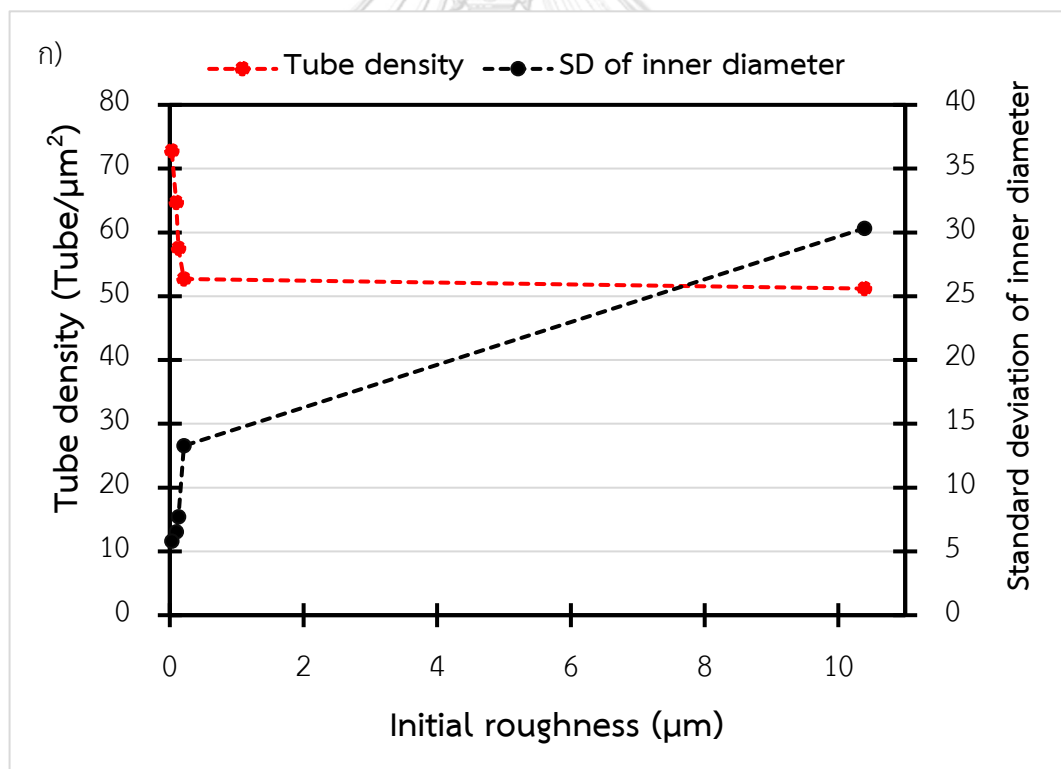
ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดจนมีความหยาบผิวเริ่มต้นต่างกันแล้วนำมาแอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ทำให้ท่อที่เกิดมีขนาดต่างกัน โดยมีขนาดเฉลี่ยตั้งแต่ 93-136 นาโนเมตรและจำนวนท่อที่เกิดก็ต่างกันด้วย โดยพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัดจนมีความหยาบผิวตั้งต้นก่อนแอโนไดซ์น้อยที่สุดจะเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีความสม่ำเสมอของขนาดท่อมากที่สุดและเมื่อทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและมีผลสอดคล้องกัน [36, 43] จึงสันนิษฐานได้ว่าการที่ชิ้นงานมีความหยาบผิวตั้งต้นน้อยจะมีความต่างของบริเวณสูงสุด (Peak) และต่ำสุด (Valley) ของพื้นผิวต่ำทำให้ในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าระหว่างการทำแอโนไดซ์ที่มีการให้ความต่างศักย์เพื่อไปรบกวนผิวชิ้นงาน การมีความหยาบผิวเล็กน้อยจึงเปรียบเสมือนการมี Nucleation site ที่มากกว่า รวมถึงผิวที่มีความหยาบผิวตั้งต้นน้อยจะทำให้ F^- ไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แพร่ไปทำปฏิกิริยาเพื่อกัดเซาะพื้นผิวเกิดได้ง่ายและสม่ำเสมอกว่าจึงทำให้ได้ท่อที่มีความหนาแน่นมาก มีขนาดท่อเล็กกว่านั่นเอง รวมถึงมีความสม่ำเสมอของการจัดเรียงตัวมากกว่านั่นเอง [44]

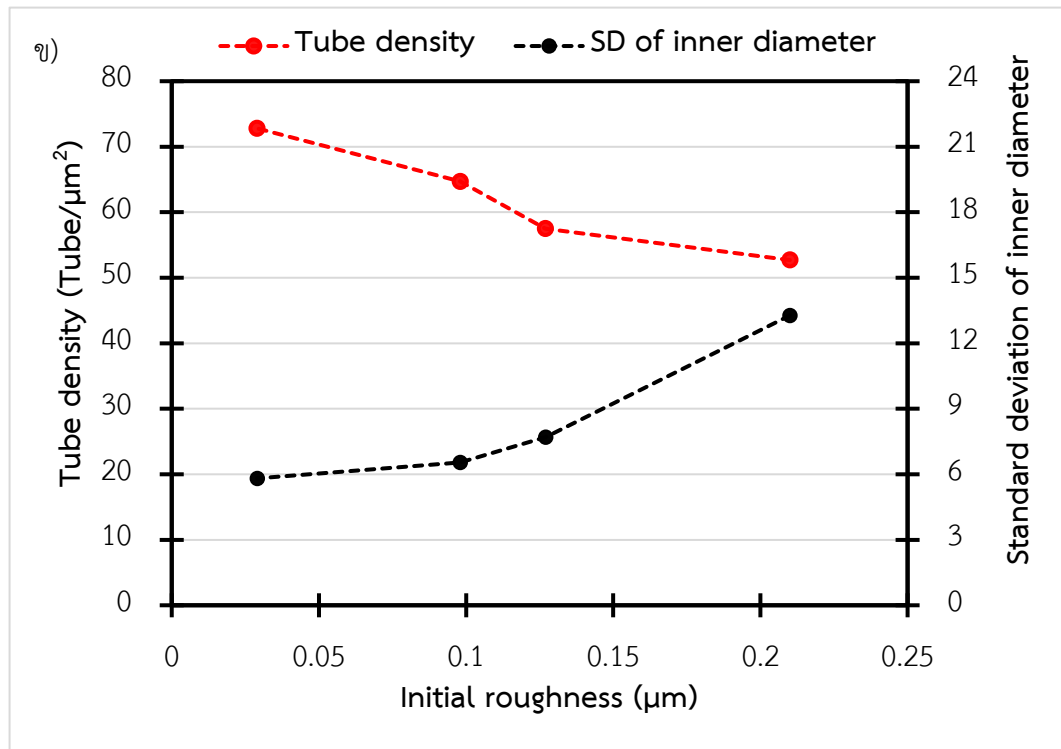
ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดจนมีความหยาบผิวตั้งต้นมากจะทำให้ F^- ไอออนที่แพร่ไปที่พื้นผิวเกิดปฏิกิริยาในแต่ละบริเวณยากและไม่เท่ากัน นอกจากนั้นความหยาบของพื้นผิวที่สูงจะมีร่องที่ลึกและกว้างกว่าทำให้เกิดการบีบอัดของท่อนาโนไทเทเนียมที่โตขึ้นและพื้นผิวที่ลาดเอียงของร่องเหล่านี้ที่มากขึ้นรวมทั้งมีความเครียดตกค้างจากแรงอัดเกิดขึ้นระหว่างการขึ้นของท่อจะส่งผลให้เกิดการก่อตัวของสัณฐานวิทยาของท่อที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ท่อที่ขึ้นในแต่ละบริเวณมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอรวมถึงอาจมีการเอียงหรือบิดเบี้ยวของท่อ [36, 43, 45] โดยภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนพื้นผิวที่มีความหยาบผิวตั้งต้นต่างกันแสดงในรูปที่ 4.9 และกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวตั้งต้นเฉลี่ย ความหนาแน่นของท่อและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ แสดงดังรูปที่ 4.10



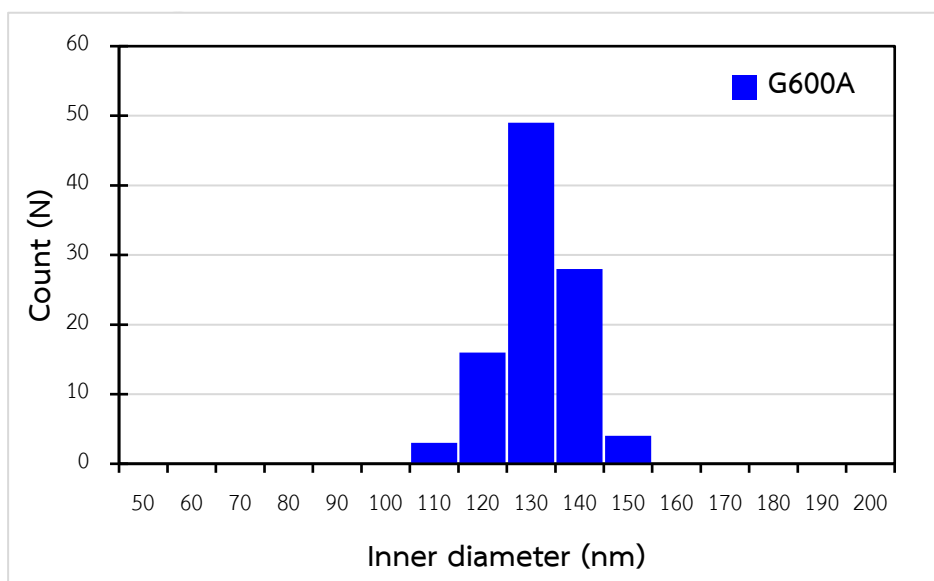
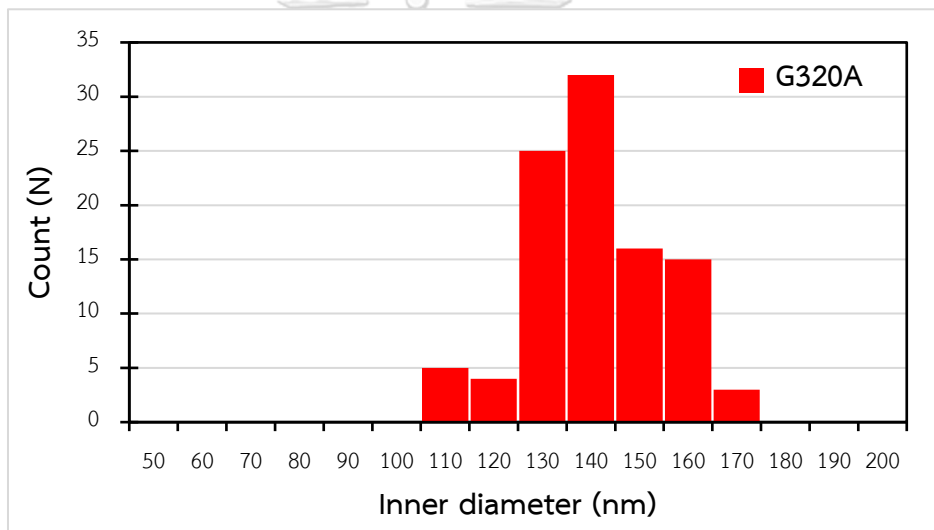
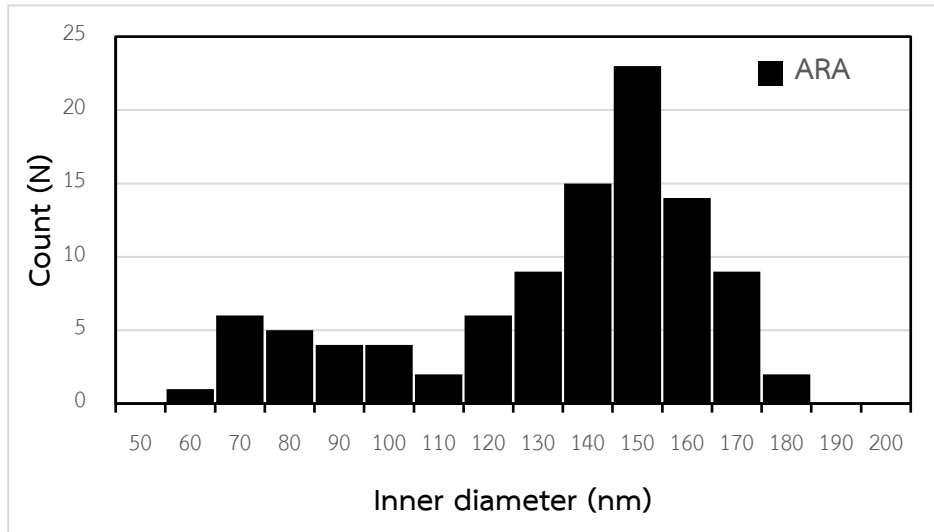
รูปที่ 4.9 จำลองการแพร่ของ F^- ไอออนไปยังพื้นผิวที่มีลักษณะและความหยาบผิวต่างกัน

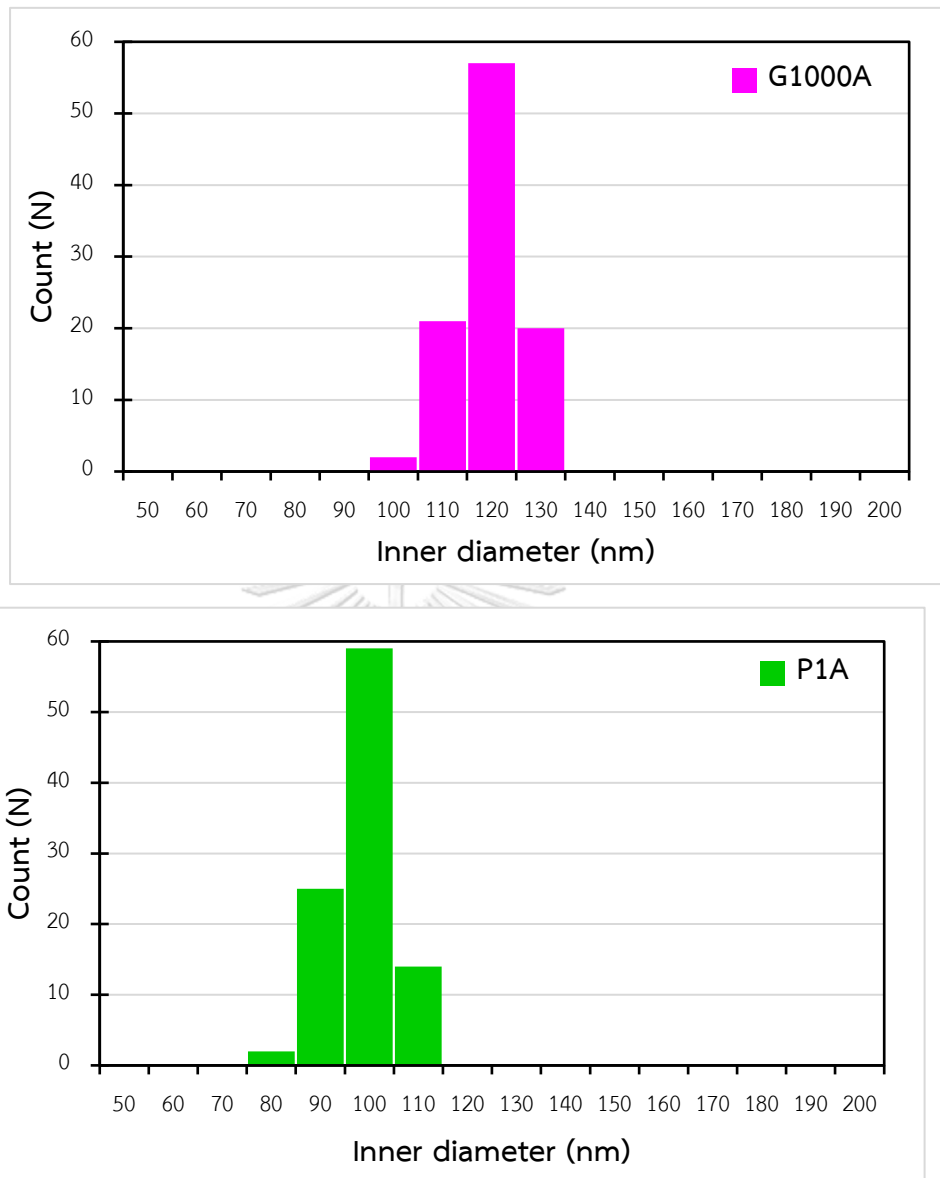




รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวตั้งต้นเฉลี่ย ความหนาแน่นของท่อและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ก) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านและผ่านการขัดเตรียมผิว ข) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดเตรียมผิว

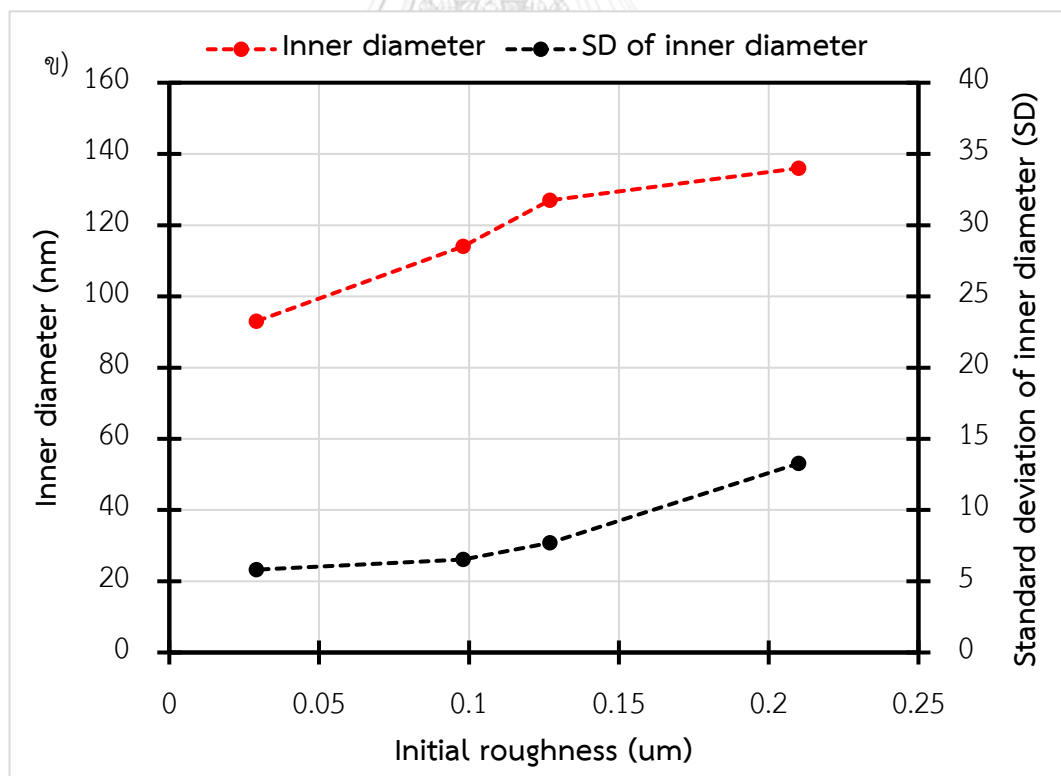
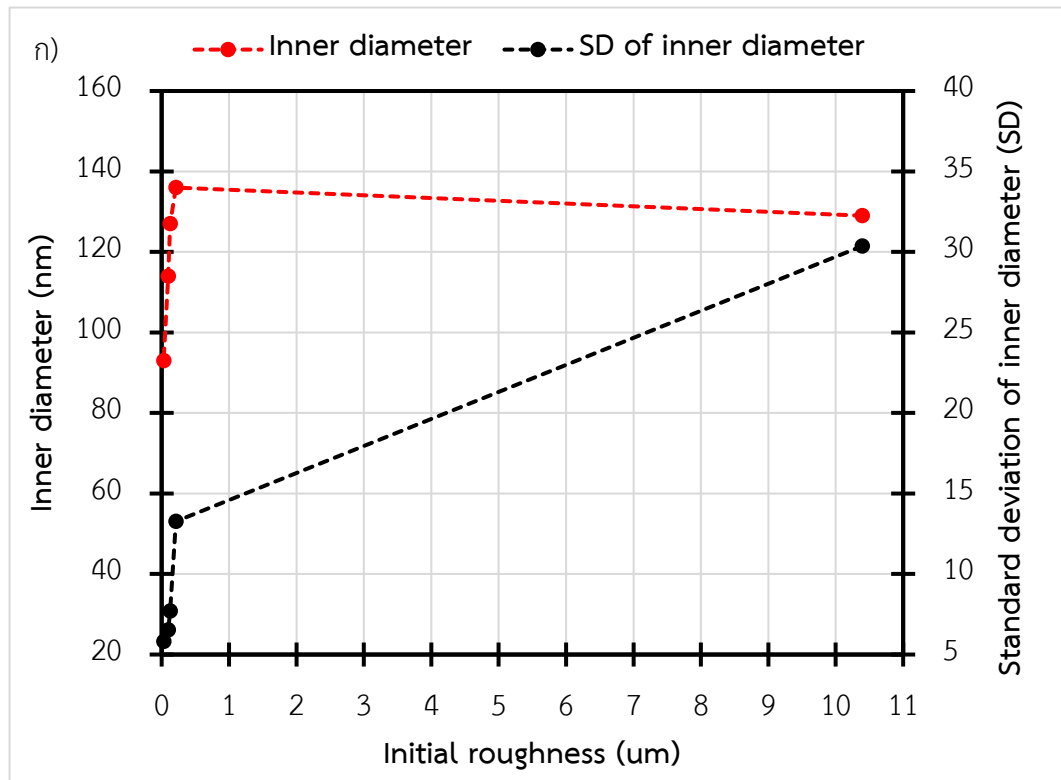
และจากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าชิ้น ARA ที่มีทั้งท่อที่ขนาดใหญ่และเล็กปะปนกันไปทำให้มีความไม่สม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาก จึงต้องใช้ตัวแปรอื่น เช่น ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มาร่วมวิเคราะห์ด้วย จากรูปที่ 4.11 เมื่อนำค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อแอนโนไทเทเนียมไดออกไซด์มาวิเคราะห์การกระจายตัว พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงานที่ผ่านการขัดเตรียมผิวด้วยการขัดเงาจนมีความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดก่อนนำไปแอนโนไดซ์จะมีค่า SD ต่ำที่สุดคือ 5.8 แสดงว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการขัดเตรียมผิวและมีความหยาบผิวมากที่สุดก่อนนำไปแอนโนไดซ์จะมีค่า SD สูงที่สุดคือ 30.3 แสดงว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอมากที่สุด ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและความสม่ำเสมอของขนาดท่อนี้จะนำไปวิเคราะห์ร่วมกับผลการกัดกร่อนของชิ้นงานหลังผ่านการทำแอนโนไดซ์ในข้อหวัถัดไป





รูปที่ 4.11 ฮิสโทแกรมของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่ผ่านการเตรียมผิวก่อนแอโนไดซ์ต่างกัน

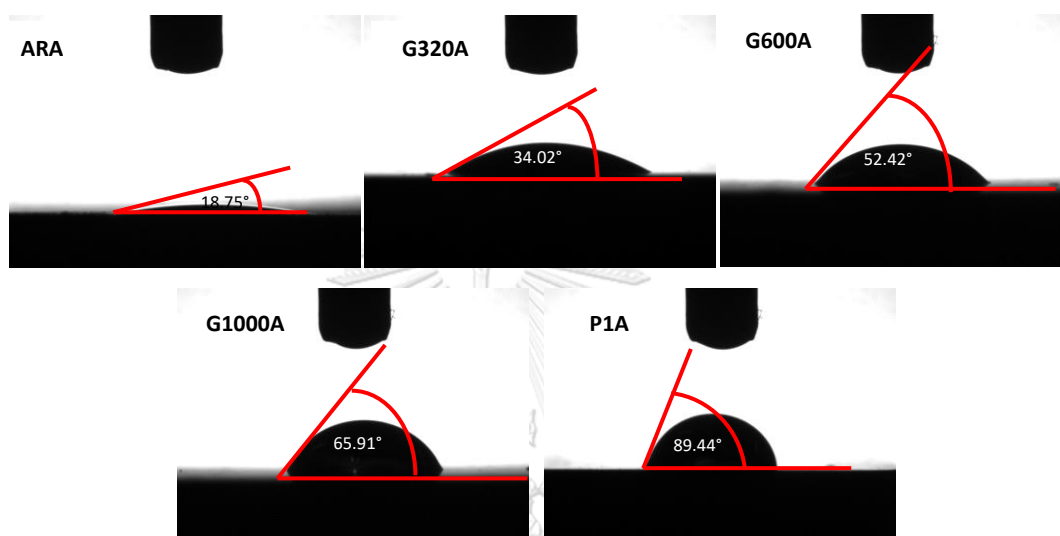
จากรูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวตั้งต้นเฉลี่ย เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าเมื่อชิ้นงานมีความหยาบผิวตั้งต้นเฉลี่ยน้อย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดท่อก็จะยิ่งน้อยตามไปด้วยเนื่องจากความหยาบผิวตั้งต้นเฉลี่ยน้อย ทำให้ความสม่ำเสมอของขนาดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการแอโนไดซ์มากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวตั้งต้นเฉลี่ย เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดท่อ ก) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการขัดเตรียมผิว ข) ชิ้นงานที่ผ่านการขัดเตรียมผิว

4.4.2 มุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิว Ti-6Al-4V หลังผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการแอนโนไดซ์

หลังนำชิ้นงานที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพผิวด้วยก่อนแอนโนไดซ์ด้วยเงื่อนไขต่างกันมาวิเคราะห์มุมสัมผัสระหว่างของเหลวหลังผ่านการแอนโนไดซ์เพื่อศึกษาความสามารถในการแทรกซึมของเหลวและความสามารถในการเปียก ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการวัดและถ่ายภาพมุมสัมผัสหลังของเหลวสัมผัสพื้นผิวชิ้นงานแล้ว 10 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.13

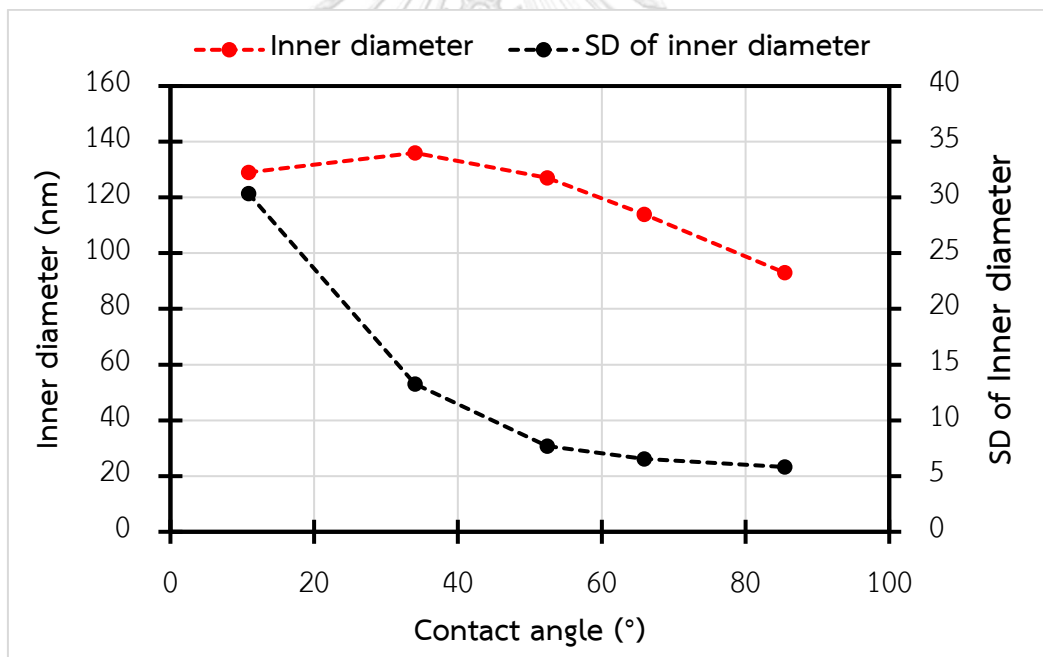


รูปที่ 4.13 มุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิว Ti-6Al-4V หลังผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการแอนโนไดซ์

โดยมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นจะบอกได้ความชอบน้ำ (Hydrophilic) รวมถึงความสามารถในการเปียก (Wettability) ของพื้นผิว ซึ่งมุมสัมผัสที่เล็กกว่า แรงยึดเหนี่ยว (Cohesive) จะอ่อนกว่าแรงยึดเกาะ (Adhesive) และโมเลกุลของของเหลวมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่เป็นของแข็งมากกว่าโมเลกุลของเหลว ส่วนมุมสัมผัสที่ใหญ่กว่า แรงยึดเหนี่ยวจะแข็งแรงกว่าแรงยึดเกาะและโมเลกุลของของเหลวมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยามากกว่ากับโมเลกุลที่เป็นของแข็ง

และเมื่อนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมาวิเคราะห์ร่วมกับมุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิว (Contact angle) ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขัดเตรียมผิวก่อนการแอนโนไดซ์จะมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันคือ ยิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากจะมีค่ามุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิวต่ำกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็ก โดยเรียงจากมุมสัมผัสของของเหลวจากน้อยไปมากได้

ดังนี้ $G320A < G600A < G1000A < P1A$ โดยมีมุมสัมผัสของของเหลวเท่ากับ 34.02 52.42 65.91 และ 89.44 องศา ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการขัดเตรียมผิวแล้วนำมาแอนโนไดซ์ (ARA) จะมีความสัมพันธ์ต่างจากชิ้นงานอื่นคือแม้จะไม่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมากที่สุด เนื่องจากชิ้นงาน ARA มีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมากที่สุดทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยไม่ได้มากที่สุดแต่กลับมีมุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิวต่ำที่สุดเท่ากับ 18.75 องศา และเมื่อทำการศึกษาร่วมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [31, 32, 37] เราจึงได้มีการตั้งสมมติฐานได้ว่า Capillary force ของชิ้นงานที่ท่อมีขนาด รูปร่างและการเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอจะดึงของเหลวด้วยมุมสัมผัสที่ต่ำกว่ากับพื้นผิวซึ่งอาจมาจากแรงดึงที่เกิดจากการดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยตัวเอง (Cohesive) อ่อนกว่าแรงยึดติดของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิว (Adhesive) เนื่องจากบริเวณที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบทำให้พื้นผิวชอบน้ำและมีพื้นที่ในการแทรกซึมหรือดูดซับของเหลวมากขึ้นด้วยจึงเป็นผลให้ค่ามุมสัมผัสของของเหลวต่ำที่สุดนั่นเอง



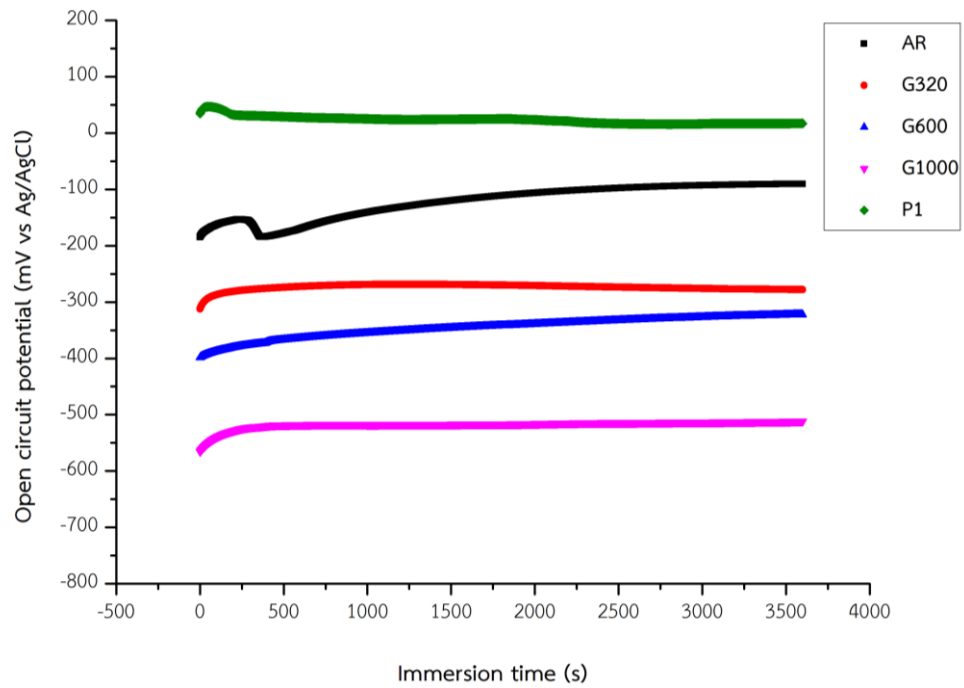
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและมุมสัมผัสของของเหลว

4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อน

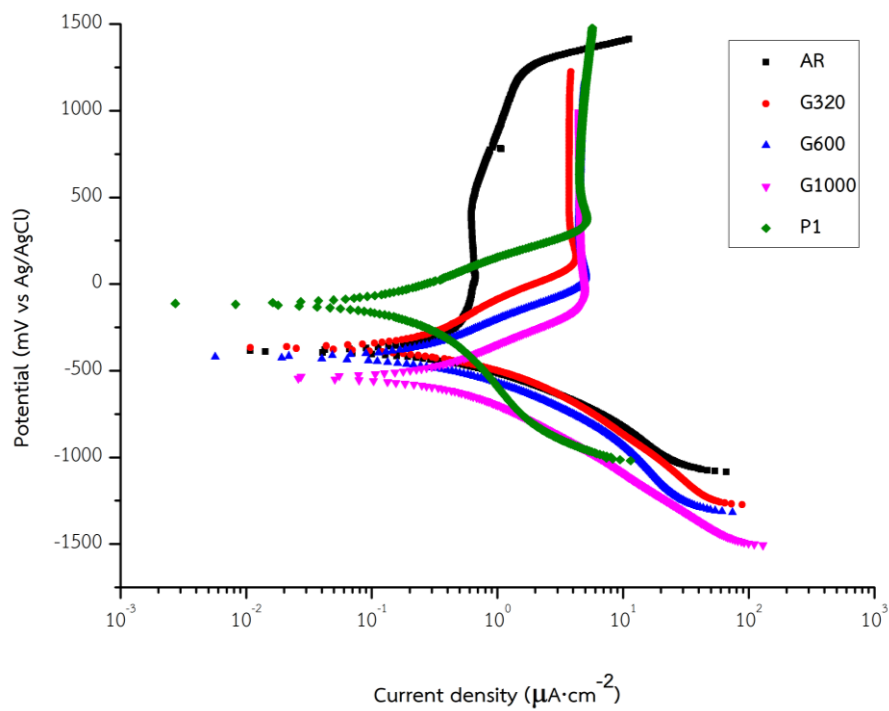
4.5.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัด

การทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิค Potentiodynamic polarization เป็นการทดสอบที่ทำลายชิ้นงานซึ่งสามารถวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อนของชิ้นงานได้จากกราฟโพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งเป็นกราฟที่พล็อตระหว่างค่าความต่างศักย์ของการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) และความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อน (Corrosion current density, I_{corr}) โดยค่าความต่างศักย์ของการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อนสามารถหาได้จากเทคนิค Tafel extrapolation ซึ่งเป็นการใช้ค่าในช่วงที่ความชันของกราฟเป็นเส้นตรงมาคำนวณผ่านโปรแกรม Nova 1.11 ซึ่งค่าที่ได้มาจากเทคนิค Tafel extrapolation จะบอกได้ถึงสมบัติด้านการกัดกร่อนของชิ้นงานนั้น ๆ ซึ่งชิ้นงานจะมีอัตราการกัดกร่อนน้อยและมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีถ้ามีค่าศักย์ของการกัดกร่อนหรือ E_{corr} สูงและความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อนหรือ I_{corr} ต่ำ

สำหรับการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดโดยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน (Phosphate buffered saline: PBS) โดยเริ่มต้นจากการวัดความเสถียรของชิ้นงานก่อนการทดสอบ Potentiodynamic polarization โดยการทดสอบ Open circuit potential (OCP) ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของชิ้นงานนั้น ๆ เทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งค่า OCP จะบ่งบอกได้ถึงแนวโน้มในความรุนแรงหรือรูปแบบในการกัดกร่อนของชิ้นงานนั้น ๆ ในสารละลาย PBS ซึ่งจากรูปที่ 4.15 แสดงกราฟ OCP ของชิ้นงานพบว่าค่า OCP ของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้นไป โดยชิ้นที่ไม่ได้ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย (AR) จะมีค่า OCP สูงกว่าชิ้นที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 600 1000 ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายแล้วทำการขัดละเอียดหรือขัดเงาต่อ (P1) จะมีค่า OCP สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายแล้วต่อด้วยการขัดเงาจะมีความเสถียรของชิ้นงานมากกว่าชิ้นอื่น ซึ่งด้วยค่า OCP ที่สูงที่สุดนี้อาจคาดการณ์ได้ว่าการกัดกร่อนจะเกิดได้ยากกว่าชิ้นงานอื่น แต่การวัดค่า OCP ไม่สามารถบอกได้ถึงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนจึงต้องนำชิ้นงานไปทำการทดสอบด้วยวิธี Potentiodynamic ต่อไป โดยหลังจากทดสอบจะได้กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานทั้ง 5 เงื่อนไขแสดงในภาพที่ 4.16



รูปที่ 4.15 กราฟ OCP ของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านปรับสภาพผิวด้วยการขัด



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัด

เมื่อพิจารณาเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่าง ๆ ตั้งแต่เบอร์ต่ำไปจนถึงเบอร์สูง (G320 G600 G1000) รวมถึงชิ้นที่ขัดเงา (P1) จะมีลักษณะเส้นกราฟแอนดิกที่คล้ายกันเนื่องมาจากการขัดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและฟิล์มออกไซด์ดั้งเดิมที่ผิว (Native oxide film) ด้วยวิธีเดียวกัน ต่างกันเพียงเบอร์กระดาษทรายลักษณะพื้นผิวรวมถึงความหยาบผิวที่วัดได้อาจไม่ได้มีค่าต่างกันมากนัก เช่นเดียวกับชิ้น P1 ซึ่งทำการขัดละเอียดเพื่อลดรอยกระดาษทรายออกไปและมีความหยาบผิวน้อยที่สุด โดยเมื่อเวลาผ่านไปและความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนจะเริ่มคงที่ที่ประมาณ 10^0 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรหรือประมาณ 10^{-6} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากโลหะมีชั้นฟิล์มป้องกันเรียกว่า พาสซีฟฟิล์ม (Passive film) แต่ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัด (AR) ที่มีลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิวแตกต่างจากชิ้นงานกลุ่มอื่นจะมีลักษณะกราฟที่ต่างออกไปคือเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 0 มิลลิโวลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสจะคงที่โดยมีค่าประมาณ 10^{-1} ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรหรือประมาณ 10^{-7} แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและหลังจากนั้นค่าความหนาแน่นกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความต่างศักย์ประมาณ 1250 มิลลิโวลต์ เนื่องจากชั้นฟิล์มป้องกันถูกทำลาย

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน

ตัวอย่าง	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr} :มิลลิโวลต์)
AR	-358
G320	-361
G600	-434
G1000	-531
P1	-104

เมื่อพิจารณาที่ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านปรับสภาพผิวโดยการขัดเงา (P1) จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงที่สุดอยู่ที่ -104 มิลลิโวลต์และตามด้วยชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยวิธีการขัดจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 320 (G320) และชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวโดยวิธีการขัด (AR) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันคือ -361 และ -358 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ แต่พบว่าลักษณะของกราฟของชิ้นงานกลุ่ม AR จะต่างกับกราฟของชิ้นงานกลุ่มอื่น ๆ และมีช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อนอย่างรวดเร็วปรากฏในกราฟโพลาริเซชันในช่วงศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1250 มิลลิโวลต์

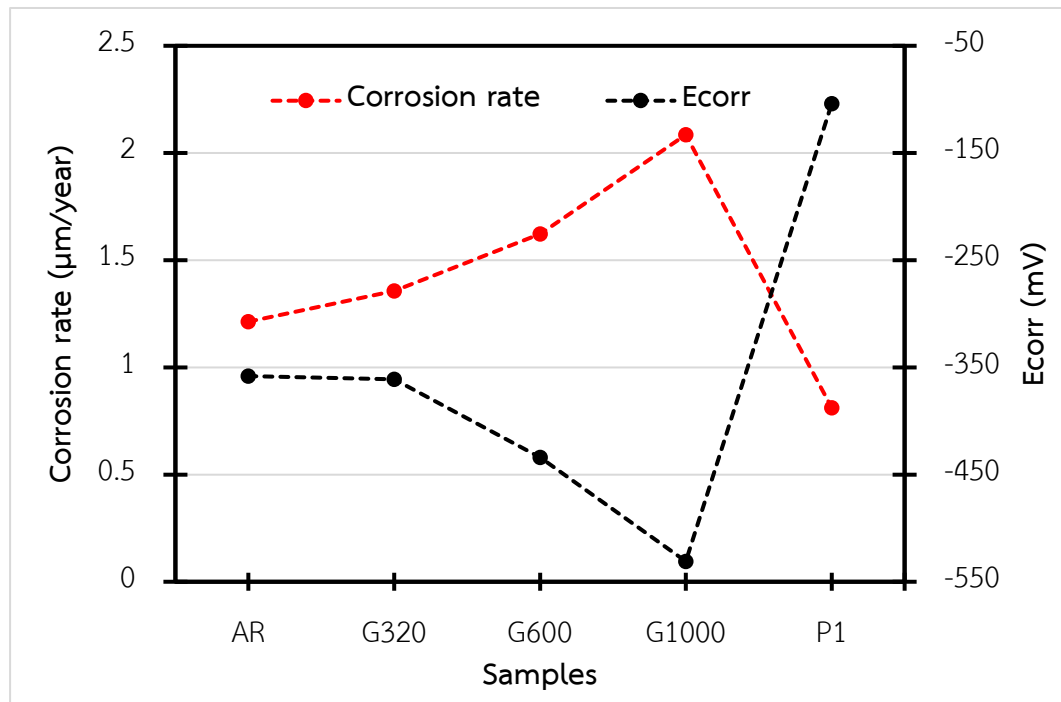
ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัดจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 600 (G600) และเบอร์ 1000 (G1000) จะเป็นกลุ่มที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำกว่า 3 กลุ่มแรกที่กำลังกล่าวไปโดยจะมีค่าเท่ากับ -434 และ -531 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ชิ้นงาน G1000 จะมีค่าต่ำกว่าและเป็นชิ้นงานกลุ่มที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานกลุ่มอื่น ๆ ที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวต่อโดยการแอนโนไดซ์

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr} : ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	อัตราการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)
AR	1.381×10^{-1}	1.213
G320	1.544×10^{-1}	1.357
G600	1.846×10^{-1}	1.622
G1000	2.373×10^{-1}	2.085
P1	9.243×10^{-2}	0.812

ในส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกได้ถึงอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) ของชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 4.6 โดยการหาค่าจาก Tafel slope พบว่าชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัด (AR) และกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัดจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 320 600 1000 จะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน ส่วนชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัดเงา (P1) จะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุด ส่วนชิ้นงานกลุ่มที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนมากที่สุดคือชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัดจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 1000 ซึ่งจากผลการทดลองสามารถเรียงลำดับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานแต่ละกลุ่มจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $G1000 > G600 > G320 > AR > P1$ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ 2.373×10^{-1} 1.846×10^{-1} 1.544×10^{-1} 1.381×10^{-1} 9.243×10^{-2} ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 2.085 1.622 1.357 1.213 0.812 ไมโครเมตรต่อปีตามลำดับ

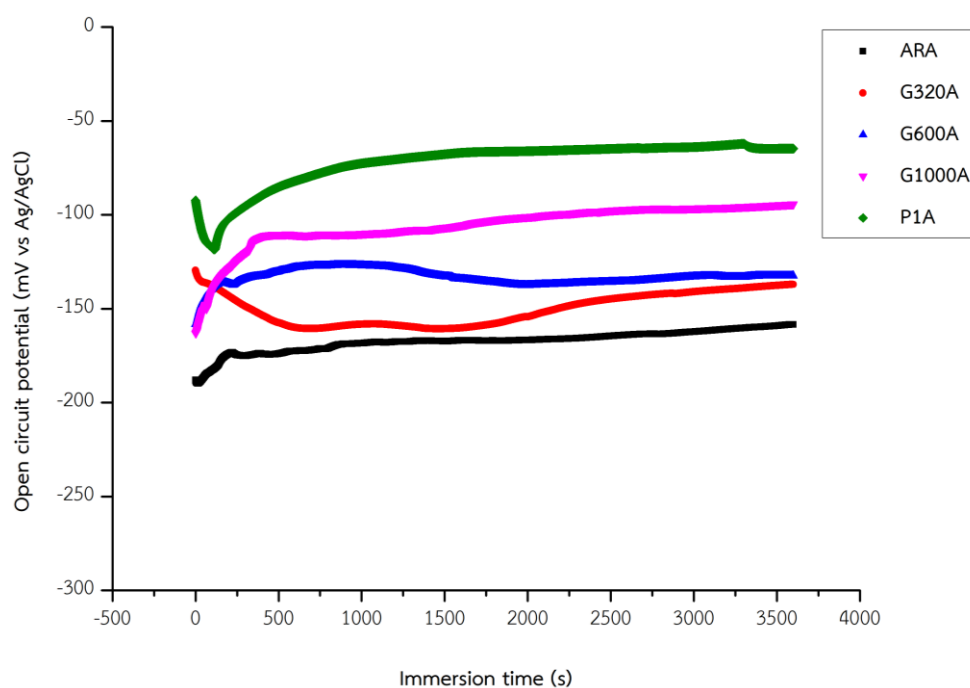
จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัดที่เงื่อนไขต่างกัน (รูปที่ 4.17) พบว่ายิ่งทำการปรับสภาพผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงยิ่งค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) จะต่ำลง ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และอัตราการกัดกร่อนจะสูงขึ้น เนื่องจากอาจเป็นผลจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงจะได้พื้นผิวที่มีรอยกระดาษที่ถี่ขึ้นเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสสารละลายหรือ Active area ให้แก่ผิวชิ้นงานรวมถึงมีความเค้นสะสมจากการขัดภายในชิ้นงานเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัดเงา (P1) จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) สูงที่สุดและมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนรวมถึงอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดเนื่องจากผิวที่เตรียมได้จะมีความเรียบและเงาคล้ายผิวกระจกซึ่งการการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าพื้นผิวที่เรียบและเงามีมุมสัมผัสของเหลว (Contact angle) มาก ซึ่งจะมีสมบัติเรื่องความสามารถในการเปียก (Wettability) ต่ำซึ่งอาจหมายความว่าความสามารถในการสัมผัสหรือเกาะติดระหว่างชิ้นงานและสารละลายลดลงรวมถึงมีบริเวณ Active area ต่ำจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนต่ำลง [33, 34] แต่เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมพบว่าถึงแม้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการสภาพพื้นผิวด้วยการขัดในชิ้นงานบางกลุ่มอาจมีค่าไม่ได้แตกต่างกันมากนักแตเมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) รวมถึงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานกลุ่มที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดมาเทียบกับกันจะเห็นความต่างอย่างชัดเจนคือกลุ่ม P1 และ G1000 ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) เท่ากับ -126 และ -531 มิลลิโวลต์ และมีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.812 และ 2.085 นาโนเมตรต่อปี ตามลำดับ ซึ่งค่า E_{corr} ที่ต่างกันนี้จะบอกถึงความยากง่ายของการกัดกร่อนของชิ้นงานแต่ละชิ้น โดยชิ้นงานที่มีค่า E_{corr} มากกว่าจะเกิดการกัดกร่อนได้ยากกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.17 แสดงแนวโน้มอัตราการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการขัดที่เงื่อนไขต่างกัน

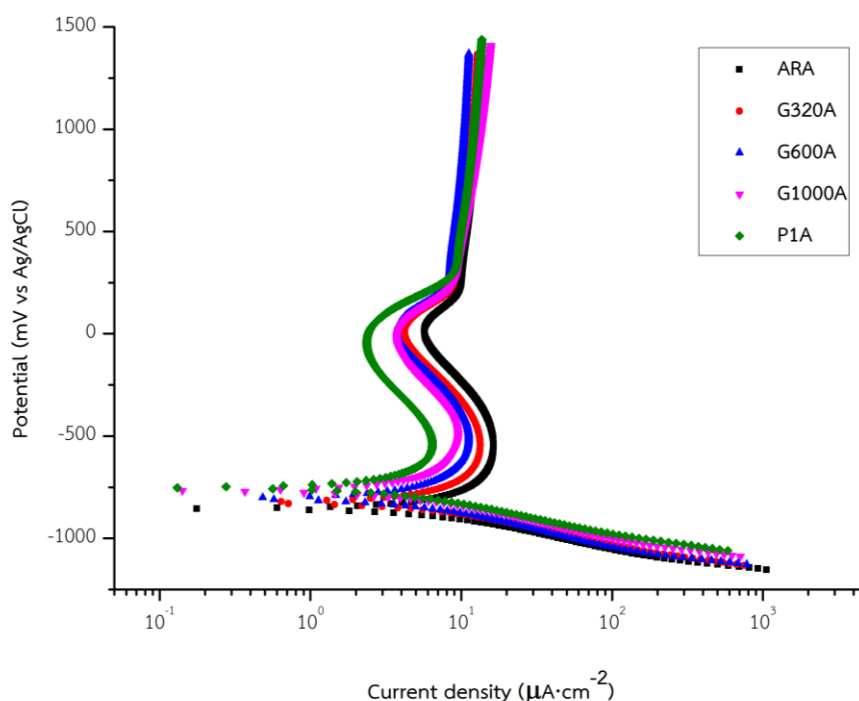
4.5.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการกัดกร่อนของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อด้วยการแอนโนไดซ์

การทดสอบ Open circuit potential (OCP) ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลิน (Phosphate buffered saline: PBS) ของชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดและทำไปปรับปรุงผิวต่อโดยการแอนโนไดซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าค่า OCP ของชิ้นงานหลังผ่านการเตรียมด้วยการขัดแล้วนำไปทำการแอนโนไดซ์ต่อพบว่ามีค่า OCP เฉลี่ยค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยค่า OCP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้นและมีความหยาบผิวเฉลี่ยตั้งต้นลดลง โดยชิ้นที่ไม่ได้ผ่านการขัดด้วยกระดาษทราย (ARA) จะมีค่า OCP ต่ำที่สุดแล้วตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 600 1000 ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายแล้วทำการขัดเงาต่อ (P1A) จะมีค่า OCP สูงที่สุดซึ่งหมายถึงชิ้นงานมีความเสถียรในสารละลาย PBS มากที่สุดนั่นเอง ซึ่งค่า OCP ที่มากที่สุดที่สุดคาดได้ว่าจะทำให้เกิดการกัดกร่อนยากกว่าชิ้นงานอื่น



รูปที่ 4.18 กราฟ OCP ของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดที่ผ่านการทำแอนโนไดซ์

จากการวิเคราะห์เส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานกลุ่มผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดแล้วนำมาปรับสภาพผิวต่อโดยการแอนโนไดซ์ พบว่าลักษณะเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานแต่ละชิ้นที่ผ่านการทำแอนโนไดซ์พบว่ามีความคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 แต่จะพบความแตกต่างเมื่อพิจารณาจากตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการกัดกร่อน เช่น ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และอัตราการกัดกร่อน ซึ่งค่าต่าง ๆ เหล่านี้หาได้จากเทคนิค Tafel extrapolation เช่นเดียวกับชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยการแอนโนไดซ์



รูปที่ 4.19 แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ผ่านการทำแอนโนไดซ์

เมื่อพิจารณาที่ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) พบว่าชิ้นงานกลุ่มที่มีค่า E_{corr} มากที่สุดคือชิ้นงานที่กราฟโพลาริเซชันขยับเยื้องไปทางด้านบนมากที่สุดซึ่งก็คือชิ้นงานกลุ่มผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1500 แล้วขัดเงาด้วยผงเพชรขนาด 9 ถึง 1 ไมครอนแล้วนำไปทำแอนโนไดซ์ (P1A) พบว่าซึ่งมีค่า E_{corr} เท่ากับ -747 มิลลิโวลต์และตามด้วยชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1000 แล้วนำไปทำแอนโนไดซ์ (G1000A) ชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 600 แล้วนำไปทำแอนโนไดซ์ (G600A) และชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย

วิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 320 แล้วนำไปทำแอนโนไดซ์ (G320A) ซึ่งมีค่า E_{corr} เท่ากับ -772, -795, และ -812 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวโดยวิธีการขัดแล้วนำไปทำแอนโนไดซ์ (ARA) เป็นกลุ่มที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) อยู่ที่ -854 มิลลิโวลต์ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดซ์

ตัวอย่าง	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} :มิลลิโวลต์)
ARA	-854
G320A	-812
G600A	-795
G1000A	-772
P1A	-747

แต่เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมของเส้นโพล่าไรเซชันของชิ้นงานทุกกลุ่มหลังผ่านการแอนโนไดซ์ พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ของชิ้นงานแต่ละกลุ่มมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน จากนั้นพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนต่อในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการแอนโนไดซ์

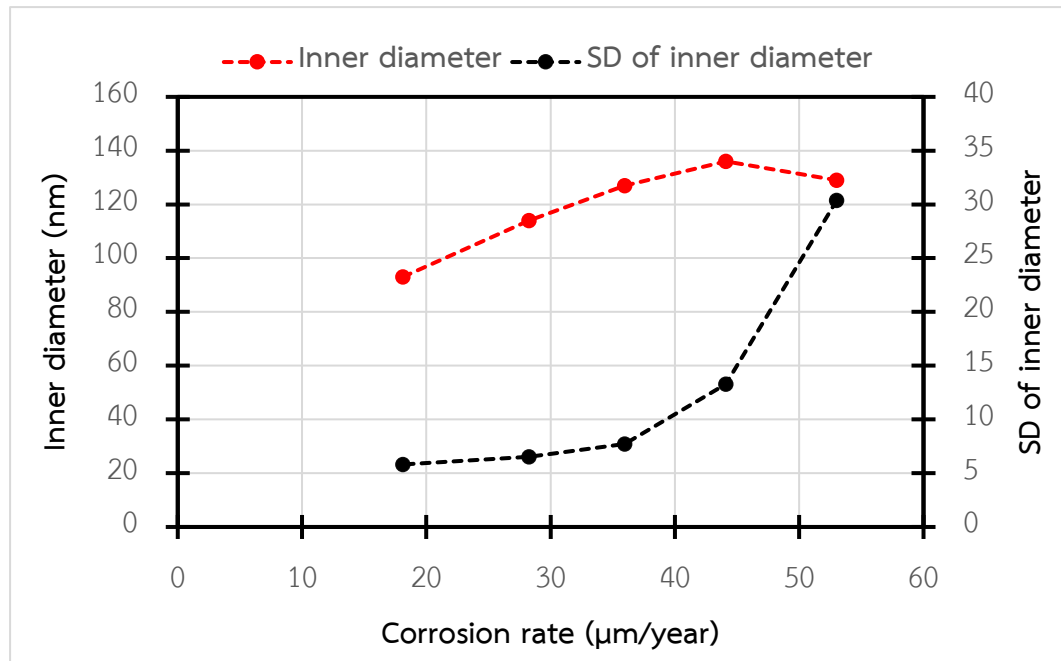
ตัวอย่าง	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr} :ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	อัตราการกัดกร่อน (ไมโครเมตรต่อปี)
ARA	6.034	53.013
G320A	5.018	44.090
G600A	4.091	35.948
G1000A	3.216	28.259
P1A	2.060	18.099

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) และอัตราการกัดกร่อนซึ่งแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าชิ้นงาน ARA มีค่า I_{corr} เท่ากับ 6.034 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 53.013 นาโนเมตรต่อปี ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 320, 600, 1000 แล้วนำไปทำแอโนไดซ์ ซึ่งมีค่า I_{corr} เท่ากับ 5.018 4.091 3.216 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 44.090 35.948 28.259 ไมโครเมตรต่อปี ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่มีค่า I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดคือชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 จนถึงเบอร์ 1500 แล้วขัดเงาด้วยผงเพชรขนาด 9 ถึง 1 ไมครอนแล้วนำไปทำแอโนไดซ์ (P1A) ซึ่งจะมีค่า I_{corr} เท่ากับ 2.060 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 18.099 ไมโครเมตรต่อปี เมื่อพิจารณาจากตัวแปรต่าง ๆ ประกอบกันจะพบว่าชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการขัดก่อนนำมาแอโนไดซ์จะมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดก่อนนำมาทำแอโนไดซ์และชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดที่มีค่าความหยาบผิวเริ่มต้นเฉลี่ยน้อยกว่าจะมีอัตราการกัดกร่อนน้อยกว่าและมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าหลังแอโนไดซ์

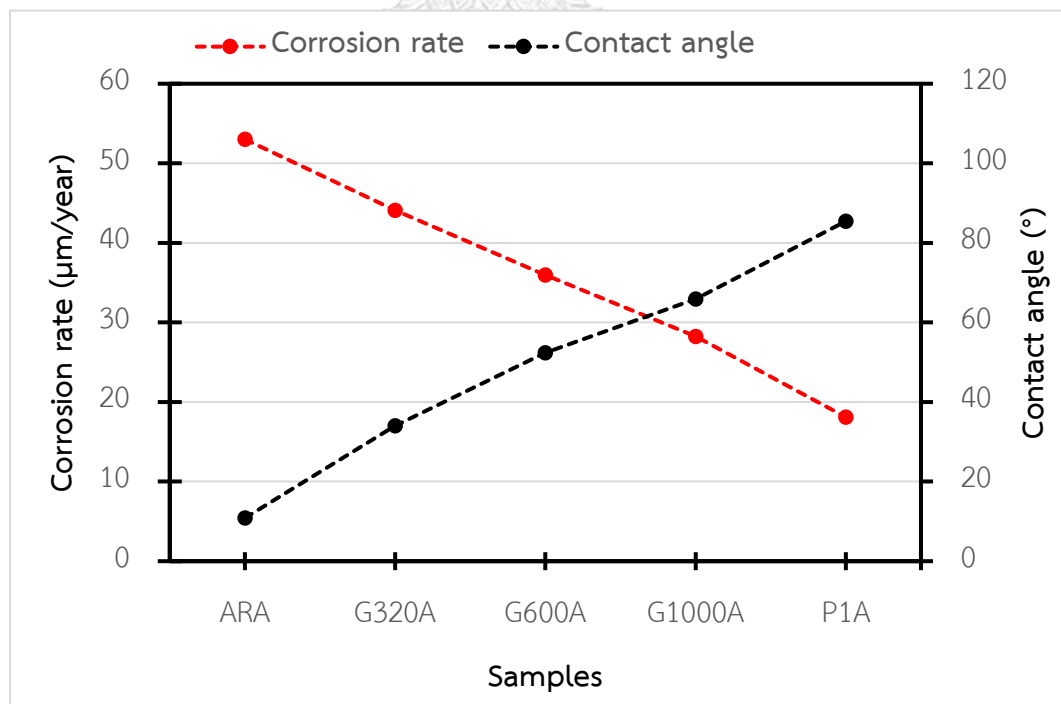
และเมื่อพิจารณาที่จุดการเปลี่ยนแปลงแอคทีฟ-พาสซีฟ (Active-Passive) ซึ่งเป็นจุดที่เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่งกระแสการกัดกร่อนกลับลดลงเนื่องจากบริเวณนี้โลหะจะเริ่มเกิดชั้นฟิล์มขึ้น ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดนี้จะเรียกว่าศักย์ไฟฟ้าพาสซีฟปฐมภูมิ (Primarily passive potential, E_{pp}) [14] โดยในงานนี้พบว่าจะเริ่มเกิดพาสซีฟฟิล์มที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกันทำให้ E_{pp} มีค่าไม่ต่างกันนักแต่เมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical current density, I_{crit}) ซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแส ณ บริเวณจุดการเปลี่ยนแปลงแอคทีฟ-พาสซีฟ พบว่า I_{crit} หลังผ่านการแอโนไดซ์ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัด (ARA) และชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัดเงา (P1A) พบว่ามีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เกิดฟิล์มต่างกันคือค่า I_{crit} ของชิ้นงาน P1A มีค่าอยู่ที่ประมาณ $5 \times 10^0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าชิ้นงาน ARA ซึ่งมีค่าประมาณ $1 \times 10^1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ และจากผลที่ได้ในการทดลองนี้รวมถึงผลจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ผลไปในทางเดียวกัน [33] จึงสันนิษฐานได้ว่าพื้นผิวที่เรียบขึ้นและค่าความหยาบผิวที่น้อยลงจะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เกิดฟิล์มน้อยลงและฟิล์มมีความหนาแน่นมากขึ้น

แม้ว่าหลังการแอโนไดซ์จะมีความแตกต่างของเส้นกราฟโพลาริเซชันน้อยลงเมื่อเทียบกับก่อนการแอโนไดซ์ แต่จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวเริ่มต้นก่อนแอโนไดซ์มีผลต่อการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนั้นแล้วลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อ ได้แก่ ขนาด

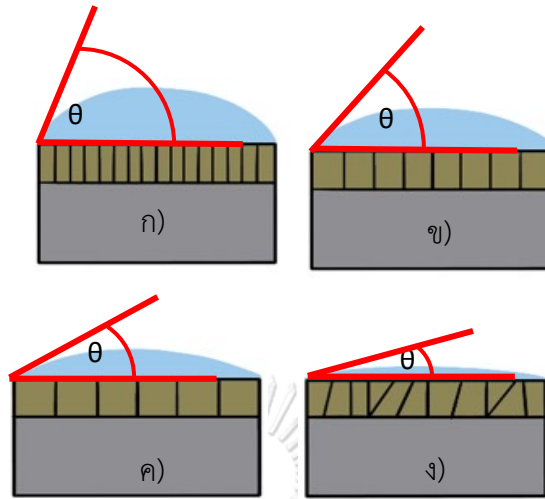
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งบ่งบอกได้ถึงความสม่ำเสมอและ/หรือการกระจายตัวของขนาดท่อ (ชิ้นงานที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง ความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจะน้อย) ยังมีความเกี่ยวข้องกับสมบัติด้านการกัดกร่อนอีกด้วย โดยเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อและมุมสัมผัสของของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อและสมบัติด้านการกัดกร่อนในรูปที่ 4.20 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดหยาบ (G320A G600A G100A) และขัดเงา (P1A) มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันคือยิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมากจะมีมุมสัมผัสของของเหลวน้อยลงส่วนอัตราการกัดกร่อนจะยิ่งมาก ในขณะที่ชิ้นที่ไม่ได้ผ่านการขัดเตรียมผิวก่อนไปทำแอนโนไดซ์ซึ่งไม่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากที่สุดและมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดกลับมีมุมสัมผัสของของเหลวน้อยที่สุดและมีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของของเหลวและอัตราการกัดกร่อน ในรูปที่ 4.21 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัย [37, 46] ที่กล่าวว่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสของของเหลว (Contact angle) ความชอบน้ำ (Hydrophilic) และความสามารถในการเปียก (Wettability) โดยยิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมากก็จะยิ่งชอบน้ำและความสามารถในการเปียกจะยิ่งมาก ส่วนชิ้นงานที่ท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบจะมีค่ามุมสัมผัสของของเหลวน้อยที่สุดและมีความสามารถในการเปียกสูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ซึ่งคาดว่าเป็นผลเกี่ยวเนื่องจากการทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารละลายของเหลวได้ดีขึ้นเนื่องจากมี Capillary force จากแรงดึงที่เกิดจากการดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยตัวเอง (Cohesive) อ่อนกว่าและมีแรงยึดติดของโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวหรือผนังท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adhesive) มากกว่า ทำให้วัสดุดูดซับของเหลวได้มากกว่าจึงทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นนั่นเอง โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดแล้วนำมาแอนโนไดซ์สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ G320A>G600A>G1000A>P1A โดยมีค่าเท่ากับ 136 127 114 93 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมผิวด้วยการขัดแล้วทำมาแอนโนไดซ์ (ARA) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเท่ากับ 129 นาโนเมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อสามารถเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ARA>G320A>G600A>G1000A>P1A โดยมีค่าเท่ากับ 30.3 13.2 7.7 6.5 5.81 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของกลางภายในท่อและอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสของของเหลวและอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 4.22 รูปจำลองความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อความสามารถในการเป็ยก ก) ถึง ค) แสดงการเรียงตัวของท่อที่เป็นระเบียบและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเรียงจากเล็กไปใหญ่ และ ง) แสดงท่อที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอ ดัดแปลง [37, 46]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ 1. ชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัดและ 2. ชิ้นงานกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัดแล้วนำไปแอนโด้ซ์ต่อที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับผลการทดลองในส่วนแรกพบว่าอัตราการกัดกร่อนจะยิ่งสูงขึ้นเมื่อขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้นและพบว่าการกัดกร่อนจะต่ำที่สุดเมื่อทำการขัดเงา ซึ่งพบว่าตรงกับการวิจัยที่ผ่านมา [33, 47] ที่ได้กล่าวไว้ว่ายิ่งทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้นถึงแม้จะทำให้ค่าหยาบผิวลดลงแต่คาดว่าจะยิ่งทำให้มีบริเวณ Active area เพิ่มขึ้นแต่เมื่อขัดเงาจนพื้นผิวเรียบและเงาจะทำให้บริเวณ Active area น้อยลงรวมถึงลักษณะผิวชิ้นงานที่เรียบมากและเงาคล้ายกระจกนั้นจะมีความสามารถในการเปียกต่ำทำให้สารละลายแทรกซึมไปที่ผิวเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่าจึงทำให้มีอัตราการกัดกร่อนต่ำ

ในส่วนของชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัดแล้วนำไปแอนโด้ซ์ต่อที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าจะมีท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้งแต่ 93 ถึง 136 นาโนเมตร ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามความหยาบผิวตั้งต้นก่อนการแอนโด้ซ์ โดยพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการขัดจนมีความหยาบผิวตั้งต้นก่อนแอนโด้ซ์น้อยที่สุดจะเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีความสม่ำเสมอของขนาดท่อมากที่สุด

เมื่อทดสอบการกัดกร่อนหลังการทำแอนโด้ซ์พบว่าอัตราการกัดกร่อนของแต่ละชิ้นมีความแตกต่างกันซึ่งเป็นผลจากความสัมพันธ์ของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ในการทดลองนี้พบว่าชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่น้อยที่สุดและมีความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดจะมีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อใหญ่และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่สม่ำเสมอมากที่สุดจะมีอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวัดมุมสัมผัสของของเหลวที่วัดได้คือ ชิ้นงานที่ขัดเตรียมผิวจนมีความหยาบผิวตั้งต้นน้อยที่สุดแล้วนำไปแอนโด้ซ์ซึ่งจะได้ท่อที่มีขนาดและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กที่สุด รวมถึงมีการเรียงตัวของท่อสม่ำเสมอที่สุดจะมีมุมสัมผัสของของเหลวมาก

ที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการขัดเตรียมผิวจนมีความหยาบผิวตั้งต้นมากที่สุดซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอและมีการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากที่สุดจะมีค่ามุมสัมผัสของของเหลว น้อยที่สุด เนื่องจากได้มีงานวิจัยที่กล่าวไว้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและความสม่ำเสมอของ โครงสร้างส่งผลต่อมุมสัมผัสของของเหลวซึ่งส่งผลต่อความชอบน้ำ (Hydrophilic) และความสามารถ ในการเปียก (Wettability) โดยยิ่งชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมากและมีความไม่ สม่ำเสมอของโครงสร้างมากจะทำให้มีค่ามุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับพื้นผิว (Contact angle) น้อย มีความชอบน้ำและความสามารถในการเปียกมากเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของขนาดและโครงสร้าง จะทำให้มีพื้นที่ในการแทรกซึมและดูดซับของเหลวมากขึ้น [37, 46]

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการกัดกร่อนของชิ้นงานกลุ่มที่ไม่ผ่านและผ่านการแอนโอดีซ์พบว่า ถึงแม้จะมีการศึกษามากมายที่ได้กล่าวไว้ว่าการทำแอนโอดีซ์เพื่อสร้างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ จะช่วยเพิ่มสมบัติในเรื่องความเข้ากันได้ทางชีวภาพและกระตุ้นการเติบโตของเซลล์กับวัสดุทดแทน แต่จากผลการทดสอบการกัดกร่อนแสดงให้เห็นว่าการทำแอนโอดีซ์จะทำให้ชิ้นงานมีอัตราการกัด กร่อนที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแอนโอดีซ์ที่เป็นการสร้างท่อระดับนาโนขึ้นบนพื้นผิวจะเป็น การไปเพิ่มพื้นที่ผิวและความหยาบผิวให้แก่ชิ้นงานและคาดว่าท่อระดับนาโนจากการแอนโอดีซ์อาจ นำไปสู่การกัดกร่อนแบบในซอก (Crevice corrosion) จึงทำให้การกัดกร่อนเกิดรุนแรงขึ้น นอกจากนั้นลักษณะของรูหรือซอก รวมถึงลักษณะพื้นผิวก็มีผลต่อการกัดกร่อนด้วยและจาก สมมุติฐานที่กล่าวมาจึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยเงื่อนไขต่างกันแล้วนำมาทำการแอนโอดีซ์ มีอัตราการกัดกร่อนต่างกันรวมถึงมีอัตราการกัดกร่อนหลังการแอนโอดีซ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น อาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนให้แก่ชิ้นงานหลัง ผ่านการแอนโอดีซ์หรือใช้วิธีการปรับปรุงพื้นผิววิธีอื่น ๆ

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. การปรับสภาพผิวด้วยการแอนโอดีซ์จะทำให้พื้นผิวชิ้นงานที่ปรากฏเปลี่ยนไปโดยจะมีฟิล์มสี เหลืองอมเทาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ผ่านการแอนโอดีซ์
2. การปรับสภาพผิวด้วยการแอนโอดีซ์จะทำให้ความหยาบผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น
3. ยิ่งทำการปรับสภาพผิวด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์สูงขึ้นอัตราการกัดกร่อนจะยิ่งมากขึ้น โดยเรียงจากชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320<600<1000 แต่อัตราการกัดกร่อนจะ ต่ำที่สุดเมื่อนำชิ้นงานไปทำการขัดเงาต่อจนได้ผิวที่เรียบและเงา

4. ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานจะมีลักษณะคล้ายกันแต่สิ่งที่ต่างกันคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของท่อ
5. ความหยาบผิวตั้งต้นของชิ้นงานที่ผ่านการขัดเตรียมผิวมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของท่อโดยชิ้นงานที่ทำการขัดเงาด้วยผงเพชรจนมีผิวที่เรียบเงาและมีความหยาบผิวตั้งต้นน้อยที่สุดก่อนนำไปแอโนไดซ์จะทำให้ได้ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดและการเรียงตัวสม่ำเสมอที่สุด รวมถึงมีความหนาแน่นของท่อมากที่สุดด้วย
6. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อค่ามุมสัมผัสของของเหลวโดยชิ้นงานที่มีค่ามุมสัมผัสของของเหลวต่ำที่สุดคือชิ้นงาน ARA ที่มีขนาดและการเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่สม่ำเสมอที่สุด
7. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่ามุมสัมผัสของของเหลวมีความสัมพันธ์ต่ออัตราการกัดกร่อน โดยชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเล็กที่สุด มีความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดและค่ามุมสัมผัสของของเหลวมากที่สุดจะมีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาสัณฐานวิทยาหลังการแอโนไดซ์ของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ควรมีการศึกษาความหนาแน่นของชั้นท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์รวมถึงความสูงของท่อที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมเพื่อใช้ร่วมในการวิเคราะห์ผลของการเตรียมผิวและสัณฐานวิทยาที่ชัดเจนขึ้น
2. เนื่องด้วยจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าพื้นผิวที่มีท่อระดับนาโนเนื่องจากการแอโนไดซ์มีผลต่อความหยาบผิวและเกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ทางชีวภาพ รวมถึงการเจริญเติบโตของกระดูกและการยึดเกาะของเซลล์แต่กลับพบว่าการปรับปรุงผิวด้วยการแอโนไดซ์ตามเงื่อนไขในงานวิจัยนี้กลับทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น ดังนั้นอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนให้แก่ชิ้นงานหลังผ่านการแอโนไดซ์โดยการปรับเงื่อนไขการแอโนไดซ์หรือใช้วิธีการปรับปรุงผิวด้วยวิธีอื่น ๆ ร่วมด้วย
3. ลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันอาจเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้สัณฐานวิทยาของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และสมบัติการกัดกร่อนต่างกัน จึงควรมีการศึกษาลักษณะของพื้นผิวเหล่านั้น

เพิ่มเติมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมืออื่น ๆ เช่น การใช้ Atomic force microscope (AFM) เพื่อถ่ายภาพความต่างของพื้นผิว รวมถึงรูหรือร่องจากการเตรียมผิวด้วยเงื่อนไขที่ต่างกัน

4. จากผลการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Potentiodynamics polarization ในสารละลาย PBS หลังการแอนโนไดซ์พบว่ามีความต่างของเส้นกราฟโพลาริเซชันน้อยจึงอาจต้องทำการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคอื่นเพิ่มเติม เช่น เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) เพื่อดูความต่างของการเกิดชั้นพาสซีฟฟิล์มหรืออาจทำการเปลี่ยนสารละลายทดสอบเพื่อให้การพิจารณาสมบัติการกัดกร่อนมีความชัดเจนยิ่งขึ้น



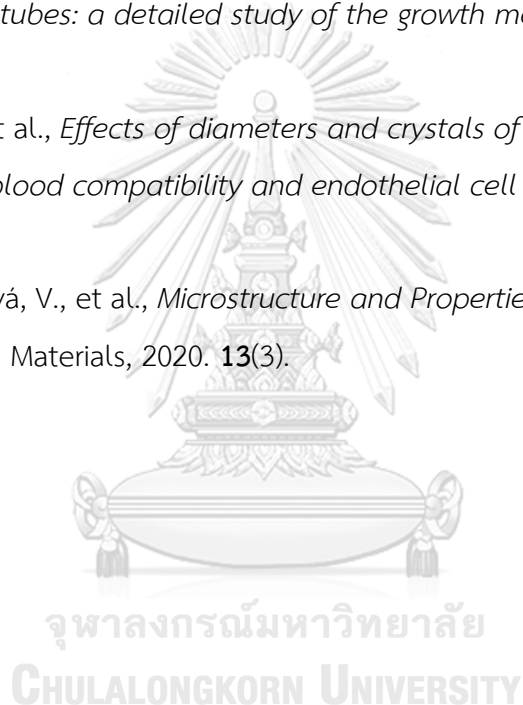
บรรณานุกรม

1. Satirajinda, M., *Metallurgy of titanium and its alloys*, in *non-ferrous metals*, 2, Editor. 1995, Chulalongkorn University Printing House: Bangkok. p. 49-54.
2. Khemaleelakul T, S.P., *Titanium in dentistry*. Chiang Mai Dental Journal, 2006. **27(2)**: p. 43-54.
3. Bhadeshia, H.J.M. and A. Youtube, *Titanium & its alloys*. 2011: p. 42.
4. Singh, S. and S. Ramakrishna, *Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future*. Current Opinion in Biomedical Engineering, 2017. **2**: p. 105-115.
5. Junbang, P., *Synthesis and characterization of TiO₂ nanotubes prepared by anodization* in *Science and Technology*. 2016, Thammasat University. p. 89.
6. KJ, A.J.S.L.S., *Phillips Science of dental materials 11th ed*. 2003: p. 89-90.
7. Qiao, Y., et al., *Corrosion and tensile behaviors of Ti-4Al-2V-1Mo-1Fe and Ti-6Al-4V titanium alloys*. 2019. **9(11)**: p. 1213.
8. Manivasagam, G., D. Dhinasekaran, and A.J.R.p.o.c.s. Rajamanickam, *Biomedical implants: corrosion and its prevention-a review*. 2010.
9. Brunette, D.M., et al., *Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications*. 2012: Springer Science & Business Media.
10. Asumpinwong, W., *The corrosion rate of anodized Ti-6Al-4V alloy in phosphoric acid solution with different voltage*, in *Department of Prosthodontics*. 2012, Chulalongkorn CUIR. p. 92.
11. Tangwongsan, C., *ชีววัสดุศาสตร์และการตอบสนองของร่างกายต่อชีววัสดุ*. 1 ed. 2014, Thailand: Chulalongkorn printing house.
12. Niinomi, M., *Metals for biomedical devices*. 2019.
13. Schmalz, G. and D. Arenholt-Bindslev, *Biocompatibility of dental materials*. Vol. 1. 2009: Springer.
14. Jones, D.A.J.U.S.R., New Jersey, *Principles and Prevention of Corrosion*. Prentice Hall, Inc. 1996.

15. Renganathan, G., N. Tanneru, and S.L. Madurai, *Orthopedical and biomedical applications of titanium and zirconium metals*, in *Fundamental biomaterials: metals*. 2018, Elsevier. p. 211-241.
16. Kim, S.E., et al., *Anodically nanostructured titanium oxides for implant applications*. 2008. **53**(14): p. 4846-4851.
17. Rollason, E.C., *Metallurgy for engineers*. 1973: Edward Arnold.
18. Misch, C.E.J.S.L., MO, *Contemporary Implant Dentistry*, Mosby. 2008.
19. Paul, S., K.J.J.o.M.E. Yadav, and Performance, *Corrosion behavior of surface-treated implant Ti-6Al-4V by electrochemical polarization and impedance studies*. 2011. **20**(3): p. 422-435.
20. Janzeer, Y., *Surface modification of titanium and titanium alloys to enhance bone healing*. 2013, Guy's, King's and St. Thomas's School of Dentistry.
21. Velten, D., et al., *Preparation of TiO₂ layers on cp-Ti and Ti6Al4V by thermal and anodic oxidation and by sol-gel coating techniques and their characterization*. 2002. **59**(1): p. 18-28.
22. Cho, L.R., et al., *Bone response of Mg ion implanted clinical implants with the plasma source ion implantation method*. 2010. **21**(8): p. 848-856.
23. Indira, K., et al., *A review on TiO₂ nanotubes: influence of anodization parameters, formation mechanism, properties, corrosion behavior, and biomedical applications*. 2015. **1**(4): p. 1-22.
24. Sarraf, M., et al., *In vitro bioactivity and corrosion resistance enhancement of Ti-6Al-4V by highly ordered TiO₂ nanotube arrays*. 2019. **55**(1): p. 187-200.
25. Lim, Y.J., et al., *Surface characterizations of variously treated titanium materials*. 2001. **16**(3).
26. YORIYA, S., *Titania nanotubes*, in *Materials Technology*. 2011, MTEC. p. 15-19.
27. Butler, D.L., *Surface Roughness Measurement*, in *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, D. Li, Editor. 2008, Springer US: Boston, MA. p. 1945-1949.
28. *Chapter 10 - Fundamentals of Contact Between Solids*, in *Engineering Tribology (Fourth Edition)*, G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, Editors. 2014, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 475-524.

29. Principles, E. and P.J.P.A.R. Polarization, *Application Note CORR-1 Basics of Corrosion Measurements*. 1980.
30. Instruments, G.J.G.I.W., PA, USA, *Getting started with electrochemical corrosion measurement*. 2011.
31. Adamson, A.W. and A.P. Gast, *Physical chemistry of surfaces*. Vol. 150. 1967: Interscience publishers New York.
32. Fowkes, F.J.W., DC, *Contact Angle Wettability and Adhesion: American Chemical Society*. 1964: p. 99-111.
33. Sivakumar, B., L.C. Pathak, and R.J.A.S.S. Singh, *Role of surface roughness on corrosion and fretting corrosion behaviour of commercially pure titanium in Ringer's solution for bio-implant application*. 2017. **401**: p. 385-398.
34. Jordanovová, V., et al., *Microstructure and Properties of Nanostructured Coating on Ti6Al4V*. 2020. **13**(3): p. 708.
35. Pourandarjani, A. and F.J.C.I. Nasirpouri, *Tuning substrate roughness to improve uniform growth and photocurrent response in anodic TiO₂ nanotube arrays*. 2018. **44**(18): p. 22671-22679.
36. Behzadi, F., F. Mohammadpour, and M.J.J.o.O.N. Moradi, *Investigation on the ordering of titanium oxide nanotubes fabricated by anodization on different substrate surface morphologies*. 2017. **2**(1): p. 21-30.
37. Liu, G., K. Du, and K.J.A.S.S. Wang, *Surface wettability of TiO₂ nanotube arrays prepared by electrochemical anodization*. 2016. **388**: p. 313-320.
38. Yu, W.-q., et al., *Corrosion behaviors of TiO₂ nanotube layers on titanium in Hank's solution*. 2009. **4**(6): p. 065012.
39. Karpagavalli, R., et al., *Corrosion behavior and biocompatibility of nanostructured TiO₂ film on Ti6Al4V*. 2007. **83**(4): p. 1087-1095.
40. Minagar, S., et al., *A review of the application of anodization for the fabrication of nanotubes on metal implant surfaces*. 2012. **8**(8): p. 2875-2888.
41. Mansoorianfar, M., et al., *Preparation and characterization of TiO₂ nanotube arrays on Ti6Al4V surface for enhancement of cell treatment*. 2017. **321**: p. 409-415.
42. Decha-umphai, D., et al., *Effects of post-processing on microstructure and*

- adhesion strength of TiO₂ nanotubes on 3D-printed Ti-6Al-4V alloy*. Surface and Coatings Technology, 2021. **421**: p. 127431.
43. Lu, K., Z. Tian, and J.A. Geldmeier, *Polishing effect on anodic titania nanotube formation*. Electrochimica Acta, 2011. **56**(17): p. 6014-6020.
44. Macák, J.M., et al., *Influence of the Ti microstructure on anodic self-organized TiO₂ nanotube layers produced in ethylene glycol electrolytes*. 2016. **371**: p. 607-612.
45. Apolinario, A., et al., *The role of the Ti surface roughness in the self-ordering of TiO₂ nanotubes: a detailed study of the growth mechanism*. 2014. **2**(24): p. 9067-9078.
46. Gong, Z., et al., *Effects of diameters and crystals of titanium dioxide nanotube arrays on blood compatibility and endothelial cell behaviors*. 2019. **184**: p. 110521.
47. Jordanovová, V., et al., *Microstructure and Properties of Nanostructured Coating on Ti6Al4V*. Materials, 2020. **13**(3).





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก ความหยาบผิวชิ้นงานก่อนการแอโนไดซ์ที่มีเงื่อนไขการเตรียมผิวต่างกัน

ตารางที่ 1ก ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน AR

ตัวอย่าง	ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a ; μm)	ความหยาบผิวเฉลี่ย กำลังสอง (R_q ; μm)
1	11.048	13.742
2	10.211	12.725
3	11.156	14.535
4	10.239	12.743
5	9.532	11.956
6	10.163	12.74
ค่าเฉลี่ย	10.3915	13.0735
SD	0.610285425	0.913628535

ตารางที่ 2ก ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน G320

ตัวอย่าง	ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a ; μm)	ความหยาบผิวเฉลี่ย กำลังสอง (R_q ; μm)
1	0.216	0.273
2	0.218	0.28
3	0.227	0.289
4	0.183	0.238
5	0.202	0.26
6	0.216	0.278
ค่าเฉลี่ย	0.210333333	0.269666667
SD	0.015603418	0.018206226

ตารางที่ 3ก ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน G600

ตัวอย่าง	ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : μm)	ความหยาบผิวเฉลี่ย กำลังสอง (R_q : μm)
1	0.124	0.164
2	0.132	0.168
3	0.124	0.159
4	0.129	0.173
5	0.128	0.166
6	0.128	0.163
ค่าเฉลี่ย	0.1275	0.1655
SD	0.003082207	0.004764452

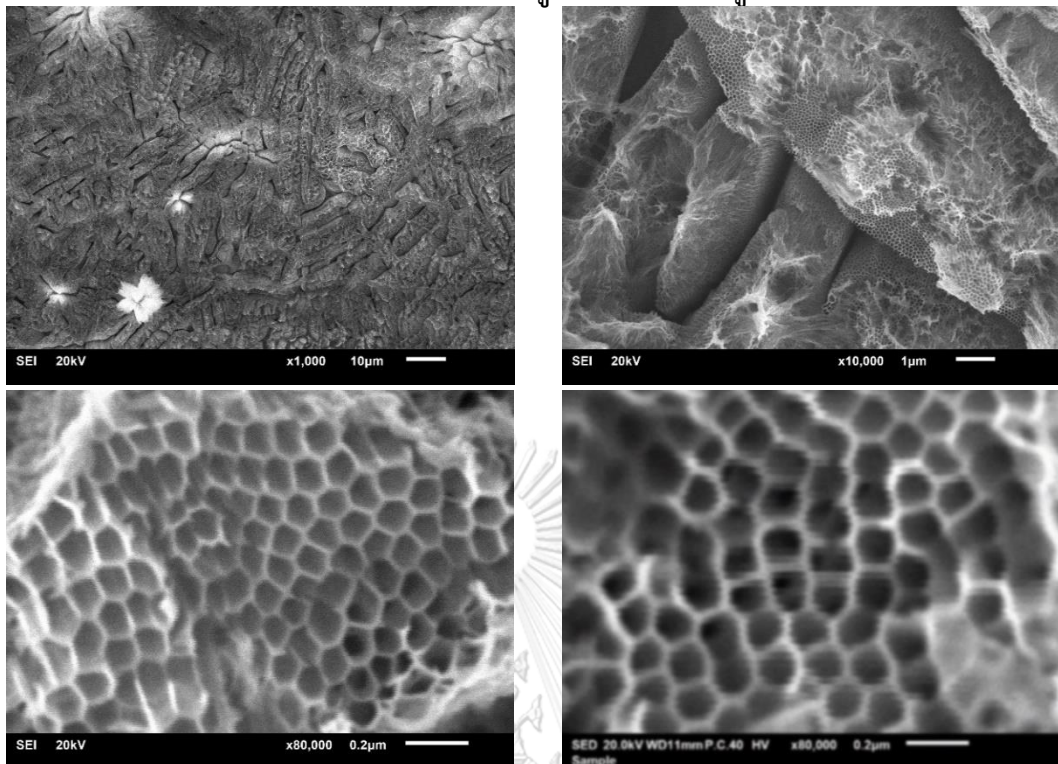
ตารางที่ 4ก ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน G1000

ตัวอย่าง	ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a : μm)	ความหยาบผิวเฉลี่ย กำลังสอง (R_q : μm)
1	0.089	0.114
2	0.08	0.103
3	0.094	0.164
4	0.106	0.135
5	0.107	0.188
6	0.115	0.144
ค่าเฉลี่ย	0.0985	0.141333333
SD	0.013065221	0.031481211

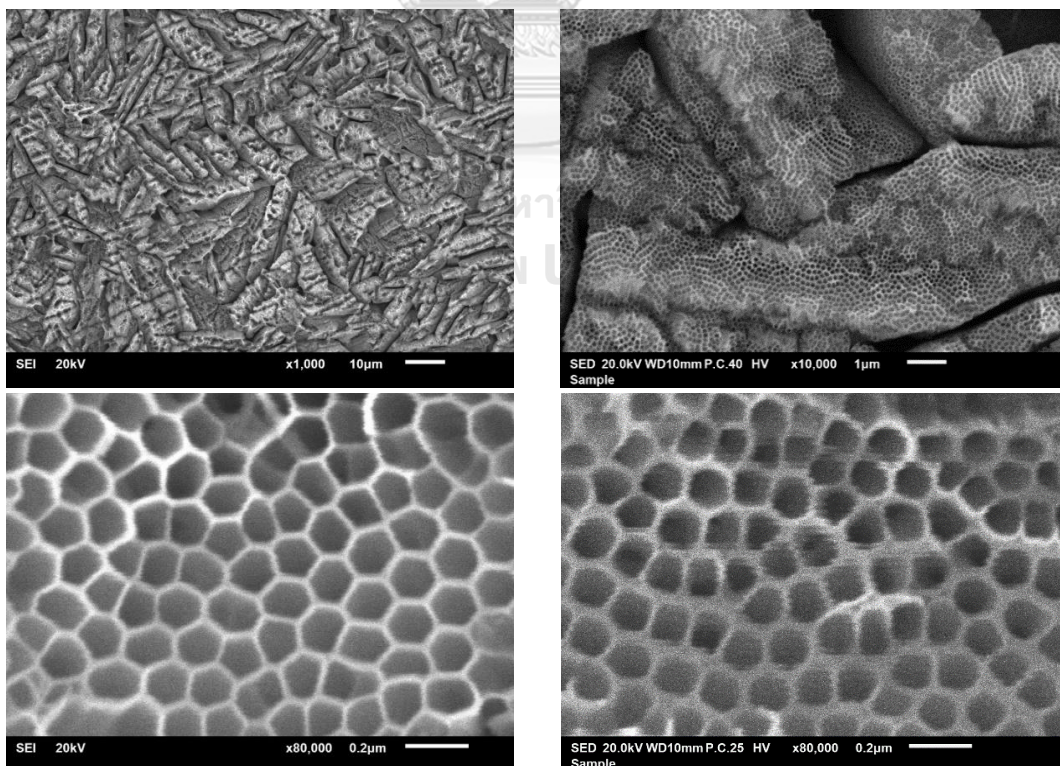
ตารางที่ 5ก ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน P1

ตัวอย่าง	ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a ; μm)	ความหยาบผิวเฉลี่ย กำลังสอง (R_q ; μm)
1	0.028	0.037
2	0.026	0.022
3	0.025	0.046
4	0.037	0.035
5	0.031	0.033
6	0.028	0.038
ค่าเฉลี่ย	0.029166667	0.035166667
SD	0.004355074	0.007833688

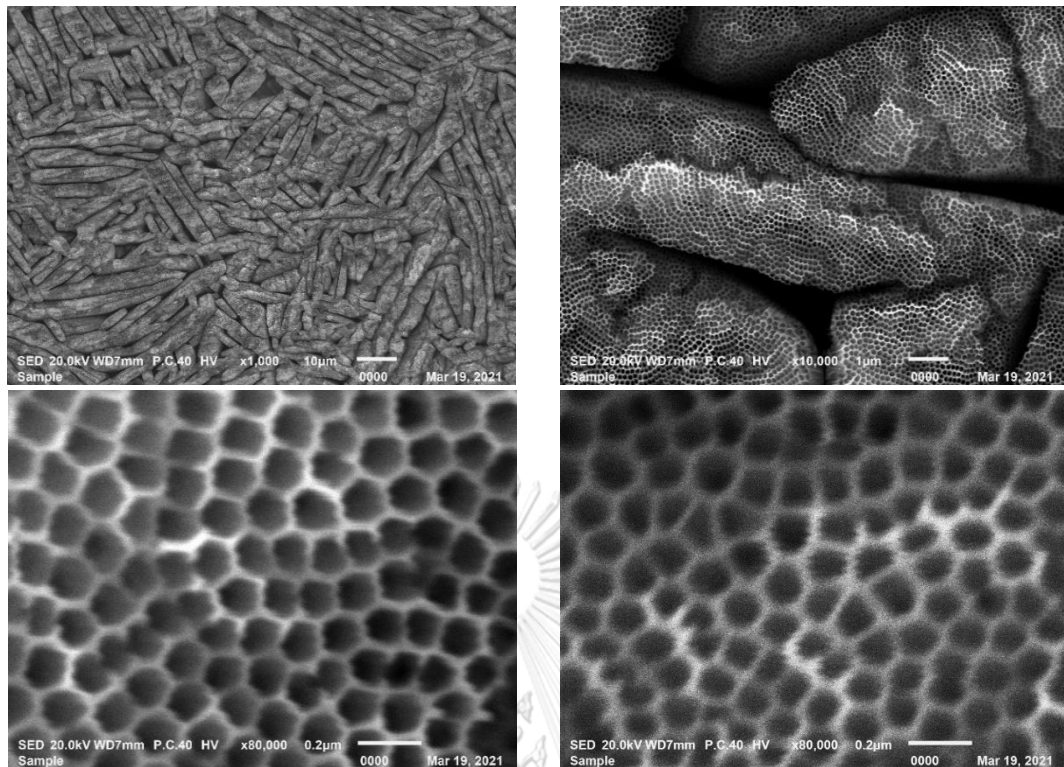
ภาคผนวก ข ภาพถ่าย SEM และข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและผนังท่อ



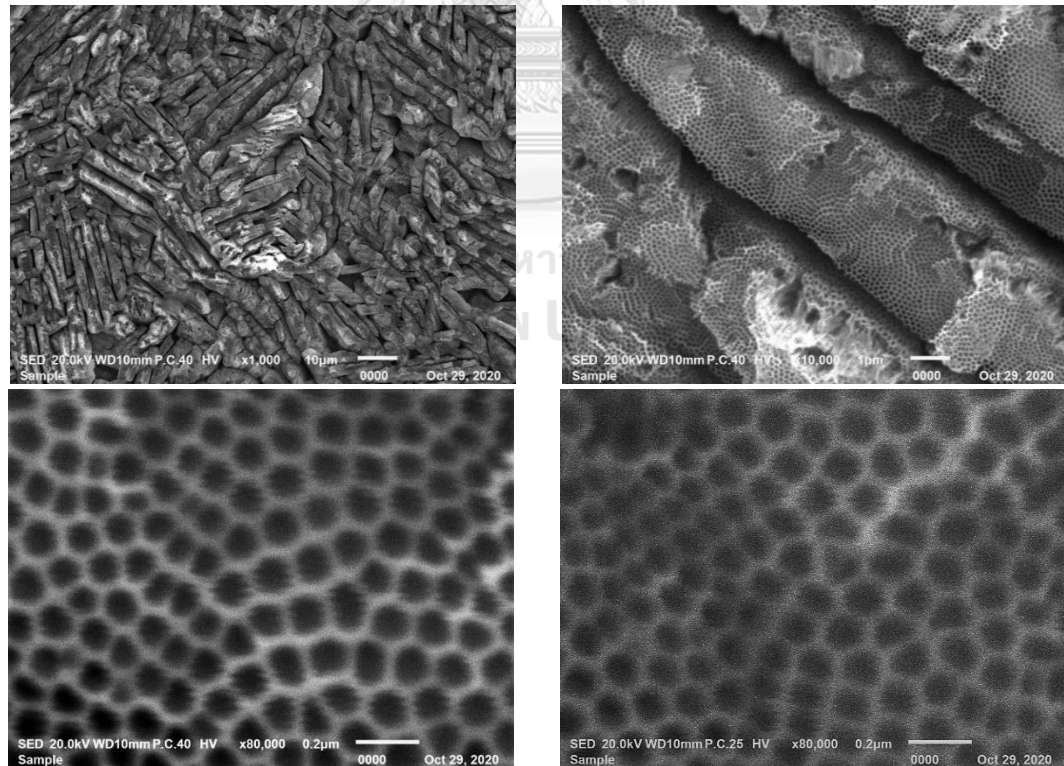
รูปที่ 1 ข ภาพถ่าย SEM หลังทำแอโนไดซ์ของชิ้นงาน ARA



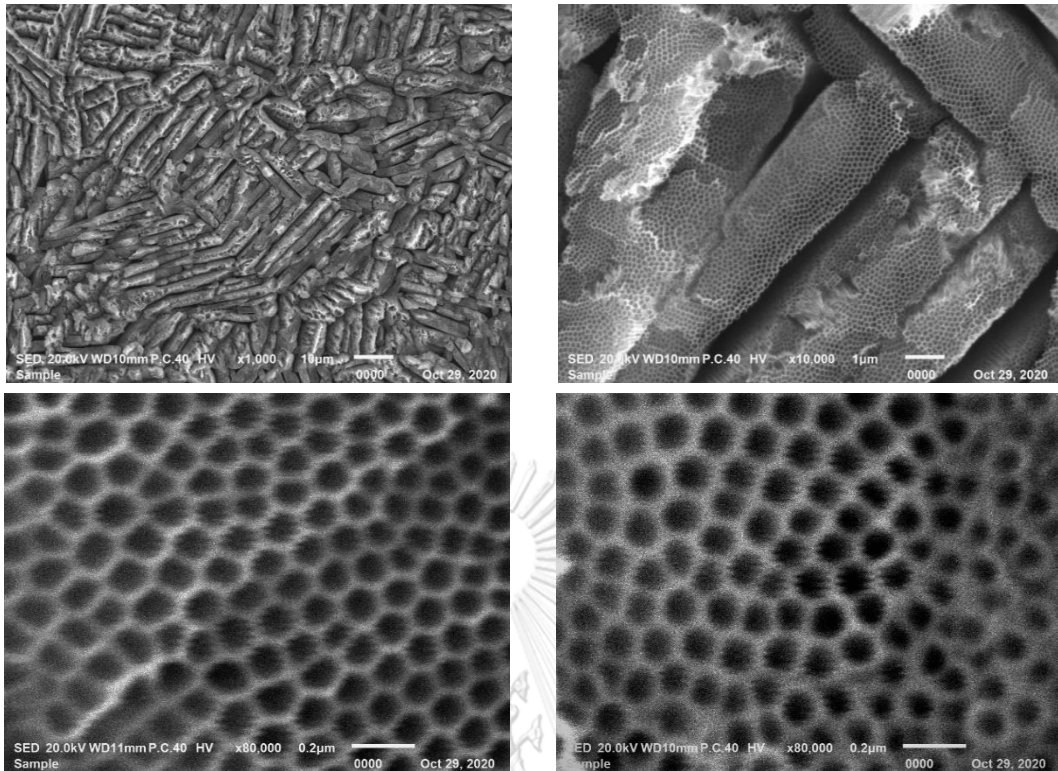
รูปที่ 2 ข ภาพถ่าย SEM หลังทำแอโนไดซ์ของชิ้นงาน G320A



รูปที่ 3 ข ภาพถ่าย SEM หลังทำแอนโนไดซ์ของชิ้นงาน G600A



รูปที่ 4 ข ภาพถ่าย SEM หลังทำแอนโนไดซ์ของชิ้นงาน G1000A



รูปที่ 5ข ภาพถ่าย SEM หลังทำแอโนไดซ์ของชิ้นงาน P1A

ตารางที่ 1 ข ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังท่อที่วัดได้ของชิ้นงาน ARA

ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)
1	0.138	0.016	51	0.147	0.026
2	0.147	0.035	52	0.13	0.022
3	0.138	0.024	53	0.136	0.028
4	0.14	0.019	54	0.131	0.026
5	0.139	0.025	55	0.145	0.032
6	0.132	0.019	56	0.138	0.022
7	0.13	0.027	57	0.115	0.024
8	0.132	0.023	58	0.121	0.023
9	0.163	0.025	59	0.123	0.032
10	0.151	0.024	60	0.127	0.027
11	0.169	0.023	61	0.087	0.032
12	0.141	0.029	62	0.146	0.028
13	0.138	0.029	63	0.158	0.015
14	0.142	0.033	64	0.155	0.017
15	0.123	0.023	65	0.146	0.032
16	0.099	0.025	66	0.156	0.022
17	0.138	0.021	67	0.123	0.019
18	0.102	0.031	68	0.145	0.027
19	0.138	0.022	69	0.155	0.023
20	0.168	0.019	70	0.119	0.026
21	0.151	0.029	71	0.129	0.025
22	0.155	0.023	72	0.146	0.032
23	0.133	0.024	73	0.146	0.03

24	0.143	0.022	74	0.144	0.022
25	0.146	0.018	75	0.149	0.021
26	0.059	0.028	76	0.148	0.026
27	0.065	0.031	77	0.149	0.035
28	0.069	0.036	78	0.095	0.02
29	0.076	0.028	79	0.153	0.022
30	0.067	0.013	80	0.064	0.027
31	0.072	0.033	81	0.143	0.026
32	0.071	0.018	82	0.087	0.033
33	0.084	0.022	83	0.061	0.04
34	0.078	0.027	84	0.065	0.034
35	0.16	0.041	85	0.083	0.028
36	0.153	0.032	86	0.132	0.03
37	0.117	0.023	87	0.141	0.035
38	0.074	0.03	88	0.152	0.036
39	0.091	0.018	89	0.142	0.034
40	0.121	0.03	90	0.163	0.038
41	0.142	0.028	91	0.166	0.029
42	0.111	0.022	92	0.157	0.043
43	0.162	0.029	93	0.152	0.035
44	0.138	0.024	94	0.164	0.025
45	0.114	0.026	95	0.145	0.026
46	0.145	0.031	96	0.171	0.032
47	0.094	0.025	97	0.156	0.038
48	0.104	0.029	98	0.177	0.019
49	0.113	0.03	99	0.163	0.037
50	0.141	0.022	100	0.165	0.016

ตารางที่ 2ข ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังท่อที่วัดได้ของชิ้นงาน G320A

ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)
1	0.125	0.03	51	0.137	0.028
2	0.137	0.024	52	0.145	0.026
3	0.134	0.028	53	0.163	0.023
4	0.155	0.02	54	0.128	0.029
5	0.123	0.021	55	0.115	0.023
6	0.123	0.025	56	0.107	0.022
7	0.121	0.028	57	0.103	0.029
8	0.123	0.032	58	0.109	0.024
9	0.13	0.028	59	0.118	0.026
10	0.121	0.022	60	0.12	0.024
11	0.131	0.024	61	0.12	0.028
12	0.129	0.028	62	0.134	0.025
13	0.123	0.029	63	0.154	0.024
14	0.133	0.027	64	0.155	0.030
15	0.134	0.024	65	0.161	0.026
16	0.136	0.026	66	0.143	0.034
17	0.123	0.024	67	0.128	0.023
18	0.126	0.024	68	0.149	0.024
19	0.134	0.023	69	0.122	0.028
20	0.134	0.032	70	0.128	0.025
21	0.13	0.028	71	0.144	0.030
22	0.152	0.019	72	0.138	0.030
23	0.158	0.03	73	0.126	0.026

24	0.13	0.028	74	0.136	0.028
25	0.158	0.026	75	0.103	0.025
26	0.132	0.02	76	0.136	0.018
27	0.126	0.021	77	0.14	0.029
28	0.128	0.019	78	0.145	0.035
29	0.132	0.024	79	0.151	0.025
30	0.154	0.022	80	0.139	0.023
31	0.107	0.028	81	0.129	0.033
32	0.139	0.021	82	0.135	0.029
33	0.152	0.02	83	0.151	0.025
34	0.123	0.021	84	0.134	0.032
35	0.138	0.029	85	0.134	0.023
36	0.136	0.019	86	0.136	0.030
37	0.155	0.02	87	0.146	0.033
38	0.128	0.024	88	0.143	0.024
39	0.143	0.022	89	0.128	0.036
40	0.143	0.025	90	0.136	0.029
41	0.159	0.023	91	0.147	0.029
42	0.145	0.023	92	0.127	0.029
43	0.138	0.026	93	0.134	0.026
44	0.143	0.019	94	0.135	0.025
45	0.145	0.019	95	0.139	0.035
46	0.154	0.023	96	0.132	0.029
47	0.146	0.023	97	0.134	0.027
48	0.158	0.023	98	0.154	0.025
49	0.163	0.024	99	0.143	0.025
50	0.144	0.03	100	0.136	0.032

ตารางที่ 3 ข ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังท่อที่วัดได้ของชิ้นงาน G600A

ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)
1	0.132	0.031	51	0.13	0.032
2	0.134	0.024	52	0.12	0.031
3	0.131	0.028	53	0.126	0.03
4	0.128	0.025	54	0.126	0.031
5	0.133	0.025	55	0.136	0.022
6	0.131	0.024	56	0.118	0.03
7	0.124	0.027	57	0.127	0.02
8	0.136	0.022	58	0.129	0.029
9	0.135	0.025	59	0.124	0.026
10	0.137	0.028	60	0.124	0.032
11	0.124	0.03	61	0.13	0.032
12	0.13	0.025	62	0.132	0.027
13	0.131	0.027	63	0.126	0.022
14	0.106	0.024	64	0.131	0.027
15	0.144	0.025	65	0.139	0.029
16	0.12	0.028	66	0.122	0.03
17	0.138	0.028	67	0.124	0.023
18	0.118	0.026	68	0.123	0.034
19	0.129	0.025	69	0.137	0.032
20	0.117	0.026	70	0.13	0.025
21	0.127	0.031	71	0.121	0.032
22	0.135	0.022	72	0.141	0.024
23	0.13	0.032	73	0.126	0.034

24	0.139	0.028	74	0.128	0.029
25	0.137	0.028	75	0.116	0.029
26	0.121	0.027	76	0.13	0.029
27	0.121	0.029	77	0.126	0.032
28	0.124	0.024	78	0.124	0.025
29	0.127	0.031	79	0.119	0.026
30	0.131	0.029	80	0.132	0.026
31	0.126	0.032	81	0.12	0.026
32	0.128	0.025	82	0.121	0.032
33	0.134	0.031	83	0.117	0.031
34	0.128	0.025	84	0.141	0.033
35	0.132	0.029	85	0.129	0.026
36	0.124	0.027	86	0.13	0.027
37	0.118	0.025	87	0.129	0.027
38	0.123	0.024	88	0.135	0.028
39	0.126	0.026	89	0.131	0.028
40	0.128	0.021	90	0.123	0.026
41	0.117	0.03	91	0.126	0.022
42	0.118	0.025	92	0.133	0.025
43	0.116	0.029	93	0.137	0.027
44	0.129	0.027	94	0.112	0.025
45	0.126	0.032	95	0.124	0.022
46	0.132	0.031	96	0.109	0.027
47	0.129	0.02	97	0.104	0.022
48	0.129	0.029	98	0.115	0.022
49	0.135	0.021	99	0.114	0.027
50	0.143	0.03	100	0.125	0.026

ตารางที่ 4ข ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังท่อที่วัดได้ของชิ้นงาน G1000A

ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)
1	0.112	0.028	51	0.112	0.031
2	0.105	0.03	52	0.115	0.031
3	0.102	0.029	53	0.113	0.028
4	0.111	0.03	54	0.11	0.029
5	0.116	0.03	55	0.113	0.027
6	0.114	0.033	56	0.113	0.033
7	0.117	0.031	57	0.125	0.03
8	0.122	0.03	58	0.118	0.027
9	0.117	0.031	59	0.121	0.032
10	0.11	0.03	60	0.125	0.03
11	0.114	0.027	61	0.108	0.033
12	0.121	0.035	62	0.113	0.028
13	0.106	0.031	63	0.123	0.028
14	0.12	0.031	64	0.119	0.029
15	0.114	0.031	65	0.116	0.033
16	0.126	0.03	66	0.126	0.029
17	0.114	0.032	67	0.113	0.032
18	0.111	0.032	68	0.118	0.029
19	0.115	0.03	69	0.116	0.028
20	0.124	0.031	70	0.127	0.027
21	0.102	0.031	71	0.12	0.033
22	0.114	0.028	72	0.119	0.029
23	0.122	0.035	73	0.115	0.03

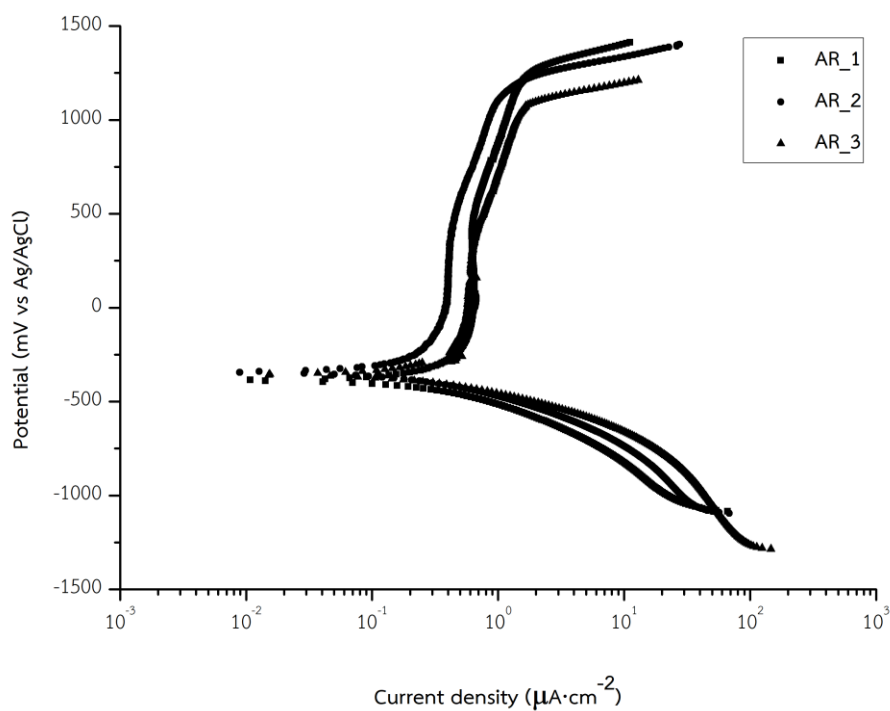
24	0.118	0.029	74	0.114	0.032
25	0.114	0.032	75	0.108	0.027
26	0.102	0.034	76	0.118	0.027
27	0.108	0.032	77	0.108	0.03
28	0.123	0.026	78	0.119	0.031
29	0.107	0.033	79	0.125	0.033
30	0.118	0.033	80	0.113	0.032
31	0.101	0.034	81	0.11	0.028
32	0.122	0.029	82	0.119	0.032
33	0.117	0.032	83	0.117	0.029
34	0.112	0.03	84	0.109	0.026
35	0.112	0.028	85	0.113	0.027
36	0.115	0.035	86	0.101	0.027
37	0.098	0.03	87	0.098	0.028
38	0.11	0.033	88	0.115	0.032
39	0.111	0.031	89	0.112	0.025
40	0.117	0.032	90	0.117	0.032
41	0.12	0.03	91	0.108	0.035
42	0.122	0.031	92	0.106	0.033
43	0.121	0.027	93	0.122	0.036
44	0.115	0.028	94	0.12	0.034
45	0.113	0.03	95	0.122	0.029
46	0.116	0.028	96	0.125	0.031
47	0.122	0.031	97	0.115	0.027
48	0.112	0.031	98	0.102	0.032
49	0.117	0.032	99	0.113	0.027
50	0.118	0.032	100	0.108	0.029

ตารางที่ 5ข ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของผนังท่อที่วัดได้ของชิ้นงาน P1A

ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ (nm)	ความหนาของ ผนังท่อ (nm)
1	0.106	0.038	51	0.094	0.030
2	0.101	0.033	52	0.099	0.029
3	0.096	0.031	53	0.092	0.031
4	0.093	0.036	54	0.099	0.028
5	0.099	0.035	55	0.089	0.030
6	0.087	0.039	56	0.102	0.029
7	0.086	0.039	57	0.104	0.029
8	0.091	0.035	58	0.099	0.030
9	0.086	0.028	59	0.101	0.030
10	0.092	0.037	60	0.094	0.028
11	0.09	0.033	61	0.094	0.031
12	0.095	0.033	62	0.092	0.028
13	0.093	0.036	63	0.097	0.030
14	0.091	0.030	64	0.092	0.027
15	0.093	0.036	65	0.091	0.031
16	0.091	0.032	66	0.091	0.028
17	0.089	0.033	67	0.099	0.032
18	0.09	0.033	68	0.094	0.025
19	0.087	0.030	69	0.105	0.029
20	0.094	0.037	70	0.093	0.027
21	0.098	0.034	71	0.104	0.029
22	0.096	0.030	72	0.097	0.026
23	0.1	0.032	73	0.099	0.028

24	0.086	0.036	74	0.101	0.027
25	0.089	0.035	75	0.096	0.026
26	0.093	0.037	76	0.097	0.028
27	0.099	0.028	77	0.098	0.032
28	0.1	0.030	78	0.097	0.033
29	0.08	0.030	79	0.097	0.031
30	0.083	0.036	80	0.086	0.032
31	0.085	0.040	81	0.093	0.033
32	0.091	0.037	82	0.091	0.032
33	0.085	0.034	83	0.095	0.032
34	0.086	0.036	84	0.097	0.028
35	0.09	0.027	85	0.095	0.030
36	0.102	0.033	86	0.095	0.032
37	0.092	0.031	87	0.09	0.033
38	0.091	0.028	88	0.092	0.027
39	0.086	0.029	89	0.099	0.032
40	0.096	0.027	90	0.092	0.028
41	0.089	0.028	91	0.093	0.032
42	0.103	0.030	92	0.101	0.032
43	0.098	0.029	93	0.086	0.029
44	0.102	0.030	94	0.095	0.031
45	0.102	0.035	95	0.091	0.033
46	0.084	0.031	96	0.091	0.031
47	0.094	0.030	97	0.101	0.031
48	0.099	0.026	98	0.086	0.031
49	0.086	0.032	99	0.089	0.028
50	0.079	0.030	100	0.084	0.029

ภาคผนวก ค ผลของสมบัติการกัดกร่อน

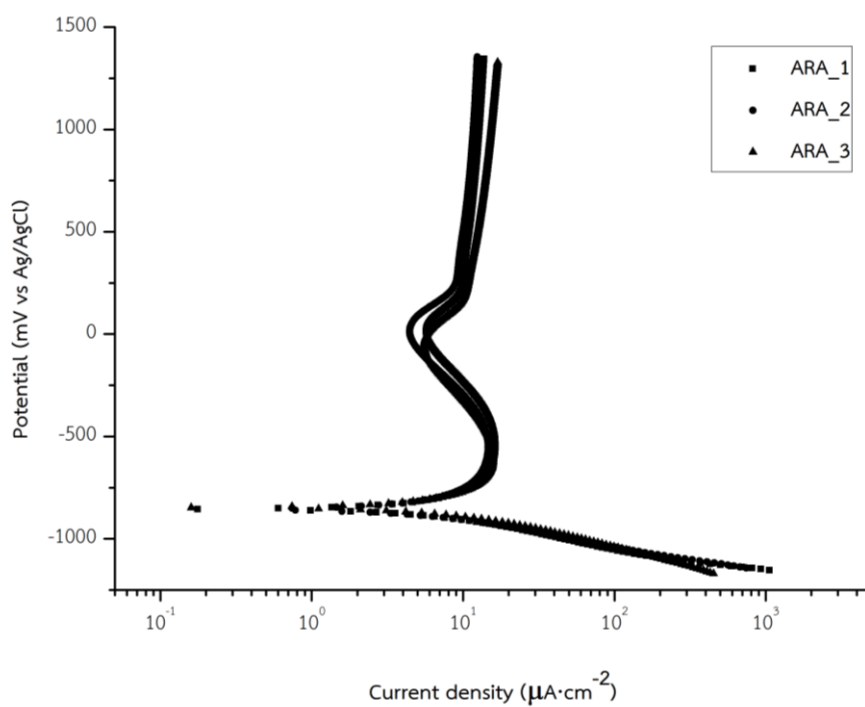


รูปที่ 1ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน AR



ตารางที่ 1ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน AR

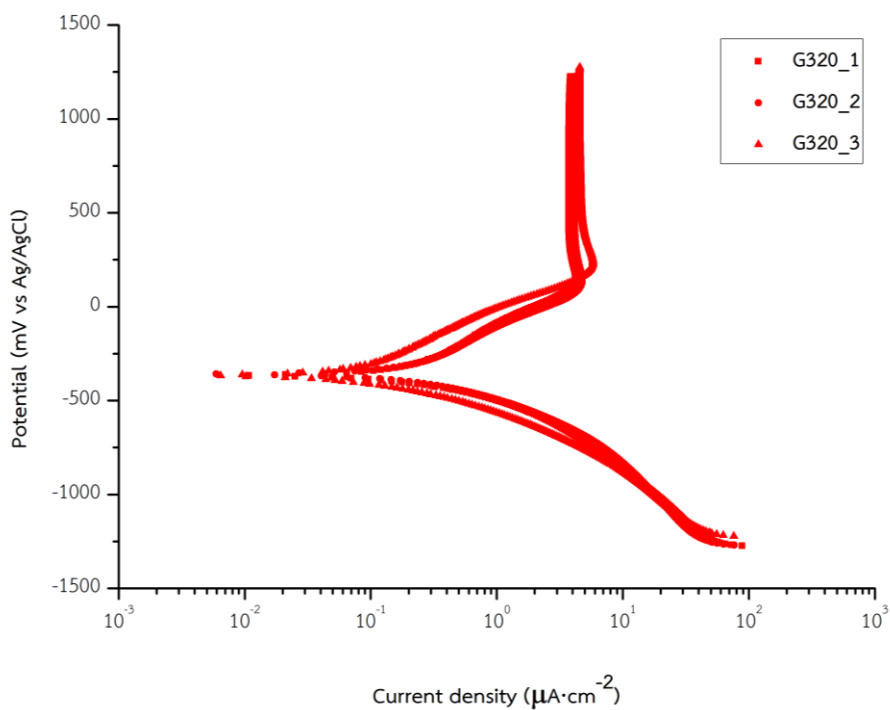
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu m/year$)
1	-380.27	1.418×10^{-1}	1.246
2	-341.69	1.279×10^{-1}	1.124
3	-353.13	1.446×10^{-1}	1.270
ค่าเฉลี่ย	-358.36	1.381×10^{-1}	1.213



รูปที่ 2ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน ARA

ตารางที่ 2ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน ARA

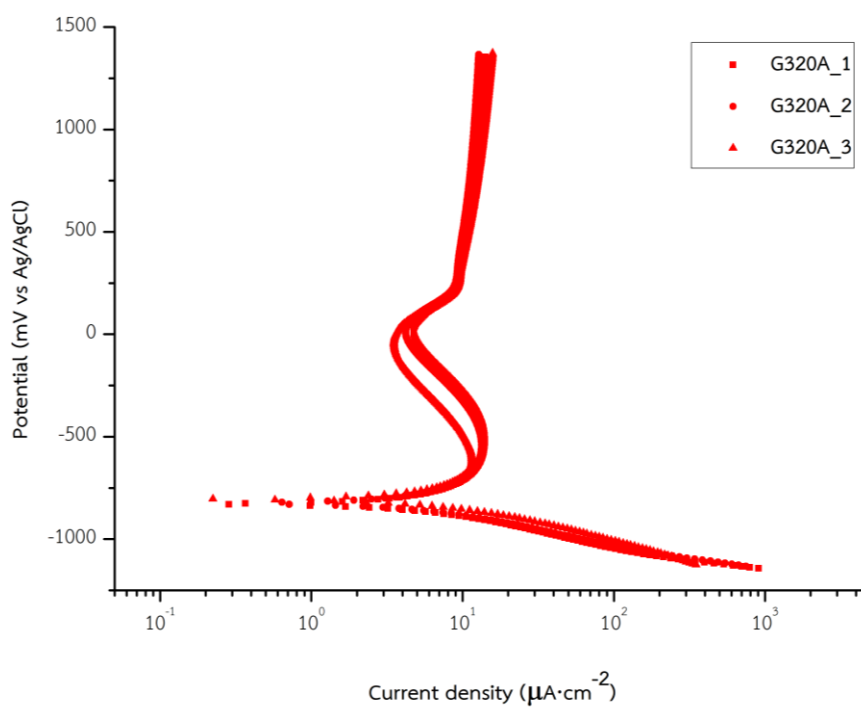
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	-859.16	5.981	52.549
2	-859.03	5.757	50.585
3	-846.71	6.363	55.907
ค่าเฉลี่ย	-854.96	6.034	53.013



รูปที่ 3ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน G320

ตารางที่ 3ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน G320

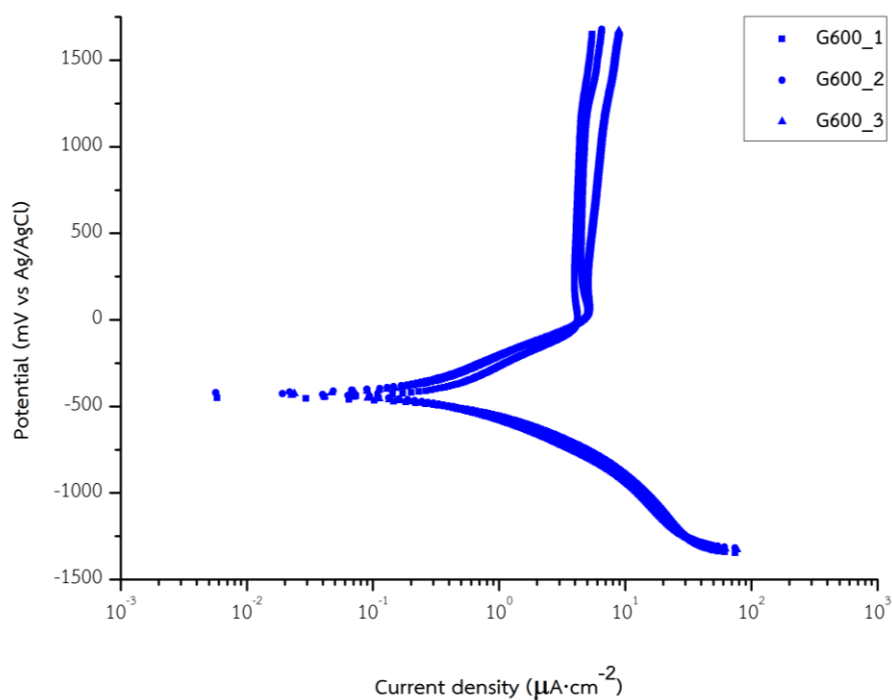
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	-361.23	1.497×10^{-1}	1.315
2	-365.21	1.552×10^{-1}	1.364
3	-359.40	1.584×10^{-1}	1.391
ค่าเฉลี่ย	-361.94	1.544×10^{-1}	1.357



รูปที่ 4ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน G320A

ตารางที่ 4ค แสดงค่า E_{corr} I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน G320A

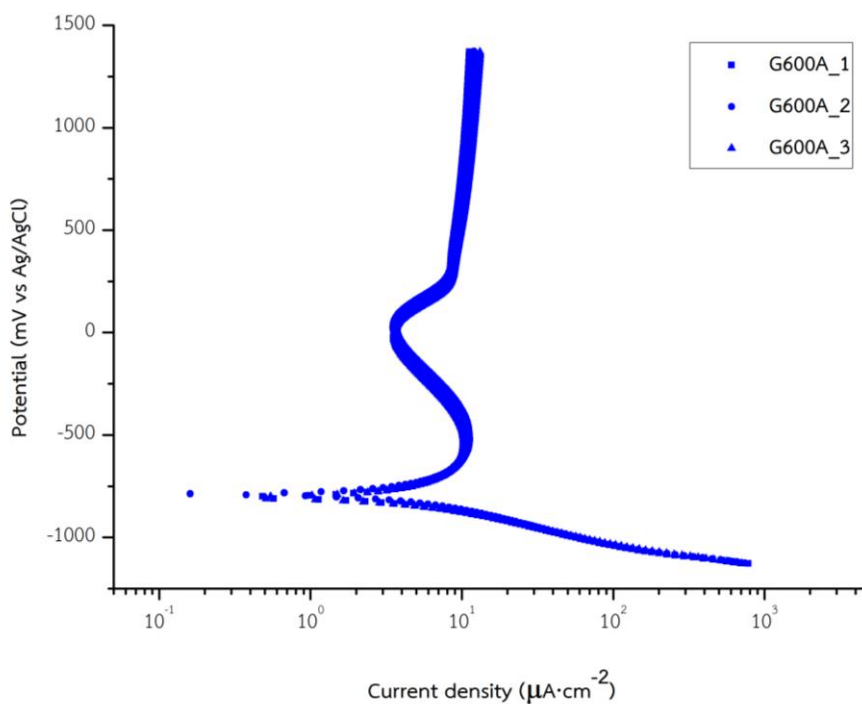
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน (nm/year)
1	-823.24	5.018	44.087
2	-819.95	4.938	43.391
3	-794.04	5.098	44.792
ค่าเฉลี่ย	-812.41	5.018	44.090



รูปที่ 5ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน G600

ตารางที่ 5ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน G600

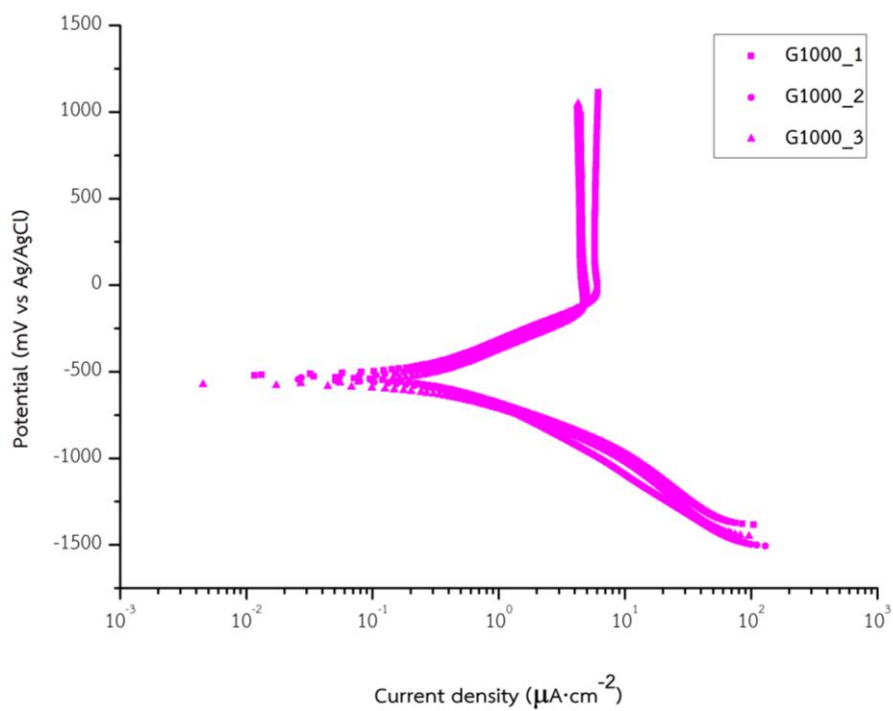
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu m/year$)
1	-453.53	1.839×10^{-1}	1.616
2	-418.46	1.859×10^{-1}	1.633
3	-432.96	1.841×10^{-1}	1.617
ค่าเฉลี่ย	-434.983	1.846×10^{-1}	1.622



รูปที่ 6ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน G600A

ตารางที่ 6ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน G600A

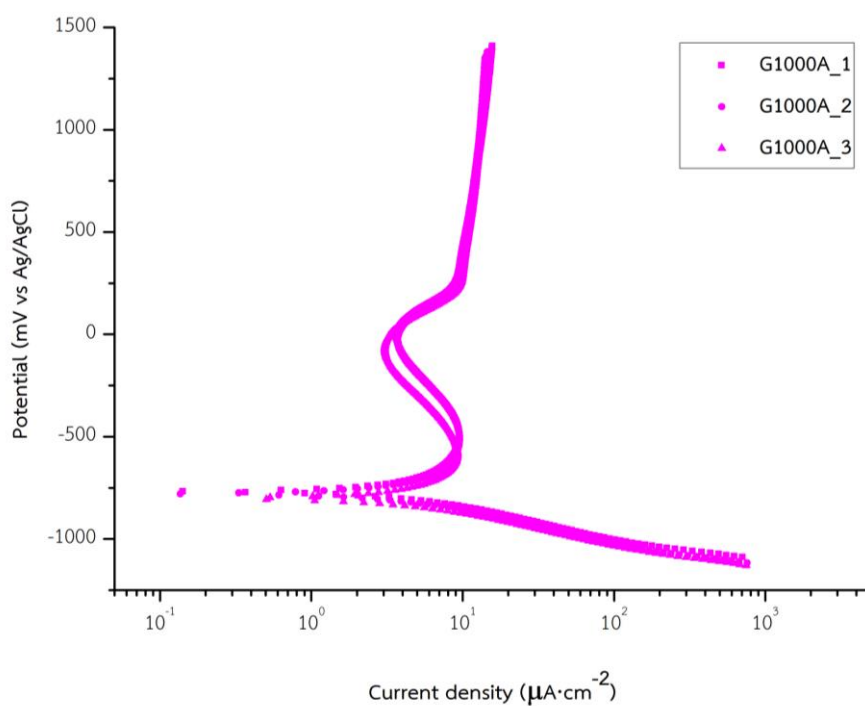
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน (nm/year)
1	-802.24	4.123	36.226
2	-782.44	4.021	35.334
3	-803.31	4.130	36.286
ค่าเฉลี่ย	-795.99	4.091	35.948



รูปที่ 7ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน G1000

ตารางที่ 7ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน G1000

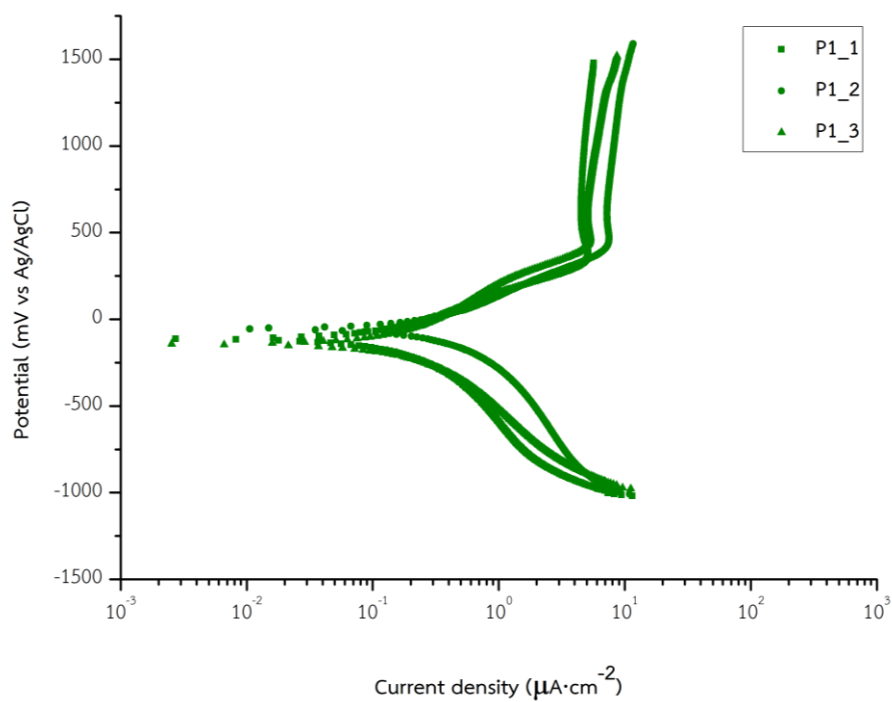
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	-504.88	2.291×10^{-1}	2.013
2	-526.04	2.416×10^{-1}	2.123
3	-562.44	2.412×10^{-1}	2.119
ค่าเฉลี่ย	-531.12	2.373×10^{-1}	2.085



รูปที่ 8ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน G1000A

ตารางที่ 8ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน G1000A

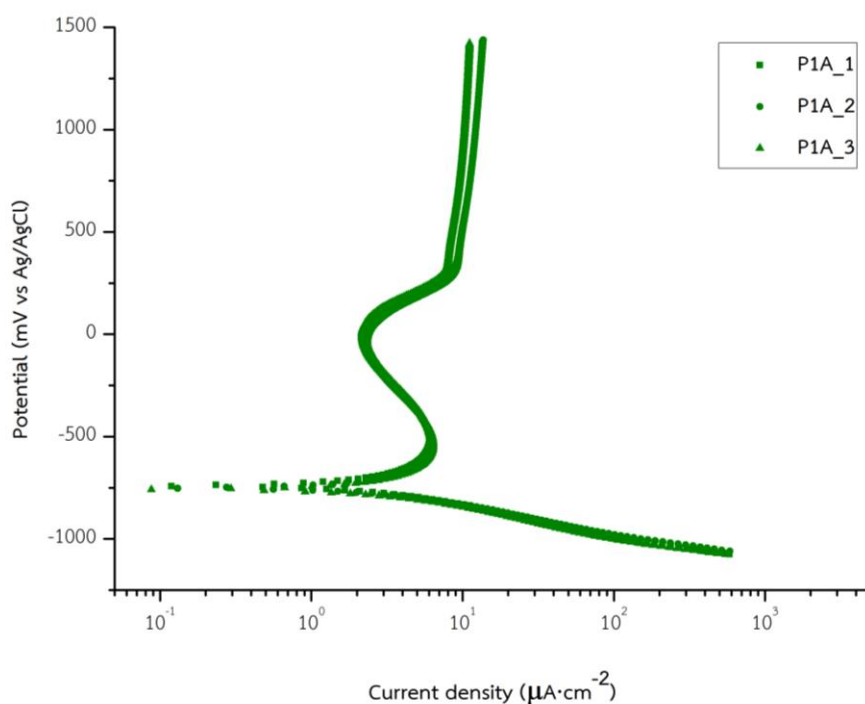
ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	-757.64	3.240	28.470
2	-767.1	3.268	28.711
3	-791.45	3.141	27.596
ค่าเฉลี่ย	-772.06	3.216	28.259



รูปที่ 9ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน P1

ตารางที่ 9ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน P1

ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	-112.63	9.012×10^{-2}	0.791
2	-60.35	9.417×10^{-2}	0.827
3	-140.20	9.299×10^{-2}	0.816
ค่าเฉลี่ย	-104.39	9.243×10^{-2}	0.812



รูปที่ 10ค แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน P1A

ตารางที่ 10ค แสดงค่า E_{corr} , I_{corr} และอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงาน P1A

ตัวอย่าง	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	อัตราการกัดกร่อน ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	-744.14	2.102	18.471
2	-744.85	2.036	17.893
3	-754.51	2.041	17.933
ค่าเฉลี่ย	-747.83	2.060	18.099

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปาณิสรา พุทธสุรธณ
วัน เดือน ปี เกิด	16 เมษายน 2539
สถานที่เกิด	ฉะเชิงเทรา
วุฒิการศึกษา	วศ.บ.วิศวกรรมวัสดุ
ที่อยู่ปัจจุบัน	65/7/6 หมู่ 7 ถนนเทพคุณากร ซอย 13/2 ตำบลโสธร อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY