



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TL184834

**PENGARUH VARIASI BEDA POTENSIAL DAN WAKTU
OKSIDASI TERHADAP STRUKTUR, MORFOLOGI DAN
KETAHANAN OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI DARI
PADUAN Ti-6Al-4V DENGAN METODE PLASMA
ELECTROLYTIC OXIDATION UNTUK APLIKASI FAN BLADE
MESIN PESAWAT**

**MAHESA ANGGARA SAKTI
NRP. 02511640000143**

**Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR – TL184834

PENGARUH VARIASI BEDA POTENSIAL DAN WAKTU OKSIDASI TERHADAP STRUKTUR, MORFOLOGI DAN KETAHANAN OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI DARI PADUAN Ti-6Al-4V DENGAN METODE PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION UNTUK APLIKASI FAN BLADE MESIN PESAWAT

MAHESA ANGGARA SAKTI
NRP. 02511640000143

Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL184834

**EFFECT OF VOLTAGE AND OXIDATION TIME VARIATIONS
TO STRUCTURE, MORPHOLOGY AND HIGH TEMPERATURE
OXIDATION RESISTANCE OF Ti-6Al-4V ALLOY WITH
PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION METHOD FOR THE
APPLICATION OF FAN BLADE IN AIRCRAFT MACHINE**

**MAHESA ANGGARA SAKTI
NRP. 02511640000143**

Supervisors

Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.

Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial and System Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**

(This page is intentionally left blank)

**PENGARUH VARIASI BEDA POTENSIAL DAN WAKTU
OKSIDASI TERHADAP STRUKTUR, MORFOLOGI DAN
KETAHANAN OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI DARI
PADUAN Ti-6Al-4V DENGAN METODE PLASMA
ELECTROLYTIC OXIDATION UNTUK APLIKASI FAN
BLADE MESIN PESAWAT**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MAHESA ANGGARA SAKTI
NRP 0251164000143

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng. (Pembimbing I)
2. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH VARIASI BEDA POTENSIAL DAN WAKTU
OKSIDASI TERHADAP STRUKTUR, MORFOLOGI DAN
KETAHANAN OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI DARI
PADUAN Ti-6Al-4V DENGAN METODE PLASMA
ELECTROLYTIC OXIDATION UNTUK APLIKASI FAN
BLADE MESIN PESAWAT**

Nama : Mahesa Anggara Sakti
NRP : 02511640000143
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Pembimbing II : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.

Abstrak

Ti-6Al-4V merupakan paduan titanium yang sangat penting bagi pesawat terutama pada bagian fan blade, namun karena keterbatasan dalam ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari paduan ini membuat pemanfaatan dari paduan ini terbatas, sehingga perlu dilakukan rekayasa permukaan Plasma Electrolytic Oxidation (PEO). Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi terhadap struktur, morfologi dan ketahanan oksidasi temperatur tinggi paduan Ti-6Al-4V yang dioksidasi dengan PEO. Dalam penelitian ini variasi beda potensial yang diterapkan adalah 150V, 200V, dan 250V sedangkan untuk variasi waktu oksidasi yang digunakan adalah 4 menit, 8 menit, dan 12 menit. Fasa yang terbentuk berdasarkan hasil XRD adalah TiO₂ (Rutile), TiO₂ (Anatase) dan SiO₂ amorphous dengan peningkatan fasa TiO₂ (Rutile) seiring peningkatan beda potensial dan waktu oksidasi. Pengujian SEM/EDX menunjukkan lapisan oksida terdiri dari unsur Ti, Si, O, Al, dan Na, sedangkan untuk morfologi lapisan oksida mengalami peningkatan diameter pori, porositas, dan ketebalan lapisan oksida seiring dengan meningkatnya beda potensial dan waktu oksidasi. Pengujian oksidasi temperatur tinggi pada 700°C selama 5 jam menunjukkan bahwa sampel

dengan variasi 150V-8 Menit memiliki ketahanan oksidasi temperatur tinggi terbaik yaitu 0,225 mg/cm².

Kata Kunci: *Fan blade; Plasma Electrolytic Oxidation; Beda Potensial; Ti-6Al-4V; Waktu Oksidasi.*

**EFFECT OF VOLTAGE AND OXIDATION TIME
VARIATIONS TO STRUCTURE, MORPHOLOGY AND
HIGH TEMPERATURE OXIDATION RESISTANCE OF
Ti-6Al-4V ALLOY WITH PLASMA ELECTROLYTIC
OXIDATION METHOD FOR THE APPLICATION OF
FAN BLADE IN AIRCRAFT MACHINE**

Student Name : Mahesa Anggara Sakti
NRP : 0251164000143
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Supervisor : Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng.
Co-Supervisor : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.

Abstract

Ti-6Al-4V is a titanium alloy that is very important for fan blade in aircraft machine, but due to its limitations in high temperature oxidation makes the application of this alloy limited, so it is necessary to do the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO). The purpose of this study was to analyze the voltage and oxidation time effect to structure, morphology and high temperature oxidation resistance of Ti-6Al-4V alloys that were oxidized with PEO. In this study the voltage variations used were 150V, 200V, and 250V while the oxidation time variations used were 4 minutes, 8 minutes and 12 minutes. Phases formed based on XRD results are TiO₂ (Rutile), TiO₂ (Anatase), and amorphous SiO₂ with an increasing in TiO₂ (Rutile) phase as voltage and oxidation time increase. SEM / EDX testing shows the oxide layer consists of Ti, Si, O, Al, and Na elements, while the morphology of the oxide layer like pores diameter, porosity, and thickness of the oxide layer increasing as voltage and oxidation time increase. Testing of high oxidation temperature at 700°C for 5 hours showed samples with variations of 150V-8 minutes had the best high temperature oxidation resistance of 0,225 mg /cm².

Keywords: *Fan blade; Plasma Electrolytic Oxidation; Voltage; Ti-6Al-4V; Oxidation Time.*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul **“Pengaruh Variasi Beda Potensial dan Waktu Oksidasi terhadap Struktur, Morfologi dan Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi dari Paduan Ti-6Al-4V dengan Metode *Plasma Electrolytic Oxidation* untuk Aplikasi *Fan Blade* Mesin Pesawat”**.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu, antara lain:

1. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI – ITS.
2. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI – ITS.
3. Dr. Agung Purniawan S.T, M.Eng. selaku dosen pembimbing 1 yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu pengetahuan.
4. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing 2 yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu pengetahuan.

Surabaya, 16 Januari 2020
Penulis,

Mahesa Anggara Sakti

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Fan Blade</i>	5
2.2 Ti-6Al-4V.....	7
2.3 Oksidasi Temperatur Tinggi.....	9
2.4 Teknologi Pelapisan.....	10
2.4.1 Teknologi Pelapisan Pada <i>Fan blade</i>	11
2.4.2 <i>Anodizing</i>	11
2.4.3 <i>Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)</i>	12
2.4.4 Perbandingan <i>Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)</i> dengan <i>Hard Anodizing</i>	15
2.5 Titanium Dioksida (TiO ₂).....	16
2.6 Penelitian Sebelumnya.....	18
2.6.1 Elektrolit yang Digunakan untuk <i>Plasma Electrolytic Oxidation</i> Pada Ti-6Al-4V.....	18
2.6.2 Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi Ti-6Al-4V dengan Pelapisan <i>Plasma Electrolytic Oxidation</i>	21

2.6.3	Pengaruh Beda Potensial dan Waktu Oksidasi PEO Terhadap Karakteristik Lapisan Oksida yang Terbentuk.....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir	31
3.2	Metode Penelitian	32
3.3	Proses Preparasi Dan Pelapisan	32
3.3.1	Preparasi Sampel Dan Larutan Elektrolit	32
3.3.2	Proses Pelapisan Menggunakan Metode PEO	33
3.4	Proses Pengujian	34
3.4.1	Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	34
3.4.2	Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) - <i>Energy Dispersive X-Ray</i> (EDX)	35
3.4.3	Pengujian Oksidasi Temperatur Tinggi.....	36
3.5	Rancangan Penelitian.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Fasa Menggunakan XRD.....	39
4.2	Analisis Komposisi Lapisan Oksida Hasil PEO	41
4.3	Morfologi Permukaan	44
4.3.1	Perbandingan Sampel Sebelum dan Sesudah PEO	44
4.3.2	Morfologi Lapisan Oksida Hasil PEO.....	45
4.4	Ketebalan Lapisan Oksida Hasil PEO	50
4.5	Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN		63
UCAPAN TERIMA KASIH.....		95
BIODATA PENULIS		97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen dari mesin turboprop pesawat	5
Gambar 2.2	Grafik σ_e/ρ terhadap $K1c/\rho$ berbagai material.....	6
Gambar 2.3	Diagram fasa paduan Ti-6Al-4V	8
Gambar 2.4	Ketahanan oksidasi temperatur tinggi paduan Ti-6Al-4V dengan pelapisan <i>hot dip galvanizing</i>	10
Gambar 2.5	Tahap pembentukan lapisan oksida PEO a) <i>passivation</i> , b) lapisan oksida dan gelembung oksigen terbentuk, c) <i>micro arc discharge</i> , d) <i>powerful arc discharge</i> , e) pembentukan lapisan oksida baru, f) bertambahnya <i>discharge channel</i> , g) potensial berfluktuatif, h) lapisan keramik oksida berpori.....	12
Gambar 2.6	Skema proses PEO.....	14
Gambar 2.7	Struktur <i>polymorph</i> TiO ₂ a) anatase, b) rutile, c) brookite	17
Gambar 2.8	Hasil pengujian XRD Ti-6Al-4V dengan pelapisan PEO	19
Gambar 2.9	Morfologi permukaan Ti-6Al-4V hasil PEO	19
Gambar 2.10	Fasa yang terbentuk pada Ti-6Al-4V hasil PEO selama 150	21
Gambar 2.11	Hasil pengujian SEM pada Ti-6Al-4V dengan PEO. a) morfologi permukaan, b) penampang melintang	21
Gambar 2.12	Hasil pengujian oksidasi temperatur tinggi Ti-6Al-4V berbagai temperatur dalam 1 jam.....	22
Gambar 2.13	Pertambahan massa Ti-6Al-4V dengan pelapisan PEO di berbagai temperatur oksidasi.....	23

Gambar 2.14	Pengaruh beda potensial PEO terhadap ukuran pori-pori lapisan oksida Ti-6Al-4V	24
Gambar 2.15	Pengaruh beda potensial PEO terhadap ketebalan lapisan oksida Ti-6Al-4V dengan a) 400 V, b) 425 V, c) 450 V, d) 475 V.....	25
Gambar 2.16	Pengaruh waktu oksidasi PEO terhadap ketebalan lapisan oksida.....	26
Gambar 2.17	Morfologi Ti-6Al-4V hasil pelapisan PEO dengan perbedaan waktu oksidasi: a) 15 menit, b) 30 menit, c) 60 menit, dan d) 120 menit.....	27
Gambar 2.18	Penampang melintang dari Ti-6Al-4V dengan waktu PEO berbeda. a) 30 menit, b) 120 menit.....	27
Gambar 2.19	Pengujian XRD terhadap Ti-6Al-4V hasil PEO dengan berbagai waktu oksidasi	28
Gambar 2.20	Hasil SEM morfologi permukaan AZ31B hasil PEO dengan variasi beda potensial dan waktu oksidasi a) 400 V,5 menit, b) 400 V,10 menit, c) 400 V,15 menit,d) 450 V,5 menit, e) 450 V,10 menit, f) 450 V,15 menit, g) 500 V,5 menit, h) 500 V,10 menit, i) 500 V,15 menit perbesaran 2000x	30
Gambar 3.1	Diagram alir	31
Gambar 3.2	Peralatan <i>Plasma Electrolytic Oxidation</i> (PEO).....	33
Gambar 3.3	Alat <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	34
Gambar 3.4	Alat <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	35
Gambar 3.5	Alat pengujian oksidasi temperatur tinggi. A) Timbangan analitis digital, B) <i>furnace</i>	36
Gambar 4.1	Pengaruh beda potensial terhadap fasa lapisan oksida hasil PEO	39
Gambar 4.2	Pengaruh waktu oksidasi terhadap fasa lapisan oksida hasil PEO	40

Gambar 4.3	Komposisi Sampel Ti-6Al-4V. A) Tanpa PEO, B) PEO 200V-8 Menit.....	42
Gambar 4.4	EDX <i>element mapping</i> sampel PEO 200V-8 menit dengan perbesaran 1000X.....	43
Gambar 4.5	Pengamatan visual sampel, A) Sebelum PEO, B) setelah PEO.....	44
Gambar 4.6	Morfologi permukaan sampel, A) Tanpa PEO, B) PEO.....	45
Gambar 4.7	Morfologi permukaan lapisan oksida hasil PEO menggunakan SEM dengan pembesaran 1000X, A)150V-8 Menit, B)200V-4 Menit, C)200V-8 Menit, D)200V-12 Menit, E)250V-8 Menit.	46
Gambar 4.8	Pengaruh beda potensial terhadap ukuran pori-pori lapisan oksida hasil PEO.....	47
Gambar 4.9	Pengaruh beda potensial terhadap porositas lapisan oksida hasil PEO.....	48
Gambar 4.10	Pengaruh waktu oksidasi terhadap ukuran pori-pori lapisan oksida hasil PEO.....	49
Gambar 4.11	Pengaruh waktu oksidasi terhadap porositas lapisan oksida.....	49
Gambar 4.12	Ketebalan lapisan oksida hasil PEO perbesaran 500X. A)150V-8 Menit, B)200V-4 Menit, C) 200V-8 Menit, D)200V-12 Menit, E)250V-8 Menit.	50
Gambar 4.13	Pengaruh beda potensial terhadap ketebalan lapisan oksida PEO.....	51
Gambar 4.14	Pengaruh waktu oksidasi terhadap ketebalan lapisan oksida PEO.....	52
Gambar 4.15	Pengaruh beda potensial terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi (700°C) dari Ti-6Al-4V hasil PEO.....	53
Gambar 4.16	Pengaruh waktu oksidasi terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi (700°C) dari Ti-6Al-4V hasil PEO.....	54

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat fisik paduan Ti-6Al-4V	8
Tabel 2.2	Komposisi kimia paduan Ti-6Al-4V	8
Tabel 2.3	Perbandingan <i>hard anodizing</i> dan PEO.....	15
Tabel 2.4	Perbandingan brookite, anatase, dan rutile	17
Tabel 2.5	Ketebalan lapisan oksida hasil PEO	29
Tabel 3.1	Rancangan pengujian sampel.....	37
Tabel 4.1	Fraksi massa TiO ₂ pada lapisan oksida hasil PEO.....	40

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Titanium dan paduannya merupakan unsur logam yang banyak digunakan di berbagai bidang, mulai dari sipil, pesawat, militer hingga medis. Sifat titanium yang superior seperti rasio kekuatan terhadap berat, kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan korosi yang tinggi, serta biokompatibilitas yang baik membuat pengembangan titanium terus menjadi pusat perhatian berbagai pihak. Ti-6Al-4V merupakan paduan titanium pertama yang diciptakan pada tahun 1950 dan hingga kini menjadi paduan titanium yang paling banyak diproduksi hingga mencapai angka 50% dari total produksi paduan titanium dunia (Lin dkk, 2018).

Ti-6Al-4V banyak digunakan pada *fan blade* mesin pesawat karena memiliki kekuatan di temperatur tinggi, kekuatan *fatigue*, karakteristik *creep*, dan *workability* yang baik serta kemudahan untuk diberi perlakuan panas membuat paduan ini cocok untuk diaplikasikan sebagai *fan blade* (Inagaki dkk, 2014). Namun paduan ini termasuk kedalam material yang tidak stabil ketika dipanaskan karena ketahanan oksidasi temperatur tingginya yang buruk. Penggunaan paduan ini sebagai struktur dalam lingkungan udara atau atmosfer oksidatif dapat mencapai 426,7°C hingga 537,8°C (Yao dkk, 2007), sedangkan dalam penggunaannya *fan blade* mesin pesawat temperatur operasi dapat mencapai $\pm 700^\circ\text{C}$ (Mansor dkk, 2019).

Keterbatasan dari paduan Ti-6Al-4V ini membuat banyak peneliti melakukan pelapisan pada permukaan paduan untuk meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi salah satunya dengan metode PEO. *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) merupakan salah satu teknologi baru dalam teknologi pelapisan yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi dari beberapa logam ringan dan paduannya salah satunya adalah titanium. Prinsip dasar dari PEO adalah melakukan *anodizing* substrat dalam sebuah larutan dengan pemberian plasma yang

membutuhkan potensial tinggi. Adanya plasma memproduksi panas dan tekanan tinggi sehingga menciptakan oksida yang keras dan melekat kuat pada permukaan substrat. Lapisan oksida yang terbentuk umumnya tercipta dari unsur logam substrat, namun pada situasi tertentu dapat mengandung senyawa kompleks dari unsur-unsur yang terkandung dalam elektrolit (Khorasani dkk, 2011). Beberapa hal yang mempengaruhi kualitas pelapisan PEO adalah beda potensial dan waktu oksidasi yang dapat menentukan sifat akhir dari lapisan oksida yang terbentuk baik morfologi, komposisi, kekerasan, maupun ketahanan korosinya.

Adapun penelitian ini akan membahas lebih lanjut tentang pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi dalam pelapisan *Plasma Electrolytic Oxidation* terhadap morfologi dan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari paduan Ti-6Al-4V yang digunakan untuk *fan blade* mesin pesawat.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi PEO terhadap struktur lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Ti-6Al-4V?
2. Bagaimana pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi PEO terhadap morfologi lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Ti-6Al-4V?
3. Bagaimana pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi PEO terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi pada paduan Ti-6Al-4V?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Komposisi dari material sampel dianggap homogen dan bebas cacat.

2. Temperatur elektrolit dianggap konstan.
3. Beda potensial yang diaplikasikan dianggap konstan.
4. Temperatur oksidasi pada saat pengujian dianggap konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi PEO terhadap struktur lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Ti-6Al-4V?
2. Menganalisis pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi PEO terhadap morfologi lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Ti-6Al-4V?
3. Menganalisis pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi PEO terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi pada paduan Ti-6Al-4V?

1.5 Manfaat Penelitian

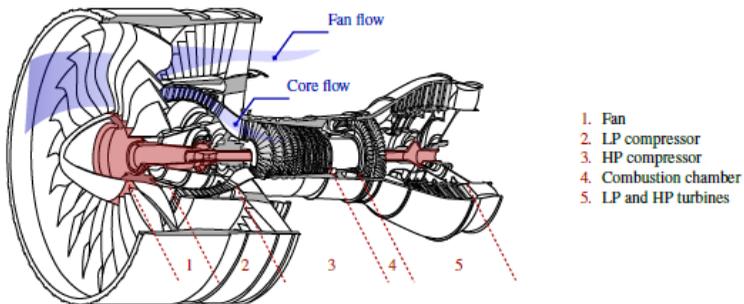
Manfaat dari penelitian adalah sebagai referensi untuk metode pelapisan oksida menggunakan *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) pada paduan Ti-6Al-4V dengan variasi beda potensial dan waktu oksidasi untuk meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tingginya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Fan Blade*

Fan blade merupakan bagian terdepan dan menjadi salah satu bagian penting pada mesin *turbofan* pesawat, fungsi utama dari *fan blade* adalah menghisap dan memberikan kecepatan lebih dari udara luar yang masuk ke dalam mesin *turbofan*, udara yang masuk ini nantinya akan dibagi menjadi 2 jalur yaitu jalur utama (*core flow*) untuk pembakaran dan jalur *bypasses* (*fan flow*) untuk mendinginkan dan meningkatkan gaya dorong dari mesin (Raj, 2017). Beberapa komponen dari mesin *turbofan* pesawat dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Komponen dari mesin turbofan pesawat
(Salvat, 2015)

Fan blade biasanya akan mengalami beban siklik yang besar yang berujung pada tegangan siklik di permukaannya. Kemungkinan untuk terkena korosi juga tinggi akibat dari kondisi temperatur, tekanan, dan komposisi dari udara yang masuk. Parameter kondisi operasi dari *fan blade* adalah sebagai berikut:

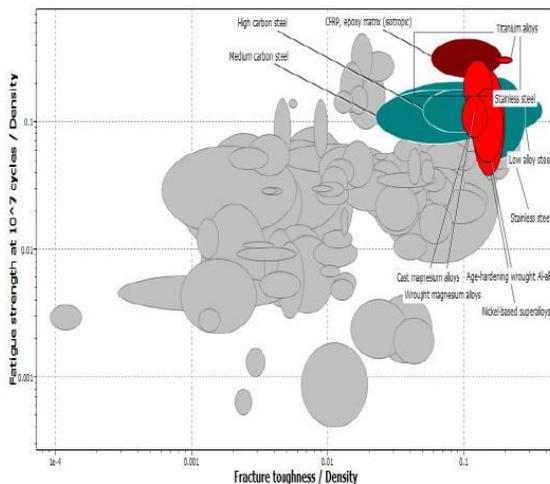
1. Temperatur dari gas yang masuk.
2. Tekanan, kecepatan dan komposisi dari aliran gas.
3. Tegangan yang diakibatkan oleh gaya sentrifugal dan dinamik.

4. Temperatur lingkungan yang tidak stabil.

Dari parameter diatas maka penentuan dari material *fan blade* harus memiliki ketahanan *fatigue*, kaku dan ringan. Maka material yang digunakan harus memenuhi sifat-sifat mekanik sebagai berikut:

1. *Endurance limit* (σ_e) yang tinggi.
2. *Fracture toughness* (K_{Ic}) yang tinggi.
3. Modulus Young yang tinggi.
4. Massa jenis yang rendah (ρ) (Raj, 2017).

Fan blade beroperasi dengan rata-rata temperatur cukup tinggi yaitu bisa mencapai $\pm 700^\circ\text{C}$, pada temperatur itu material *fan blade* harus bisa menjaga sifat mekaniknya untuk mengantisipasi kecelakaan yang tidak terduga seperti menabrak burung (Mansor dkk, 2019). Pada Gambar 2.2 menunjukkan perbandingan σ_e/ρ terhadap K_{Ic}/ρ berbagai material, dari semua material dipilihlah paduan titanium khususnya paduan Ti-6Al-4V karena memenuhi sifat-sifat yang dibutuhkan untuk sebuah *fan blade* (Raj, 2017).



Gambar 2.2 Grafik σ_e/ρ terhadap K_{Ic}/ρ berbagai material (Raj, 2017)

Fan blade juga harus memiliki standar kekerasan minimal sebesar 327-339 VHN sehingga bisa bertahan dari kerusakan akibat erosi oleh angin maupun partikel-partikel yang ada di udara sehingga dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan pesawat (ATSB, 2001).

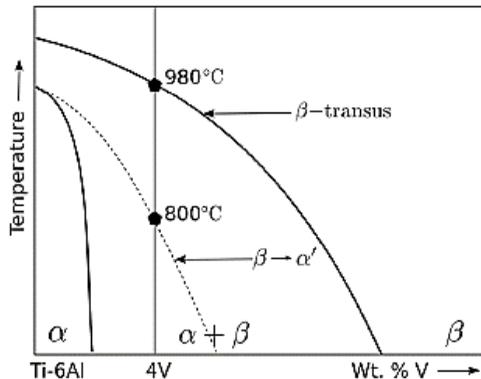
2.2 Ti-6Al-4V

Ti-6Al-4V merupakan paduan titanium yang pertama kali diciptakan pada tahun 1950 dan hingga kini masih sering digunakan di berbagai bidang seperti infrastruktur sipil, militer, pesawat, bahkan medis. Paduan ini mendominasi produksi paduan titanium dunia sampai dengan 50%. Hal ini di dukung oleh karakteristik dari paduan ini seperti rasio kekuatan terhadap berat, kekuatan, dan ketangguhan yang tinggi, serta ketahanan korosi dan biokompatibilitas yang baik (Lin dkk, 2018).

Paduan ini merupakan paduan yang terdiri dari 2 fasa yaitu α dan β dengan unsur paduan utama aluminium dan vanadium, fungsi dari aluminium adalah menstabilkan dan menguatkan fasa α dan mengurangi densitas dari paduan, sedangkan vanadium berfungsi untuk menstabilkan fasa β dan memungkinkan penguatan fasa β (Neminathan dkk, 2008). Pada paduan ini juga terdapat fasa metastabil yaitu α' yang merupakan fasa yang terbentuk dari pengintian dan pertumbuhan butir yang cepat dan memiliki kekerasan yang lebih tinggi dari fasa α akibat lebih banyaknya dislokasi butir (Babu, 2015). Diagram fasa dari paduan Ti-6Al-4V dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Paduan ini termasuk kedalam material yang tidak stabil saat dipanaskan akibat ketahanan oksidasi temperatur tingginya yang buruk, ketika digunakan sebagai struktur dalam lingkungan udara atau atmosfer oksidatif dengan temperatur penggunaan dapat mencapai 426,7°C hingga 537,8°C (Yao dkk, 2007). Jika dikorelasikan dengan diagram Ellingham didapati bahwa nilai $\Delta G^\circ = -760$ sampai -789 KJ/mol dengan tekanan oksigen parsial sebesar 1×10^{-44} sampai 5×10^{-42} atm untuk mengubah Ti menjadi TiO_2 .

Sifat fisik dari paduan ini dapat dilihat pada Tabel 2.1 sedangkan untuk komposisi kimianya ditunjukkan pada Tabel 2.2. Dari nilai kekerasan Ti-6Al-4V sebenarnya sudah memenuhi standar kekerasan minimum dari *fan blade* sendiri.



Gambar 2.3 Diagram fasa paduan Ti-6Al-4V (Babu, 2015)

Tabel 2.1 Sifat fisik paduan Ti-6Al-4V (Raj, 2017)

Sifat Fisik	Nilai
Minimum yield strength (MPa)	828
Minimum tensile strength (MPa)	895
Minimum elongation (%)	10
Fatigue strength pada 10^7 siklus (MPa)	854
Kekerasan (HV)	342
Poisson's ratio	0,35-0,37
Titik lebur ($^{\circ}\text{C}$)	1250
Densitas (Kg/m^3)	4420

Tabel 2.2 Komposisi kimia paduan Ti-6Al-4V (ASTM B265, 2009)

Unsur	N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
%wt	0,05	0,08	0,015	0,4	0,2	5,5- 6,75	3,5- 4,5	Balance

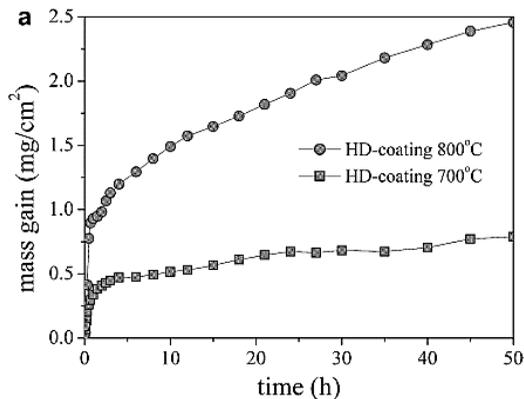
2.3 Oksidasi Temperatur Tinggi

Setiap logam yang terpapar dengan gas panas bertemperatur diatas 400°C di mana pada temperatur ini tidak ada fasa cair dari air tetapi dapat mengalami korosi yang disebut oksidasi panas/ temperatur tinggi. Ketika korosi basah yang masih terdapat fasa cair menggunakan proses elektrokimia, oksidasi temperatur tinggi menggunakan reaksi kimia yang diatur oleh kinetika reaksi kimia pada perbatasan logam dan fasa gas. Namun lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan logam dipengaruhi oleh difusi ion dan konduktivitas elektronik dalam oksida, seperti mekanisme elektrokimia pada umumnya. Korosi temperatur tinggi terbagi menjadi beberapa jenis seperti *carburization*, *chlorination*, *nitridation*, *sulfurization*, dan oksidasi.

Pesawat *hypersonic* pada umumnya terpapar dengan lingkungan oksidatif dan di temperatur tinggi yang akan menyebabkan permasalahan struktural dan mekanika akibat oksidasi dan degradasi dalam waktu yang lama. Reaksi oksidasi merupakan faktor yang sangat penting dalam kinerja di temperatur tinggi, lapisan oksida yang padat dan melekat kuat pada substrat sudah dikenal luas sebagai lapisan pelindung logam dari oksidasi lebih lanjut. Walaupun begitu ada ketidak seimbangan koefisien ekspansi termal yang sangat besar antara logam dan lapisan oksida yang menciptakan tegangan yang besar pada lapisan oksida dan perbatasan permukaan logam. Tegangan yang besar ini dapat menyebabkan retak pada lapisan oksida yang menyebabkan oksigen bisa berdifusi ke logam. Hal ini menyebabkan oksidasi logam sehingga sifat logam akan terdegradasi. Secara umum oksidasi logam pada temperatur tinggi terdiri dari 3 tahap yaitu:

1. Atom oksigen terserap ke permukaan logam, reaksi antara logam dan oksigen menciptakan lapisan oksida.
2. Oksigen berdifusi melewati lapisan oksida ke permukaan logam.
3. Logam akan teroksidasi lebih lanjut dan lapisan oksida akan terus meningkat dengan bertahap (Yépez, 2018).

Pada Gambar 2.4 merupakan hasil pengujian oksidasi dari paduan Ti-6Al-4V dengan pelapisan *hot dip galvanizing* yang merupakan salah satu metode pelapisan pada *fan blade* pesawat menghasilkan lapisan pelindung $TiAl_3$ memiliki ketahanan yang cukup baik dimana pertambahan oksidasi ketika 5 jam oksidasi di $700^\circ C$ memiliki pertambahan massa perluas sebesar $0,5 \text{ mg/cm}^2$ sedangkan untuk temperatur $800^\circ C$ memiliki pertambahan massa perluas yang lebih tinggi yaitu $1,24 \text{ mg/cm}^2$ (Zhang, 2011).



Gambar 2.4 Ketahanan oksidasi temperatur tinggi paduan Ti-6Al-4V dengan pelapisan *hot dip galvanizing* (Zhang, 2011)

2.4 Teknologi Pelapisan

Teknologi pelapisan atau *coating* merupakan suatu proses di mana suatu substansi diaplikasikan kepada permukaan material induk (substrat) yang akan menyebabkan perubahan sifat dari permukaan substrat, seperti warna, *wear resistance*, ketahanan serangan kimia, dan permeabilitas tanpa mengubah sifat dari substrat secara keseluruhan. Pembuatan lapisan dari setiap metode pelapisan harus didasari kepada 2 faktor, yaitu: kohesi antara zat pembentuk film dan adhesi antara film dan substrat (NPCS, 2019).

2.4.1 Teknologi Pelapisan Pada *Fan blade*

Fan blade harus memiliki perlindungan terus-menerus terhadap kerusakan yang diakibatkan oleh oksidasi di temperatur tinggi dan erosi. Oleh karena itu pelapisan pada *fan blade* ini harus memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Lapisan harus bisa bertahan dari korosi temperatur tinggi, oksidasi, dan erosi ketika dialiri oleh gas yang memiliki parameter yang sama dengan yang ada di bagian turbin.
2. Lapisan harus bertahan dengan baik terhadap tegangan statis maupun siklik yang diberikan terhadap permukaan *blade*: lapisan harus memiliki kombinasi yang baik antara kekuatan dan elastisitas.
3. Lapisan harus memiliki stabilitas yang baik dan tidak rusak akibat interaksi dengan substrat.
4. Lapisan harus tidak mengurangi sifat mekanik dari material *blade* (Raj, 2017).

Pada pengaplikasian lapisan pelindung atau *coating* pada *fan blade* memiliki standar ketebalan tertentu agar tidak memberikan efek yang buruk seperti ketahanan *fatigue* yang menurun atau ketidak seimbangan kerja mesin. Ketebalan dari *coating* pada *fan blade* harus berkisar 12,7 μ m - 3175 μ m (U.S Patent, 2017).

2.4.2 Anodizing

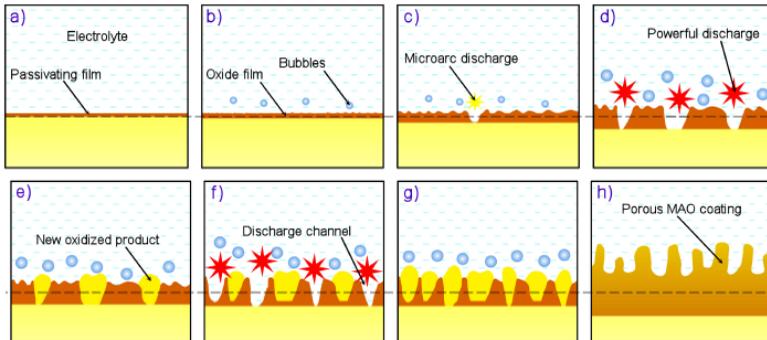
Secara umum *anodizing* diartikan sebagai pelapisan konversi dari substrat aluminium dan paduannya menjadi *porous* aluminium oksida. Sesuai namanya aluminium yang akan dilapisi akan dijadikan sebagai anoda dalam sel elektrolisis, berbeda dengan *electroplating* yang menggunakan substrat yang akan dilapisi sebagai katoda. *Anodizing* biasanya berkaitan dengan substrat aluminium tetapi proses *anodizing* ini juga bisa digunakan pada material lain seperti magnesium, titanium, dan zink. Alasan penggunaan metode ini sebagai pelapis substrat adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan ketahanan korosi.
 2. Memberikan dekorasi pada penampilan permukaan substrat.
-

3. Meningkatkan ketahanan abrasi.
4. Meningkatkan adhesi dari cat. (Stevenson, 1994)

2.4.3 Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)

Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) merupakan salah satu tipe *anodizing* dengan menggunakan potensial yang tinggi, biasa digunakan kepada logam-logam ringan seperti Al, Mg dan Ti. Prosesnya sama dengan *anodizing* pada umumnya yaitu substrat direndam ke dalam larutan elektrolit dan dipolarisasi secara anodik. Perlakuan PEO biasanya dilakukan pada kondisi arus atau potensial yang konstan dengan menggunakan *power supply* AC maupun DC. Substrat dan elektrolit perlu dipilih dengan sebaik mungkin untuk membuat lapisan anodik resistif terbentuk dengan baik di permukaan substrat, potensial yang digunakan juga harus cukup tinggi untuk membuat *dielectric breakdown* dari lapisan oksida disertai dengan *micro arc discharges* (Mohedano dkk, 2018).



Gambar 2.5 Tahap pembentukan lapisan oksida PEO a) *passivation*, b) lapisan oksida dan gelembung oksigen terbentuk, c) *micro arc discharge*, d) *powerful arc discharge*, e) pembentukan lapisan oksida baru, f) bertambahnya *discharge channel*, g) potensial berfluktuatif, h) lapisan keramik oksida berpori (He dkk, 2017)

Pada Gambar 2.5 menunjukkan beberapa tahapan pembentukan lapisan oksida dalam proses PEO, yaitu:

1. *Passivation*

Ketika spesimen di masukan ke dalam elektrolit maka akan terjadi kenaikan beda potensial yang sangat cepat dan menciptakan lapisan pelindung anodik di permukaan spesimen.

2. Pembentukan gelembung oksigen dan lapisan oksida berpori

Beda potensial yang diterima spesimen terus meningkat sehingga menciptakan gelembung-gelembung oksigen di sekitar spesimen dan pembentukan lapisan oksida isolator berpori di permukaan spesimen.

3. *Micro arc discharge*

Ketika beda potensial yang diberikan melebihi kemampuan dari lapisan oksida isolator maka akan terjadi *dielectric breakdown* yang menyebabkan terbentuknya *micro arc discharge*.

4. *Powerful arc discharge*

Arah arus yang terjadi hanya terpusat ke lapisan oksida yang mengalami *dielectric breakdown* dan unsur-unsur dari elektrolit serta dari spesimen itu sendiri berdifusi ke daerah yang mengalami *dielectric breakdown* diiringi dengan kenaikan temperatur lokal yang tinggi sehingga menyebabkan pembentukan dan penebalan lapisan oksida berpori. Percikan listrik yang terbentuk juga semakin banyak dan besar.

5. Pembentukan lapisan oksida baru

Ketika lapisan oksida baru yang terbentuk mampu menahan arus yang diberikan maka *electric breakdown* akan berpindah ke lapisan oksida lain yang memiliki hambatan listrik lebih kecil sehingga terjadilah *electric breakdown* baru di permukaan sampel. Sedangkan lapisan oksida baru yang sudah mampu menahan arus akan terus tumbuh dan menebal akibat temperatur lokal yang tinggi.

6. Bertambahnya *discharge channel* baru

Semakin bertambahnya waktu ekspose maka akan menambah titik terjadinya *dielectric breakdown* yang disertai

dengan pembentukan gas di permukaan sehingga membentuk struktur lapisan yang berpori.

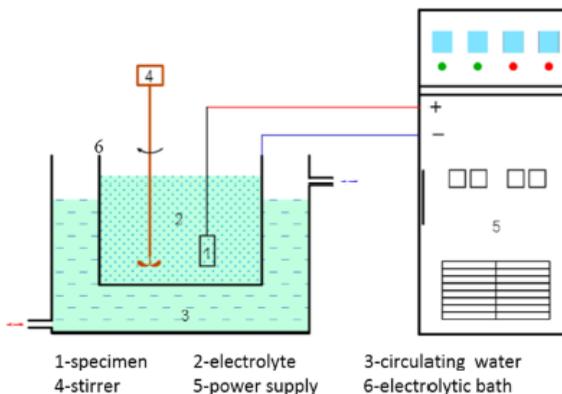
7. Potensial mengalami fluktuatif

Proses pembentukan dan *dielectric breakdown* menyebabkan potensial yang diterima sampel berfluktuatif.

8. Terbentuknya lapisan keramik oksida berpori

Peleburan dari material sampel dan juga pembentukan gas yang terjadi memungkinkan untuk terbentuknya struktur keramik oksida berpori (He dkk, 2017).

Penggunaan PEO pada titanium dan paduannya menciptakan 2 tipe oksida yang biasa ditemukan pada perlakuan dengan temperatur tinggi yaitu anatase dan rutile. Peningkatan *wear resistance* terjadi karena terbentuknya oksida ini terutama rutile yang merupakan oksida yang terbentuk akibat pemanasan yang sangat cepat oleh plasma dan pendinginan cepat oleh elektrolit dingin. Anatase memiliki ketahanan korosi, *wear resistance* dan kekerasan yang lebih rendah dibanding rutile karena rutile memiliki kestabilan yang lebih baik dan morfologi yang lebih padat. Kedua oksida ini memiliki kekuatan rekat yang tinggi terhadap substrat (Fuentes dkk, 2019). Skema dari proses PEO dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema proses PEO (He dkk, 2017)

2.4.4 Perbandingan *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) dengan *Hard Anodizing*

Pada Tabel 2.3 memperlihatkan perbandingan antara pelapisan dengan metode PEO dan *Hard Anodizing*. Dari tabel tersebut bisa disimpulkan PEO merupakan kombinasi dari *anodizing* (*electrolytic oxidation*) dan proses pelepasan plasma, di mana persamaan utama dari PEO dan *anodizing* yaitu kedua proses membuat substrat teroksidasi menggunakan elektrolit dan tahap pertama dalam PEO adalah proses anodisasi (Hussein dan Northwood, 2014).

Tabel 2.3 Perbandingan *hard anodizing* dan PEO (Hussein dan Northwood, 2014)

Proses	PEO	<i>Hard Anodizing</i>
Beda potensial dan densitas arus	Tinggi	Rendah
Kecepatan deposisi	Cepat (1~2 $\mu\text{m}/\text{min}$)	Lambat (~0,3 $\mu\text{m}/\text{min}$)
Mekanisme oksidasi	Reaksi kimia/elektrokimia dan plasma kimia	Reaksi kimia/elektrokimia
Pelapisan pada logam tertentu	Dapat digunakan untuk banyak jenis paduan Al, Mg, dan Ti	Terbatas (tidak bisa digunakan untuk paduan seri 2000, paduan Al dengan zink atau silicon tinggi, dan paduan Al <i>casting</i>)
Struktur mikro	Fasa <i>amorphous</i> dan <i>crystalline</i> / lapisan padat di dalam dan lapisan berpori di luar	Lapisan <i>amorphous</i> / pori-pori <i>columnar</i> dan pembatas yang sangat tipis

Ketahanan (relatif)	korosi	Sangat baik (5)	Baik (1)
Kekerasan		Tinggi (~1600 HV)	Rendah (maksimal 600 HV)
Wear (relatif)	<i>resistance</i>	Sangat baik (30)	Cukup (2)
Perlindungan termal		Sangat baik	Baik
Elektrolit		Larutan alkaline	Larutan asam
Kekuatan dielektrik		Sangat baik	Cukup
Kekurangan (umum)		Kekurangan data tentang kinerja pelapisan dalam praktik	Sensitif terhadap pengotor dalam logam yang akan dilapisi
Kekurangan (lingkungan)		Tidak ada	Kolam asam sulfat

2.5 Titanium Dioksida (TiO₂)

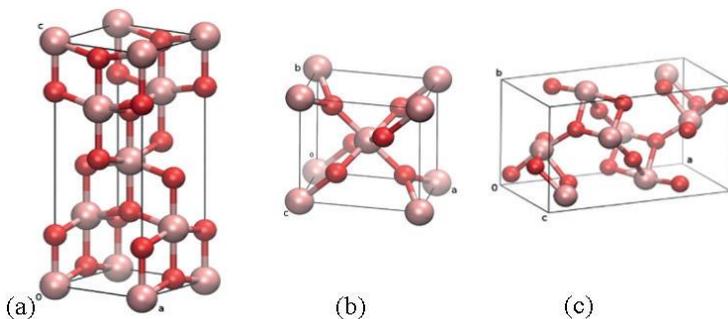
Titanium dioksida merupakan oksida dari titanium yang secara alami terbentuk pada kondisi tekanan atmosfer, titanium dioksida memiliki 3 jenis *polymorph* yaitu: anatase, rutile, dan brookite. Rutile merupakan fasa stabil di segala temperatur dan tekanan, sedangkan anatase dan brookite merupakan fasa metastabil (Hanaor dan Sorrell, 2011). Ketiga jenis *polymorph* dari TiO₂ ini memiliki kekerasan Mohr yang berbeda-beda mulai dari brookite memiliki kekerasan Mohr yang hampir sama dengan anatase yaitu 5,5-6,0 sedangkan untuk rutile memiliki kekerasan Mohr yang lebih tinggi yaitu 6,0-6,5 (Yan dan Chen, 2015). Tabel 2.4 menunjukkan beberapa sifat lain dari masing-masing *polymorph* TiO₂.

Anatase dan rutile memiliki struktur kristal yang sama yaitu tetragonal, dalam proses transformasi fasa dari anatase ke rutile merupakan peristiwa rekonstruksi yaitu berupa pemutusan dan pembentukan ikatan. Transformasi fasa ini sering terjadi ketika temperatur ~600°C, tetapi temperatur transisinya bervariasi dengan rentang 400-1200°C tergantung dari bahan baku dan metode

pemrosesan (Hanaor dan Sorrell 2011). Struktur dari polymorph TiO_2 ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Tabel 2.4 Perbandingan brookite, anatase, dan rutile (Scarpelli dkk, 2018)

Sifat	Anatase	Rutile	Brookite
Struktur kristal	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
Lattice parameter (Å)	a = b = 3784 c = 9515	a = b = 4593 c = 2959	a = 9184 b = 5447 c = 5145
Massa jenis (g.cm^{-3})	3.79	4.13	3.99
Titik leleh ($^{\circ}\text{C}$)	-	1843	-
Titik didih ($^{\circ}\text{C}$)	-	2500-3000	-
Refractive index	2.52	2.72	2.63
Molekul/ sel Volume (Å^3)	4 136.25	2 62.07	8 257.38



Gambar 2.7 Struktur *polymorph* TiO_2 a) anatase, b) rutile, c) brookite (Scarpelli dkk, 2018)

2.6 Penelitian Sebelumnya

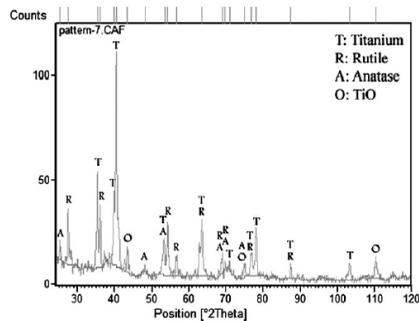
Pada penelitian ini tentu membutuhkan referensi tentang penelitian-penelitian lain yang pernah meneliti pengaruh pengaplikasian *Plasma Electrolytic Oxidation* terhadap Ti-6Al-4V. Penelitian sebelumnya yang dijadikan referensi pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.6.1 Elektrolit yang Digunakan untuk *Plasma Electrolytic Oxidation* Pada Ti-6Al-4V

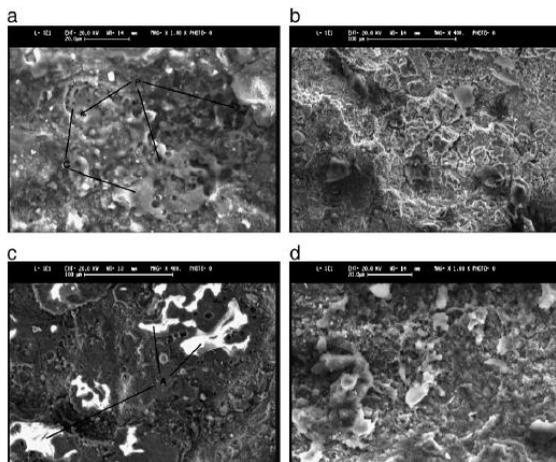
Khorasanian dkk (2011) telah melakukan penelitian *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) terhadap paduan Ti-6Al-4V dengan menggunakan *power supply* arus DC dengan potensial 380V serta elektrolit yang tidak mahal dan sering dijumpai berupa NaCl (30 g/l), NaOH (10 g/l), Na₂SiO₃ (25 g/l), H₂O₂ (15 g/l), dan tepung kanji (25 g/l) dengan waktu pelapisan 10 menit sehingga bisa menjadi alternatif penggunaan PEO kepada paduan Ti-6Al-4V yang murah serta tidak membutuhkan tegangan yang tinggi dibandingkan dengan referensi lain. Penelitian ini menganalisis efek dari komposisi elektrolit yang digunakan terhadap struktur mikro dan juga *wear resistance* dari lapisan oksida yang terbentuk.

Dalam percobaan yang Khorasanian dkk (2011) lakukan didapat komposisi dari lapisan oksida yang terbentuk dari pelapisan menggunakan PEO adalah rutil, anatase, dan TiO seperti yang ditunjukkan pada hasil pengujian XRD pada Gambar 2.8. Hasil morfologi lapisan yang terbentuk tergolong baik dengan ketebalan 50 µm dan memiliki ciri-ciri dari lapisan oksida yang dihasilkan dari proses PEO, yaitu adanya pori-pori dan *crater*. Pori-pori merupakan jalan keluarnya logam cair dari permukaan substrat ke elektrolit akibat *micro-arc discharge* dan *crater* merupakan logam cair yang telah dingin dan terdeposit di permukaan substrat. Pada permukaan lapisan yang terbentuk juga ditemukan fasa *non-crystalline / amorphous* yang merupakan hasil pembekuan yang sangat cepat dari logam cair. Secara keseluruhan permukaan memiliki struktur yang padat, tanpa banyak porositas dan retakan. Tingkat kekasaran dari lapisan yang terbentuk

tergolong tinggi dan struktur permukaan tidak sama (Gambar 2.9 b & d), hal ini biasa terjadi karena percikan plasma yang terjadi di permukaan substrat dapat membuat titik percikan plasma dan *crater* baru. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 2.9 dengan symbol P menunjukkan Pori-pori, C menunjukkan *crater*, dan A menunjukkan fasa *Amorphous*.



Gambar 2.8 Hasil pengujian XRD Ti-6Al-4V dengan pelapisan PEO (Khorasanian dkk, 2011)

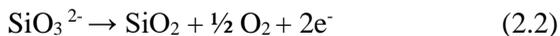
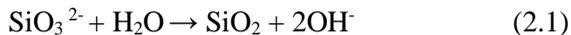


Gambar 2.9 Morfologi permukaan Ti-6Al-4V hasil PEO (Khorasanian dkk, 2011)

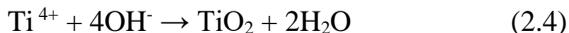
Kekerasan yang dihasilkan dari penelitian yang dilakukan Khorasanian dkk (2011) mencapai 1050 HV, kekerasan yang didapat jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan paduan Ti-6Al-4V tanpa PEO yang hanya 430 HV. Peningkatan kekerasan ini akan sangat membantu dalam sifat *wear resistance* material.

Penelitian PEO terhadap paduan Ti-6Al-4V pernah juga dilakukan oleh Han dkk (2018) dengan komposisi elektrolit berupa $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (70 g/l) dan NaOH (4 g/l) menggunakan *power supply pulse bipolar* dengan waktu oksidasi 150 s menghasilkan lapisan oksida berwarna hitam dengan fasa dari lapisan oksida yang terbentuk ditunjukkan pada Gambar 2.10, dapat dilihat bahwa terdapat *peak* yang luas pada $15-40^\circ 2\theta$ yang menunjukkan adanya fasa *amorphous* berupa SiO_2 yang biasa ditemukan pada PEO dengan menggunakan elektrolit yang mengandung silika, selain itu terdapat 2 fasa lain yaitu rutil dan titanium.

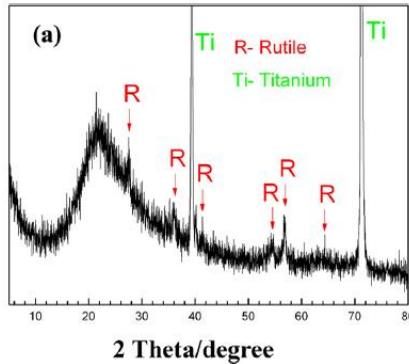
Adanya SiO_2 pada lapisan oksida terbentuk dari ionisasi Na_2SiO_3 yang terdekomposisi dan terdeposit akibat adanya percikan plasma, pembentukan SiO_2 mengikuti Persamaan Reaksi 2.1 dan 2.2 sebagai berikut:



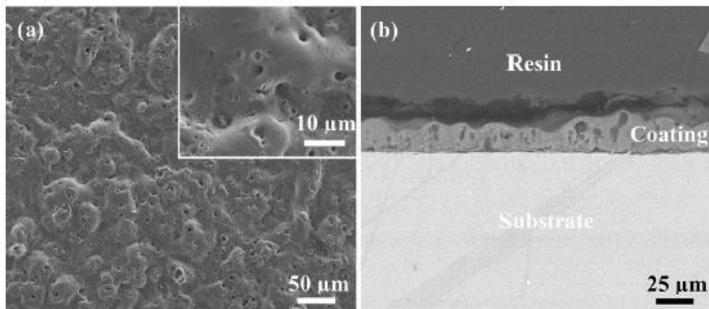
TiO_2 dengan fasa rutil terbentuk dari Ti^{4+} yang bereaksi baik dengan O^{2-} maupun OH^- dari elektrolit ketika lelehan logam cair keluar dari pori-pori akibat percikan plasma, reaksinya mengikuti Persamaan Reaksi 2.3 dan 2.4 adalah sebagai berikut:



Morfologi dari lapisan oksida yang dihasilkan oleh Han dkk (2018) dapat dilihat pada Gambar 2.11 bagian a memiliki permukaan yang cukup kasar dengan pori-pori mikro dan pada perbesaran lebih lanjut didapati permukaan yang cukup halus di beberapa titik. Ketebalan lapisan oksida yang dihasilkan sebesar 25 μm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 bagian b.



Gambar 2.10 Fasa yang terbentuk pada Ti-6Al-4V hasil PEO selama 150 s (Han dkk, 2018)

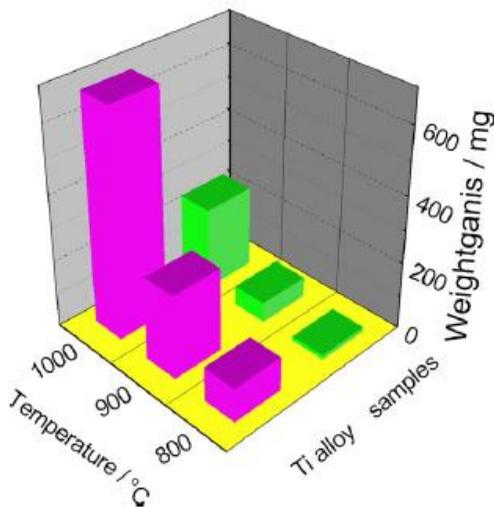


Gambar 2.11 Hasil pengujian SEM pada Ti-6Al-4V dengan PEO. a) morfologi permukaan, b) penampang melintang (Han dkk, 2018)

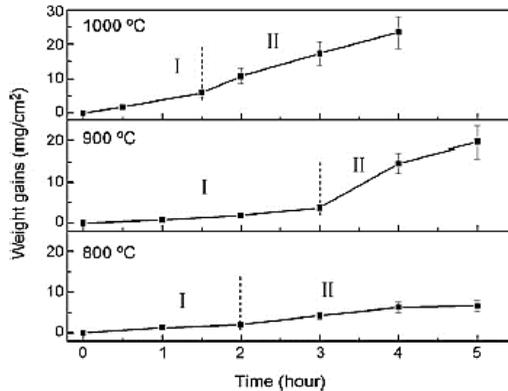
2.6.2 Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi Ti-6Al-4V dengan Pelapisan *Plasma Electrolytic Oxidation*

Yao dkk (2007) melakukan penelitian terhadap Ti-6Al-4V dengan menggunakan metode PEO *bi-polar* dan elektrolit yang berbeda berhasil menciptakan lapisan yang mengandung Al_2TiO_5 , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, dan Rutile yang dapat meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dengan temperatur pengujian 800°C , 900°C , dan 1000°C dengan sangat baik dibanding dengan Ti-6Al-4V tanpa

pelapisan PEO. Pada Gambar 2.12 dapat dilihat bahwa dengan waktu oksidasi yang sama perbedaan temperatur sangat mempengaruhi pertambahan massa dari Ti-6Al-4V tanpa perlakuan dengan sangat signifikan, pertambahan massa pada 1000°C dua kali lebih banyak dari 900°C dan tujuh kali lebih banyak dari 800°C. Untuk Ti-6Al-4V dengan pelapisan PEO memiliki pertambahan massa yang bervariasi dan jauh lebih rendah dibanding dengan Ti-6Al-4V tanpa perlakuan, pertambahan massa pada 1000°C dengan pelapisan PEO hampir sama dengan pertambahan massa pada 900°C tanpa perlakuan, sedangkan pertambahan massa 900°C dengan pelapisan PEO hanya setengah dari 800°C tanpa perlakuan, dan 800°C dengan pelapisan PEO hanya satu persepuluh dari pertambahan massa 800°C tanpa perlakuan.



Gambar 2.12 Hasil pengujian oksidasi temperatur tinggi Ti-6Al-4V berbagai temperatur dalam 1 jam (Yao dkk, 2007)



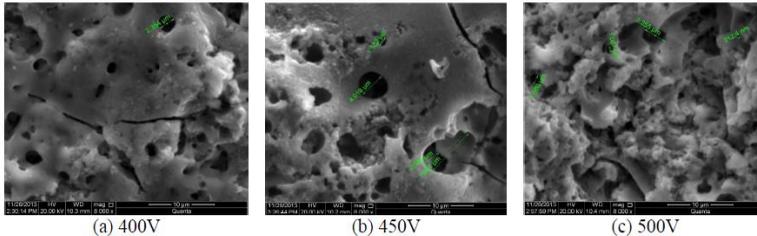
Gambar 2.13 Pertambahan massa Ti-6Al-4V dengan pelapisan PEO di berbagai temperatur oksidasi (Yao dkk, 2007)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yao dkk (2007) ditemukan terdapat dua tahap dalam oksidasi temperatur tinggi dari Ti-6Al-4V yang dilapisi PEO yang dapat dilihat pada Gambar 2.13. Pada temperatur 800°C pertambahan massa terjadi secara linier pada tahap ke-1 dan akan bertambah secara parabola antara 2 dan 5 jam oksidasi pada tahap ke-2. Pertambahan massa pada 900°C bertambah dengan cepat pada setelah 3 jam oksidasi dan lebih banyak dari sampel yang di oksidasi pada 800°C. Pada 1000°C pertambahan massa bertambah lebih cepat dan lebih banyak dibanding dengan 900°C. Hal ini menunjukkan pertambahan massa dari Ti-6Al-4V yang dilapisi PEO akan bertambah dengan bertambahnya temperatur dan waktu oksidasi temperatur tinggi.

2.6.3 Pengaruh Beda Potensial dan Waktu Oksidasi PEO Terhadap Karakteristik Lapisan Oksida yang Terbentuk

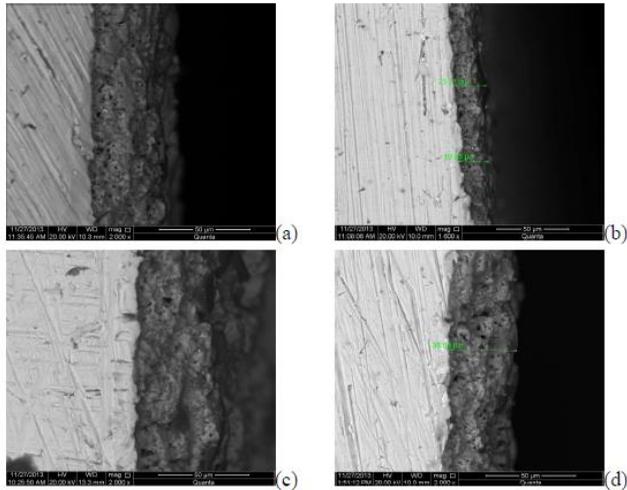
Pengaplikasian beda potensial untuk pelapisan menggunakan metode PEO dengan substrat Ti-6Al-4V pernah dilakukan oleh Teng dkk (2016) namun dengan elektrolit dan waktu PEO yang berbeda. Dari penelitian ini didapat perbedaan morfologi permukaan lapisan oksida yang terbentuk di mana

dengan semakin besarnya potensial yang diberikan menghasilkan penurunan jumlah pori-pori namun diameter pori-pori semakin membesar, akan tetapi pada beda potensial 500V permukaan terselimuti oleh sejumlah banyak lelehan sehingga pori-pori tidak jelas. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.14 di mana menggunakan beda potensial 400V, 450V, dan 500V.



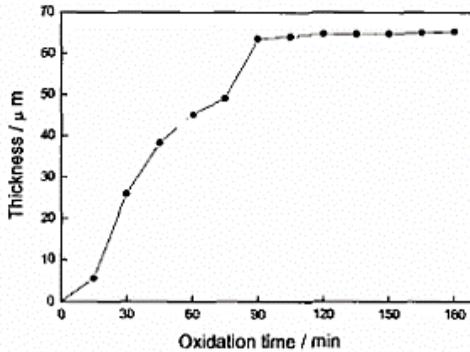
Gambar 2.14 Pengaruh beda potensial PEO terhadap ukuran pori-pori lapisan oksida Ti-6Al-4V (Teng dkk, 2016)

Variasi pengaplikasian beda potensial juga berpengaruh terhadap ketebalan lapisan oksida yang terbentuk di mana semakin besar beda potensial yang digunakan maka ketebalan dari lapisan oksida yang terbentuk semakin tebal. Bisa dilihat pada Gambar 2.15 dengan menggunakan variasi beda potensial 400V, 425V, 450V, dan 475V menghasilkan ketebalan lapisan oksida 22 μm , 40 μm , 45 μm dan 48 μm . Peningkatan beda potensial akan memberikan energi yang lebih banyak dan membuat semakin banyak percikan plasma yang terjadi mengakibatkan pertumbuhan lapisan oksida semakin cepat.



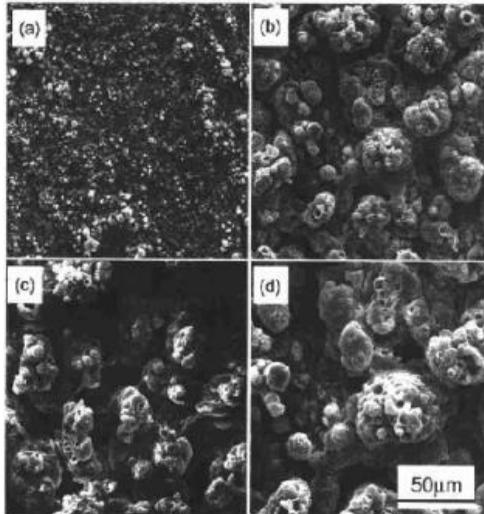
Gambar 2.15 Pengaruh beda potensial PEO terhadap ketebalan lapisan oksida Ti-6Al-4V dengan a) 400V, b) 425V, c) 450V, d) 475V (Teng dkk, 2016)

Pengaruh dari perbedaan waktu oksidasi PEO terhadap hasil lapisan oksida yang terbentuk dari substrat Ti-6Al-4V pernah diteliti oleh Jiang dkk (2005) menggunakan elektrolit silicate hypophosphite dengan komposisi elektrolit dan potensial yang konstan, didapatkan bahwa ketebalan lapisan meningkat dengan kontinu pada 1-2 jam pertama (tahap pertama) seiring dengan bertambahnya waktu oksidasi, setelah memasuki tahap kedua penambahan ketebalan lapisan menurun bahkan hampir konstan, perubahan ini bisa dilihat pada Gambar 2.16. Penjelasan untuk peristiwa ini adalah ketika awal pemberian arus lapisan keramik mudah sekali rusak, sehingga banyak sekali titik percikan plasma pada permukaan lapisan dan densitas arus sangat besar yang menyebabkan pertumbuhan lapisan oksida yang cepat. Pertumbuhan dari lapisan ini akan terus terjadi sampai titik maksimum yang bisa dicapai dengan kondisi elektrolit dan potensial yang konstan.

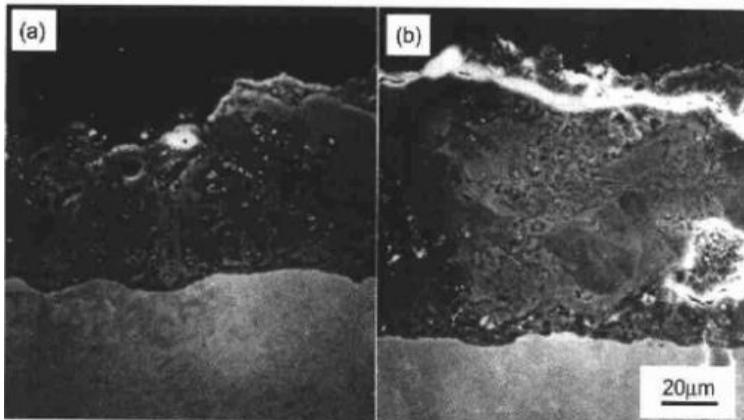


Gambar 2.16 Pengaruh waktu oksidasi PEO terhadap ketebalan lapisan oksida (Jiang dkk, 2005)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Jiang dkk (2005) menemukan pengaruh bertambahnya waktu oksidasi terhadap pori-pori yang terbentuk pada permukaan lapisan. Bisa dilihat pada Gambar 2.17 pori-pori pada waktu oksidasi 15 menit memiliki ukuran yang sangat kecil dan berjumlah sangat banyak, dengan bertambahnya waktu oksidasi diameter pori-pori semakin besar dan jumlahnya semakin sedikit. Pada titik percikan plasma akan didapati temperatur yang tinggi, titik ini akan terus diselubungi oleh lelehan oksida yang dibekukan oleh elektrolit dingin, untuk memecahkan lapisan yang tebal dan rata ini memerlukan energi yang lebih besar, yang membuat pori-pori yang dihasilkan dari proses PEO pada bagian yang tertutupi lelehan oksida menjadi membesar. Pada Gambar 2.18 yang merupakan penampang melintang dari sampel dengan waktu oksidasi 30 menit (a) dan 120 menit (b) menunjukkan bahwa dengan bertambahnya waktu oksidasi didapat lapisan oksida yang lebih tebal dan padat dengan pori-pori dalam yang lebih sedikit. Hal ini terjadi akibat pertumbuhan lapisan yang terbentuk terhadap substrat di mana pertumbuhan lapisan bagian dalam mendominasi seluruh pertumbuhan lapisan yang menyebabkan struktur yang lebih homogen dan padat seiring dengan bertambahnya waktu oksidasi.

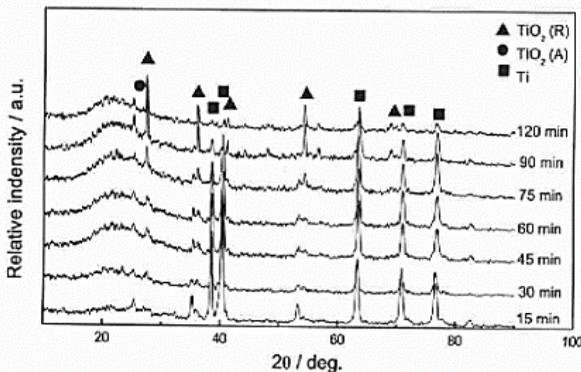


Gambar 2.17 Morfologi Ti-6Al-4V hasil pelapisan PEO dengan perbedaan waktu oksidasi: a) 15 Menit, b) 30 Menit, c) 60 Menit, dan d) 120 Menit (Jiang dkk, 2005)



Gambar 2.18 Penampang melintang dari Ti-6Al-4V dengan waktu PEO berbeda. a) 30 Menit, b) 120 Menit (Jiang dkk, 2005)

Jiang dkk (2005) juga mendapati perubahan komposisi dari lapisan yang terbentuk berubah seiringan dengan bertambahnya waktu oksidasi. Pada penelitian ini lapisan oksida terdiri dari rutile, anatase, dan fasa *amorphous*, komposisi rutile terus meningkat dengan bertambahnya waktu oksidasi, sedangkan anatase dan fasa *amorphous* pada awalnya meningkat lalu sedikit menurun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19. Ketika waktu oksidasi bertambah maka akan memberikan temperatur dan waktu yang cukup untuk fasa *amorphous* (terdiri dari Si) untuk berubah bentuk sehingga jumlah fasa ini semakin sedikit dengan bertambahnya waktu oksidasi, sedangkan anatase merupakan fasa metastabil sehingga dengan bertambahnya waktu oksidasi yang diiringi dengan peningkatan temperatur membuat anatase berubah menjadi rutile yang merupakan fasa stabil dari TiO_2 di tekanan dan temperatur tinggi dengan melting point 1870°C .



Gambar 2.19 Pengujian XRD terhadap Ti-6Al-4V hasil PEO dengan berbagai waktu oksidasi (Jiang dkk, 2005)

Muafa dan Purniawan (2018) melakukan penelitian PEO terhadap paduan AZ31B dengan menggunakan elektrolit Na_3PO_4 dan KOH dengan menggunakan variabel beda potensial berupa 400V, 450V, dan 500V serta variabel waktu oksidasi PEO yaitu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit. Dari penelitiannya didapatkan

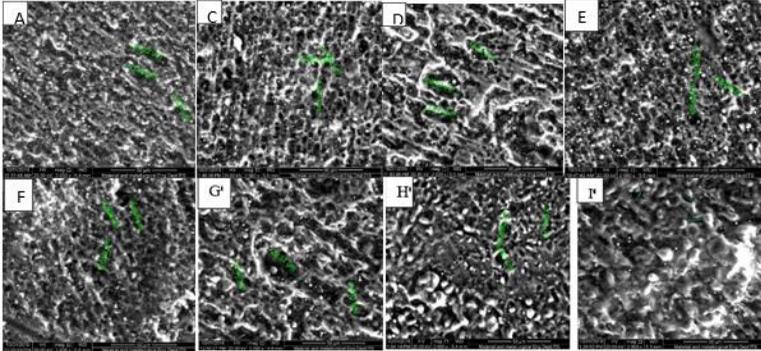
bahwa nilai kekerasan yang tinggi terdapat pada spesimen dengan pengaplikasian PEO di 500V selama 15 menit, kekerasan yang dihasilkan bisa mencapai 141,56 VHN yaitu dua kali dari kekerasan AZ31B tanpa PEO yang hanya 68 VHN. Ketebalan lapisan oksida dari proses PEO yang terbentuk juga meningkat beriringan dengan bertambahnya beda potensial, bisa dilihat pada Tabel 2.5 bahwa ketebalan tertinggi terdapat pada spesimen yang diaplikasikan beda potensial 500V yaitu beda potensial tertinggi yang diaplikasikan.

Tabel 2.5 Ketebalan lapisan oksida hasil PEO (Muafa dan Purniawan, 2018)

Spesimen dengan perlakuan PEO	Rata-rata ketebalan lapisan(μm)
400V , 5 Menit	2,62
400V , 10 Menit	3,63
400V , 15 Menit	3,92
450V , 5 Menit	5,56
450V , 10 Menit	5,47
450V , 15 Menit	5,03
500V , 5 Menit	5,96
500V , 10 Menit	8,56
500V , 15 Menit	6,89

Pada penelitian yang dilakukan Muafa dan Purniawan (2018) juga meneliti pengaruh beda potensial dan waktu terhadap ukuran pori-pori lapisan yang terbentuk, didapatkan bahwa semakin tinggi beda potensial maka akan memperbesar ukuran pori-pori namun hal ini berkorelasi dengan waktu PEO, di mana semakin lama waktu PEO akan memperkecil pori-pori yang terbentuk. Pada spesimen dengan perlakuan beda potensial 500V dan 15 menit memiliki ukuran pori rata-rata paling kecil yaitu 4,71 μm . Pada Gambar 2.20 dapat dilihat perbedaan morfologi

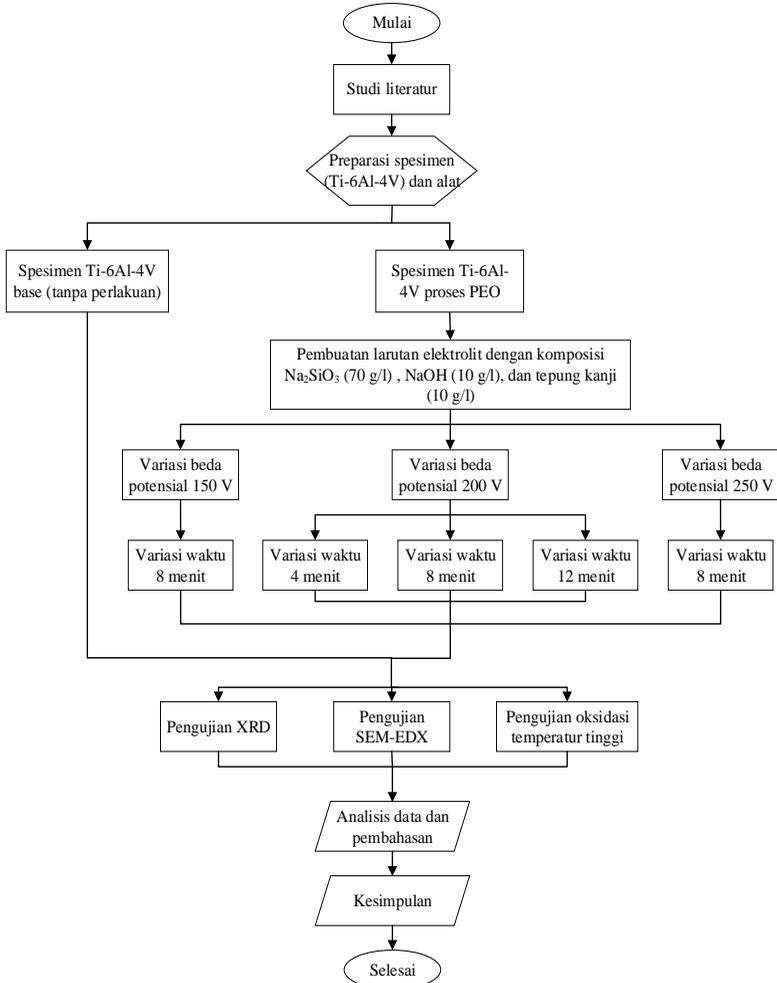
permukaan spesimen yang di PEO dengan beda potensial dan waktu yang berbeda.



Gambar 2.20 Hasil SEM morfologi permukaan AZ31B hasil PEO dengan variasi beda potensial dan waktu oksidasi a) 400 V,5 menit, b) 400V,10 Menit, c) 400V,15 Menit,d) 450V,5 Menit, e) 450V,10 Menit, f) 450V,15 Menit, g) 500V,5 Menit, h) 500V,10 Menit, i) 500V,15 Menit perbesaran 2000x (Muafa dan Purniawan, 2018)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir

3.2 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan pada perancangan penelitian ini adalah:

1. Studi Literatur

Metode ini mengacu pada buku-buku, jurnal, paten serta penelitian serupa tentang *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) pada Ti-6Al-4V yang meneliti pengaruh beda potensial dan waktu oksidasi terhadap morfologi dan ketahanan oksidasi temperatur tingginya.

2. Diskusi

Pada tahapan ini dilakukan diskusi untuk menambah wawasan agar lebih memahami permasalahan dan solusi pada penelitian yang akan dilakukan. Diskusi ini dilakukan dengan pihak – pihak terkait dengan penelitian yang akan dilakukan.

3. Eksperimental

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada, yaitu metode PEO, pengujian XRD, SEM-EDX, dan oksidasi temperatur tinggi.

3.3 Proses Preparasi Dan Pelapisan

Pada proses preparasi dan pelapisan terdiri dari dua tahapan yaitu preparasi sampel dan larutan elektrolit lalu proses pelapisan menggunakan metode PEO, proses selengkapnya adalah sebagai berikut:

3.3.1 Preparasi Sampel Dan Larutan Elektrolit

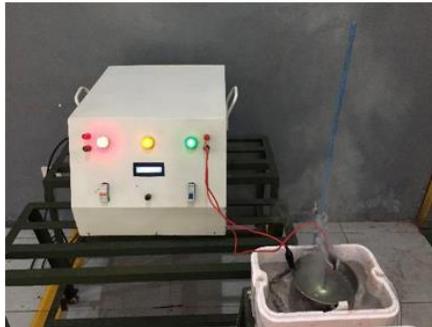
Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan Ti-6Al-4V yang diproduksi oleh Xian Ocean Material Technology Co., Ltd. Komposisi dari paduan Ti-6Al-4V ditunjukkan pada Table 2.2. Substrat dipotong menggunakan metode *wire cut* dengan dimensi 20 x 10 x 3 mm menjadi 42 buah sampel lalu diampas dengan menggunakan ampas dengan *grade* 180, 400, 800, dan 1000. Pengamplasan bertujuan untuk mendapatkan kekasaran sampel yang homogen dan memudahkan proses pelapisan. Setelah itu sampel dibilas menggunakan *aquadest* dan

dibersihkan menggunakan *ultrasonic* di dalam larutan etanol selama 10-15 menit untuk menghilangkan sisa-sisa pengotor.

Larutan elektrolit yang digunakan pada proses PEO dengan substrat Ti-6Al-4V memiliki komposisi Na_2SiO_3 (70 g/l), NaOH (10 g/l), dan tepung kanji (10 g/l).

3.3.2 Proses Pelapisan Menggunakan Metode PEO

Setelah substrat dipreparasi selanjutnya substrat dilapisi menggunakan metode *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) untuk membentuk lapisan oksida TiO_2 (baik rutil maupun anatase). Proses PEO menggunakan *power supply DC* dengan potensial maksimum sebesar 800V dan arus maksimum sebesar 4A.



Gambar 3.2 Peralatan *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO)

PEO menggunakan prinsip dasar *anodizing*, dimana anodanya adalah substrat (Ti-6Al-4V) sedangkan katodanya berupa wadah *stainless steel*. Wadah dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menjaga temperatur elektrolit tidak terlalu tinggi ($\pm 30^\circ\text{C}$) sehingga elektrolit tidak terlalu cepat menguap akibat panas yang dihasilkan oleh plasma. Peralatan yang digunakan pada proses PEO ditunjukkan pada Gambar 3.2.

Dalam melakukan pelapisan substrat di penelitian ini menggunakan variasi potensial yaitu 150V, 200V, dan 250V dengan waktu oksidasi PEO berbeda yaitu 4 menit, 8 menit, dan 12 menit. Waktu oksidasi PEO mulai dihitung ketika sampel telah

berada pada kondisi beda potensial yang ditentukan dan jalannya proses PEO dilakukan tanpa ada agitasi.

3.4 Proses Pengujian

Proses pengujian bertujuan untuk menganalisis struktur, morfologi dan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari sampel Ti-6Al-4V *base* (tanpa PEO) dan juga setelah PEO, pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.4.1 Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)



Gambar 3.3 Alat *X-Ray Diffraction* (XRD)

Alat *X-Ray Diffraction* (XRD) ditunjukkan pada Gambar 3.3, fungsi dari alat ini adalah untuk mengetahui fasa kristalin yang terbentuk pada sampel tanpa perlakuan dan hasil PEO dengan pengaplikasian potensial dan waktu yang berbeda. XRD memanfaatkan radiasi *x-ray* yang ditembakkan oleh *x-ray source* ke arah sampel yang kemudian terpantul ke *x-ray detector* dan direkam dalam bentuk grafik hubungan intensitas terhadap 2θ . Kemudian 3 intensitas tertinggi (*peak*) akan digunakan untuk mengetahui unsur yang terkandung di lapisan oksida yang terbentuk dengan menggunakan aplikasi tertentu.

Pada pengujian kuantitatif XRD untuk menghitung fraksi massa dari *polymorph* TiO₂ berupa rutile, anatase, dan brookite dapat menggunakan persamaan yang digunakan pada penelitian yang dilakukan oleh Cano-Casanova dkk (2018) digunakan Persamaan 3.1, 3.2, 3.3, dan 3.4 sebagai berikut:

$$W_R \% = \frac{I_R}{K_A I_A + I_R + K_B I_B} \quad (3.1)$$

$$W_A \% = \frac{K_A I_A}{K_A I_A + I_R + K_B I_B} \quad (3.2)$$

$$W_B \% = \frac{K_B I_B}{K_A I_A + I_R + K_B I_B} \quad (3.3)$$

W_R , W_A , dan W_B adalah fraksi massa dari rutile, anatase, dan brookite, sedangkan I_R , I_A , dan I_B merupakan intensitas *peak* (110) rutile, (101) anatase, dan (121) brookite pada hasil pengujian XRD. K_A dan K_B adalah koefisien koreksi dengan nilai $K_A = 0.886$ dan $K_B = 2.721$.

Namun jika pada sampel tidak ditemukan fasa brookite maka fraksi massa dari rutile (W_R) dapat ditentukan dengan Persamaan 3.4 sebagai berikut:

$$W_R \% = \frac{I_R}{0.884 I_A + I_R} \cdot 100 \quad (3.4)$$

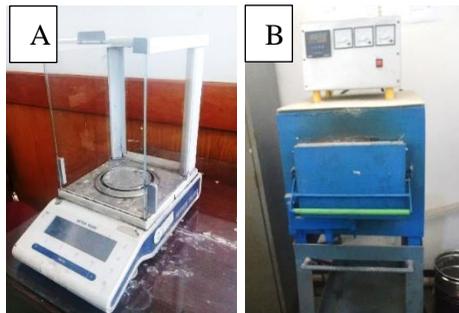
3.4.2 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)-*Energy Dispersive X-Ray* (EDX)



Gambar 3. 4 Alat *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) bertujuan untuk mendapatkan morfologi permukaan dan penampang melintang dari sampel tanpa perlakuan dan hasil PEO dengan pengaplikasian beda potensial dan waktu oksidasi yang berbeda-beda, sedangkan Energy Dispersive X-Ray (EDX) merupakan salah satu metode pengujian yang ada pada alat SEM yang berfungsi untuk mengetahui komposisi unsur secara kuantitatif dari permukaan sampel. Cara kerja mesin SEM adalah menembakkan elektron dengan energi tinggi ke sampel, pantulan dari elektron yang ditembakkan akan memberikan informasi visual dari morfologi permukaan sampel. Alat SEM ditunjukkan pada Gambar 3.4

3.4.3 Pengujian Oksidasi Temperatur Tinggi



Gambar 3. 5 Alat pengujian oksidasi temperatur tinggi.

A) Timbangan analitis digital, B) *furnace*

Pengujian oksidasi temperatur tinggi dilakukan kepada sampel Ti-6Al-4V tanpa perlakuan dan Ti-6Al-4V dengan pelapisan PEO (semua variable beda potensial dan waktu oksidasi), pertama-tama semua sampel dimasukkan ke dalam *crucible* dan dipanaskan menggunakan oven dengan temperatur 120°C selama 30 menit untuk menghilangkan *moisture*, lalu semua sampel ditimbang menggunakan timbangan analitis digital, setelah selesai ditimbang sampel akan dipanaskan menggunakan *furnace* dengan

temperatur 700°C selama 1-5 jam. Setelah mencapai waktu oksidasi yang ditentukan maka sampel dikeluarkan dan didinginkan di udara terbuka sampai temperatur kamar lalu ditimbang kembali. Hasil dari perubahan massa akan digambarkan kedalam grafik pertambahan massa terhadap waktu oksidasi. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.

3.5 Rancangan Penelitian

Untuk mempermudah penelitian maka dibuatlah rancangan penelitian berupa tabel yang mendata sampel dan jenis pengujian yang dilakukan, tabel rancangan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3. 1 Rancangan pengujian sampel

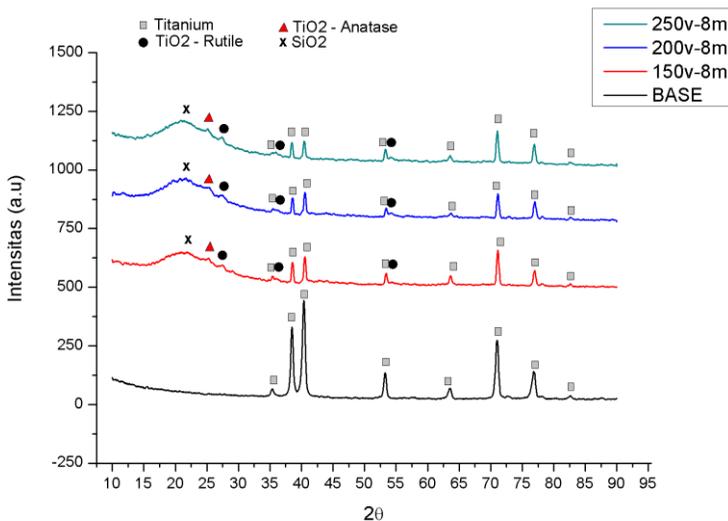
Sampel	Variabel		Uji XRD	Uji SEM-EDX	Uji oksidasi temperatur tinggi
	Potensial (V)	Waktu (Menit)			
Ti-6Al-4V	-	-	√	√	√
	150	8	√	√	√
Ti-6Al-4V	200	4	√	√	√
	200	8	√	√	√
+ PEO	200	12	√	√	√
	250	8	√	√	√

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Fasa Menggunakan XRD

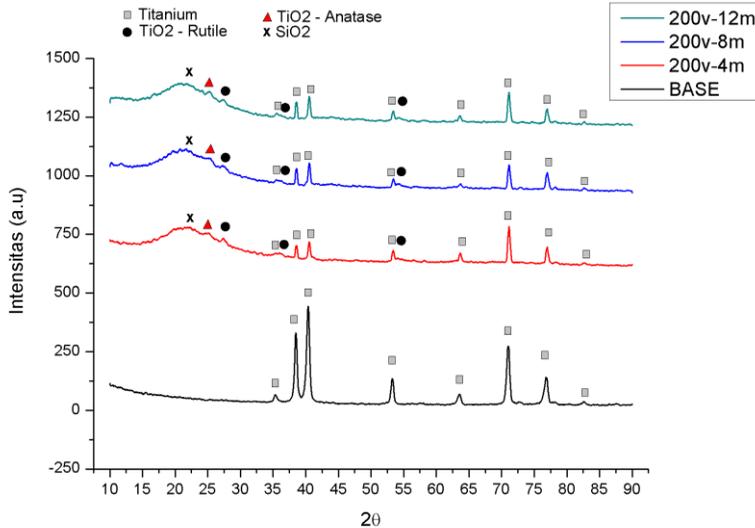
Hasil dari pengujian fasa menggunakan XRD dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Kedua gambar memperlihatkan adanya beberapa *peak* yang berbeda pada sampel dengan PEO dibandingkan dengan sampel *base* (Ti-6Al-4V tanpa PEO), *peak* tersebut menunjukkan adanya 3 fasa baru yang terbentuk berupa *amorphous* SiO₂ pada sudut $2\theta = 21.984$, TiO₂ (anatase) pada sudut $2\theta = 25.281$, dan TiO₂ (rutile) pada sudut $2\theta = 27.447$, 36.086 , dan 54.642 , namun untuk fasa TiO₂ (brookite) tidak ditemukan pada semua variasi beda potensial dan waktu oksidasi.



Gambar 4.1 Pengaruh beda potensial terhadap fasa lapisan oksida hasil PEO

Menurut Han dkk (2018) adanya fasa *amorphous* SiO₂ pada lapisan oksida terbentuk dari ionisasi Na₂SiO₃ berupa SiO₃²⁻ yang

bereaksi membentuk SiO_2 dan terdeposit akibat adanya percikan plasma dengan reaksi seperti pada Persamaan Reaksi 2.1 dan 2.2. sedangkan untuk TiO_2 terbentuk dari reaksi Ti^{4+} yang bereaksi baik dengan O^{2-} maupun OH^- dari elektrolit ketika lelehan logam cair keluar dari pori-pori akibat percikan plasma sesuai dengan Persamaan Reaksi 2.3 dan 2.4.



Gambar 4.2 Pengaruh waktu oksidasi terhadap fasa lapisan oksida hasil PEO

Tabel 4.1 Fraksi massa TiO_2 pada lapisan oksida hasil PEO

Sampel	Fraksi Massa (%)		
	W_R	W_A	W_B
150V-8 Menit	49.6681	50.3319	0
200V-4 Menit	46.1688	53.8312	0
200V-8 Menit	51.2632	48.7368	0
200V-12 Menit	51.4097	48.5903	0
250V-8 Menit	52.0109	47.9891	0

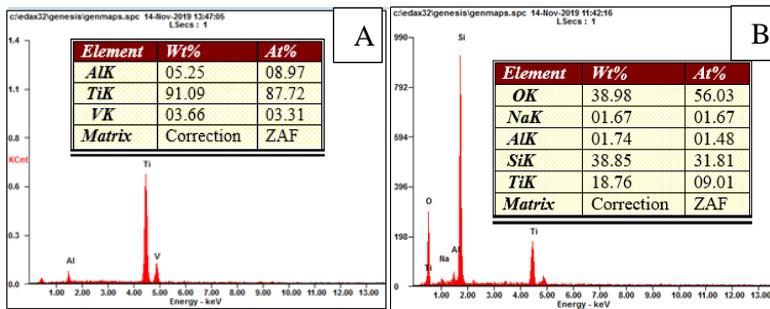
Variasi beda potensial dan waktu oksidasi PEO yang digunakan tidak meningkatkan *peak* rutile maupun anatase secara signifikan namun seiring dengan bertambahnya beda potensial dan waktu oksidasi dapat menurunkan *peak* dari Ti dan meningkatkan fraksi massa dari rutile seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Perhitungan fraksi massa menggunakan Persamaan 3.4 yang didapati bahwa fraksi massa rutile tertinggi berada di sampel 250V-8 Menit dan 200V-12 Menit yang merupakan variasi beda potensial dan waktu oksidasi tertinggi. Peningkatan fraksi massa dari rutile ini terjadi karena bertambahnya temperatur di permukaan tempat terbentuknya *discharge channel* atau titik terbentuknya percikan plasma akibat peningkatan beda potensial yang digunakan. Temperatur yang tinggi ini akan memberikan energi yang cukup untuk mengubah anatase yang sebelumnya terbentuk pada temperatur kamar menjadi rutile yang merupakan fasa stabil secara termodinamik di temperatur tinggi (Teng dkk, 2016).

Peningkatan waktu oksidasi juga memiliki pengaruh yang sama terhadap peningkatan fraksi massa rutile akibat bertambahnya temperatur dan juga waktu yang diberikan sehingga memberikan kesempatan lebih untuk anatase bertransformasi menjadi rutile yang merupakan fasa yang lebih stabil pada temperatur tinggi (Jiang dkk, 2005).

4.2 Analisis Komposisi Lapisan Oksida Hasil PEO

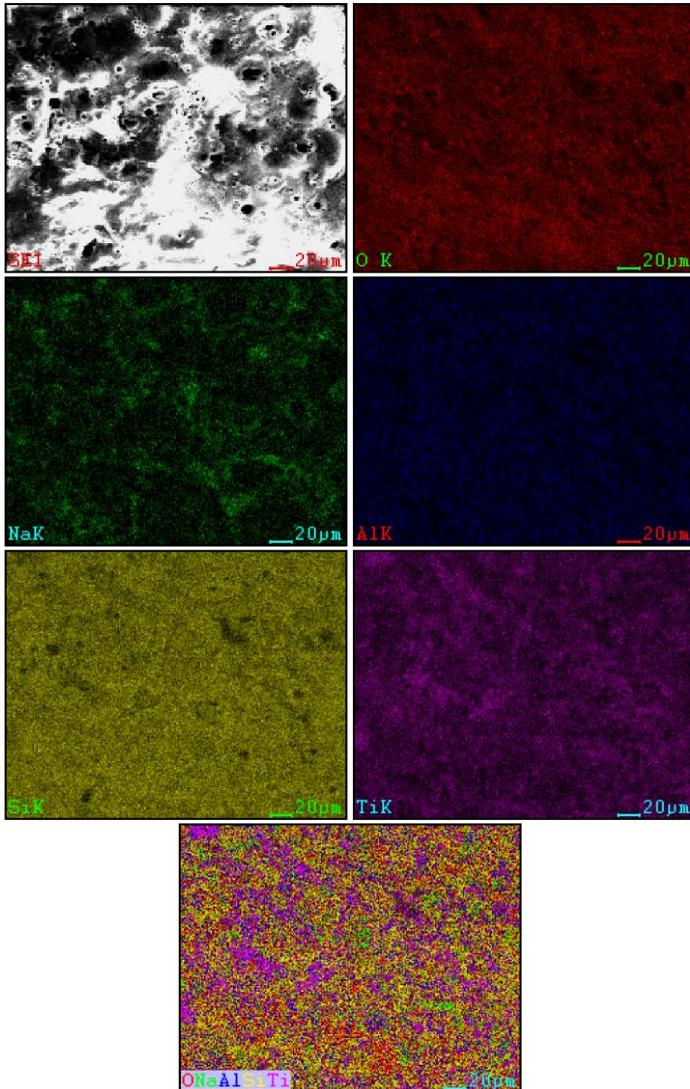
Hasil pengujian EDX pada sampel Ti-6Al-4V tanpa PEO dan hasil PEO dengan variasi 200V-8 Menit dapat dilihat pada Gambar 4.3, dari data tersebut didapatkan bahwa sampel tanpa PEO pada Gambar 4.3 bagian A memiliki unsur penyusun berupa Ti, Al, dan V sedangkan lapisan oksida yang terbentuk pada Gambar 4.3 bagian B didominasi oleh unsur Ti, Si, dan O, selain itu terdapat juga unsur minor seperti Al yang berasal dari substrat Ti-6Al-4V dan Na berasal dari elektrolit. Persentase unsur yang didapat mendekati hasil penelitian yang dilakukan oleh Han dkk (2018) dengan *at%* unsur O, Na, Si, Ti, dan V berturut-turut adalah

53.7%, 01.1%, 35.59%, 08.86%, dan 00.75%. Tingginya unsur Si yang terjadi di permukaan disebabkan oleh tingginya fluiditas molten metal yang keluar dari pori-pori dan berkontak langsung dengan elektrolit silikat sehingga molten metal yang keluar dari pori-pori tersisipi unsur Si dari elektrolit dan memenuhi permukaan dengan unsur Si, begitu pula dengan unsur Na. Pernyataan ini didukung dengan hasil pengujian *element mapping* pada Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Komposisi Sampel Ti-6Al-4V. A) Tanpa PEO, B) PEO 200V-8 Menit

Adanya unsur Al pada permukaan mungkin membentuk Al_2O_3 akibat bereaksi dengan oksigen karena energi Gibbssnya yang lebih negatif (lebih spontan untuk membentuk oksida) dibanding TiO_2 , SiO_2 dan V_2O_3 jika dilihat pada diagram Ellingham, namun karena persentase unsurnya sedikit dan tidak merata sehingga fasa Al_2O_3 tidak terdeteksi pada pengujian XRD, sedangkan untuk unsur V tidak terdeteksi pada lapisan oksida karena energi Gibbssnya lebih positif (lebih sulit membentuk oksida) dibandingkan dengan Al_2O_3 , TiO_2 , dan SiO_2 yang menyebabkan unsur V tidak memiliki kesempatan untuk bereaksi dengan oksigen membentuk V_2O_3 .



Gambar 4.4 EDX *element mapping* sampel PEO 200V-8 menit dengan perbesaran 1000X

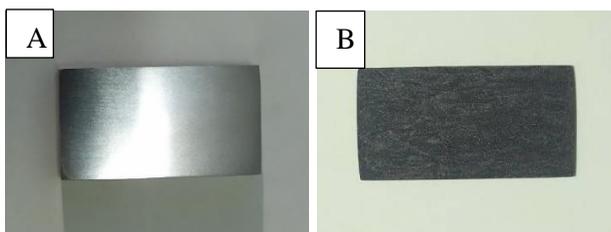
Gambar 4.4. merupakan pengujian EDX *element mapping* pada sampel Ti-6Al-4V dengan PEO 200V-8 menit, dapat dilihat bahwa Persebaran unsur O yang terjadi secara merata pada seluruh bagian lapisan oksida yang terbentuk, begitu pula dengan unsur Si terutama pada bagian *crater* dan tidak ditemukan pada titik-titik terbentuknya pori-pori karena pori-pori merupakan tempat keluarnya lelehan logam dari substrat menuju permukaan lapisan oksida sehingga pori-pori lebih banyak mengandung unsur Ti dan Al. Unsur Ti dan Al juga ditemukan di *crater* atau titik-titik yang jauh dari pori-pori, sedangkan untuk unsur Na tersebar secara tidak merata dan tidak ditemukan pada bagian pori-pori.

4.3 Morfologi Permukaan

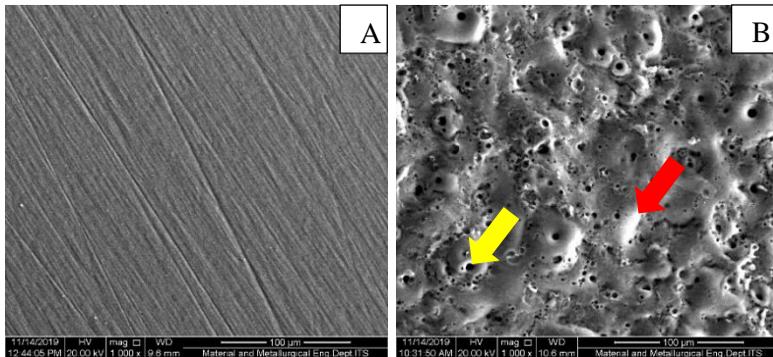
Hasil pengamatan morfologi permukaan terhadap sampel Ti-6Al-4V sebelum dan setelah PEO adalah sebagai berikut:

4.3.1 Perbandingan Sampel Sebelum dan Sesudah PEO

Permukaan dari sampel Ti-6Al-4V ditunjukkan pada Gambar 4.5, bagian A merupakan sampel Ti-6Al-4V sebelum PEO yang sudah diampelas hingga *grade* 1000 dengan warna silver mengkilap sedangkan bagian B merupakan sampel Ti-6Al-4V sesudah PEO dengan lapisan oksida berwarna hitam menyelimuti seluruh permukaan sampel dengan merata. Menurut Han dkk (2018) pada PEO Ti-6Al-4V menggunakan elektrolit Na_2SiO_3 dan NaOH dapat terbentuk lapisan oksida berwarna hitam akibat adanya unsur vanadium dan waktu oksidasi dibawah 15 menit.



Gambar 4.5 Pengamatan visual sampel, A) Sebelum PEO, B) setelah PEO

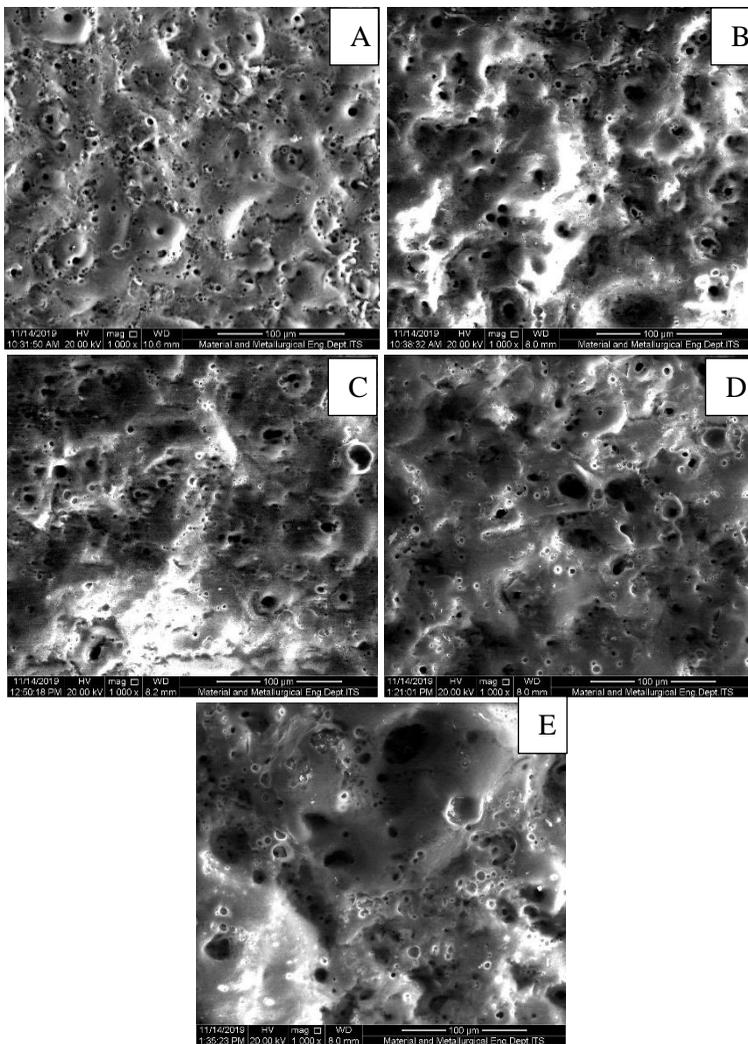


Gambar 4.6 Morfologi permukaan sampel, A) Tanpa PEO, B) PEO

Pada Gambar 4.6 bagian A merupakan morfologi sampel Ti-6Al-4V *base* (tanpa perlakuan PEO) yang sudah diampelas hingga *grade* 1000, terlihat bahwa terdapat goresan-goresan yang searah akibat proses pengampelasan pada permukaan sampel. Sedangkan pada Gambar 4.6 bagian B merupakan morfologi sampel Ti-6Al-4V dengan PEO yang memiliki 2 bentuk morfologi khas dari pelapisan menggunakan metode PEO yaitu pori-pori berukuran mikro yang ditunjukkan dengan tanda panah berwarna kuning dan juga *crater* yang ditunjukkan dengan tanda panah berwarna merah. Pori-pori merupakan jalan keluarnya logam cair dari permukaan substrat ke elektrolit akibat *micro-arc discharge* dan *crater* merupakan logam cair yang telah dingin dan terdeposit di permukaan substrat (Khorasani dkk, 2011). Adanya 2 bentuk morfologi dari PEO membuat kekasaran dari hasil pelapisan tidak merata di semua bagian sampel.

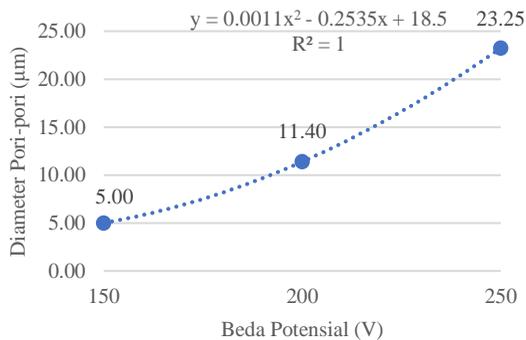
4.3.2 Morfologi Lapisan Oksida Hasil PEO

Pada Gambar 4.7 merupakan morfologi permukaan dari lapisan oksida hasil PEO dimana seluruh variasi beda potensial dan waktu oksidasi sama-sama memiliki pori-pori dan *crater* yang tersebar secara acak serta tidak ditemukannya retakan dari lapisan oksida pada seluruh variasi beda potensial dan waktu oksidasi.



Gambar 4.7 Morfologi permukaan lapisan oksida hasil PEO menggunakan SEM dengan pembesaran 1000X, A)150V-8 Menit, B)200V-4 Menit, C)200V-8 Menit, D)200V-12 Menit, E)250V-8 Menit.

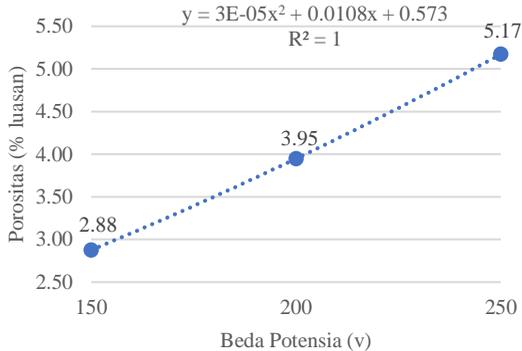
Diameter pori-pori yang dihasilkan pada setiap variasi beda potensial berbeda-beda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, terlihat bahwa peningkatan beda potensial dapat memperbesar diameter pori-pori dengan cukup signifikan, diameter pori-pori terbesar didapatkan ketika menggunakan beda potensial 250V yaitu 23.25 μ m. Namun peningkatan diameter pori-pori diiringi dengan penurunan jumlah dari pori-pori yang terbentuk yang dapat dilihat pada Gambar 4.7 bagian A,C, dan E, hal ini terjadi karena peningkatan beda potensial akan memberikan energi yang lebih banyak lalu menciptakan percikan plasma yang semakin besar dan banyak mengakibatkan pembesaran diameter pori-pori dan peningkatan jumlah lelehan substrat yang keluar dari pori-pori sehingga lelehan ini akan menutupi pori-pori kecil di sekitarnya (Teng dkk, 2016).



Gambar 4.8 Pengaruh beda potensial terhadap ukuran pori-pori lapisan oksida hasil PEO

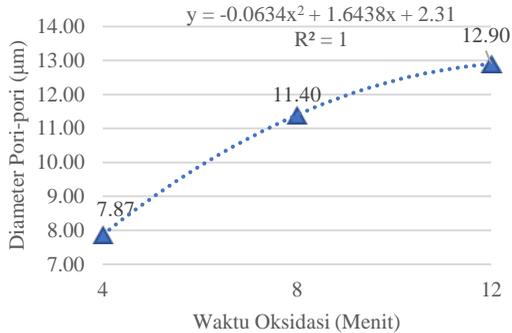
Besarnya diameter pori-pori yang terbentuk dengan bertambahnya beda potensial juga berdampak pada peningkatan porositas dari lapisan oksida yang terbentuk. Dapat dilihat pada Gambar 4.9 yang menunjukkan hasil pengukuran porositas berdasarkan rasio luasan pori, didapatkan porositas terkecil terdapat pada sampel dengan beda potensial 150V yaitu 2.88%

luasan sedangkan porositas terbesar terdapat pada sampel dengan beda potensial 250V yaitu 5.17% luasan.



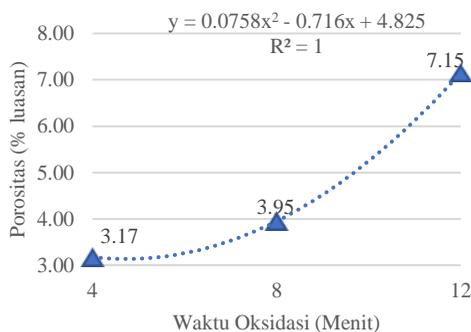
Gambar 4.9 Pengaruh beda potensial terhadap porositas lapisan oksida hasil PEO

Pengaruh peningkatan waktu oksidasi PEO juga memiliki efek yang sama dengan peningkatan beda potensial yaitu memperbesar diameter pori-pori dan menurunkan jumlah pori-pori yang terbentuk namun tidak terlalu signifikan dibanding dengan beda potensial, dapat dilihat pada Gambar 4.10 memiliki *trend* yang terus meningkat namun sedikit melandai pada waktu oksidasi PEO 12 menit yang memiliki diameter pori sebesar 12.90 μm dan hanya berbeda 1.50 μm dibanding dengan waktu oksidasi PEO 8 menit. Peningkatan diameter ini disebabkan temperatur yang tinggi di titik terjadinya percikan plasma, titik ini akan terus diselimuti oleh lelehan oksida yang dibekukan oleh elektrolit dingin, untuk memecahkan lapisan yang tebal dan rata ini memerlukan energi yang lebih besar, yang membuat pori-pori yang dihasilkan dari proses PEO pada bagian yang tertutupi lelehan oksida menjadi membesar (Jiang dkk, 2005).



Gambar 4.10 Pengaruh waktu oksidasi terhadap ukuran pori-pori lapisan oksida hasil PEO

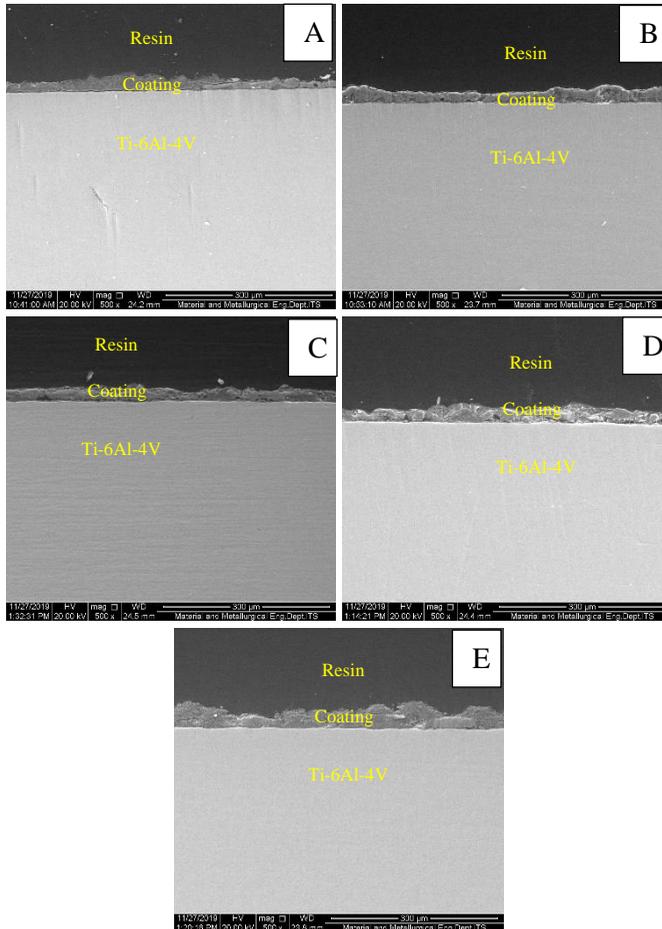
Peningkatan porositas lapisan oksida juga dapat diamati seiring dengan bertambahnya waktu oksidasi seperti pada Gambar 4.11, porositas terkecil terdapat pada sampel dengan waktu oksidasi 4 menit yaitu 3.17% luasan, sedangkan porositas terbesar terdapat pada sampel dengan waktu oksidasi 12 menit yaitu 7.15% luasan, nilai ini lebih besar 1,98% luasan dibanding dengan pengaruh beda potensial yang memiliki porositas tertinggi 5,17% luasan.



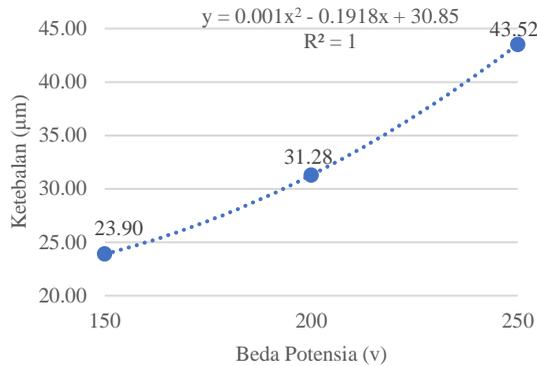
Gambar 4.11 Pengaruh waktu oksidasi terhadap porositas lapisan oksida

4.4 Ketebalan Lapisan Oksida Hasil PEO

Gambar 4.12 menunjukkan penampang melintang dari sampel Ti-6Al-4V hasil PEO dengan pengaplikasian beda potensial dan waktu oksidasi yang berbeda.



Gambar 4.12 Ketebalan lapisan oksida hasil PEO perbesaran 500X. A)150V-8 Menit, B)200V-4 Menit, C) 200V-8 Menit, D)200V-12 Menit, E)250V-8 Menit.

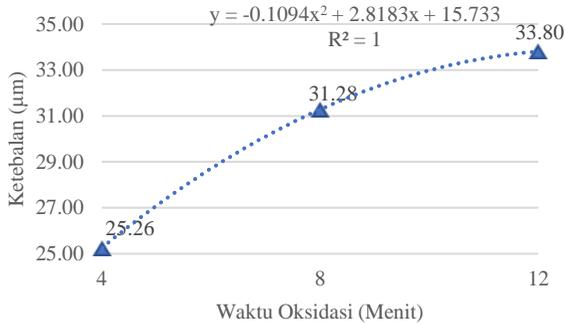


Gambar 4.13 Pengaruh beda potensial terhadap ketebalan lapisan oksida PEO

Lapisan oksida yang dibentuk dengan metode PEO memiliki ketebalan yang tidak terlalu rata yang disebabkan karena titik pembentukan *discharge channel* atau titik percikan plasma yang terjadi secara acak. Pengaruh beda potensial terhadap ketebalan lapisan oksida PEO dapat dilihat pada Gambar 4.13, terlihat bahwa ketebalan tertinggi didapat dengan pengaplikasian beda potensial 250V yaitu 43,52 µm, nilai ini 2 kali lebih besar dibandingkan dengan ketebalan yang dihasilkan beda potensial 150V. Semakin besar beda potensial yang digunakan akan mempertebal lapisan oksida yang terbentuk. Peningkatan beda potensial akan memberikan energi yang lebih banyak dan membuat semakin banyak percikan yang terjadi mengakibatkan pertumbuhan lapisan oksida semakin cepat (Teng dkk, 2016).

Ketebalan lapisan oksida yang dihasilkan juga meningkat seiring dengan peningkatan waktu oksidasi PEO dengan maksimal ketebalan sebesar 33.80 µm pada pengaplikasian waktu oksidasi tertinggi yaitu 12 menit, namun peningkatan ketebalan ini semakin berkurang dan tidak terlalu signifikan dibanding pengaruh beda potensial seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Penjelasan untuk ini adalah ketika awal pemberian arus lapisan oksida mudah sekali rusak, sehingga banyak sekali titik *discharge channel* atau

titik percikan plasma pada permukaan lapisan dan densitas arus yang sangat besar menyebabkan pertumbuhan lapisan oksida yang cepat. Pertumbuhan dari lapisan ini akan terus terjadi sampai titik maksimum yang bisa dicapai dengan kondisi elektrolit dan potensial yang konstan (Jiang dkk, 2005).



Gambar 4.14 Pengaruh waktu oksidasi terhadap ketebalan lapisan oksida PEO

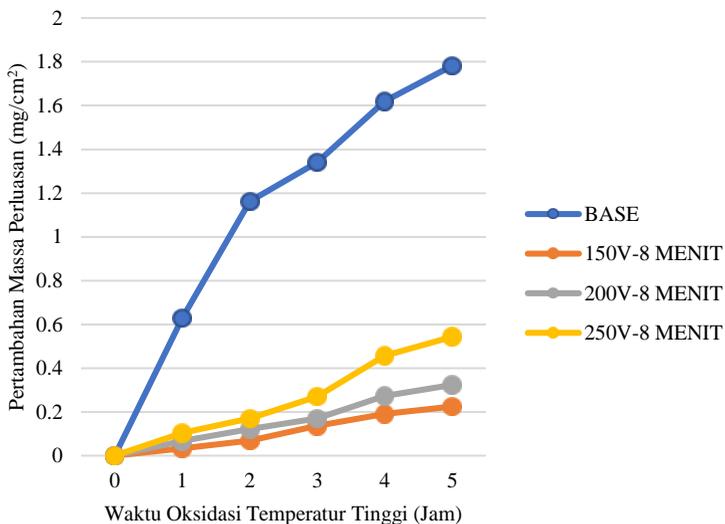
Nilai ketebalan lapisan oksida yang didapat setelah proses PEO memiliki rentang 23,90-43,52 μm , nilai ini masih termasuk kedalam rentang ketebalan standar untuk *fan blade* menurut U.S Patent (2017) yaitu 12,7-3175 μm sehingga dapat diaplikasikan untuk *fan blade* mesin pesawat.

4.5 Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi

Hasil pengujian oksidasi temperatur tinggi pada temperatur 700°C sampel hasil PEO dengan berbagai beda potensial dapat dilihat pada Gambar 4.15. Terlihat bahwa sampel *base* (tanpa PEO) memiliki pertambahan massa perluasan yang sangat tinggi pada akhir pengujian yaitu mencapai 1,78 mg/cm², sedangkan untuk sampel dengan PEO memiliki pertambahan massa perluasan yang jauh dibawah sampel *base* (tanpa PEO) yaitu 3 sampai 8 kali lebih rendah.

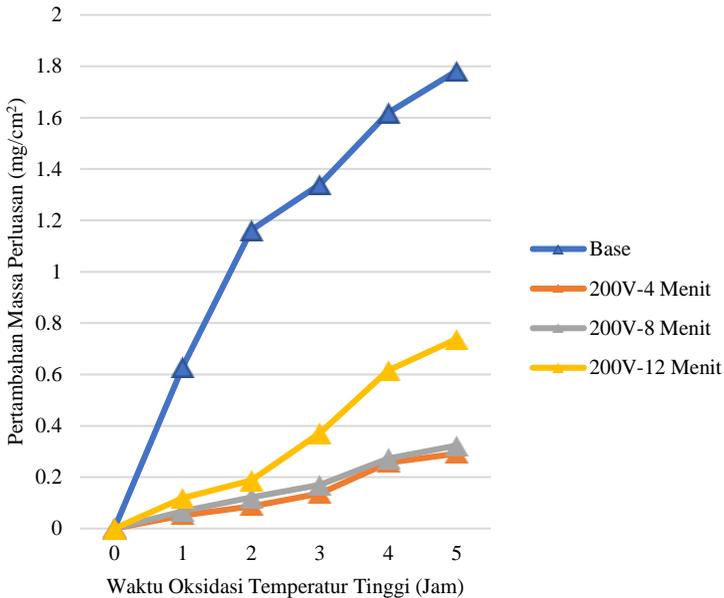
Pertambahan massa perluasan dari hasil oksidasi temperatur tinggi sampel PEO dengan variasi beda potensial 150V, 200V, dan 250V berturut-turut adalah 0,225 mg/cm², 0,323 mg/cm², dan 0,543 mg/cm². Dari data tersebut maka ketahanan oksidasi temperatur tertinggi dimiliki oleh sampel dengan beda potensial 150V sedangkan untuk ketahanan oksidasi terendah dimiliki oleh sampel dengan beda potensial 250V.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Song dkk (2017) hal ini mungkin terjadi akibat besarnya porositas dari sampel dengan beda potensial 250V yang mencapai 5,17% luasan sehingga kemungkinan oksigen untuk berdifusi dan mengoksidasi substrat lebih tinggi dibanding sampel dengan beda potensial 150V dan 200V yang memiliki porositas lebih kecil yaitu 2,88% luasan dan 3,95% luasan, walaupun fasa rutil dan ketebalan yang dimiliki oleh sampel dengan beda potensial 250V lebih tinggi dibanding sampel lainnya.



Gambar 4.15 Pengaruh beda potensial terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi (700°C) dari Ti-6Al-4V hasil PEO

Gambar 4.16 merupakan hasil pengujian oksidasi temperatur tinggi dari sampel PEO dengan variasi waktu oksidasi pada temperatur 700°C, didapatkan data pertambahan massa perluasan sampel dengan waktu oksidasi PEO 4 menit, 8 menit, dan 12 menit berturut-turut adalah 0,292 mg/cm², 0,323 mg/cm², dan 0,738 mg/cm².



Gambar 4.16 Pengaruh waktu oksidasi terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi (700°C) dari Ti-6Al-4V hasil PEO

Ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari sampel dengan waktu oksidasi 12 menit jauh lebih rendah dibanding sampel dengan waktu oksidasi PEO 4 menit dan 8 menit, tingginya pertambahan massa perluasan dari sampel dengan waktu oksidasi PEO 12 menit ini disebabkan oleh porositasnya yang 2 kali lebih besar yaitu 7,15% luasan sedangkan sampel dengan waktu oksidasi

PEO 4 menit dan 8 menit memiliki porositas sebesar 3,18% luasan dan 3,95% luasan. Sedangkan untuk sampel dengan waktu oksidasi PEO 4 menit dan 8 menit memiliki karakteristik pertambahan massa perluasan yang hampir sama hal ini mungkin terjadi akibat dari porositas yang dimiliki kedua sampel tidak berbeda jauh yaitu hanya berbeda 0,77% luasan.

Nilai ketahanan oksidasi terbaik berada pada sampel 150V-8 Menit dengan nilai pertambahan massa perluasan $0,225 \text{ mg/cm}^2$ pada temperatur 700°C selama 5 jam, nilai ini cukup kompetitif jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yaitu Zhang (2011) dengan pelapisan *hot dip galvanizing* memiliki pertambahan massa perluasan $0,5 \text{ mg/cm}^2$ pada 700°C selama 5 jam dan penelitian yang dilakukan oleh Yao (2007) dengan pelapisan PEO dengan elektrolit yang berbeda memiliki pertambahan massa perluasan 5 mg/cm^2 pada temperatur 800°C selama 5 jam, sehingga sampel 150V-8 Menit dapat dijadikan kandidat untuk pelapisan pada *fan blade* mesin pesawat.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Analisis dan pembahasan dari data yang didapatkan dalam penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengujian EDX menunjukkan bahwa lapisan oksida ini terdiri dari unsur Ti, Si, O, Al, dan Na. Peningkatan beda potensial dan waktu oksidasi akan meningkatkan diameter pori-pori, porositas, ketebalan, dan fasa rutile. Dari pengujian XRD didapati bahwa lapisan Oksida terdiri dari TiO₂ (rutile), TiO₂ (anatase), dan SiO₂ *amorphous* dengan persentase fasa rutile tertinggi sebesar 52,01%.
2. Hasil pengujian SEM menunjukkan bahwa sampel Ti-6Al-4V yang dilapisi menggunakan metode *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) memiliki ukuran diameter pori, porositas, dan ketebalan yang meningkat dengan bertambahnya beda potensial dan waktu oksidasi dengan nilai tertinggi berturut-turut adalah 23,25 μm , 7,15% luasan, dan 43,52 μm .
3. Ketahanan oksidasi temperatur tinggi terbaik dimiliki oleh sampel 150V-8 Menit dengan pertambahan massa perluasan sebesar 0,225 mg/cm², nilai ini jauh lebih kecil dibanding dengan sampel *base* (tanpa PEO) yang memiliki pertambahan massa perluasan mencapai 1,78 mg/cm² atau 8,2 kali lebih rendah dibanding dengan sampel *base* (tanpa PEO). Peningkatan beda potensial dan waktu oksidasi akan menurunkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi, hal ini terjadi karena porositas yang semakin besar akan meningkatkan kemungkinan difusi oksigen kedalam substrat dan terjadinya oksidasi substrat walaupun jumlah fasa rutile dan ketebalan meningkat.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian berikutnya:

1. Menggunakan *Power Supply* AC dalam proses PEO dengan konfigurasi frekuensi yang digunakan sehingga bisa didapatkan fasa rutile dan ketebalan yang tinggi namun dengan porositas yang rendah dan meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi.
2. Menggunakan elektrolit yang mengandung partikel Al_2O_3 untuk meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari lapisan oksida hasil PEO.
3. Menggunakan timbangan analitis digital dengan ketelitian 0,00001 gram sehingga didapatkan data pertambahan massa perluasan yang lebih akurat.
4. Melakukan penelitian lebih lanjut terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari sampel dengan PEO pada waktu *ekspose* yang lebih lama untuk mendapatkan karakteristik pertambahan massa perluasan saat oksidasi temperatur tinggi yang lebih akurat.
5. Kondisi oksigen pada saat sampel dikeluarkan dari *furnace* ketika pengujian oksidasi temperatur tinggi perlu di kontrol agar tidak mengoksidasi sampel lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM B265. 2009. **Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate**. West Conshohocken: ASTM International
- ATSB. 2001. "Examination of A Failed Fan Blade Rolls-Royce RB211 Trent 892 Turbofan Engine Boeing 777, A6-EMM". Australia: Australian Safety Transport Bureau
- Babu, Bijish. 2015. **Physically Based Model for Plasticity and Creep of Ti-6Al-4V**. Sweden: Luleå University of Technology
- Cano-Casanova, L. et al. 2018. "One Step Hydrothermal Synthesis of TiO₂ with Variable HCl Concentration: Detailed Characterization and Photocatalytic Activity in Propene Oxidation." **Applied Catalysis B: Environmental**: 645–53.
- Fuentes, Elena et al. 2019. "Advanced Surface Treatments on Titanium and Titanium Alloys Focused on Electrochemical and Physical Technologies for Biomedical Applications." In **Biomaterial-Supported Tissue Reconstruction or Regeneration**, 1-35
- Han, Jun xiang et al. 2018. "The Black and White Coatings on Ti-6Al-4V Alloy or Pure Titanium by Plasma Electrolytic Oxidation in Concentrated Silicate Electrolyte." **Applied Surface Science** 428: 684–97.
- Hanaor, Dorian A H, and Charles C Sorrell. 2011. "Review of the Anatase to Rutile Phase Transformation." **Journal of Materials Science** 46(4): 855–74.
- He, Xiaojing, Xiangyu Zhang, Xin Wang, and Lin Qin. 2017. "Review of Antibacterial Activity of Titanium-Based Implants' Surfaces Fabricated by Micro-Arc Oxidation." **Coatings**. 7(45); 1-22
- Hussein., Riyad, and Derek Northwood. 2014. "Production of Anti-Corrosion Coatings on Light Alloys (Al, Mg, Ti) by Plasma-Electrolytic Oxidation (PEO)." In **Developments in Corrosion Protection**, 11: 201-239

-
- Inagaki, I, T. Takechi, S Yoshihisa, and A Nozomu. 2014. “Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry.” **Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report**.22-27
- Jiang, Zhaohua et al. 2005. “Effect of the Oxidation Time on Properties of Ceramic Coatings Produced on Ti-6Al-4V by Micro-Arc Oxidation.” **Journal of Materials Science and Technology**. Vol. 21(2): 281-283
- Khorasanian, M. et al. 2011. “Microstructure and Wear Resistance of Oxide Coatings on Ti-6Al-4V Produced by Plasma Electrolytic Oxidation in an Inexpensive Electrolyte.” **Surface and Coatings Technology**. 206: 1495-1502
- Licentiate, T, Bijish Babu, and Babu. 2019. “Physically Based Model for Plasticity and Creep of Ti6Al4V.”
- Lin, Naiming et al. 2018. “Surface Texture-Based Surface Treatments on Ti6Al4V Titanium Alloys for Tribological and Biological Applications: A Mini Review.” **Materials**. 11(487): 1-28
- Scarpelli, Francesca, Teresa F. Mastropietro, Teresa Poerio, and Nicolas Godbert. 2018. “Mesoporous TiO₂ Thin Films: State of the Art.” In **Titanium Dioxide - Material for a Sustainable Environment**. 3: 57-80
- Song, B., M. Bai, K. T. Voisey, and T. Hussain. 2017. “Role of Oxides and Porosity on High-Temperature Oxidation of Liquid-Fueled HVOF Thermal-Sprayed Ni50Cr Coatings.” **Journal of Thermal Spray Technology** 26(3): 554–68.
- Teng, Yuan et al. 2016. “Influence of Voltage on Microstructure of Micro-Arc Oxide Films on TC4 Titanium Alloy.” In **Key Engineering Materials**, Switzerland: Trans Tech Publication. Vol. 697: 617-622
- U.S Patent. 2017. **US 9,587,645 B2**. Longueuil: Pratt & Whitney Canada Corp.
- Yan, Xiaodong, and Xiaobo Chen. 2015. “Titanium Dioxide Nanomaterials.” In Kansas City: University of Missouri.
- Yao, Zhongping, Zhaohua Jiang, Fuping Wang, and Guodong Hao.
-

-
2007. "Oxidation Behavior of Ceramic Coatings on Ti-6Al-4V by Micro-Plasma Oxidation." **Journal of Materials Processing Technology**.
- Yépez, Omar. 2018. "On the Mechanism of High Temperature Corrosion". Texas: Clariant Oil Services
- Zhang, Z.G, Peng, Y.P, Mao, Y.L, Pang, C.J, Lu, L.Y. "Effect of Hot-Dip Aluminizing on The Oxidation Resistance of Ti-6Al-4V Alloy at High Temperatures" **Corrosion Science**. 55: 187-193

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. Komposisi unsur Ti-6Al-4V

 <small>Xian Ocean Trading</small>		XIAN OCEAN TRADING CO., LTD Material Certificate ACC. TO EN 10204 - 3.1			
Commodity & Specification					
Titanium Sheet as ASTM B265-15					
Grade	Size (mm)	Quantity (kg/Pcs)	Heat No.	Lot No.	
Gr5	3.0x200x400	1.1KGS/1PCS	T8105-09	P5190824-01	
Chemical Composition (wt%)					
Element	Requirement	Top			
Al	5.5-6.75	6.24			
V	3.5-4.5	4.02			
Fe	0.40	0.182			
C	0.08	0.0110			
N	0.05	0.024			
H	0.015	0.0011			
O	0.20	0.140			
Each	0.10	0.10			
Total	0.40	0.40			
Ti	Balance	Balance			
Mechanical Property					
Items	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength(0.2% offset) (Mpa)	Elongation(4D) (%)	Reduction of area Z %	Bend Test 105 o/T
Standard	895	828	10.0	/	/
Results	935	897	15.0	/	/
Other Inspections					
Dimensional			ACCEPTABLE		
PMI Inspection			ACCEPTABLE		
NDT/NDE			ACCEPTABLE		
Surface			ACCEPTABLE		
Appearance quality			ACCEPTABLE		
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order confirmation. Inspection and dimensional control without complaints.					
Manager of Quality Department			Date: Aug,23, 2019		

B. Data JCPDS

1. Titanium (JCPDS 00-044-1294)

Date: 10/15/2019 Time: 2:39:45 PM User: Teknik Material

File: 00-000-0117

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 00-044-1294

Compound name: Titanium

Empirical formula: Ti

Chemical formula: Ti

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal

Space group: P63/mmc

Space group number: 194

a (Å): 2.5605

b (Å): 2.5605

c (Å): 4.6826

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 120.0000

Calculated density (g/cm³): 4.50

Volume of cell (10⁻⁶ cm³): 33.30

Z: 2.00

RIR: 0.90

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic

Common Phase

Explosive

Forensic

Inorganic

Star (☆)

Quality:

Comments

Color: Gray

Creation Date: 7/25/1993

Modification Date: 1/11/2011

Additional Patterns: Validated by calculated pattern. To replace 00-005-0662

Color: Gray

General Comments: Average relative standard deviation in intensity of the ten strongest reflections for three specimen mounts = 5.7%. Component of pyrotechnic

boom powders

Sample Source or Locality: Sample was obtained from A.D. Mackay Inc.

Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

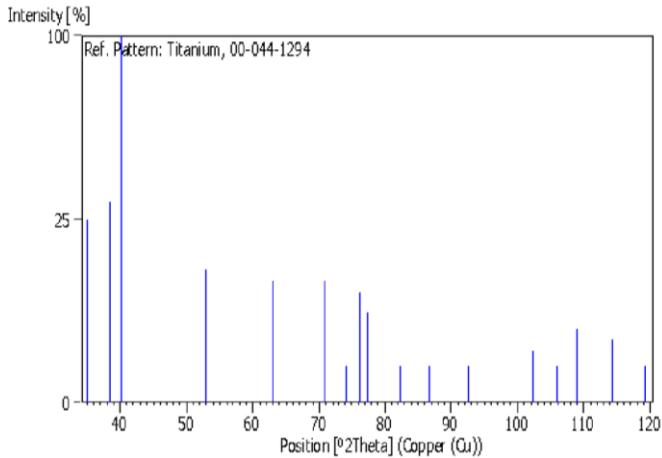
References

Primary reference: Sailer, R., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., *K2D Grant-67-442*, (1993)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ obs [deg]	I (%)
1	1	0	0	2.55300	35.094	25.0
2	0	0	2	2.34100	38.422	30.0
3	1	0	1	2.24300	40.171	100.0
4	1	0	2	1.72420	51.005	13.0
5	1	1	0	1.47530	62.951	11.0
6	1	0	3	1.33200	70.665	11.0
7	2	0	0	1.27760	74.160	1.0
8	1	1	2	1.24810	76.221	9.0
9	2	0	1	1.23240	77.370	6.0
10	0	0	4	1.17070	82.292	1.0
11	2	0	2	1.12150	86.762	1.0
12	1	0	4	1.04610	92.732	1.0
13	2	0	3	0.98860	102.172	2.0
14	2	1	0	0.93580	105.799	1.0
15	2	1	1	0.84590	109.048	4.0
16	1	1	4	0.91700	114.295	3.0
17	2	1	2	0.89280	119.263	1.0

Stick Pattern



2. TiO₂ Rutile (JCPDS 00-021-1276)

Date: 10/15/2019 Time: 2:39:02 PM User: Teknik Material

File: 00-008-0117

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 00-021-1276
 Mineral name: Rutile, syn
 Compound name: Titanium Dioxide
 Common name: Titania
 Empirical formula: O₂Ti
 Chemical formula: TiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal
 Space group: P4₂/mnm
 Space group number: 136
 a (Å): 4.5933
 b (Å): 4.5933
 c (Å): 2.9592
 Alpha (°): 90.0000
 Beta (°): 90.0000
 Gamma (°): 90.0000
 Calculated density (g/cm³): 4.25
 Measured density (g/cm³): 4.23
 Volume of cell (10⁻⁶ cm³): 62.43
 Z: 2.00
 RIR: 3.40

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
 Common Phase
 Educational pattern
 Specimen
 Forensic
 Inorganic
 Mineral

Quality: NIS pattern
Pharmaceutical
Pigment/Type
Star (5)

Comments

Color: White
Creation Date: 1/1/2020
Modification Date: 1/11/2011
Additional Patterns: Validated by calculated pattern
Analysis: No impurity over 0.031%
Color: White
General Comments: Pattern reviewed by Svirinski, W., McCarthy, G., North Dakota State Univ. Fargo, North Dakota, USA, JCOO Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns. Additional weak reflections (indicated by brackets) were observed. Naturally occurring material may be reddish brown.
Optical Data Specimen location: Optical data on specimen from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 1555
Polymorphism/Phase Transition: Two other polymorphs, analsite (tetragonal) and brookite (orthorhombic), converted to rutile on heating above 700 C
Reflectance: Opacous mineral optical data on specimen from Sweden: R08/94/2013, (Sp. 4-86). Sample Source or Locality: Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA. Temperature of Data Collection: Pattern taken at 299 K. Vickers Hardness Number: HK100=1130-1187. Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

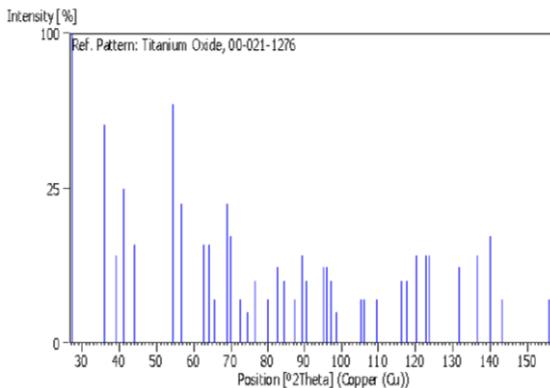
References

Primary reference: *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr.* 25 7 89, (1969)
Optical data: *Dana's System of Mineralogy*, 7th Ed., 1575

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I (%)
1	1	1	0	3.24700	27.447	100.0
2	1	0	1	2.48720	34.086	80.0
3	2	0	0	2.22970	39.188	8.0
4	1	1	1	2.18800	41.226	25.0
5	2	1	0	2.05400	44.052	10.0
6	2	1	1	1.68740	53.123	60.0
7	2	2	0	1.62370	56.442	20.0
8	0	0	2	1.47970	62.742	10.0
9	3	1	0	1.45230	64.040	10.0
10	2	2	1	1.42430	65.480	2.0
11	3	0	1	1.35980	69.010	20.0
12	1	1	2	1.34850	69.790	12.0
13	3	1	1	1.30410	73.410	2.0
14	3	2	0	1.27390	74.411	1.0
15	2	0	2	1.24410	76.510	4.0
16	2	1	2	1.20060	79.022	2.0
17	3	2	1	1.17020	82.335	6.0
18	4	0	0	1.14830	84.260	4.0
19	4	1	0	1.14330	87.464	2.0
20	2	2	2	1.05160	89.597	8.0
21	3	3	0	1.08270	90.708	4.0
22	4	1	1	1.04250	96.275	6.0
23	3	1	2	1.03660	96.017	6.0
24	4	2	0	1.02710	97.177	4.0
25	3	3	1	1.01670	98.514	1.0
26	4	2	1	0.97030	103.059	2.0
27	1	0	3	0.95490	106.109	2.0
28	1	1	3	0.94350	109.406	2.0
29	4	0	2	0.90720	116.227	4.0
30	5	1	0	0.86090	117.527	4.0
31	2	1	3	0.88920	120.059	8.0
32	4	3	1	0.87740	122.788	8.0
33	3	3	2	0.87330	123.660	8.0
34	4	2	2	0.84370	131.847	6.0
35	3	0	3	0.82920	136.549	8.0
36	5	2	1	0.81260	140.052	12.0
37	4	4	0	0.81220	143.116	2.0
38	5	3	0	0.78770	152.870	2.0

Stick Pattern



3. TiO_2 Anatase (00-021-1272)

Date: 10/15/2019 Time: 2:30:51 PM User: Teknik Material

File: 00-000-0117

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 00-021-1272
Mineral name: Anatase, syn
Compound name: Titanium Oxide
Empirical formula: O_2Ti
Chemical formula: TiO_2

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal
Space group: $I4_1/amd$
Space group number: 141
a (Å): 3.7852
b (Å): 3.7852
c (Å): 9.5139
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000
Calculated density (g/cm³): 3.89
Volume of cell (Å³ pm³): 136.31
Z: 4.00
RIR: 3.30

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Common Phase
Educational pattern
Excerpt
Forensic
Inorganic
Mineral
NBS pattern
Pharmaceutical

Quality: Pigment/ dye
Star (S)

Comments

Color: Colorless
Creation Date: 1/1/2070
Modification Date: 1/1/2211
Additional Patterns: See PDF 01-071-1166. Validated by calculated pattern
Color: Colorless
General Comments: Pattern reviewed by Holzer, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns
Polymorphism/Phase Transition: Anatase and another polymorph, brookite (orthorhombic), are converted to rutile (tetragonal) by heating above 700 C
Sample Source or Locality: Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA
Temperature of Data Collection: Pattern taken at 25°C
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

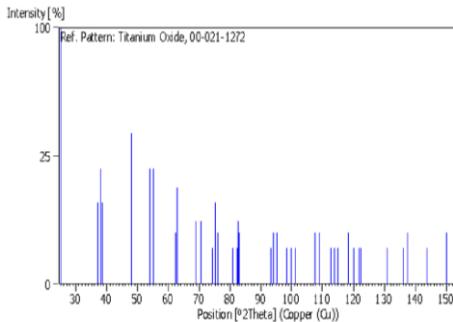
Primary reference: *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr.* 25, 7, 82, (1969)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta (deg)	I (%)
1	1	0	1	3.52000	25.294	100.0
2	1	0	3	2.49100	36.947	10.0
3	0	0	4	2.37800	37.801	20.0
4	1	1	2	2.33200	38.576	10.0
5	2	0	0	1.89200	48.050	35.0
6	1	0	5	1.69900	53.891	20.0
7	2	1	1	1.66650	55.062	20.0
8	2	1	3	1.49300	62.121	4.0
9	2	0	4	1.48000	62.690	14.0
10	1	1	6	1.39410	68.762	6.0
11	2	2	0	1.33760	70.213	6.0
12	1	0	7	1.27950	74.031	2.0
13	2	1	5	1.26490	75.032	10.0
14	3	0	1	1.20360	76.020	4.0
15	0	0	8	1.18980	80.727	2.0
16	3	0	3	1.17260	82.139	2.0
17	2	2	4	1.16640	82.662	6.0
18	3	1	2	1.16060	83.199	4.0
19	2	1	7	1.06000	93.221	2.0

20	3	0	5	1.05170	94.182	4.0
21	3	2	1	1.04360	95.143	4.0
22	1	0	9	1.01820	99.319	2.0
23	2	0	8	1.00750	99.804	2.0
24	3	2	3	0.99670	101.221	2.0
25	3	1	6	0.95550	107.448	4.0
26	4	0	0	0.94640	108.565	4.0
27	3	0	7	0.92460	112.841	2.0
28	3	2	5	0.91920	113.861	2.0
29	4	1	1	0.91380	114.909	2.0
30	2	1	9	0.89660	118.439	4.0
31	2	2	8	0.88950	120.104	2.0
32	4	1	3	0.88150	121.725	2.0
33	4	0	4	0.87990	122.336	2.0
34	4	2	0	0.84640	131.036	2.0
35	3	2	7	0.83080	135.998	2.0
36	4	1	5	0.82680	137.391	4.0
37	3	0	9	0.81020	143.888	2.0
38	4	2	4	0.79740	150.039	4.0
39	0	0	12	0.79280	152.634	2.0

Stick Pattern



4. SiO₂ amorphous (00-029-0085)

Date: 10/25/2019 Time: 2:39:12 PM User: Teknik Material

File: 00-008-0117

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 00-029-0085
Compound name: Silicon Oxide
Empirical formula: O₂Si
Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Unknown

RR: -

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Exipient
Inorganic
Pharmaceutical
Quality: Low precision (Q)

Comments

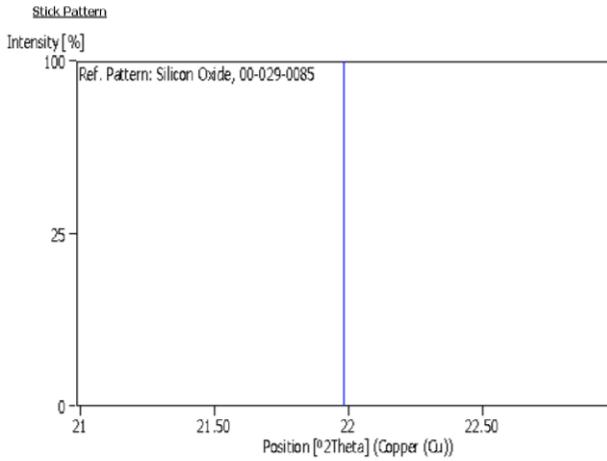
Creation Date: 1/1/1970
Modification Date: 1/1/2011
General Comments: ²⁹Si O₂ (am) (L⁺)₂O₂ O³⁺. Compositions given in weight percent of oxides. Coprecipitated mixtures, fired to 500 C. Non-crystalline phase
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

Primary reference: Brindley, G, Penn State Univ., University Park, PA, USA., JCSB Grantham-vol

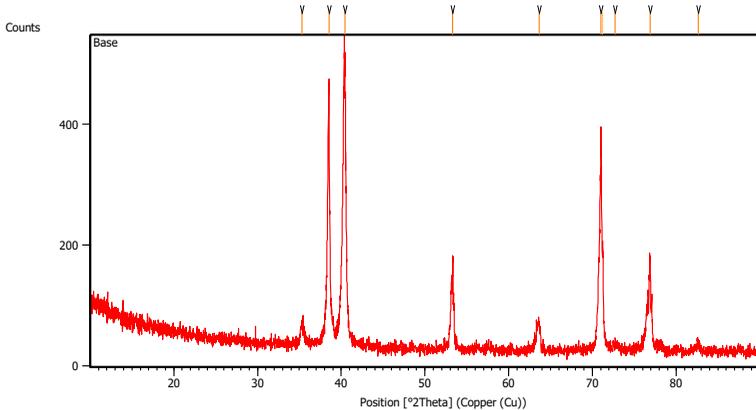
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1				4.04000	21.984	100.0



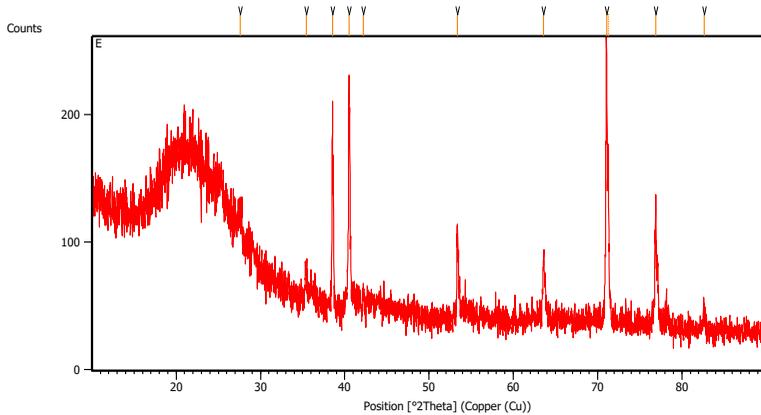
C. Hasil Pengujian XRD

1. Ti-6Al-4V Tanpa PEO (*base*)



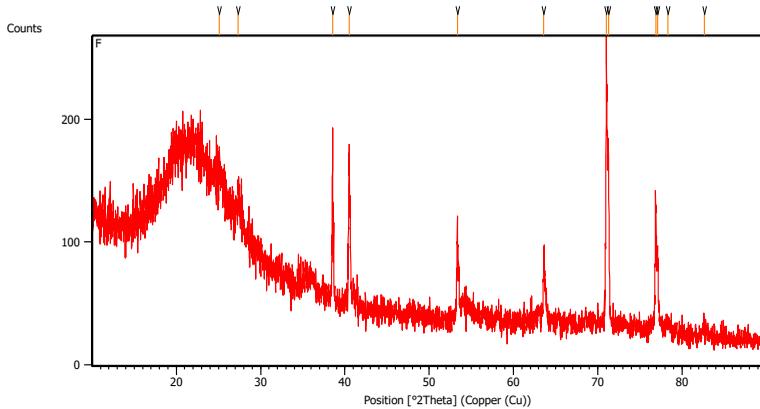
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.3238	31.51	0.4015	2.54100	6.80
38.5467	386.98	0.1338	2.33564	83.52
40.4286	463.33	0.3346	2.23115	100.00
53.3171	151.09	0.0612	1.71684	32.61
63.6681	41.62	0.5353	1.46160	8.98
71.0400	366.10	0.0816	1.32585	79.01
71.2421	168.31	0.0816	1.32587	36.32
72.7295	7.15	0.6528	1.29915	1.54
76.9066	146.80	0.1632	1.23867	31.68
82.6574	15.28	0.4896	1.16645	3.30

2. Ti-6Al-4V Hasil PEO 150V-8 Menit



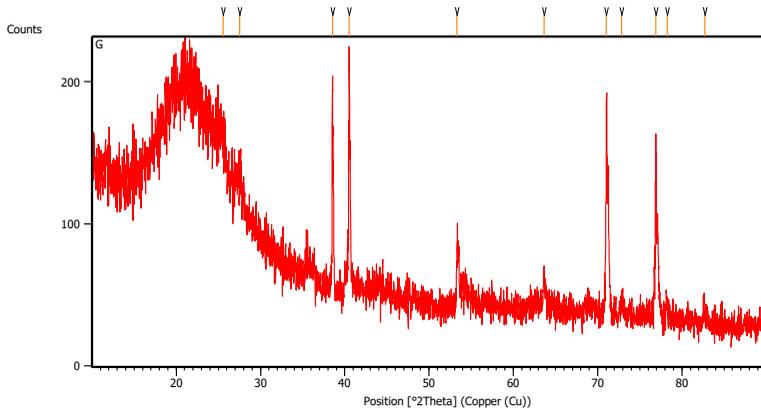
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
27.5884	14.20	0.5353	3.23332	6.41
35.4118	25.20	0.2007	2.53488	11.38
38.5340	137.21	0.1004	2.33638	61.94
40.4855	169.77	0.1004	2.22815	76.64
42.2107	10.25	0.2342	2.14099	4.63
53.3493	67.25	0.1338	1.71730	30.36
63.6078	47.59	0.1004	1.46284	21.48
71.0600	221.51	0.1632	1.32552	100.00
71.2834	120.92	0.1020	1.32520	54.59
76.9082	98.84	0.0612	1.23865	44.62
82.6720	12.86	0.3264	1.16628	5.80

3. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-4 Menit



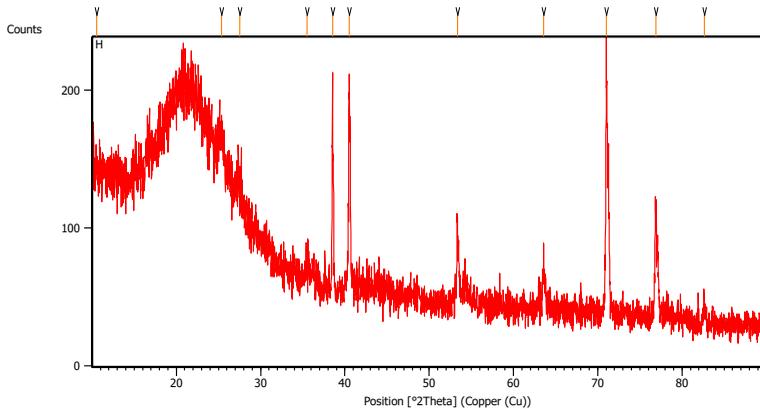
Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
25.1042	14.41	0.8029	3.54736	6.82
27.3081	19.88	0.8029	3.26586	9.40
38.5405	114.57	0.0502	2.33600	54.19
40.5079	131.28	0.0669	2.22697	62.10
53.3453	71.59	0.1004	1.71742	33.86
63.6099	50.58	0.1673	1.46280	23.92
71.0265	211.41	0.0816	1.32606	100.00
71.2755	127.94	0.1338	1.32314	60.52
76.9001	95.15	0.1020	1.23876	45.01
77.1266	60.77	0.1224	1.23568	28.75
78.3585	7.79	0.4015	1.22032	3.68
82.6696	9.14	0.5353	1.16728	4.32

4. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-8 Menit



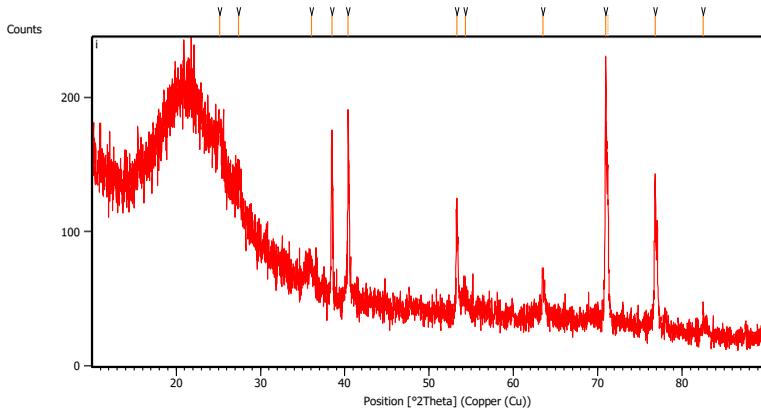
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.5894	11.63	0.6691	3.48118	7.33
27.5301	15.50	0.8029	3.24003	9.76
38.5368	151.94	0.0836	2.33622	95.67
40.5128	158.82	0.1171	2.22672	100.00
53.3312	38.25	0.1338	1.71784	24.08
63.6644	21.49	0.2676	1.46168	13.53
71.0551	148.64	0.1020	1.32560	93.59
72.8683	7.42	0.4015	1.29809	4.67
76.8839	91.08	0.0816	1.23898	57.35
78.2310	9.31	0.4015	1.22199	5.86
82.7228	9.48	0.5353	1.16666	5.97

5. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-12 Menit



Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
10.5708	0.81	0.8029	8.36913	0.45
25.3536	20.55	0.6691	3.51303	11.35
27.5118	11.48	0.5353	3.24215	6.34
35.5334	16.17	0.4015	2.52649	8.93
38.5381	161.80	0.0669	2.33614	89.35
40.4912	143.07	0.0836	2.22785	79.01
53.3348	62.46	0.1004	1.71773	34.49
63.6031	35.22	0.2342	1.46294	19.45
71.0212	181.08	0.0816	1.32615	100.00
76.8807	78.43	0.1224	1.23902	43.31
82.6765	9.68	0.3346	1.16720	5.34

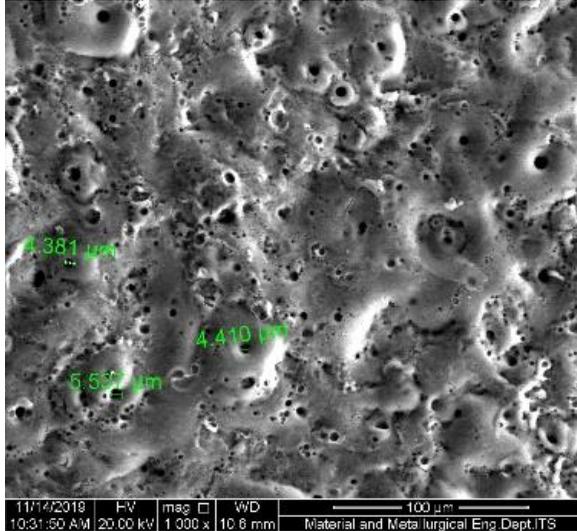
6. Ti-6Al-4V Hasil PEO 250V-8 Menit



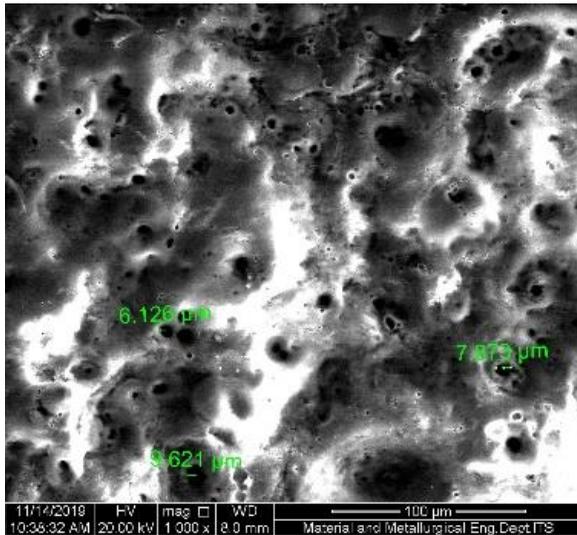
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.1681	18.00	0.8029	3.53849	9.18
27.4255	19.98	0.5353	3.25216	10.19
36.0350	12.34	0.4015	2.49246	6.29
38.4579	109.59	0.1673	2.34083	55.89
40.4035	141.76	0.0669	2.23249	72.30
53.3184	59.64	0.2007	1.71822	30.42
54.2896	15.03	0.4015	1.68976	7.67
63.4807	30.78	0.1338	1.46546	15.70
70.9695	196.07	0.1224	1.32699	100.00
71.2128	102.83	0.1224	1.32634	52.45
76.8216	114.95	0.1632	1.23983	58.62
82.5403	11.06	0.6528	1.16781	5.64

D. Perhitungan Diameter Pori-pori Lapisan Oksida Menggunakan SEM

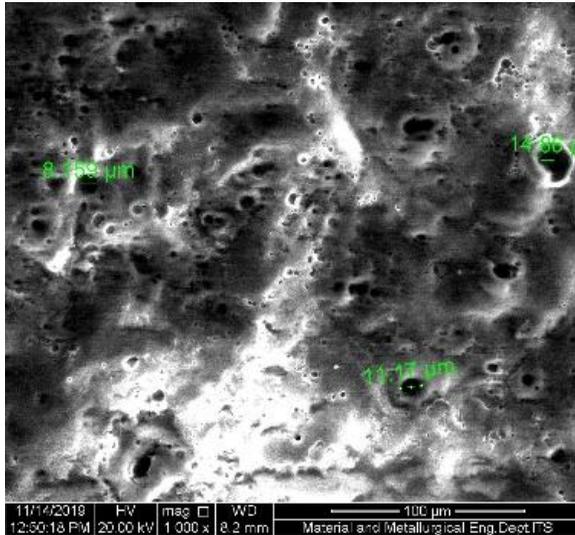
1. Ti-6Al-4V Hasil PEO 150V-8 Menit



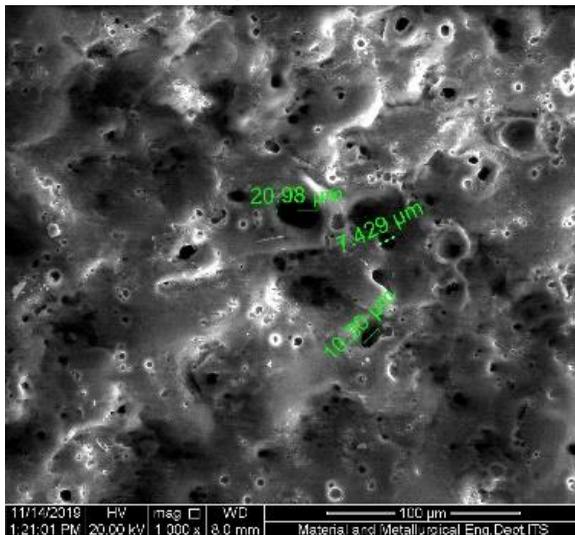
2. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-4 Menit Menit



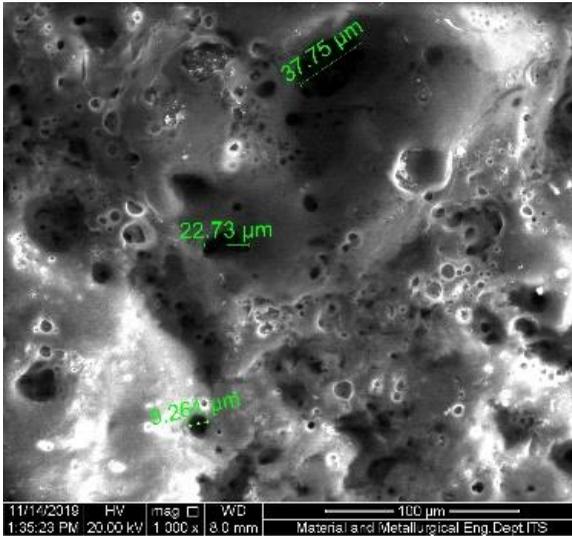
3. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-8 Menit Menit



4. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-12 Menit Menit



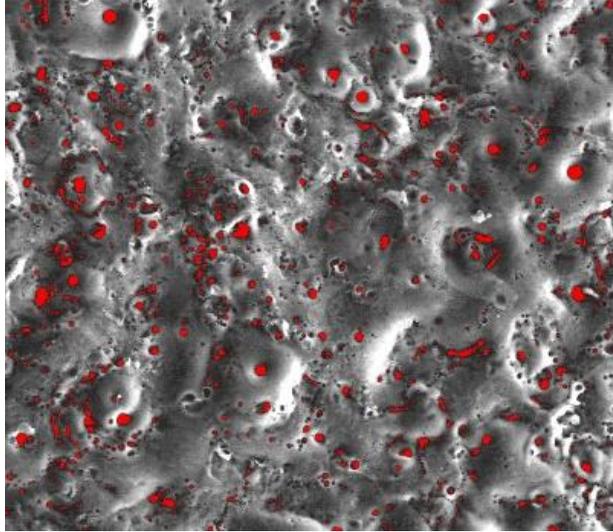
5. Ti-6Al-4V Hasil PEO 250V-8 Menit Menit



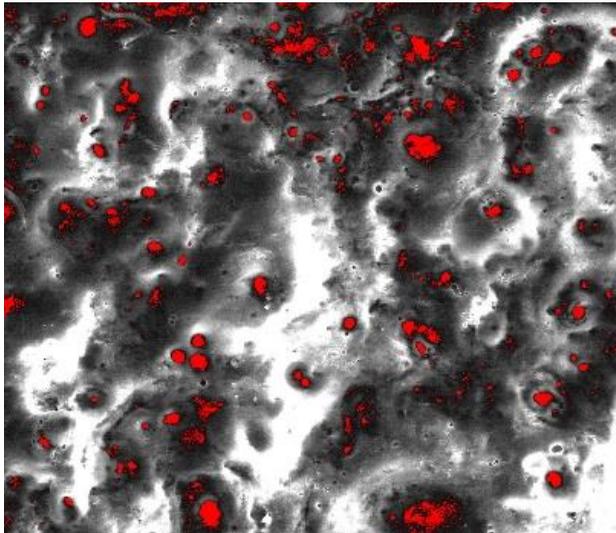
Sampel	Diameter Pori-pori (μm)			
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata
150V-8 Menit	4,410	5,537	4,381	5,00
200V-4 Menit	6,126	9,621	7,873	7,87
200V-8 Menit	8,59	14,86	11,17	11,40
200V-12 Menit	20,98	10,30	7,429	12,90
250V-8 Menit	33,75	22,73	9,261	23,25

E. Perhitungan Porositas Lapisan Oksida Menggunakan ImageJ

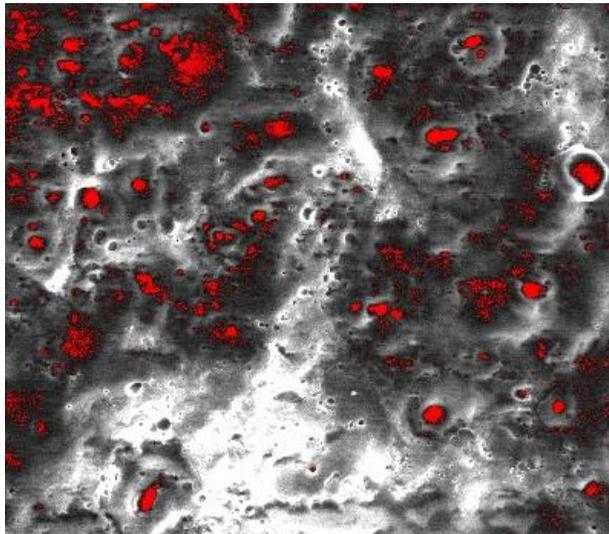
1. Ti-6Al-4V Hasil PEO 150V-8 Menit



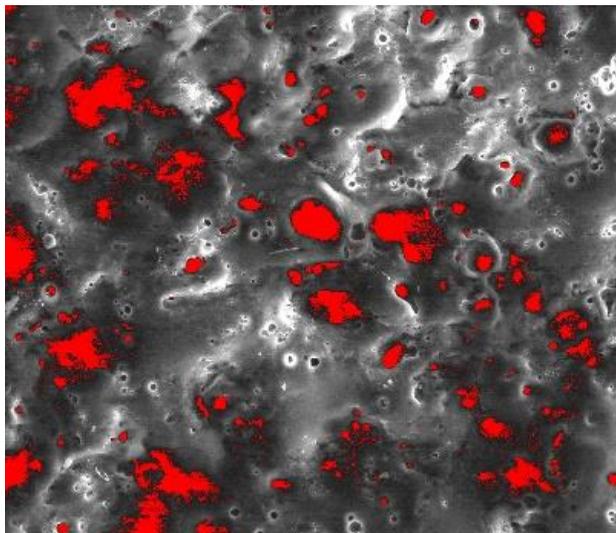
2. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-4 Menit



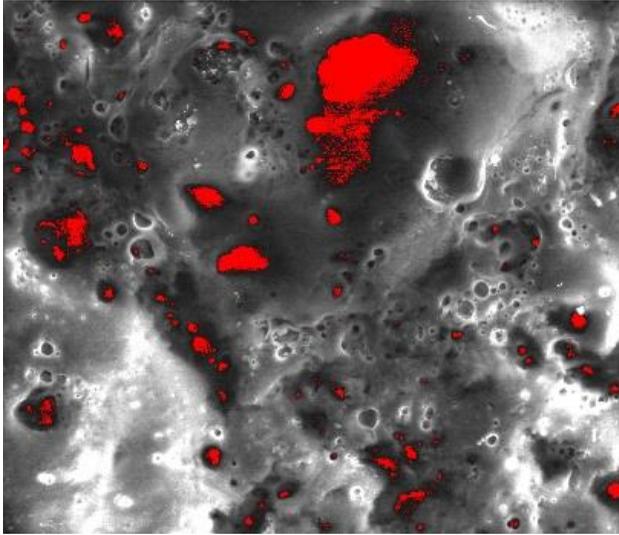
3. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-8 Menit



4. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-12 Menit

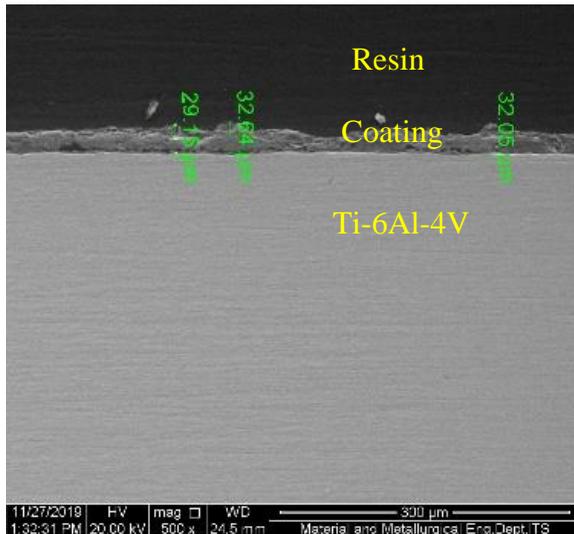


5. Ti-6Al-4V Hasil PEO 250V-8 Menit

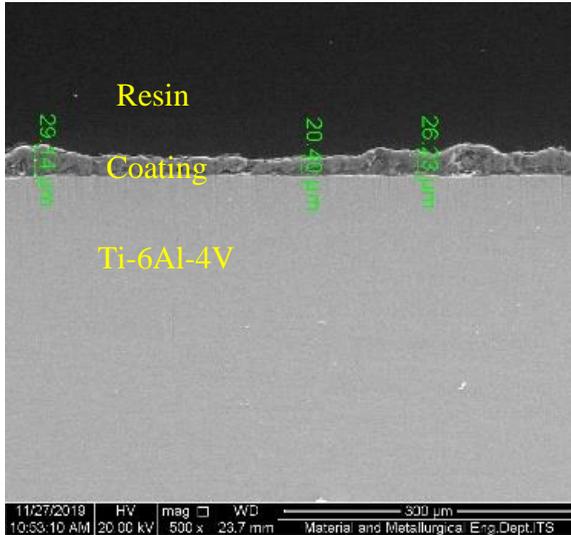


F. Perhitungan Ketebalan Lapisan Oksida Menggunakan SEM

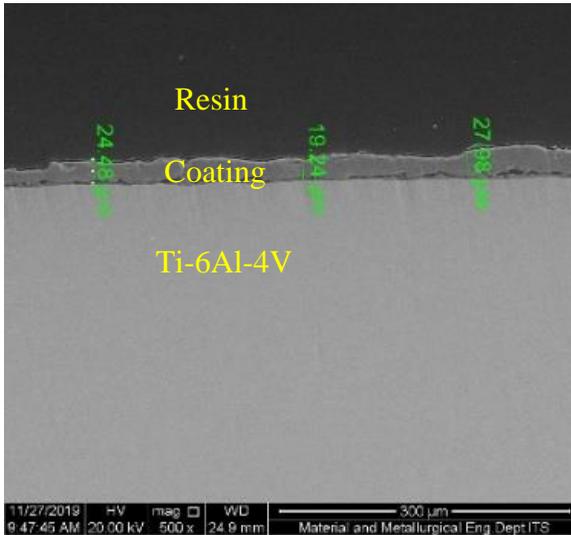
1. Ti-6Al-4V Hasil PEO 150V-8 Menit



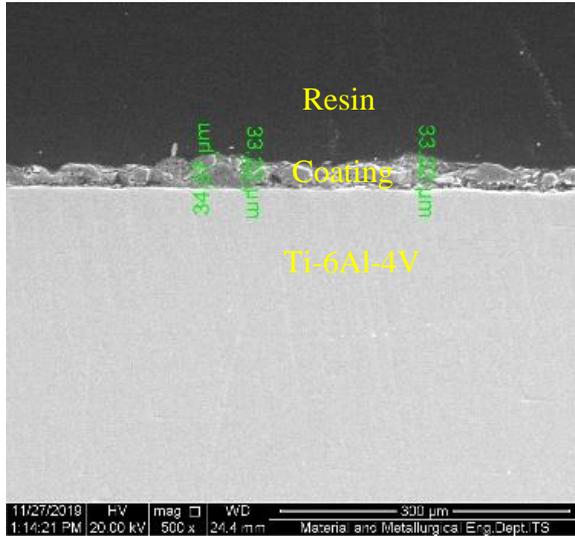
2. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-4 Menit



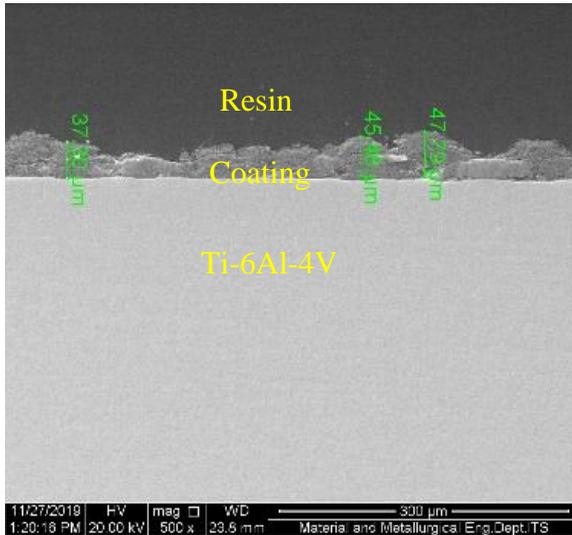
3. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-8 Menit



4. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-12 Menit



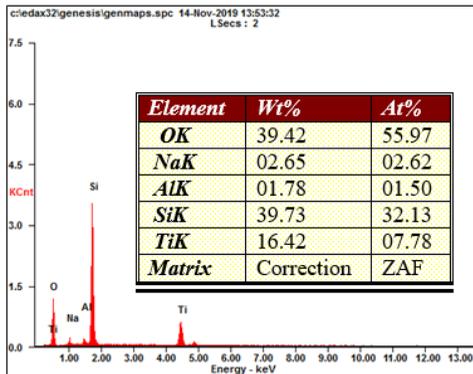
5. Ti-6Al-4V Hasil PEO 250V-8 Menit



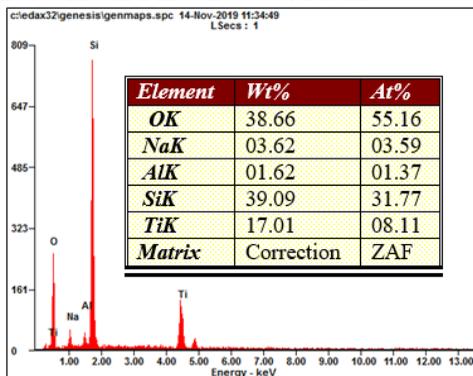
Sampel	Ketebalan Lapisan Oksida (μm)			
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata
150V-8 Menit	24,48	19,24	27,98	23,90
200V-4 Menit	29,14	20,4	26,23	25,26
200V-8 Menit	29,15	32,64	32,05	31,28
200V-12 Menit	34,97	33,22	33,22	33,80
250V-8 Menit	37,3	45,46	47,79	43,52

G. Hasil Pengujian EDX Komposisi

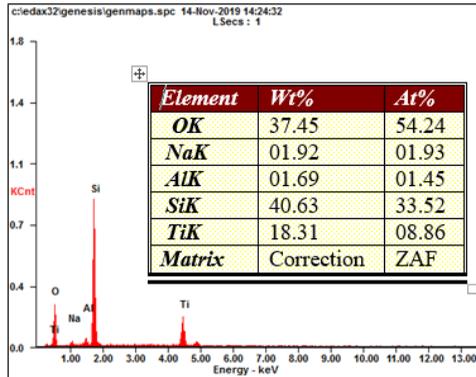
1. Ti-6Al-4V Hasil PEO 150V-8 Menit



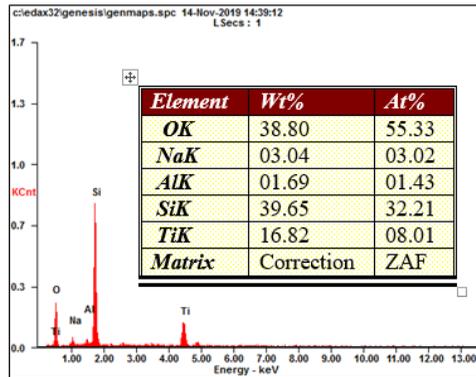
2. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-4 Menit



3. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-12 Menit

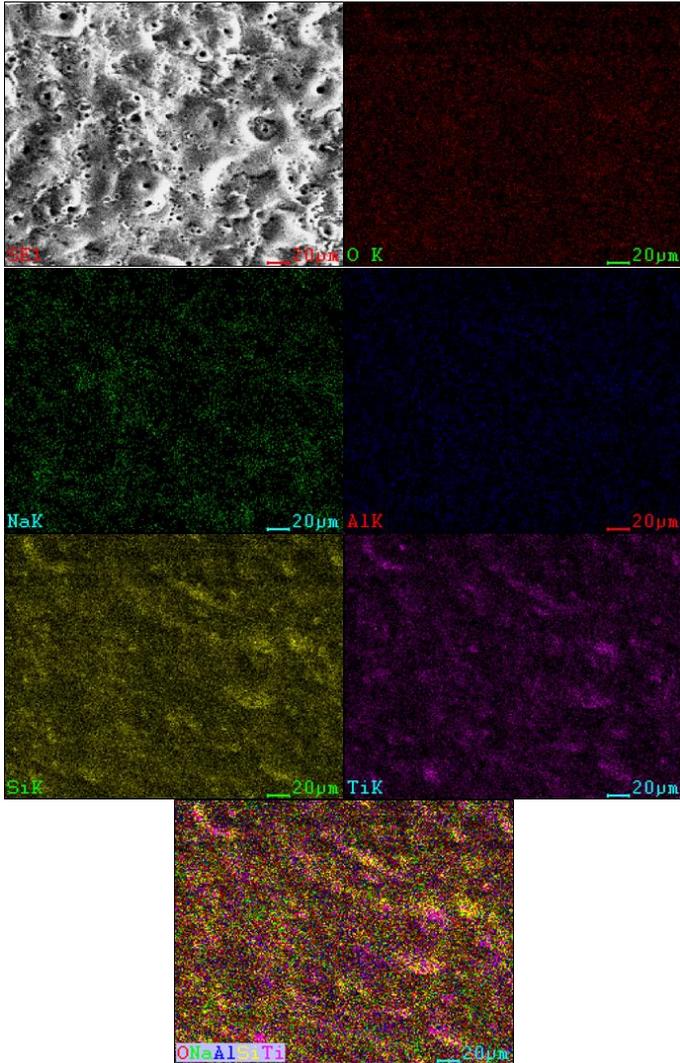


4. Ti-6Al-4V Hasil PEO 250V-12 Menit

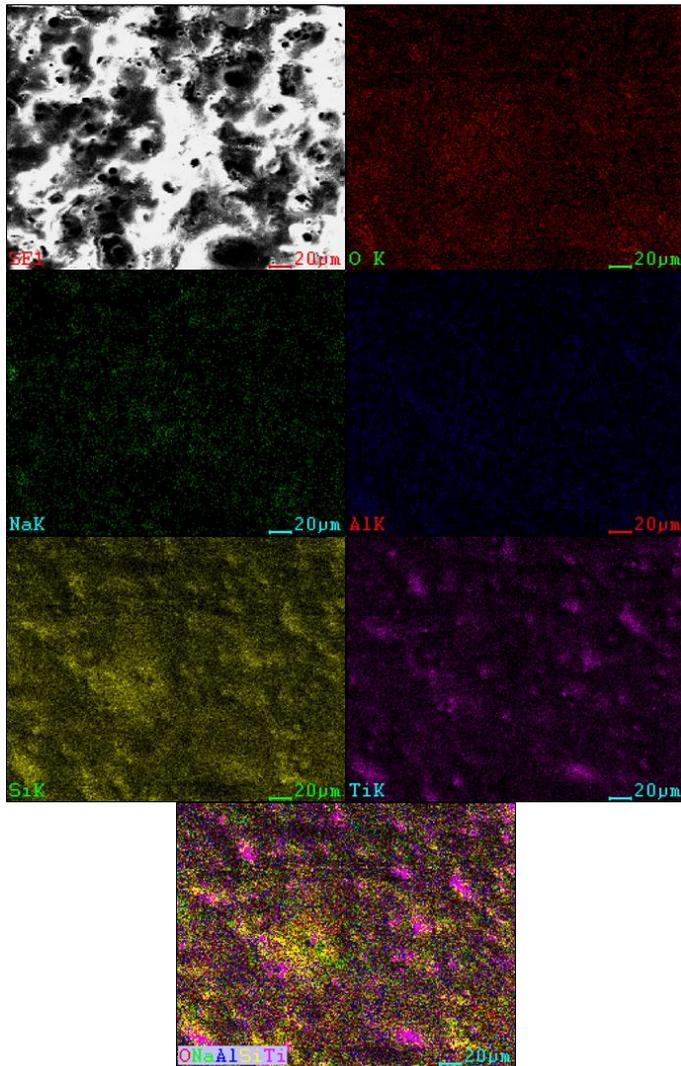


H. Hasil Pengujian EDX *Element Mapping*

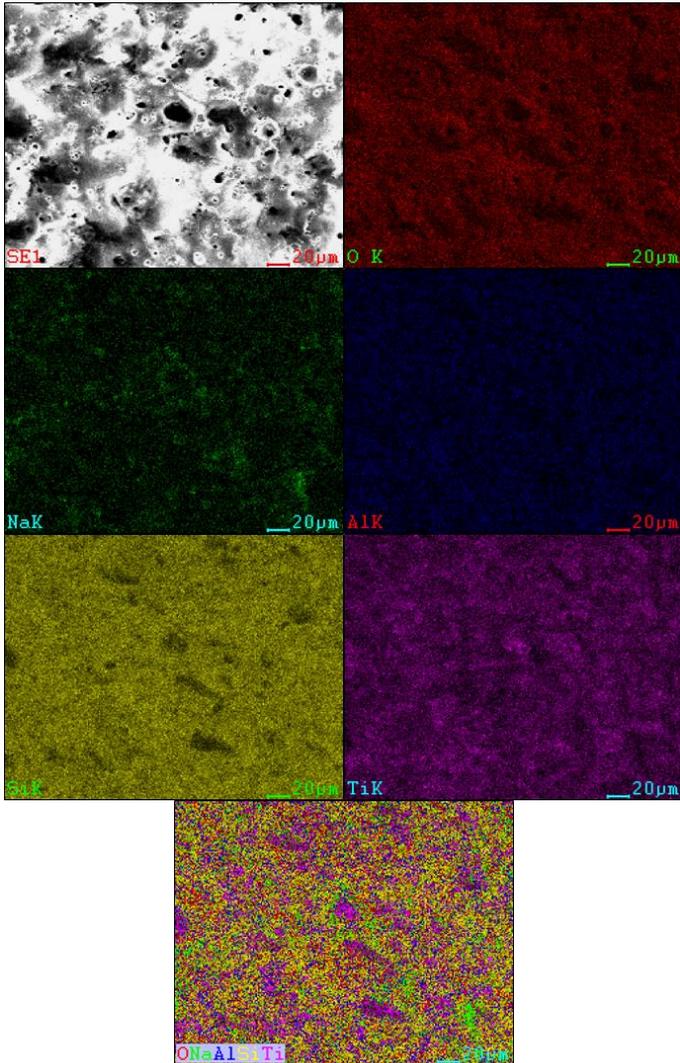
1. Ti-6Al-4V Hasil PEO 150V-8 Menit



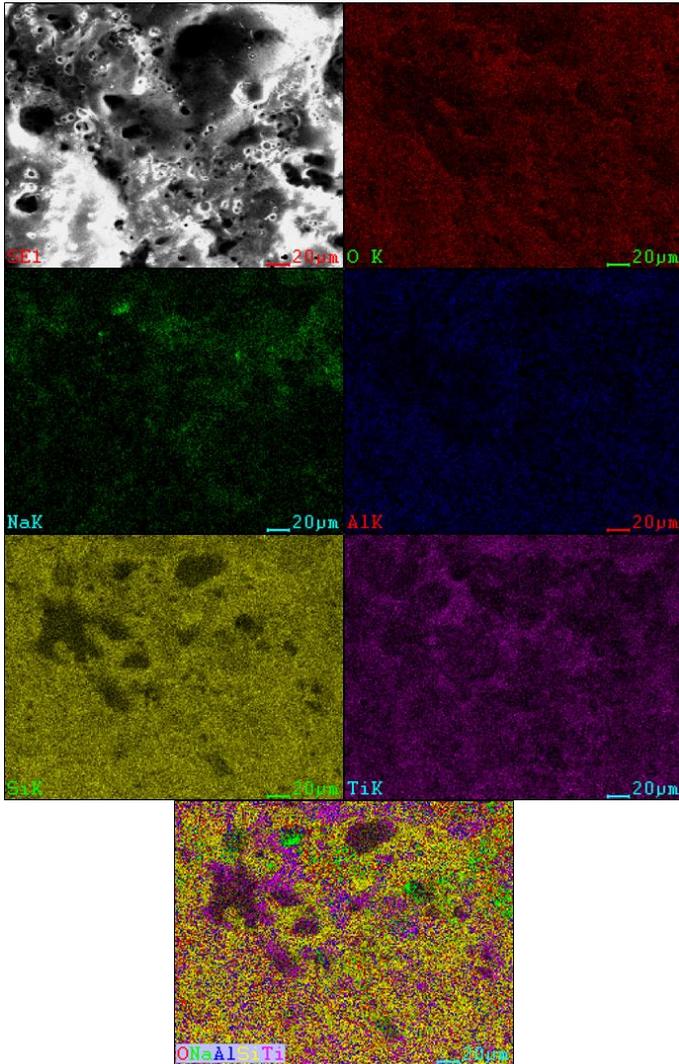
2. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-4 Menit



3. Ti-6Al-4V Hasil PEO 200V-12 Menit

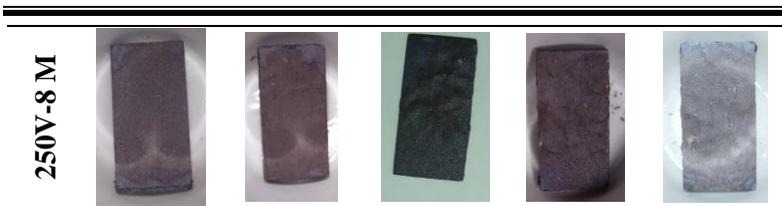


4. Ti-6Al-4V Hasil PEO 250V-8 Menit



I. Hasil Pengujian Oksidasi Temperatur Tinggi

Sa m pel	Lama Waktu Oksidasi Temperatur 700°C (jam)				
	1	2	3	4	5
BASE					
150V-8M					
200V-4 M					
200V-8 M					
200V-12 M					



J. Perhitungan Pertambahan Massa Perluasan Pengujian Oksidasi Temperatur Tinggi

1. Oksidasi Temperatur Tinggi Selama 1 jam

Sampel	Rata-rata Dimensi (cm)			Luas (cm ²)	Massa (g)			Pertambahan massa perluasan (mg/cm ²)
	Panjang	Lebar	Tinggi		Sebelum	Sesudah	Perubahan	
Base	19.87	9.85	3.037	571.96	2.6017	2.6053	0.0036	6.29E-01
150V-8 Menit	19.87	10	3.16	585.98	2.653	2.6532	0.0002	3.41E-02
200V-4 Menit	19.98	9.97	3.12	585.56	2.6514	2.6517	0.0003	5.12E-02
200V-8 Menit	20.10	10.04	3.14	592.05	2.6619	2.6623	0.0004	6.76E-02
200V-12 Menit	19.97	9.96	3.18	587.87	2.6656	2.6663	0.0007	1.19E-01
250V-8 Menit	19.80	9.88	3.10	575.2	2.582	2.5826	0.0006	1.04E-01

2. Oksidasi Temperatur Tinggi Selama 2 Jam

Sampel	Rata-rata Dimensi (cm)			Luas (cm ²)	Massa (g)			Pertambahan massa perluasan (mg/cm ²)
	Panjang	Lebar	Tinggi		Sebelum	Sesudah	Perubahan	
Base	19.78	9.85	3.00	567.58	13.8095	13.8161	0.0066	1.16E+00
150V-8 Menit	19.89	9.98	3.11	582.75	13.1439	13.1443	0.0004	6.86E-02
200V-4 Menit	19.85	9.94	3.10	579.25	12.8263	12.8268	0.0005	8.63E-02
200V-8 Menit	19.82	9.88	3.11	576.44	13.4011	13.4018	0.0007	1.21E-01
200V-12 Menit	19.86	10.00	3.14	584.72	13.9696	13.9707	0.0011	1.88E-01
250V-8 Menit	20.06	9.97	3.15	589.45	13.6082	13.6092	0.001	1.70E-01

3. Oksidasi temperatur tinggi selama 3 jam

Sampel	Rata-rata Dimensi (cm)			Luas (cm ²)	Massa (g)			Pertambahan massa perluasan (mg/cm ²)
	Panjang	Lebar	Tinggi		Sebelum	Sesudah	Perubahan	
Base	19.90	9.91	3.02	574.60	2.5928	2.6005	0.0077	1.34E+00
150V-8 Menit	19.92	9.99	3.11	584.31	13.1494	13.1502	0.0008	1.37E-01
200V-4 Menit	19.98	9.98	3.16	588.01	12.8992	12.9	0.0008	1.36E-01

200V- 8 Menit	20.01	9.95	3.16	587.4 8	13.485 7	13.486 7	0.001	1.70E-01
200V- 12 Menit	20.06	10.0 5	3.14	592.1 6	13.956 4	13.958 6	0.0022	3.72E-01
250V- 8 Menit	20.07	10.0 4	3.16	593.2 5	13.595 3	13.596 9	0.0016	2.70E-01

4. Oksidasi Temperatur Tinggi Selama 4 Jam

Sampel	Rata-rata Dimensi (cm)			Luas (cm ²)	Massa (g)			Pertambahan massa perluasan (mg/cm ²)
	Panjang	Lebar	Tinggi		Sebelum	Sesudah	Perubahan	
Base	20.04	9.98	3.10	586.4 1	13.833 9	13.843 4	0.0095	1.62E+00
150V- 8 Menit	19.88	9.91	3.06	576.2 2	13.140 3	13.141 4	0.0011	1.91E-01
200V- 4 Menit	19.96	9.98	3.11	585.0 7	12.883	12.884 5	0.0015	2.56E-01
200V- 8 Menit	19.91	10.0 4	3.11	586.1 9	13.47	13.471 6	0.0016	2.73E-01
200V- 12 Menit	19.98	9.98	3.10	584.5 5	13.960 5	13.964 1	0.0036	6.16E-01
250V- 8 Menit	20.03	10.0 6	3.13	591.7 2	13.578 6	13.581 3	0.0027	4.56E-01

5. Oksidasi Temperatur Tinggi Selama 5 Jam

Sampel	Rata-rata Dimensi (cm)			Luas (cm ²)	Massa (g)			Pertambahan massa perluasan (mg/cm ²)
	Panjang	Lebar	Tinggi		Sebelum	Sesudah	Perubahan	
Base	19.18	9.88	3.03	555.53	2.5235	2.5334	0.0099	1.78E+00
150V-8 Menit	19.88	9.92	3.09	578.78	13.0969	13.0982	0.0013	2.25E-01
200V-4 Menit	19.94	9.95	3.11	582.85	12.8674	12.8691	0.0017	2.92E-01
200V-8 Menit	19.96	9.99	3.15	587.77	13.4768	13.4787	0.0019	3.23E-01
200V-12 Menit	19.93	9.94	3.12	582.49	13.9526	13.9569	0.0043	7.38E-01
250V-8 Menit	19.98	10.07	3.11	589.27	13.5603	13.5635	0.0032	5.43E-01

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu, antara lain:

1. Kedua orang tua, adik-adik, dan eyang saya yang senantiasa mendoakan, memotivasi dan mendukung penulis baik secara moril maupun materil.
2. Mahasiswa Teknik Material angkatan 2016 (MT18) selaku angkatan penulis yang selalu memotivasi dan membantu.
3. UKM Merpati Putih ITS selaku wadah berlatih silat dan berkeluh kesah.
4. Triska Ferawati selaku kekasih penulis yang selalu memberikan banyak dukungan dan semangat selama mengerjakan tugas akhir.
5. Bayu Murti Wicaksono selaku *partner* dalam mengerjakan tugas akhir.
6. Mas Alfreda, Mas Ihsan, Mas Rafiandy, Mas Wahyu, Mas Fikri, Mas Bagus, Mas Putro, Mas Diaz, Mba Firdos dan senior-senior penulis lainnya yang turut membantu dalam penyusunan tugas akhir.
7. Teman-teman penghuni Laboratorium Kimia Material (Ipul, Alvia, Laras, Kristin, Azarine, Wor, Dayyan, Gatra, Elvira, Riska, Ade, Fadel Omar, Adit, Fajar dan Oneng), Pengolahan Material dan Mineral (Kepin, Henokh, Fira, Ticil, Om sat, Nanda, Arif, Rizki, Iqbal, Erik, Mahanaim dan Tetty) dan Manufaktur (Monge, Aden, Om yog, Beggy, Ghozy, Ryan dan Yuli) yang selalu menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
8. Anggota kontrakan Om Jess & C5 (Ari, Agoy, Na'il, Nanda, Nopal, Garry, Bayu, Ucup, Aden, dan Fajar) selaku teman setempat tinggal penulis selama 2 tahun di Surabaya.
9. Dan seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam penulisan Laporan Tugas Akhir ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Tangerang, 12 Desember 1998 dengan orang tua bernama dr. Yosi Garniwa, MM dan Diannita Tri Listyani, SE. Penulis memiliki tiga adik laki-laki. Hobi penulis adalah jalan-jalan dan menonton anime. Penulis pernah menuntut ilmu di SD Negeri 1 Sirnabaya (2004-2010), SMP Negeri 2 Ciamis (2010-2013), SMA Negeri 1 Ciamis (2013-2016) dan Perguruan Tinggi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) tahun (2016-2020). Selama perkuliahan penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Fisika Material (2018), Asisten Laboratorium Korosi dan Kegagalan Material (2018-2019), dan Ketua Departemen Sumber Daya Anggota UKM Merpati Putih ITS (2017-2018). Pengalaman kerja praktik yang pernah dilakukan penulis yaitu di PT. Pertamina (Persero) *Refinery Unit IV Cilacap* pada divisi *Stationary & Statutory Inspection Engineer*. Saat ini penulis tinggal di Perum Sapphire Residence Blok C No.6, Sindangrasa, Ciamis, Jawa Barat. Penulis dapat dihubungi melalui *email* mahesaangarasakti@gmail.com atau nomor *handphone* 082331234347.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)