



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - 141584

**PENGARUH WAKTU OKSIDASI TERHADAP
MORFOLOGI DAN KEKERASAN LAPISAN Al_2O_3
PADA ALUMINIUM 2024 MENGGUNAKAN
METODE *PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION***

IRVAN KAISAR RENALDI
0251144000043

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

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TL141584

PENGARUH WAKTU OKSIDASI TERHADAP MORFOLOGI DAN KEKERASAN LAPISAN Al_2O_3 PADA ALUMINIUM 2024 MENGGUNAKAN METODE *PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION*

Irvan Kaisar Renaldi
NRP 0251144000043

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

Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(Halaman Ini Sengaja di Kosongkan)



FINAL PROJECT-TL141584

**THE EFFECT OF OXIDATION TIME TO MORPHOLOGY
AND HARDNESS OF Al_2O_3 COATING OF ALUMINIUM
2024 BY PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION
METHOD**

Irvan Kaisar Renaldi
NRP 0251144000043

Advisor:

Dr. Ir. Agung Purniawan, S.T., M.Eng
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T

Department of Material Engineering
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

(This Page is Left Intentionally Blank)

**PENGARUH WAKTU OKSIDASI TERHADAP
MORFOLOGI DAN KEKERASAN LAPISAN Al_2O_3
PADA ALUMINIUM 2024 MENGGUNAKAN
METODE *PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada
Bidang Studi Metalurgi dan Manufaktur
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: -

IRVAN KAISAR RENALDI
NRP. 0251144000043

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

Dr. Ir. Agung Purniawan, S.T., M.Eng (Pembimbing I)

Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T (Pembimbing II)



(Halaman Ini Sengaja di Kosongkan)

PENGARUH WAKTU OKSIDASI TERHADAP MORFOLOGI DAN KEKERASAN LAPISAN Al_2O_3 PADA ALUMINIUM 2024 MENGGUNAKAN METODE *PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION*

Nama : Irvan Kaisar Renaldi
NRP : 0251144000043
Pembimbing : Dr. Ir. Agung Purniawan, S.T., M.Eng
Co-Pembimbing : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T

ABSTRAK

Penggunaan logam ringan, seperti paduan aluminium mulai meningkat dalam berbagai bidang, penggunaan aluminium untuk kebutuhan material struktural sendiri secara perlahan aluminium mulai menggantikan baja dalam banyak penggunaan, tetapi karena sifat aluminium yang tidak sekuat baja perlu diberikan perlakuan untuk meningkatkan sifatnya, salah satunya *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO), PEO merupakan jenis rekayasa permukaan seperti anodising, hanya saja menggunakan tegangan yang lebih besar dan lebih ramah lingkungan. Pada penelitian kali ini dilakukan penelitian pengaruh waktu terhadap morfologi lapisan alumina substrat aluminium 2024 yang dilakukan proses PEO sehingga dapat dianalisa pengaruh waktu terhadap morfologi dan kekerasan dari lapisan substrat aluminium 2024. PEO yang dilakukan dengan variabel waktu 10 menit hingga 40 menit menggunakan tegangan 260V DC, dan di dapat rapat arus sebesar $151 - 303\text{mA/cm}^2$. Pada karakterisasi yang dilakukan dengan menggunakan SEM didapat struktur *crater* dan struktur *nodular* dimana struktur *crater* akan semakin membesar dengan semakin lamanya waktu PEO serta pada hasil EDX dengan semakin lamanya waktu oksidasi didapatkan komposisi aluminium oksida yang semakin tinggi, pada karakterisasi XRD yang dilakukan semakin lamanya waktu oksidasi PEO akan menghasilkan fasa γ - Al_2O_3 dan mullite. Dengan terbentuknya lapisan alumina

menghasilkan kekerasan yang tinggi mencapai 896,2 HV untuk proses PEO dengan waktu oksidasi 40 menit.

Kata Kunci : *Plasma Electrolytic Oxidation, Micro Arc Oxidation, Waktu Oksidasi, Aluminium 2024*

**THE EFFECT OF OXIDATION TIME TO MORPHOLOGY
AND HARDNESS OF AL₂O₃ COATING OF ALUMINIUM
2024 BY PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION
METHOD**

Name : Irvan Kaisar Renaldi
NRP : 02511440000043
Advisor : Dr. Ir. Agung Purniawan, S.T., M.Eng
Co-Advisor : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T

ABSTRACT

The usage of light alloys, such as aluminium alloys tend to increase in various sectors, the usage of aluminium for structural material itself gradually replacing steel in many sectors, due to the weakness of aluminium itself there were some treatment to increase its mechanical and other properties, such as Plasma Electrolytic Oxidation (PEO), PEO is a type of surface engineering similar to anodizing but the voltage employed is much higher and also more environmentally friendly. In this research there was investigated the effect of oxidation time to the morphology and hardness of alumina layer from aluminium 2024 substrate with PEO process, so it could be analyzed the effect of oxidation time to morphology and hardness of alumina layer. The PEO process was varied from 10 minutes until 40 minutes using voltage of 260V DC and current density ranged from 151 to 303mA/cm². The SEM characterization resulted in nodular structure and crater-like structure that increasing by the longer time of oxidation time, also EDX shows the composition of aluminium oxide was increasing by the longer time of oxidation time, the XRD characterization resulted in the longer oxidation time of PEO treatment resulted in dominant Al₂O₃ and mullite phase. With the alumina layer formed will generate high hardness reach up to 896.2 HV for PEO process with 40 minutes oxidation time.

Keywords : Plasma Electrolytic Oxidation, *Micro Arc Oxidation*, Alumina Layer, Oxidation Time, Aluminium 2024

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena Rahmat dan Hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul ***“PENGARUH WAKTU OKSIDASI TERHADAP MORFOLOGI DAN KEKERASAN LAPISAN Al_2O_3 PADA ALUMINIUM 2024 MENGGUNAKAN METODE PLASMA ELECTROLYTIC OXIDATION”***.

Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Departemen Teknik Material FTI – Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

- Allah Subhanahu Wata'ala, atas agama Rahmat-Nya sehingga saya dapat mendapat hidayah untuk tetap tegak menjadi hamba-Nya dan semoga saya selalu dipilih *agar* mudah mengamalkan agama-Nya yang sempurna
- Ayah-Ibu, orang tua tercinta, atas jasa–jasanya yang tak terhingga dalam mendidik dan membesarkan saya.
- Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng dan Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T sebagai dosen pembimbing yang sangat saya hormati. Terima kasih atas segala bimbingan, masukan, dan saran yang bapak berikan.
- Bapak-bapak dan Ibu-ibu dosen Departemen Teknik Material yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.
- Staf Laboratorium Korosi dan Analisa Kegagalan serta Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material FTI-ITS.
- Staf Laboratorium Konversi Energi Departemen Teknik Elektro ITS.
- Juga kepada seluruh teman – teman seperjuanganku MT-16, terima kasih karena sudah saling membantu, berjuang bersama-sama.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena adanya keterbatasan kemampuan penulis. Namun demikian, penulis dapat mewujudkan laporan ini secara lengkap berkat adanya perhatian, bimbingan, dan petunjuk dari berbagai pihak.

Pastinya dalam penulisan laporan ini masih terdapat kekurangan dan kesalahan. Untuk itu, saran dan kritik yang konstruktif sangat diharapkan.

Demikian penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya khususnya bagi sesama mahasiswa yang menggeluti bidang metalurgi dan manufaktur.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Desember 2017

Penulis

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 Masalah 1
1.2	Perumusan Masalah 2
1.3	Batasan Masalah..... 3
1.4	Tujuan Penelitian 3
1.5	Manfaat Penelitian 3
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA
2.1	Aluminium..... 5
2.1.1	Aluminium Untuk Dirgantara 6
2.1.2	Alumina 8
2.2	Rekayasa Permukaan 9
2.3	Anodising..... 10
2.3.1	Pembentukan Lapisan Anoda..... 11
2.3.3	Proses Anodising 13
2.4	<i>Plasma Electrolytic Oxidation</i> 15
2.4.1	Keuntungan Proses PEO..... 16
2.5	Fundamental dan Mekanisme PEO..... 17
2.5.1	Fenomena Pertumbuhan Lapisan..... 18
2.5.2	Reaksi Kimia dan Elektrokimia..... 21
2.6	Properti Lapisan PEO..... 22
2.6.1	Sifat Mekanik 23
2.6.2	Sifat Tahan Aus 24
2.7	Parameter Proses PEO dan Penelitian Sebelumnya..... 24
2.7.1	Efek Elektrolit 24
2.7.2	Pengaruh Komposisi Paduan 26

2.7.3	Pengaruh Waktu	27
BAB III	METODOLOGI	
3.1	Diagram Alir	29
3.2	Metode Penelitian	30
3.3	Tabel Rancangan Penelitian	31
3.4	Preparasi Sampel dan Larutan Elektrolit	31
3.5	Proses PEO	33
3.6	Karakterisasi dan Pengujian	34
3.6.1	Karakterisasi SEM/EDX	34
3.6.2	Karakterisasi XRD	35
3.6	Pengujian Kekerasan <i>Microhardness</i> Vickers	37
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1	Analisa Morfologi	39
4.2	Analisa Fasa	53
4.3	Analisa Kekerasan	56
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1	Kesimpulan	63
5.2	Saran	63
	Daftar Pustaka	xxi
	Lampiran	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Aluminium dan Unsur Paduannya.....	6
Gambar 2.2	Urutan Umum Proses Anodising	13
Gambar 2.3	Skema Proses PEO.....	15
Gambar 2.4	Respon Tegangan – Waktu pada Proses PEO..	18
Gambar 2.5	Skema Pembentukan Struktur Lapisan Pada PEO	19
Gambar 2.6	Morfologi Permukaan Aluminium Hasil PEO Menggunakan SEM.....	20
Gambar 2.7	Diagram Pourbaix Aluminium.	21
Gambar 2.8	Potongan Melintang Lapisan PEO pada SEM..	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	29
Gambar 3.2	<i>Coupon</i> Aluminium Ukuran 2,5 X 1,5 X 0,3 cm	32
Gambar 3.3	<i>Set-Up</i> Proses PEO Skala Laboratorium	34
Gambar 3.4	Mesin SEM FEI Inspect S50.....	34
Gambar 3.5	Mesin XRD Xper Pro Panalytical.....	35
Gambar 3.6	Alat Uji <i>Microhardness</i> Vickers.....	37
Gambar 4.1	Hasil SEM Perbesaran 250X (a) <i>Base Metal</i> (b)Substrat <i>Treatment</i> PEO.....	39
Gambar 4.2	Hasil EDX Pada (a) Base Metal Al2024 (b)Substrat Hasil <i>Treatment</i> PEO	41
Gambar 4.3	Hasil Perbesaran SEM 250X Pada (a)PEO 10 Menit (b)PEO 20 Menit (c)PEO 30 Menit (d)PEO 40 Menit.....	42
Gambar 4.4	Hasil SEM Perbesaran 1000X (a)PEO 10 Menit (b)PEO 20 Menit (c)PEO 30 Menit (d)PEO 40 Menit	45
Gambar 4.5	<i>Spot</i> EDX Pada PEO 40 Menit di Bagian Lembah	47
Gambar 4.6	Hasil <i>Mapping</i> Pada PEO 40 Menit	49
Gambar 4.7	Hasil <i>Mapping</i> Unsur Silikon Pada PEO 20 Menit	50
Gambar 4.8	Grafik EDX Pada PEO 20 Menit	51

Gambar 4.9	Respon Waktu – Voltase Pada Proses PEO.....	52
Gambar 4.10	Hasil Uji XRD.....	53
Gambar 4.11	Grafik Hasil Uji <i>Microhardness</i> Vickers.....	57
Gambar 4.12	Perbesaran Mikroskop 50X pada Substrat PEO58	
Gambar 4.13	Grafik Distribusi Kekerasan Dari Pusat <i>Dicharge</i>	59
Gambar 4.14	Diagonal Indentasi <i>Base Metal</i>	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat Fisik dan Mekanik Alumina.....	9
Tabel 2.2	Proses Anodising Aluminium dan Paduannya	14
Tabel 2.3	Perbandingan PEO dengan Anodising	17
Tabel 2.4	Variasi Waktu dan Paduan pada Ketebalan hasil proses PEO.....	27
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian	31
Tabel 3.2	Komposisi Kimia Aluminium 2024	32
Tabel 4.1	Hasil EDX Pada <i>Spot</i> Lembah.....	48
Tabel 4.2	Hasil Uji Kekerasan.....	56
Tabel 4.3	Distribusi Kekerasan Permukaan.....	59

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISTILAH

Al	= Aluminium
Al2024	= Aluminium Seri 2024
Al ³⁺	= Ion Aluminium
Al ₂ O ₃	= Alumina
α-Al ₂ O ₃	= Alpha Alumina
γ-Al ₂ O ₃	= Gamma Alumina
Crater	= Bentuk Berlubang
DC	= Direct Current
Discharge	= Pelepasan
EDX	= Energy Dispersive X-Ray
FCC	= Kubus Pemusatan Sisi
HV	= Kekerasan Vickers
GPa	= Gigapascal
KOH	= Potasium Hidroksida
MAO	= Microarc Oxidation
Mapping	= Pemetaan unsure pada SEM
Mullite	= Al ₂ O ₃ ·SiO ₂
Na ₂ SiO ₃	= Sodium Metasilikat
Nodular	= Bentuk Kebulatan
PEO	= Plasma Electrolytic Oxidation
SEM	= Scanning Electron Microscope
Spark	= Percikan
XRD	= X-Ray Diffraction

(Halaman Ini Sengaja di Kosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Penggunaan logam ringan, seperti paduan aluminium dan magnesium mulai meningkat dalam bidang - bidang yang berbeda seperti alat elektronik, alat teknik serta industri dirgantara, penggunaan logam ini dibutuhkan karena sifatnya yang mudah untuk di manufaktur, perbandingan kekuatan dan berat yang tinggi serta densitas yang rendah jika dibandingkan dengan logam lainnya seperti baja (Walsh dkk, 2009) hal ini juga didasari kebutuhan untuk mengurangi berat peralatan – peralatan di berbagai sektor industri telah mendorong para insinyur menjadi lebih kreatif dalam pemilihan material (Campo dkk, 2009).

Salah satu kebutuhan struktural yang membutuhkan sifat yang ringan adalah untuk aplikasi satelit, dimana pada umumnya satelit menggunakan material aluminium, pada aplikasi satelit sendiri dibutuhkan sifat mekanik yang tinggi untuk dapat bertahan pada kondisi ekstrim serta gesekan dan tabrakan dengan benda luar angkasa sehingga dibutuhkan peningkatan sifat mekanik pada komponen satelit. Untuk meningkatkan sifat – sifat mekanik maupun peningkatan sifat lainnya, sering dilakukan perlakuan – perlakuan lanjutan tertentu untuk aluminium (Mukesh dkk, 2014). Salah satunya adalah rekayasa permukaan aluminium sebagai *finishing* dari manufaktur aluminium struktural yang membutuhkan sifat mekanik yang tinggi. Dari jenis *finishing* pada proses manufaktur aluminium struktural banyak jenis untuk *finishing* permukaan yang tersedia, seperti pelapisan konversi (*conversion coating*), pelapisan cat, pelapisan logam dan komposit serta pelapisan serbuk salah satunya juga anodising. Anodising menyediakan hasil pelapisan yang esensial dengan menghasilkan lapisan oksida tipis yang memperbaiki sifat konduktivitas listrik, ketahanan korosi dan ketahanan aus serta

memungkinkan untuk dapat merubah warna dan tekstur dari permukaan untuk estetika dari produk (Walsh dkk, 2009).

Dalam waktu yang lama anodising telah digunakan untuk menghasilkan lapisan oksida, akan tetapi karena lapisan oksida tipis yang ada di permukaan, anodising memiliki batas umur dan kelekatan oksidanya pada substrat (Mukesh dkk, 2014). Sebuah proses rekayasa permukaan relatif baru, *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) merupakan suatu jenis rekayasa permukaan seperti anodising, spesimen yang dicelupkan di dalam larutan elektrolit selanjutnya dengan tegangan dan arus yang dialirkan pada katoda dan anoda dari rangkaian anodising (Vahid dkk, 2015). Akan tetapi PEO menghasilkan rekayasa permukaan yang lebih baik, diantaranya ketebalan lapisan oksida yang lebih tebal, lapisan oksida yang lebih keras dan lapisan oksida yang padat (Mukesh dkk., 2014) juga PEO lebih ramah terhadap lingkungan (Vahid dkk, 2015). Penggunaan *plasma electrolytic oxidation* sendiri telah digunakan sekitar 40 tahun yang lalu untuk pesawat luar angkasa Soviet (Markov dkk, 1976) hingga saat ini teknologi PEO ini terus dikembangkan untuk menghasilkan aplikasi antariksa, satelit, dan transportasi luar angkasa dengan sifat yang lebih baik (Shresta dan Dunn, 2010).

Penelitian ini bertujuan untuk membentuk lapisan alumina (Al_2O_3) pada aluminium dengan metode *plasma electrolytic oxidation* (PEO) untuk aplikasi dirgantara yang selanjutnya dikarakterisasi strukturnya melalui uji komposisi dan fasa serta mikrostrukturnya menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Selanjutnya kekerasan mikro lapisan akan diuji dengan tes indentasi Vickers.

1.2. Perumusan Masalah

Beberapa permasalahan yang dibahas dan dirumuskan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

-
1. Bagaimana pengaruh lama waktu oksidasi proses *plasma electrolytic oxidation* terhadap morfologi lapisan permukaan logam aluminium 2024?
 2. Bagaimana pengaruh lama waktu oksidasi proses *plasma electrolytic oxidation* terhadap kekerasan lapisan permukaan logam aluminium 2024?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini agar penelitian yang dilakukan menjadi lebih terarah adalah sebagai berikut:

1. Komposisi aluminium di seluruh permukaan dianggap sama rata.
2. Voltase selama proses meningkat linear kemudian setelah stabil voltase dianggap konstan.
3. Selama proses berlangsung temperatur dianggap selalu kurang dari 50 °C

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh lama waktu oksidasi proses *plasma electrolytic oxidation* terhadap morfologi lapisan permukaan logam aluminium 2024.
2. Menganalisa pengaruh lama waktu oksidasi proses *plasma electrolytic oxidation* terhadap kekerasan lapisan permukaan logam aluminium 2024.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

-
1. Dapat dijadikan referensi dalam metoda rekayasa permukaan untuk pembentukan lapisan oksida keramik pada aluminium untuk aplikasi material struktur pada satelit.
 2. Dapat dijadikan referensi untuk metoda *plasma electrolytic oxidation* (PEO) lain dengan variasi lama waktu oksidasi.
 3. Hasil penelitian ini dapat dijadikan informasi yang saling melengkapi dan komprehensif dengan hasil penelitian – penelitian sebelumnya terkait rekayasa permukaan dengan metoda *plasma electrolytic oxidation* (PEO).

BAB II

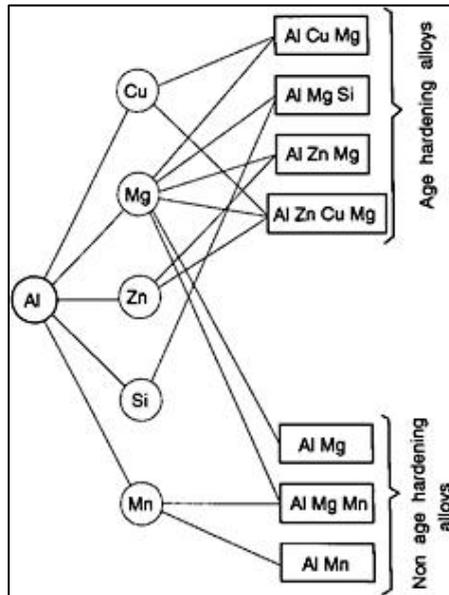
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Aluminium

Aluminium adalah salah satu logam yang banyak digunakan dalam memenuhi kebutuhan sehari – hari dari manusia mulai dari skala rumah tangga hingga industri. Salah satu industri yang tentunya melibatkan banyak konsumsi bahan berdasarkan aluminium adalah pesawat terbang yang tentunya terkait dengan sifat aluminium yang ringan sehingga cocok untuk kebutuhan transportasi udara (Kaisar, 2017). Aluminium sendiri merupakan salah satu logam dengan simbol Al pada tabel periodik unsur dengan nomor atom 13. Biasanya logam Al ditemukan dalam warna putih keperakan dengan sifatnya yang lembut dan ulet. Aluminium dalam kondisi naturalnya di alam biasanya akan berikatan dengan banyak unsur lain membentuk suatu mineral, namun mineral yang dominan untuk keberadaan dari aluminium adalah bauxite. Aluminium memiliki struktur Kristal FCC (*Face Centered Cubic*) dengan radius sepanjang 143 pm (Kissell, 2000)

Aluminium juga sangat identik sebagai logam dengan densitas yang sangat rendah memiliki ketahanan korosi yang baik diakibatkan oleh fenomena pasivasi pada permukaannya ketika terpapar kondisi atmosferik. Aluminium (Al) mempunyai massa atom 27 (hanya ada satu isotop natural), densitas $2,79 \text{ g/cm}^3$, titik lebur $660,4 \text{ }^\circ\text{C}$, dan titik didih $2467 \text{ }^\circ\text{C}$. Mengingat sifatnya yang lunak dan ulet pada kondisi logamnya, maka aluminium pada tahap aplikasi digunakan sebagai paduan dengan menambahkan beberapa unsur pepadu untuk kemudian meningkatkan sifat fisiknya demi mendukung fungsi tertentu.

Dari gambar 2.1 menjelaskan bagan pembagian paduan aluminium berdasarkan unsur pepadunya, dimana dengan unsur pepadu yang paling dominan menentukan seri berapa paduan aluminium tersebut. Sebagai contoh dengan pepadu utama tembaga menjadikan aluminium seri 2



Gambar 2.1 Aluminium dan Unsur Paduannya. (Kissell, 2010)

Aluminium memiliki sifat yang reaktif terhadap lingkungan, sehingga aluminium memiliki lapisan Aluminium Oksida (Al_2O_3) yang merupakan lapisan pasif yang dapat berperan sebagai pelindung dari fenomena korosi (Kissell, 2000).

2.1.1 Aluminium Untuk Dirgantara

Begitu pesawat dan satelit berada di luar angkasa, ia harus mempertahankan fungsinya dalam kondisi gravitasi dan lapisan atmosfer rendah, di mana bahan komponennya akan memiliki berat yang jauh lebih rendah dibanding ketika berada di bumi. Variasi kekuatan gravitasi dan atmosfer ini berarti bahwa bahan yang digunakan harus sangat serbaguna dan “unik” dalam integritasnya. Struktur juga harus bisa menahan tekanan kabin yang berasal dari dalam satelit. Pada Stasiun Luar Angkasa Internasional, oksigen di dalamnya dapat memberikan tekanan

hingga 15 lbs per inci pada struktur permukaan. Ketika material yang digunakan terutama untuk struktur *body* dan *armor* tidak cukup kuat untuk menahan tekanan sebesar 15 lbs per inch dapat menyebabkan kebocoran, yang mengganggu fungsi komponen lain dan mengancam kehidupan setiap penumpang.

Bahaya lain yang perlu dipertimbangkan untuk aplikasi *aerospace* adalah gesekan udara dengan kecepatan tinggi dan jumlah proyektil yang akan bersentuhan dengan strukturnya. Sampai saat ini, pecahan peluru satelit buatan lama yang sudah tidak berfungsi masih mengorbit di sekitar bumi saat ini sebagai sampah luar angkasa. Potongan logam berkecepatan tinggi tersebut bisa menghancurkan satelit yang masih berfungsi jika material yang digunakan tidak cukup kuat untuk menahan abrasi dari udara dan proyektil tersebut. (Anil dan Varsha, 2014).

Saat meluncurkan objek ke orbit bumi merupakan proyek dengan biaya mahal, sehingga selain kriteria bahan yang memenuhi juga perlu dipertimbangkan secara ekonomis. Kondisi ini yang mengakibatkan aluminium masih menjadi pilihan utama selain material inovatif seperti komposit. Rekayasa komposisi maupun struktur masih terus dilakukan untuk aluminium. Paduan aluminium tembaga (seri 2xxx) dan paduan aluminium – zinc (seri 7xxx) adalah paduan utama yang digunakan dalam aplikasi *aerospace*.

Paduan Aluminium-Tembaga (seri 2xxx)

Golongan paduan aluminium seri 2 merupakan paduan aluminium dengan unsur pepadu dominan adalah tembaga. Paduan ini memerlukan proses perlakuan panas untuk menghasilkan paduan dengan sifat mekanik yang optimum. Paduan golongan ini sulit melalui pengerjaan dingin kecuali pada kondisi *annealed*. Ketahanan korosinya relatif rendah sehingga memerlukan perlindungan tambahan serta relatif sulit untuk dilas. Aplikasi paduan ini adalah untuk badan pesawat terbang (Kissell, 2000)

Paduan Aluminium-Seng (seri 7xxx)

Paduan aluminium seri 7 adalah paduan dengan unsur padu dapat berupa seng dan magnesium namun terkadang juga ditambahkan tembaga. Paduan ini merupakan paduan dengan kekuatan terbaik sejauh pengembangan paduan aluminium. Kandungan seng dan magnesium membuat paduan ini dapat diperkuat melalui perlakuan panas. Walaupun memiliki kekuatan yang tinggi, pembuatan paduan ini relatif sulit dan memerlukan teknologi yang baik sehingga hanya digunakan untuk aplikasi tertentu salah satunya adalah kebutuhan militer (Kissell, 2000). Aplikasi kekuatan yang tinggi dibutuhkan pada kerangka dan *armor* satelit. Selain keperluan kekuatan yang tinggi, material untuk aplikasi body dan armor harus memiliki ketahanan abrasi yang tinggi. Ketika mengudara dengan kecepatan tinggi, *body* dan *armor* akan mengalami gesekan besar dengan udara maupun benda angkasa, sehingga rekayasa lanjut perlu dilakukan (Anil dan Varsha, 2014).

2.1.2 Alumina

Alumina (Al_2O_3) atau aluminium oksida adalah satu-satunya oksida yang terbentuk oleh logam aluminium dan terbentuk di alam dalam bentuk mineral korundum (Al_2O_3); *diaspore* ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$); *gibbsite* ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) dan yang paling umum sebagai bauksit, yang merupakan bentuk tidak murni dari *gibbsite*.

Alumina adalah salah satu keramik yang digunakan untuk aplikasi pada temperatur tinggi. Alumina memiliki struktur yang keras, abrasif, inert, ketahanan aus yang baik, dan penahan korosi yang sangat baik (Karaoglanli dkk., 2011). Sifat fisik dan mekanik alumina ditunjukkan oleh tabel 2.1

Beberapa sifat fisik dan mekanik dari alumina disajikan pada tabel 2.1 dimana jika dilihat alumina memiliki sifat mekanik yang sangat tinggi seperti kekerasan yang sangat tinggi, modulus elastisitas yang tinggi serta ketahanan terhadap temperatur tinggi.

Tabel 2.1 Sifat Fisik dan Mekanik Alumina (Auerkari, 1996)

Sifat	Satuan	Nilai
Temperatur Leleh,	$^{\circ}\text{C}$	2040
Densitas pada 20°C	g/cm^3	3.95
Konduktivitas Panas	W/mK	30
Modulus Elastisitas	GPa	398
Hardness	HV	1500

Terdapat dua jenis alumina, α -alumina yang mempunyai permukaan luar kecil, atau korundum, dan γ -alumina yang sangat *porous* (Maciver dkk, 1963). γ -alumina adalah fasa metastabil yang pertama terbentuk dari proses kalsinasi sulfat, hidroksida, dan garam-garam lain sebelum membentuk fasa stabil α -alumina. Perubahan ke α -alumina berupa proses pengasaran dan ditandai dengan menurunnya luas permukaan alumina (Dynys dan Halloran, 1982)

2.2. Rekayasa Permukaan

Rekayasa permukaan adalah kegiatan multidisiplin yang dimaksudkan untuk menyesuaikan sifat permukaan komponen teknik sehingga fungsi dan kemampuan mereka dapat ditingkatkan sesuai aplikasinya. Definisi lain dari rekayasa permukaan yaitu sebagai "perlakuan bagian permukaan dan bagian dekat permukaan dari suatu material untuk memungkinkan permukaan dari material tersebut memiliki sifat dan fungsi yang berbeda dari sifat aslinya". (ASM Handbook)

Sifat atau karakteristik yang diinginkan dari rekayasa permukaan suatu komponen meliputi:

- Meningkatkan ketahanan korosi melalui pelindung dengan membentuk pembatas dengan lingkungan
- Peningkatan ketahanan terhadap oksidasi dan/ atau sulfidasi
- Peningkatan ketahanan aus

- Mengurangi kerugian kehilangan energi akibat gesekan
- Meningkatkan sifat mekanik yang ditingkatkan, misalnya kekuatan atau kekerasan
- Peningkatan sifat elektronik atau listrik
- Peningkatan isolasi termal
- Peningkatan estetika

Rekayasa permukaan dapat dilakukan dengan berbagai prinsip, yaitu mengubah sifat metalurgi permukaan (*surface hardening, laser melting*); mengubah struktur kimia permukaan seperti *Chromate chemical conversion coatings, Black oxide chemical conversion coatings* anodising (prinsip pelapisan melalui reaksi elektrokimia), *carburizing*; dan dengan menambahkan lapisan pada permukaan/*coating (hot dip, thermal spraying, electroplating, CVD, PVD)* (Davis dkk, 2001).

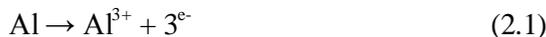
2.3. Anodising

Logam ringan, seperti aluminium dan paduannya memiliki kemampuan untuk menahan korosi oleh atmosfer karena lapisan pelindungnya dalam bentuk oksida Al_2O_3 atau hidroksida Al_2O_3 , lapisan pasif yang segera terbentuk setelah logam terekspos udara. Lapisan oksida setebal 2,5 hingga 10 nm (Henley, 1982) hanya dapat memberikan perlindungan terbatas pada lingkungan agresif. Sifat perlindungan dari aluminium dapat ditingkatkan dengan mengoksidasi permukaan lebih lanjut, baik secara *thermal*, kimiawi, ataupun elektrokimia. Anodising merupakan jenis yang berbeda dari proses pelapisan konversi kimia, pada anodising permukaan di oksidasi secara elektrolitik sehingga lapisan yang jauh lebih tebal akan terbentuk (Sheasby, 2001). Proses anodising mendapat nama dari prosesnya berupa substrat yang menjadi anoda pada sel elektrolitik, dibandingkan dengan teknik rekayasa permukaan lainnya, anodising memiliki perbedaan, dengan cara memanfaatkan oksidasi terkontrol pada

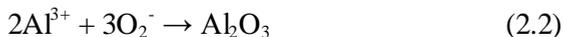
substrat logam yang akan menghasilkan perubahan lapisan logam menjadi lapisan oksida. Lapisan oksida anoda aluminium memiliki ketebalan dari 5 hingga 25 mm; oleh karena itu anodising tidak hanya digunakan untuk kebutuhan perlindungan tetapi juga dapat untuk kebutuhan estetika (Yerokhin, 2010), proses anodising sering digunakan untuk perlindungan korosi pada kendaraan, bangunan, pesawat, alat olahraga serta alat elektronik (ASM, 2003).

2.3.1 Pembentukan Lapisan Anoda

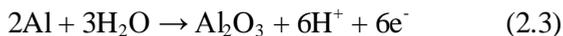
Ketika aluminium terpolarisasi secara anodik pada elektrolit, anion muatan negatif pada larutan berpindah ke anoda dimana anoda dilepaskan dengan melepas elektron. Pada larutan encer, anion mengandung oksigen, yang akan bereaksi secara kimia dengan aluminium. Reaksi pembentukan oksida logam dapat dianggap terjadi melalui pelarutan logam anodik untuk membentuk kation yang sesuai :



Diikuti dengan reaksi antara kation logam dengan ion oksigen :



Reaksi total dari oksidasi anodik aluminium :



hasil dari oksidasi anodik tergantung dari beberapa faktor, terutama elektrolit (komposisi, konsentrasi, dan temperatur) dan juga kondisi elektrolisis (arus dan tegangan). proses berikut dapat terjadi di anoda jika :

- (i) Jika produk reaksi anodik tidak larut dalam elektrolit, lapisan pembatas kuat yang mudah menempel terbentuk pada aluminium. Lapisan pembatas akan

terus tumbuh hingga hambatannya mencegah arus sampai pada anoda. Lapisan ini sangat tipis dan padat. Jenis lapisan ini dapat terbentuk pada pH yang relatif netral, juga pada elektrolit jenis borat dan tartrat. Lapisan jenis ini juga terbentuk pada tegangan yang relatif tinggi, biasanya jenis anodising ini digunakan untuk produksi kapasitor pada industri elektronik.

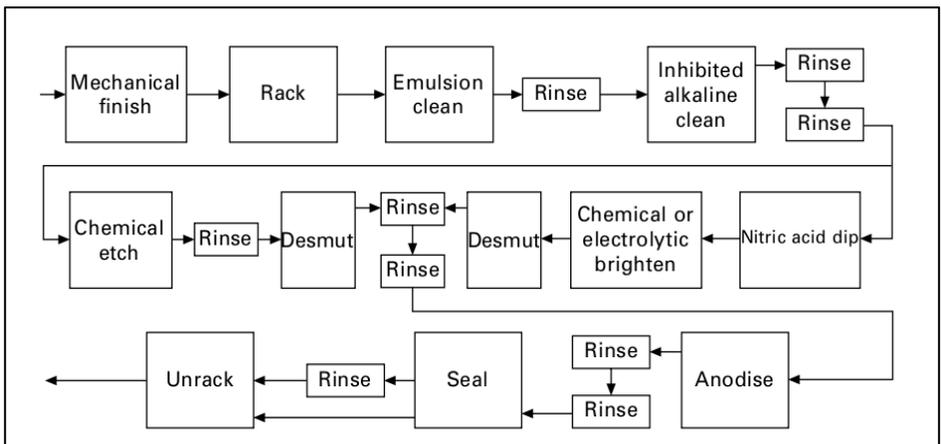
- (ii) Jika produk reaksi sedikit larut pada elektrolit, lapisan yang mudah menempel seperti poin (i) terbentuk, tetapi pertumbuhan lapisan disertai dengan pelarutan lokal, yang akan memproduksi susunan pori pada lapisan. Lapisan ini meneruskan aliran arus dan pertumbuhan lapisan. Elektrolit yang digunakan untuk jenis lapisan ini biasanya asam termasuk asam sulfat, asam fosfat, asam kromat dan asam oksalat. Lapisan ini dibentuk untuk memperbaiki adhesi dari cat, pernis dan karena jenis lapisan ini sangat keras dan tebal (mikron), lapisan ini digunakan untuk kegunaan dekorasi dan proteksi.
- (iii) Jika produk reaksi sedikit banyak larut pada elektrolit, electropolishing logam aluminium dapat dilakukan pada kondisi ini, jika elektrolit yang tepat digunakan
- (iv) Jika produk reaksi seluruhnya larut pada elektrolit, logam akan larut hingga larutan menjadi jenuh. Jenis seperti ini terjadi pada beberapa asam dan basa anorganik kuat (Sheasby, 2001) yang digunakan untuk manufaktur elektrokimia logam aluminium

Pertumbuhan oksida untuk ketebalan dan struktur kimia bergantung pada beberapa faktor seperti tegangan dan densitas arus yang digunakan, temperatur, dan komposisi larutan. Jenis

lapisan pembatas dimana oksida hampir tidak terlarut paling disukai dimana jenis lapisan ini memiliki resistivitas listrik tinggi (Yerokhin, 2010)

2.3.2 Proses Anodising

Untuk proses oksidasi anodik aluminium, proses yang sering digunakan berasal dari asam sulfat dan asam kromat. Asam sulfat digunakan untuk kebutuhan dekoratif, proteksi, kekerasan serta ketahanan aus. Asam kromat digunakan untuk perlindungan maksimal dengan larutnya logam se sedikit mungkin (The Canning Handbook, 1982). Proses lain yang digunakan untuk kebutuhan khusus berupa campuran asam sulfat dengan asam oksalat, asam fosfat atau dengan asam oksalat sepenuhnya. Untuk permukaan lebih tebal (≥ 25 mm) proses menggunakan hard anodising, hampir seluruh ketebalan dari proses anodising berkisar antara 5 hingga 18 mm (ASM, 1994). Gambar 2.2 menunjukkan urutan proses anodising dari *surface preparation* yang dimulai dari perlakuan mekanik hingga anodising dan hingga sampai ke tahap *packaging*.



Gambar 2.2 Urutan Umum Proses Anodising (ASM, 1994)

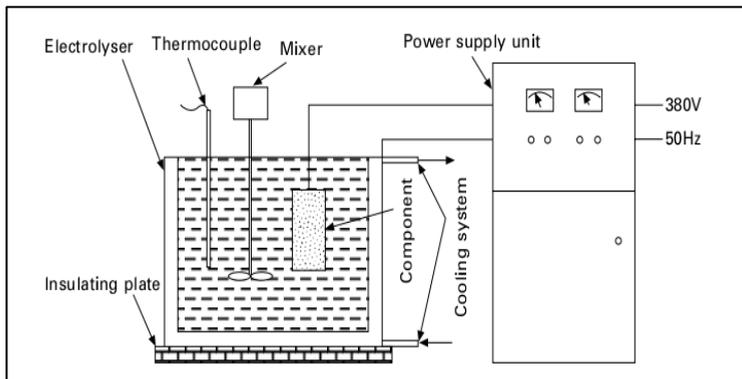
Tabel 2.2 Proses Anodising Aluminium dan Paduannya (ASM, 2003)

Komposisi Larutan	Konsentrasi (wt%)	Temperatur (°C)	Densitas Arus (A/dm ²)	Tegangan (V DC)
Asam Kromat	10	45 – 55	0,3 – 1	40 – 50
Asam Sulfat	5 – 25	15 – 25	0,8 – 3	15 – 20
Asam Oksalat	3 – 5	20 – 30	1 – 1,5	25
Asam Fosfat	3 – 10	20 – 30	0,5 – 2	40 – 100
Hard Anodising				
-H ₂ SO ₄	10 – 20	0 – 5	2 – 4	25 – 60
-Al ₂ (SO ₄) ₃	0,1 – 10			
-H ₂ C ₂ O ₄	1			
Alkaline Anodising		10 – 20	1 – 4	30 – 70
-NaOH	8 – 12			
-H ₂ O ₂	2 – 3			
-Sodium Fosfat	0,1 – 0,5			
AC Anodising	15 – 30	0 – 40	3 – 12	15 – 30 AC

Tabel 2.2 memberikan spesifikasi umum kebutuhan anodising dengan berbagai macam jenis proses, dengan larutan asam yang berbeda dan dengan proses yang lain, Hard anodising, alkalin anodising dan parameter *power supply* berbeda tegangan AC

2.4. Plasma Electrolytic Oxidation

Plasma electrolytic oxidation (PEO) Sebuah teknologi rekayasa permukaan relatif baru, biasa juga disebut *microarc oxidation* (MAO) mulai mengalami peningkatan dalam pembuatan lapisan oksida keramik untuk logam ringan seperti aluminium, titanium dan magnesium. PEO dapat meningkatkan sifat ketahanan korosi dan ketahanan aus, serta dapat juga memberi sifat fungsional lainnya seperti anti - friksi, perlindungan *thermal*, optik dan dielektrik. (Jiang, 2010). Proses PEO berdasarkan proses konvensional anodising logam ringan di dalam larutan elektrolit, tetapi dioperasikan di atas tegangan biasa, yang menghasilkan pembentukan mikro - plasma, pembentukan ini menghasilkan lapisan oksida dari substrat juga oksida kompleks yang mengandung unsur dalam elektrolit. Sifat dan mikrostruktur lapisan dapat disesuaikan dengan memilih elektrolit dan parameter elektrik yang tepat, sehingga PEO dapat diterapkan untuk berbagai macam aplikasi yang luas, otomotif, dirgantara, kelautan, tekstil, elektronik, biomedis, dan material katalis. Gambar 2.3 menunjukkan skema proses PEO dimana setidaknya terdapat *power supply*, anoda, katoda dan *chiller*.



Gambar 2.3 Skema Proses PEO (Jiang, 2010)

2.4.1. Keuntungan Proses PEO

Proses PEO memiliki beberapa keuntungan (Patel dan Saka, 2001) ; (i) Aplikasi pelapisan yang luas, baik untuk ketahanan aus, ketahanan korosi, dan sifat fungsional lainnya (*thermo* - optik, dielektrik, *thermal barrier*, dll) ; (ii) tidak ada penurunan performa untuk sifat mekanik dari substrat karena input panas yang tidak begitu tinggi; (iii) ikatan metalurgi yang kuat antara substrat dan *coating* ; (iv) dapat dilakukan untuk komponen dengan ukuran besar dan geometri yang kompleks ; (v) peralatan sederhana dan mudah untuk dilakukan ; (vi) biaya rendah, karena tidak butuh kondisi vakum dan juga tidak dibutuhkan gas pelindung dalam proses PEO ; (vii) proses yang ramah lingkungan, hanya menggunakan larutan elektrolit alkalin, dibandingkan dengan menggunakan larutan asam serta tidak ada emisi berbahaya yang dikeluarkan dari proses.

Jika dibandingkan dengan anodising konvensional dan *hard anodising*, PEO menunjukkan banyak keunggulan (Volynets dkk, 1991). Walaupun anodising konvensional pada larutan alkalin dapat memberikan lapisan dengan tebal beberapa mikron, lapisan ini masih terlalu tipis untuk memberikan proteksi efektif untuk keausan dan korosi, dan anodising ini biasanya hanya digunakan untuk kebutuhan dekorasi. Metode PEO, yang diturunkan dari anodising konvensional tetapi lebih baik dengan pelepasan percikan (*spark discharge*) plasma ketika voltase yang besar dapat menghasilkan lapisan keramik yang lebih tebal dengan sifat yang sangat baik seperti kekerasan yang tinggi, ketahanan aus dan ketahanan korosi yang sangat baik, serta ikatan yang kuat antara lapisan dengan substrat jika dibandingkan dengan anodising konvensional. Proses PEO telah menunjukkan sukses besar dalam meningkatkan rekayasa permukaan dari logam magnesium, aluminium dan titanium, menggantikan proses anodising konvensional dengan elektrolit asam yang mengandung zat berbahaya terhadap lingkungan (Jiang, 2010). Tabel 2.3 menunjukkan perbandingan lebih lengkap antara anodising konvensional dengan PEO.

Tabel 2.3 Perbandingan PEO dengan Anodising (Mukesh dkk, 2014)

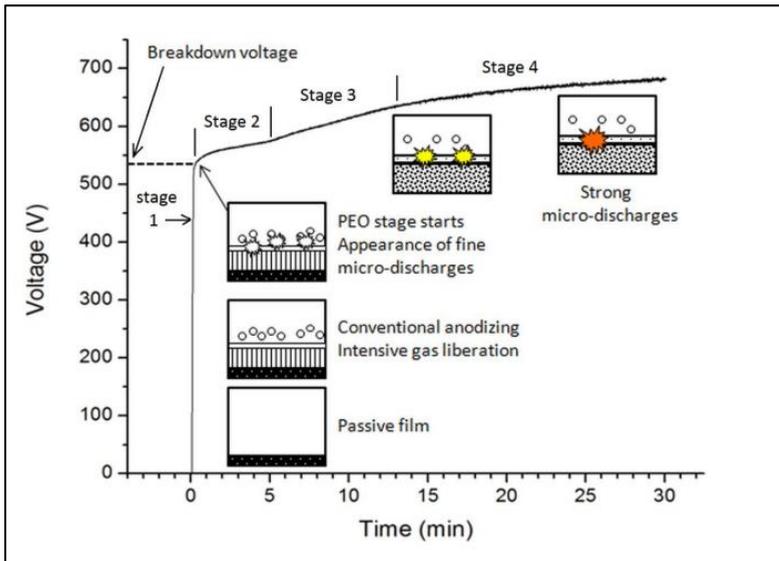
Sifat	Anodising	Plasma Electrolytic Oxidation
Tegangan sel	Rendah ~ 20 – 80 V	Tinggi ~ 100 – 400 V
Densitas arus	Rendah ~ 10A/dm ²	Tinggi ~ 20A/dm ²
Elektrolit	Asam, berbahaya	Alka lin, ramah lingkungan
Ketebalan lapisan oksida	10µm atau kurang	100µm atau lebih
Sifat lapisan	Kekerasan sedang, dielektrik rendah	Kekerasan tinggi, padat (dense)
Sifat lapisan oksida	Amorphous, kasar, berporous	Kristalin tinggi, halus, berporous pada permukaan, padat dibawah permukaan
Kontrol temperatur	Ketat	Cukup didinginkan dengan <i>chiller</i>
Biaya	Rendah, hard anodising tinggi	Relatif rendah

2.5. Fundamental dan Mekanisme PEO

PEO sering dikategorikan sebagai teknologi yang berada di antara anodizing konvensional dan *high energy plasma coating*. Pada proses PEO, terjadi berbagai macam fenomena baik fenomena fisika, kimia, elektrokimia dan reaksi *plasma thermochemical*. Walaupun banyak penelitian sudah meneliti mekanisme pembentukan lapisan pada proses PEO, hingga saat ini proses yang terjadi pada PEO belum sepenuhnya diketahui, banyak faktor yang menyebabkannya terutama kesulitan dalam mendapatkan fenomena *discharge* pada PEO (Vahid, 2014)

2.5.1 Fenomena Perumbuhan Lapisan

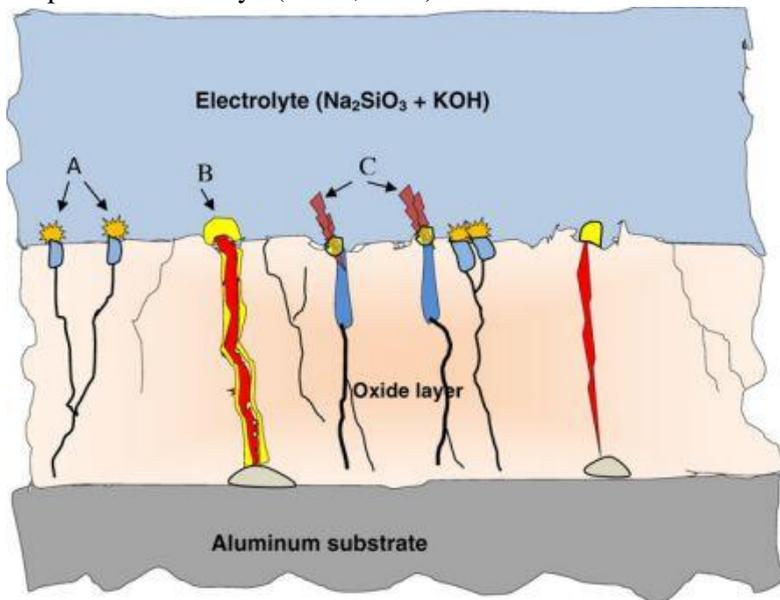
Terdapat beberapa penelitian dalam mekanisme pembentukan lapisan. Berdasarkan respon tegangan – waktu pada gambar 2.4, proses PEO dapat dibagi menjadi beberapa tahap dimana pada masing – masing tahap terjadi fenomena yang berbeda



Gambar 2.4 Respon Tegangan – Waktu pada Proses PEO (Vahid, 2014)

Pada gambar 2.4 menjelaskan pada tahap 1, tegangan sel meningkat secara linear dan secara cepat lapisan oksida yang sangat tipis akan terbentuk pada logam seperti Al, Ti, Mg jika digunakan elektrolit yang tepat. Pada tahap ini, terjadi anodising konvensional serta terlihat terjadinya evolusi gas. Hingga akhirnya tegangan mencapai nilai kritis, tegangan *breakdown*, hal ini ditandai dengan terbentuknya *micro-discharge* putih, bersamaan dengan jumlah yang banyak pada permukaan substrat.

micro-discharge atau *spark* yang terbentuk pada proses PEO ini memiliki peran yang penting dalam pembentukan lapisan. Pada tahap 2, setelah *breakdown* terjadi, tegangan meningkat perlahan dan laju pertumbuhan oksida menurun. Pada tahap 3, laju perubahan tegangan sedikit berubah, *micro-discharge* menjadi lebih intens dan lebih lama, warna *spark* pada tahap 3 berubah dari putih ke kuning kemudian secara bertahap berubah menjadi oranye. Pada tahap 4, laju meningkatnya tegangan sedikit menurun dibandingkan pada tahap 3, *spark* pada tahap ini menjadi lebih kuat tetapi lebih sedikit serta warna *spark* disini tetap berwarna oranye (Vahid, 2014).

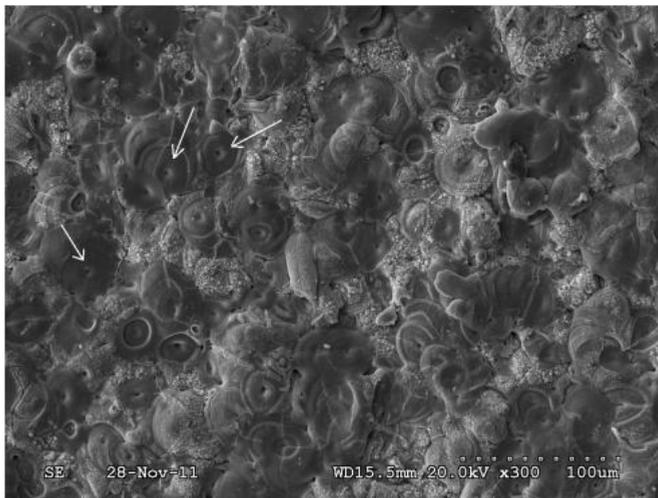


Gambar 2.5 Skema Pembentukan Struktur Lapisan Pada PEO (Hussein dkk, 2010)

Pada proses PEO *discharge* memainkan peran yang sangat penting pada mekanisme pertumbuhan lapisan. Karena fenomena *discharge* pada PEO sangat cepat, menjadikannya

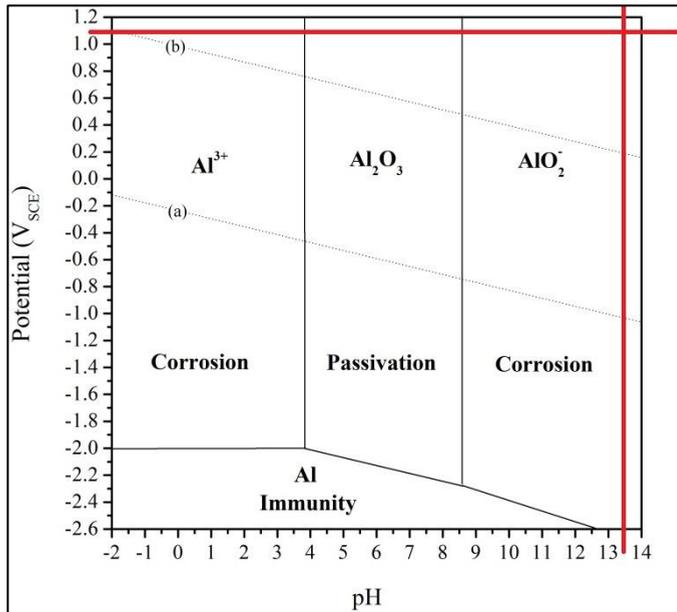
sukar untuk di analisa baik secara fisika maupun kimia pada fenomena *discharge*. Sehingga, terjadi perbedaan pendapat pada mekanisme pertumbuhan lapisan pada proses PEO (Jiang, 2010) Terlihat bahwa pertumbuhan lapisan PEO bertumbuh secara simultan dengan diatas ataupun dibawah permukaan asli substrat dengan kombinasi 2 mekanisme pertumbuhan

- (i) pertumbuhan ke luar, dari substrat menuju ke elektrolit, dimulai dengan pelelehan, oksidasi dan solidifikasi dari spesies yang terlontar
- (ii) pertumbuhan ke dalam, menuju ke substrat, ditandai dengan perpindahan oksigen akibat medan listrik yang tinggi. Pada pertumbuhan lapisan ke arah dalam, anion oksigen bergerak ke lapisan dan bereaksi dengan kation logam dari substrat untuk membentuk lapisan oksida keramik. Akibat laju pendinginan yang tinggi, lelehan oksida pada batas lapisan dengan substrat dengan cepat membeku, membentuk lapisan kristalin tipis dengan butiran berukuran nano yang seragam (Vahid, 2014)



Gambar 2.6 Morfologi Permukaan Aluminium Hasil PEO Menggunakan SEM (Vahid, 2014)

2.5.2 Reaksi Kimia dan Elektrokimia



Gambar 2.7 Diagram Pourbaix Aluminium(IntechOpen)

Reaksi yang mungkin terjadi pada proses PEO dengan melibatkan reaksi kimia dan elektrokimia, terjadi pada pH larutan sekitar 13 – 14 sesuai gambar 2.7(Vahid, 2014).

- a. Dimulai dengan saat tidak ada arus pada larutan, reaksi kimia menetsa menjadi AlO₂⁻ dan Al(OH)₄⁻

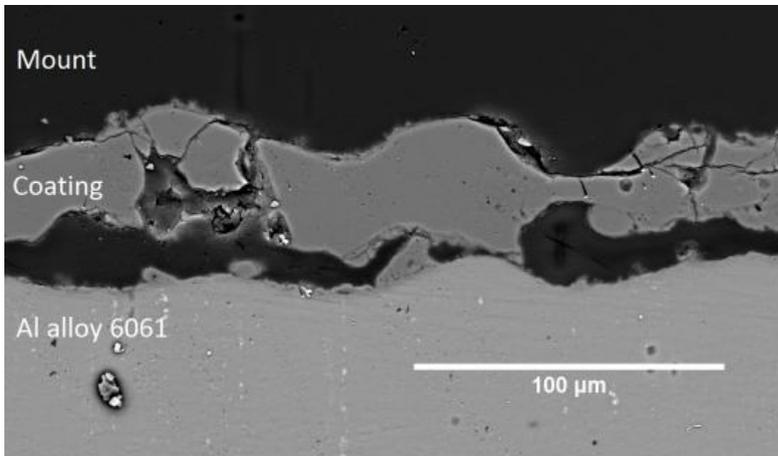
$$2\text{Al} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{AlO}_2^- + 3\text{H}_2 \quad (2.4)$$

$$\text{Al} + 4\text{OH}^- \rightarrow \text{Al(OH)}_4^- \text{ (gel)} \quad (2.5)$$
- b. Ketebalan alumina dapat berkurang akibat pelarutan kimia
$$\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{OH}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al(OH)}_4^- \rightarrow 2\text{Al(OH)}_3^- + 2\text{OH}^- \quad (2.6)$$

-
- c. Sehingga boehmite mungkin terbentuk
- $$\text{Al}(\text{OH})_4^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AlO}_2\text{H}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O} + \text{OH}^- \quad (2.7)$$
- d. Aluminium hidroksida dapat terlarut lagi oleh OH^-
- $$\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_4^- \quad (2.8)$$
- e. Serta dalam pengaruh medan listrik tinggi, oksigen dapat terionisasi menjadi anion oksigen (O_2^-), berdifusi ke dalam substrat, dan bereaksi dengan kation logam (Al^{3+}) yang selanjutnya bergerak menuju elektrolit membentuk aluminium oksida
- $$2\text{Al}^{3+} + 3\text{O}_2^- \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (2.9)$$
- f. Serta kation aluminium (Al^{3+}) juga dapat bereaksi dengan elektrolit membentuk mullite
- $$2\text{Al}^{3+} + 3\text{SiO}_2^{2-} \rightarrow \text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3 \quad (2.10)$$

2.6. Properti Lapisan PEO

lapisan PEO biasanya terdapat 3 lapisan, berdekatan dengan substrat, terdapat lapisan dalam yang tipis yang biasa disebut lapisan penghalang diikuti dengan lapisan tengah dengan ketebalan bervariasi dan porositas relatif rendah, dinamakan *functional layer*, yang memberikan sifat termo-mekanik dan fungsi - fungsi tribologi dari lapisan. Lapisan ketiga yang memiliki porositas tinggi dan lapisan yang longgar, terletak di atas *functional layer* terdapat pada beberapa sampel. Lapisan fungsional ini mencapai 70 sampai 80% dari total ketebalan lapisan. Lapisan terluar dapat digunakan sebagai *sealant* serta fungsi utamanya untuk meningkatkan ketahanan korosi (Yerokhin, 2005).



Gambar 2.8 Potongan Melintang Lapisan PEO pada SEM (Vahid, 2014)

2.6.1 Sifat Mekanik

Komposisi fasa merupakan faktor utama yang menentukan sifat mekanik dan tribologi dari lapisan PEO. Penelitian – penelitian sebelumnya PEO pada paduan aluminium dengan elektrolit alkalin menunjukkan hasil lapisan yang terdiri dari α - Al_2O_3 dan γ - Al_2O_3 , serta pada elektrolit dengan kandungan silikat terbentuk mullite pada lapisan. Kandungan α - Al_2O_3 dapat mencapai 60% untuk lapisan PEO pada substrat aluminium dengan kandungan tembaga yang tinggi, serta pada aluminium dengan kandungan magnesium yang tinggi lebih dominan fasa γ - Al_2O_3 (Yerokhin, 1999).

Modulus elastisitas dan kekerasan lapisan PEO ditemukan lebih tinggi dibandingkan paduan aluminium 6082 yang di hard anodizing (Malayoglu, 2011). Fasa kristalin pada lapisan menghasilkan kekerasan yang tinggi dibandingkan oksida amorfus pada anodizing konvensional. Beberapa studi melaporkan kekerasan lapisan PEO pada aluminium bervariasi dari 900 hingga 2000 HV (Wheeler, 2012).

2.6.2 Sifat Tahan Aus

Sifat ketahanan aus suatu material sangat bergantung terhadap kekerasan material itu sendiri. Kekerasan lapisan PEO merupakan fungsi dari fasa dominan yang ada pada lapisan, juga rasio, distribusi, porositas dan densitas dari *micro-crack* pada lapisan. Kekerasan fasa alumina dilaporkan hingga 26GPa pada α -Al₂O₃, 17 GPa pada γ -Al₂O₃, 10,5 GPa pada mullite dan 7 GPa pada amorfus alumina. Sebuah studi pada tribologi menunjukkan lapisan dengan kandungan α -Al₂O₃ memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi (Tian, 2002).

Pada beberapa tahun terakhir, permintaan terhadap konsumsi bahan bakar yang lebih rendah menyebabkan meningkatnya kebutuhan terhadap pengurangan berat pada transportasi. Ketahanan aus yang tinggi dari pelapisan PEO memungkinkan untuk menggantikan komponen – komponen baja dan besi tuang dengan paduan yang lebih ringan, hal ini akan mendorong efisiensi dengan meningkatnya performa dan mengurangi konsumsi bahan bakar pada transportasi, pesawat dan industri dirgantara (Jiang, 2010).

2.7. Parameter Proses PEO dan Penelitian Sebelumnya

2.7.1 Efek Elektrolit

Efek dasar dari elektrolit bisa diringkas sebagai berikut :

- (i) Pertama dan paling penting, mengembangkan pasivasi logam untuk membentuk lapisan, dimana lapisan tersebut penting untuk syarat terjadinya induksi percikan listrik ;
- (ii) sebagai media untuk menghantarkan arus untuk mentransmisikan energi yang dibutuhkan oleh untuk mengoksidasi anoda pada *interface* logam dengan elektrolit ;
- (iii) menyediakan sumber oksigen dalam bentuk garam oksigen (oxysalt), garam yang mengandung anion oksigen yang dibutuhkan untuk terjadinya oksidasi ;
- (iv) memungkinkan unsur yang ada dalam elektrolit untuk tergabung

dalam elektrolit, bahkan dapat memodifikasi atau memperbaiki sifat dari pelapisan PEO (Jiang, 2010). Beberapa penelitian dengan elektrolit tertentu telah dilakukan, penelitian oleh Voevodin dkk (1996) dengan menggunakan elektrolit sodium metasilikat serta potasium hidroksida pada logam aluminium menghasilkan Al_2O_3 , SiO_2 dan Al-Si-O di lapisan permukaan yang berguna untuk meningkatkan ketahanan aus, dan ketahanan korosi. Percobaan oleh Wang dkk (1999) menunjukkan penambahan garam $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ ke dalam elektrolit sedikit meningkatkan rasio ketebalan lapisan dalam dari total ketebalan lapisan. Begitu juga dengan penelitian oleh Luo dkk (2009) dan Yao dkk (2008) fasa sangat keras dari m-ZrO₂ dan t-ZrO₂ tergabung dalam pelapisan paduan magnesium dan paduan titanium dengan menambahkan K_4ZrF_6 ke dalam elektrolit, lalu diperoleh lapisan mengandung senyawa ZrO₂ yang penting untuk peningkatan ketahanan korosi dan ketahanan aus serta penyekat panas. Penelitian oleh Arrabal dkk menunjukkan partikel zirkonia dapat tergabung dalam lapisan yang terbentuk dengan PEO baik DC maupun AC pada logam magnesium, dan lapisan ini terdiri dari dua lapisan utama dimana partikel zirkonia tergabung lebih baik pada daerah lapisan dalam dan lapisan terluar, walaupun hanya sedikit zirkonium ada di dalam lapisan dalam, dapat dibuktikan bahwa partikel nano yang tersebar di dalam elektrolit dapat mencapai lapisan dalam. Penelitian oleh Wang dkk (1999) menunjukkan penambahan serbuk silikon karbida ke dalam elektrolit dapat mereduksi rasio ketebalan lapisan padat terhadap total ketebalan lapisan. Permasalahan dari penggunaan elektrolit dalam proses PEO adalah konsumsi yang tinggi serta umurnya yang pendek, yang mempengaruhi reproduktifitas proses pelapisan dan menambah biaya untuk penggantian elektrolit. Hingga saat ini, banyak penelitian dan literatur mencari dan mengembangkan elektrolit yang optimum baik komposisi dan konsentrasi untuk mendapatkan sifat lapisan yang diinginkan (Jiang, 2010).

2.7.2 Pengaruh Komposisi Paduan

Paduan dengan kandungan silikon tinggi atau tembaga (Aluminium paduan tembaga) sulit untuk di anodising dengan proses anodising konvensional, permasalahan ini dapat diatasi dengan proses PEO walaupun dengan menggunakan PEO memiliki kerugian berupa cacat lokal pada silikon (atau tembaga) dan daya yang dihabiskan lebih banyak. Silikon dan tembaga merupakan unsur utama yang menyebabkan pola tak beraturan pada lapisan *coating* proses PEO (He dkk., 2009). Derajat ke tidak beraturan semakin meningkat dengan meningkatnya kadar silikon di dalam paduan, meski masih bisa di dapat lapisan dengan kadar silikon lebih dari 20% tetapi akan menyebabkan nilai kekerasan menurun akibat porositas yang tinggi, tekstur tak beraturan pada strukturmikro dari substrat paduan mengefek pada pertumbuhan awal lapisan. Penelitian oleh Duan dkk (2007) menemukan bahwa lapisan PEO yang terbentuk pada paduan aZ91D memiliki laju pertumbuhan yang lebih tinggi dibanding yang berada di dalam fasa β , dan pertumbuhan lapisan PEO yang terbentuk pada fasa β dipengaruhi terutama hanya oleh sifat dari lapisan oksida yang ditemukan di fasa α .

Komposit matriks logam (MMC) yang diperkuat dengan partikel serat, dengan kombinasi baik dari densitas rendah, kekuatan spesifik tinggi dan kekakuan spesifik tinggi, memiliki aplikasi yang menjanjikan di bidang otomotif, dirgantara dan industri lain. Tetapi, MMC mudah terkena korosi dalam berbagai lingkungan, baik karena korosi lokal atau korosi galvanik antara penguat dengan matriks, dan korosi selektif akibat pembentukan senyawa baru di interface. Anodising konvensional telah digunakan untuk menyiapkan lapisan tipis pada MMC seperti Al8090/SiC (Shahid, 1997), tetapi ketika partikel atau *whisker* dari serat berada di *interface*, serat dapat mengganggu keberlanjutan lapisan ini, sehingga proteksi dari anodising terbatas. Hal ini dapat di atasi dengan proses menggunakan PEO seperti penelitian oleh Xue dkk (2006) dengan substrat 2024 serta penguat SiC 15% dengan terbentuknya fasa mullite, α -Al₂O₃,

γ -Al₂O₃ dari hasil pelapisan metode PEO tersebut menunjukkan kenaikan ketahanan korosi yang sangat menjanjikan untuk penggantian dengan anodising, akan tetapi kehadiran fasa penguat (partikel, *whisker*, *fiber*) dalam MMC ini mempengaruhi dalam proses PEO seperti menurunkan efisiensi pertumbuhan lapisan (Picas dkk., 2007) karena kehadiran partikel ini menghancurkan integritas lapisan pembatas pada tahap awal oksidasi. Shahid (1997) menyimpulkan hampir seluruh SiC meleleh dan menjadi silikon oksida. Walaupun sifat permukaan menjadi lebih baik setelah proses PEO, efek buruk lapisan permukaan juga tidak dapat dihindarkan. Hal ini menunjukkan jika komposisi paduan mempengaruhi jalannya proses PEO.

2.7.3 Pengaruh Waktu

Waktu dalam proses PEO sangat mempengaruhi substrat yang terbentuk, karena di dalam proses PEO sendiri dibutuhkan waktu *spark discharge* agar proses PEO berjalan. Salah satu penelitian parameter waktu terhadap hasil proses PEO adalah yang dilakukan oleh Kim dkk (2012).

Tabel 2.4 Variasi Waktu dan Paduan pada Ketebalan hasil proses PEO (Kim dkk, 2012)

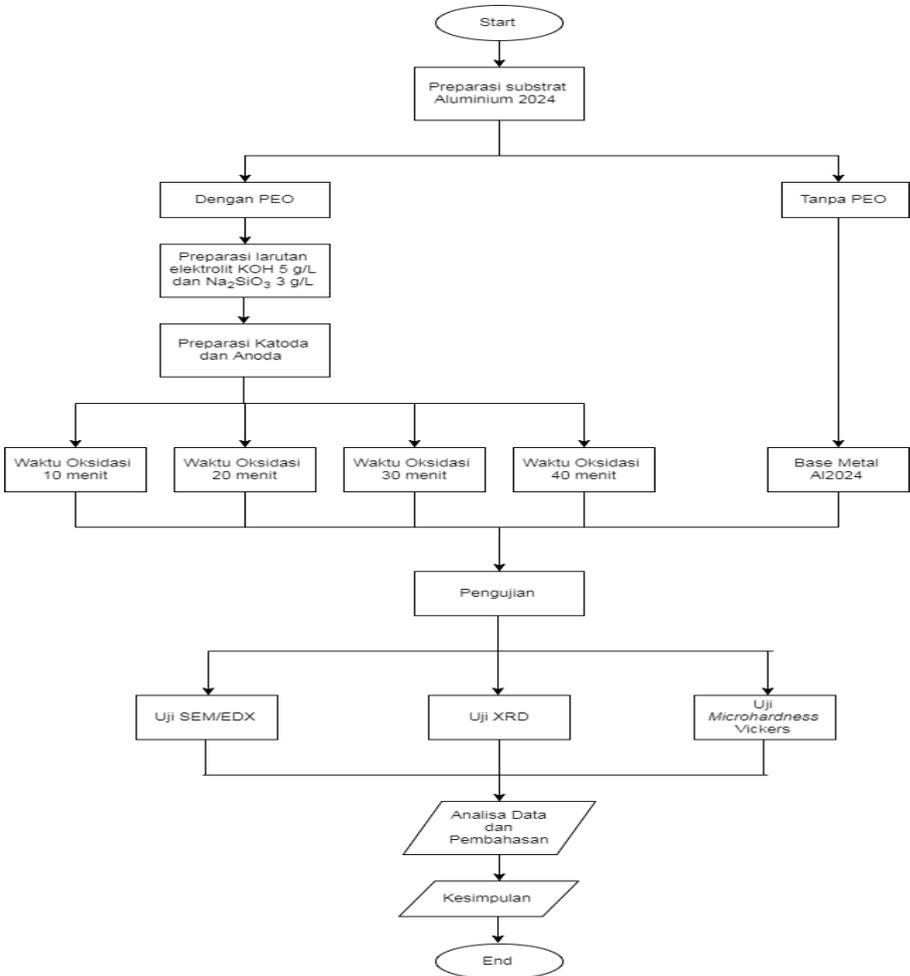
Material	Ketebalan (μm)	
	Oksidasi 10 menit	Oksidasi 20 menit
A-1100	16	21
A-2014	13	18
A-5052	19	21
A-6061	15	18
A-6063	14	18
A-7075	17	20
ACD-7B	15	19
ACD-12	14	16

Hasil penelitian menemukan bahwa semakin lama waktu oksidasi substrat mengakibatkan terbentuknya lapisan alumina yang lebih tebal beberapa mikron, diperlukan ketebalan lapisan yang tebal untuk kebutuhan dirgantara.

BAB III

METODOLOGI PERCOBAAN

3.1. Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Metode Penelitian

Metode yang dilakukan pada perancangan penelitian ini adalah :

1. Studi Literatur
Metode ini mengacu pada *textbook*, jurnal, paten serta penelitian serupa tentang anodising, *plasma electrolytic oxidation* baik pengetahuan maupun penerapannya yang telah dilakukan oleh penelitian – penelitian sebelumnya.
2. Diskusi
Pada tahapan ini dilakukan diskusi untuk menambah wawasan agar lebih memahami permasalahan dan solusi pada penelitian. Diskusi ini dilakukan dengan pihak – pihak terkait dengan penelitian.
3. Eksperimental
Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada, yaitu metode *plasma electrolytic oxidation*, pengujian SEM, pengujian XRD, pengujian kekerasan dan pengujian lain yang diperlukan.

3.3. Tabel Perancangan Penelitian

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

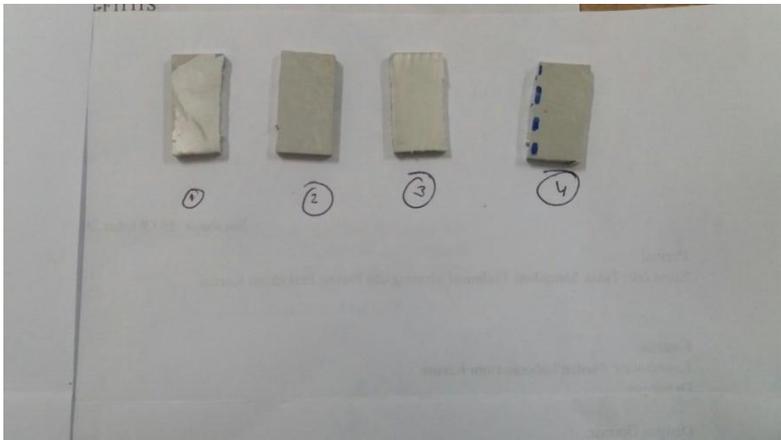
Spesimen	SEM	EDX	XRD	<i>Microhardness</i> Vickers
Tanpa PEO	✓	✓	✓	✓
Oksidasi 10 Menit	✓	✓	✓	✓
Oksidasi 20 Menit	✓	✓	✓	✓
Oksidasi 30 Menit	✓	✓	✓	✓
Oksidasi 40 Menit	✓	✓	✓	✓

3.4. Preparasi Sampel dan Larutan Elektrolit

Sampel atau substrat yang akan digunakan berupa aluminium 2024 atau yang biasa disebut duralumin pada pasaran, untuk memastikan komposisi kimia kandungan aluminium dilakukan pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES) yang dilakukan di laboratorium DT/NDT PPNS data hasil OES ditunjukkan pada tabel 3.2. Setelah dipastikan komposisi kimia aluminium akan dipotong sehingga berbentuk *coupon* dengan ukuran panjang dan lebar masing – masing 2,5 cm X 1,5 cm dengan ketebalan rata – rata 3 mm per substrat, selanjutnya substrat ini akan di amplas dengan kertas abrasif silikon karbida hingga *grade* 2000 agar tercipta permukaan yang halus, selanjutnya spesimen di rendam pada larutan methanol 95% agar pengotor – pengotor luntur setelah itu dicuci pada air distilasi dan dikeringkan pada udara dingin, setelah preparasi yang dilakukan substrat aluminium 2024 sudah dapat menjadi anoda dalam proses PEO.

Tabel 3.2 Komposisi Kimia Aluminium 2024

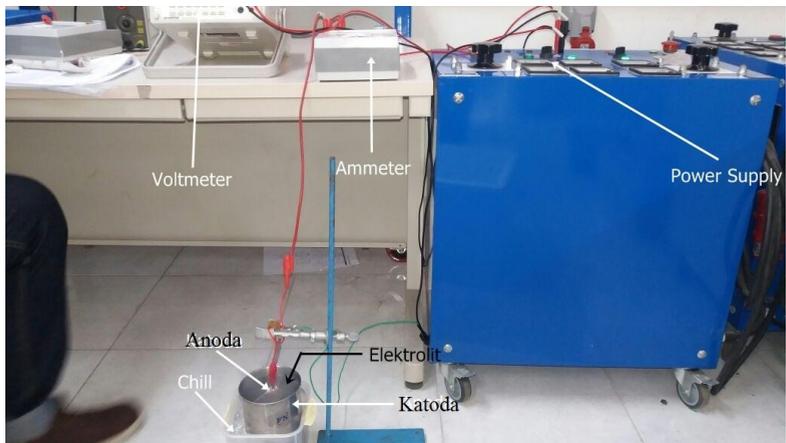
Unsur	Wt %
Al	Bal.
Mn	0.54
Si	0.20
Cr	0.01
Ti	0.01
Fe	0.11
Mg	0.35
Cu	4.66

Gambar 3.2 *Coupon* Aluminium Ukuran 2,5 X 1,5 X 0,3 cm

Dalam proses PEO yang dilakukan dibutuhkan larutan elektrolit, elektrolit yang digunakan berupa larutan alkalin dengan potasium hidroksida (KOH) sebanyak 5 gram dan natrium metasilikat (Na_2SiO_3) sebanyak 3 gram dimana keduanya akan dilarutkan di dalam air sulingan (*distilled water*) sebanyak 1 liter yang selanjutnya dilakukan agitasi sehingga larutan menjadi larutan elektrolit yang sudah cukup merata dan setimbang, setelah itu larutan alkalin siap digunakan dalam proses PEO.

3.5. Proses Plasma Electrolytic Oxidation

Proses PEO pada umumnya sesuai dengan literatur pada bab 2.4. yaitu berupa larutan alkalin yang mengandung potasium hidroksida dan natrium metasilikat di tuangkan ke dalam wadah *stainless steel* sebagai elektrolit, *coupon* aluminium yang sudah di preparasi seperti sub-bab 3.4 dihubungkan dengan kutub positif *power supply*, berperan sebagai anoda dan wadah *stainless steel* sebagai pasangan elektroda (katoda). Proses coating dilakukan dengan menggunakan DC *power supply* 3 fasa COMPAK20 Langlois, Prancis milik laboratorium Konversi Energi Teknik Elektro ITS, dengan tegangan maksimum 260V serta arus 0 – 8A didapat densitas arus 151 – 303mA/cm² dengan terbentuknya plasma singkat akibat *spark discharge* akan menaikkan temperatur elektrolit oleh karena itu temperatur elektrolit tetap dijaga agar tidak penguapan berlebih larutan elektrolit, temperatur elektrolit dijaga tetap dibawah 50 °C temperatur dikontrol dengan menggunakan *chiller* berupa es batu yang di dinginkan di luar wadah elektrolit sehingga dapat mengontrol temperatur, substrat akan di *coat* dengan waktu oksidasi yang berbeda yaitu selama 10 menit, 20 menit, 30 menit dan 40 menit sesuai tabel 3.1.



Gambar 3.3 *Set-Up* Proses PEO Skala Laboratorium

3.6. Karakterisasi dan Pengujian

3.6.1 Karakterisasi SEM/EDX



Gambar 3.4 Mesin SEM FEI Inspect S50

Pengamatan SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi dan strukturmikro lapisan substrat setelah dilakukan proses PEO. Disamping SEM juga dilakukan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) untuk melihat unsur – unsur pada titik yang diinginkan. Instrumen SEM yang digunakan menggunakan SEM pada departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS, SEM tipe FEI INSPECT S50. Hasil variasi waktu oksidasi PEO sebanyak empat buah akan diamati dengan SEM dan dibandingkan dengan *base metal* Al2024 tanpa perlakuan PEO, SEM dilakukan pada permukaan substrat. Selanjutnya dengan pengujian SEM dilakukan juga EDX pada *spot – spot* tertentu untuk membantu mengetahui unsur – unsur yang ada pada morfologi lapisan, selanjutnya morfologi juga akan di *mapping* untuk mengetahui persebaran – persebaran unsur yang ada di lapisan permukaan.

3.6.2 Karakterisasi XRD



Gambar 3.5 Mesin XRD Xper Pro Panlythical

X-Ray Diffraction adalah pengujian yang digunakan untuk mengetahui unsur dan senyawa yang terbentuk pada substrat dari hasil proses PEO. Data hasil XRD berupa grafik dengan puncak intensitas terhadap 2θ . Data XRD ini digunakan untuk perhitungan komposisi fasa serta derajat kristalinitas dari alumina yang terbentuk. Pengujian XRD ini menggunakan alat merk Xper Pro Panlythical milik departemen Teknik Material ITS. Substrat hasil proses PEO sebanyak empat buah akan di karakterisasi dengan XRD untuk dilihat fasa yang terbentuk setelah proses PEO menggunakan radiasi tembaga Cu-K dengan jarak 2θ di set antara 10° sampai 90° , interval waktu 10 detik dan interval $0,02^\circ$ serta digunakan *incident angle* $5,5^\circ$ untuk pembacaan lapisan dan menghindari penetrasi sinar – X ke dalam substrat. Setelah mendapatkan grafik dari serangkaian pengujian menggunakan XRD maka selanjutnya akan diidentifikasi fasa pada *peak* yang dicari untuk melihat kemungkinan fasa yang terbentuk dari proses PEO berupa α -alumina γ -alumina terdapat pada $2\theta = 25,57 ; 35,14 ; 37,76 ; 43,33 ; 46,16 ; 52,53 ; 57,47 ; 61,27 ; 66,49 ;$ dan $68,18$ serta senyawa atau fasa lain yang mungkin terbentuk dengan bantuan *software match* dan JCPDF Card untuk mengetahui senyawa yang terbentuk pada material hasil *treatment* PEO.

3.6.3 Pengujian Kekerasan *Microhardness* Vickers



Gambar 3.6 Alat Uji *Microhardness* Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari lapisan substrat hasil proses PEO. Substrat hasil PEO dengan variasi waktu oksidasi akan diuji kekerasan permukaannya serta dibandingkan dengan kekerasan substrat tanpa perlakuan PEO menggunakan alat uji kekerasan Wilson *Microhardness* 402MVD milik departemen Teknik Material ITS, uji kekerasan dilakukan dengan memberikan beban sebesar 300gf ke permukaan sampel selama 10 detik, sehingga akan terlihat diagonal hasil indentasi beban, dengan perhitungan dan bantuan *software* dapat dihitung besarnya nilai kekerasan dari lapisan permukaan substrat yang selanjutnya dapat di analisa pengaruh waktu oksidasi proses PEO yang paling optimal agar bisa mendapatkan nilai kekerasan yang paling tinggi, sebagai tujuan utama dari penelitian ini untuk mendapatkan aluminium dengan sifat mekanik terutama kekerasan yang baik agar dapat digunakan sebagai aplikasi dirgantara.

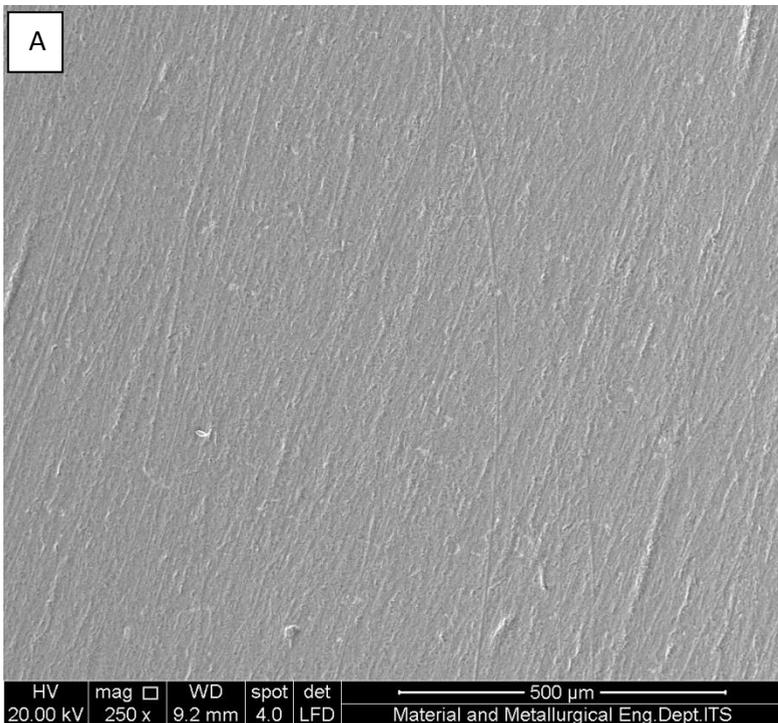
(Halaman Ini Sengaja di Kosongkan)

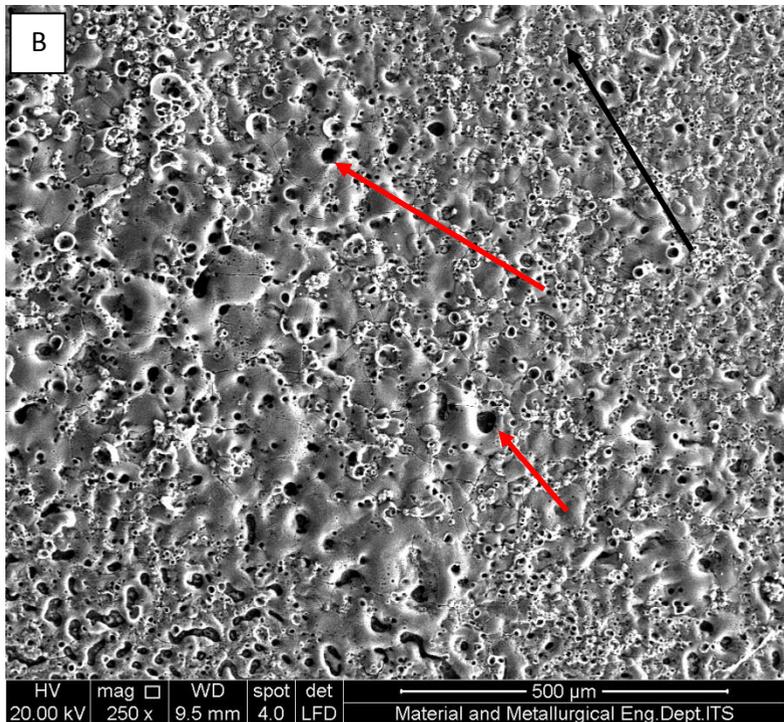
BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Morfologi

Untuk mengetahui morfologi lapisan yang terbentuk pada proses PEO dilakukan karakterisasi dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Selain itu pada karakterisasi EDX juga dilakukan untuk mengetahui unsur yang terbentuk pada lapisan. Pertama akan dibandingkan morfologi penampang dari *base metal* dengan penampang dari substrat hasil *treatment* PEO

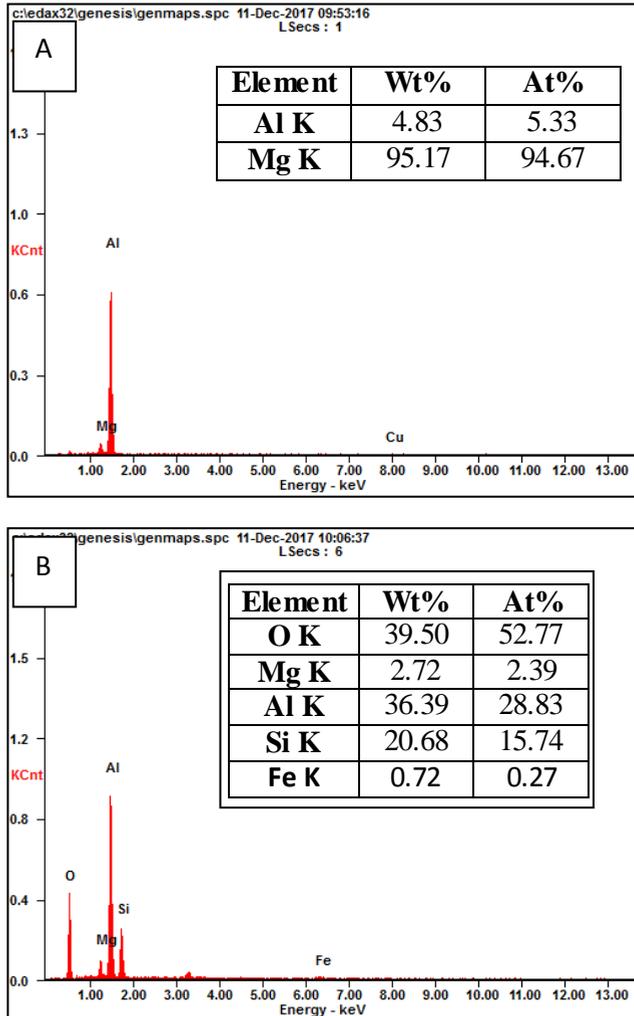




Gambar 4.1 Hasil SEM Perbesaran 250X (a) *Base Metal*
(b) *Substrat Treatment PEO*

Pada hasil SEM yang ditunjukkan pada gambar 4.1 menunjukkan perbedaan morfologi antara substrat Al2024 tanpa perlakuan dengan substrat Al2024 yang di *treatment* dengan PEO, jika pada substrat Al2024 tanpa PEO menunjukkan pola halus dengan sedikit *scratch*, pada substrat hasil PEO menunjukkan pola yang kasar seperti lubang – lubang di permukaan berwarna gelap yang ditunjukkan oleh anak panah warna merah pada gambar 4.1, selanjutnya ada juga struktur *nodular* berwarna abu – abu yang kasar ditunjukkan oleh anak panah warna hitam pada gambar 4.1. Pada hasil pengujian EDX juga terlihat jelas

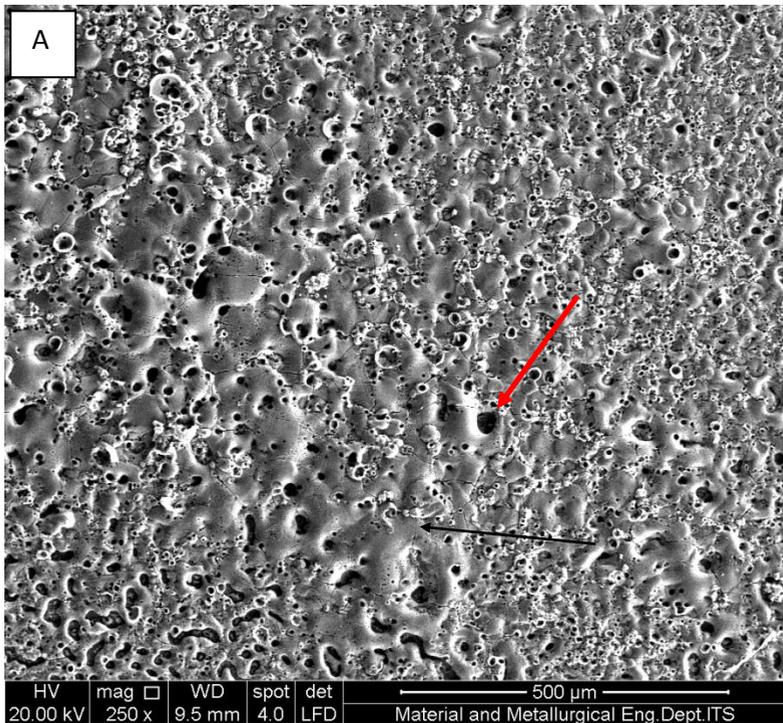
perbedaan komposisi kimia antara *base metal* Al2024 dengan substrat aluminium yang di *treatment* dengan PEO.

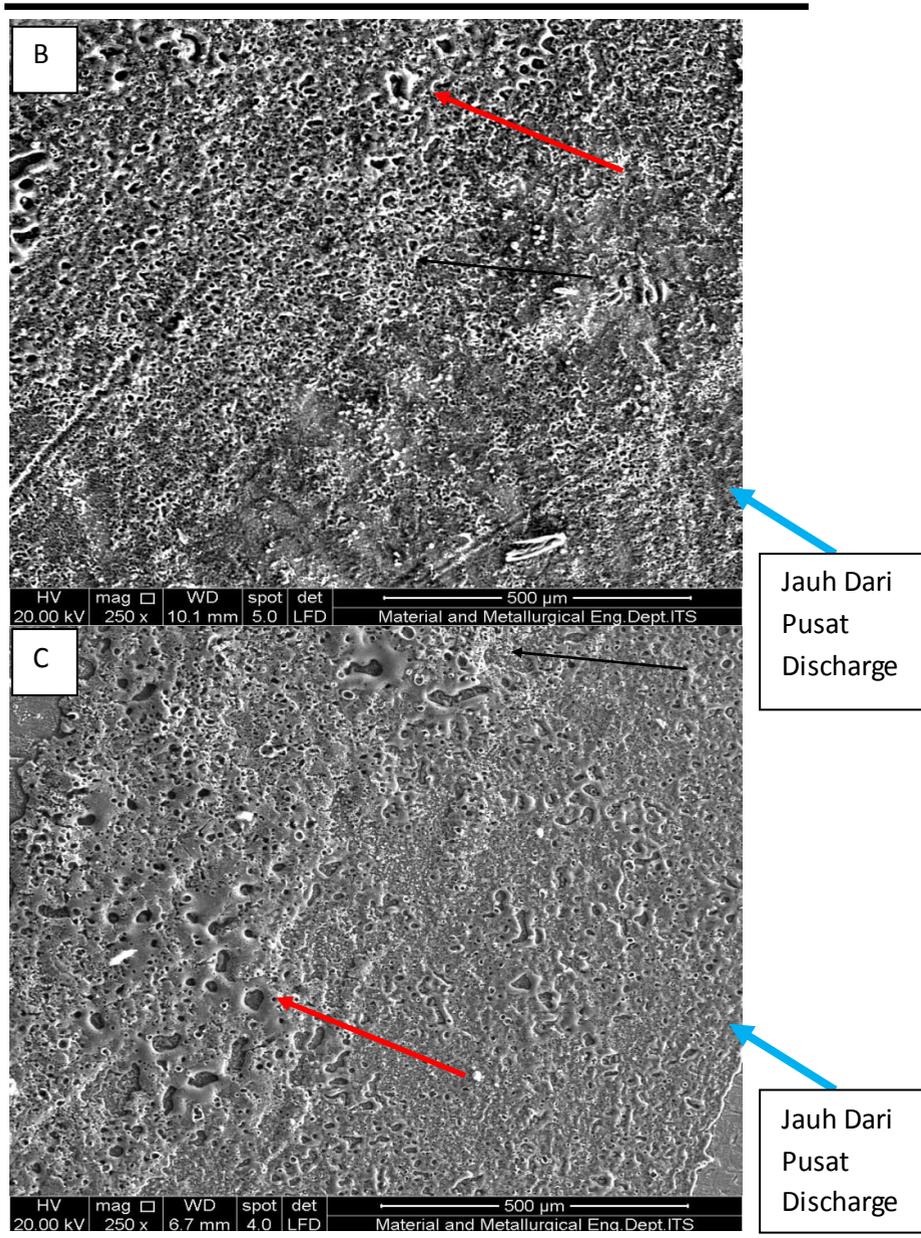


Gambar 4.2 Hasil EDX Pada (a) Base Metal Al2024 (b)Substrat Hasil *Treatment* PEO

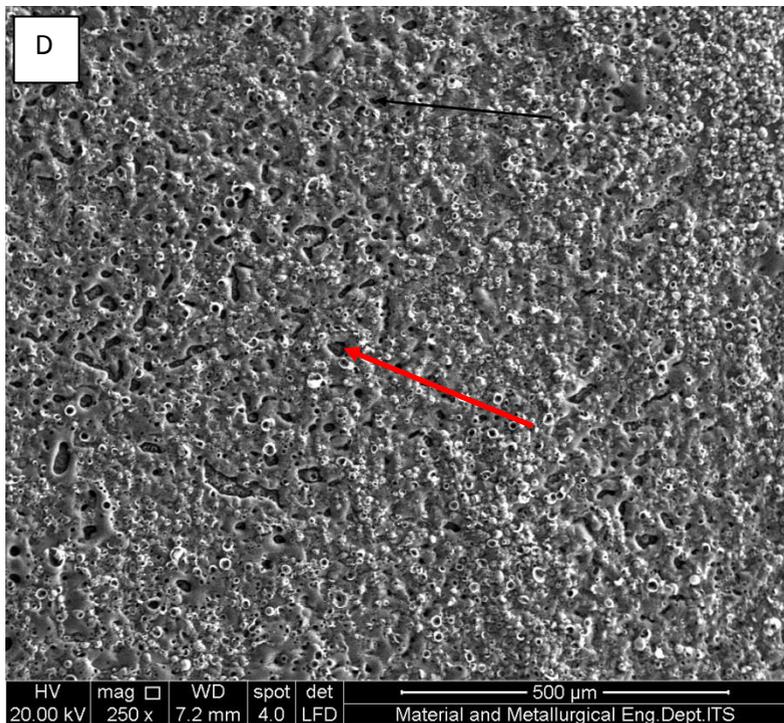
Perubahan komposisi kimia yang terjadi antara *base metal* dengan substrat hasil perlakuan PEO menunjukkan pada proses PEO mengalami reaksi kimia dan elektrokimia yang ditunjukkan pada hasil EDX dan juga dengan perlakuan PEO terjadi perubahan struktur yang terjadi pada morfologi hasil pengamatan SEM.

Selanjutnya setelah melihat perbandingan antara *base metal* dengan substrat yang di treatment dengan PEO, akan dilihat perbandingan morfologi permukaan antara PEO dengan waktu oksidasi yang berbeda.





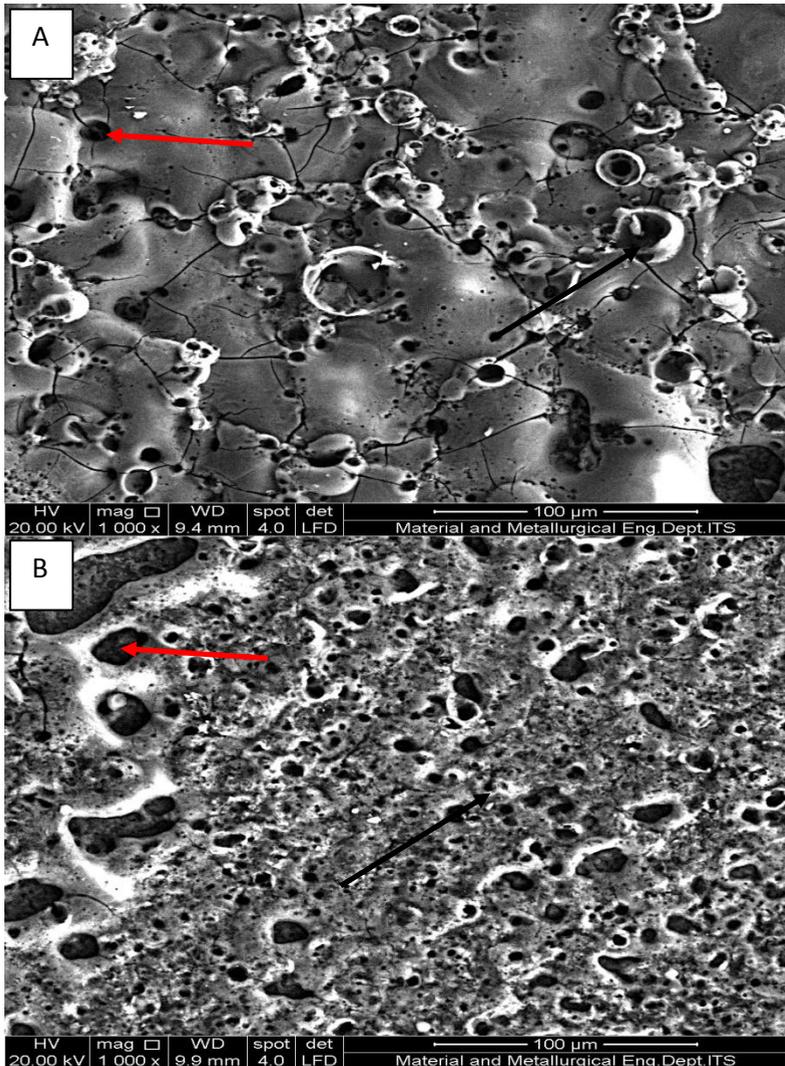
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



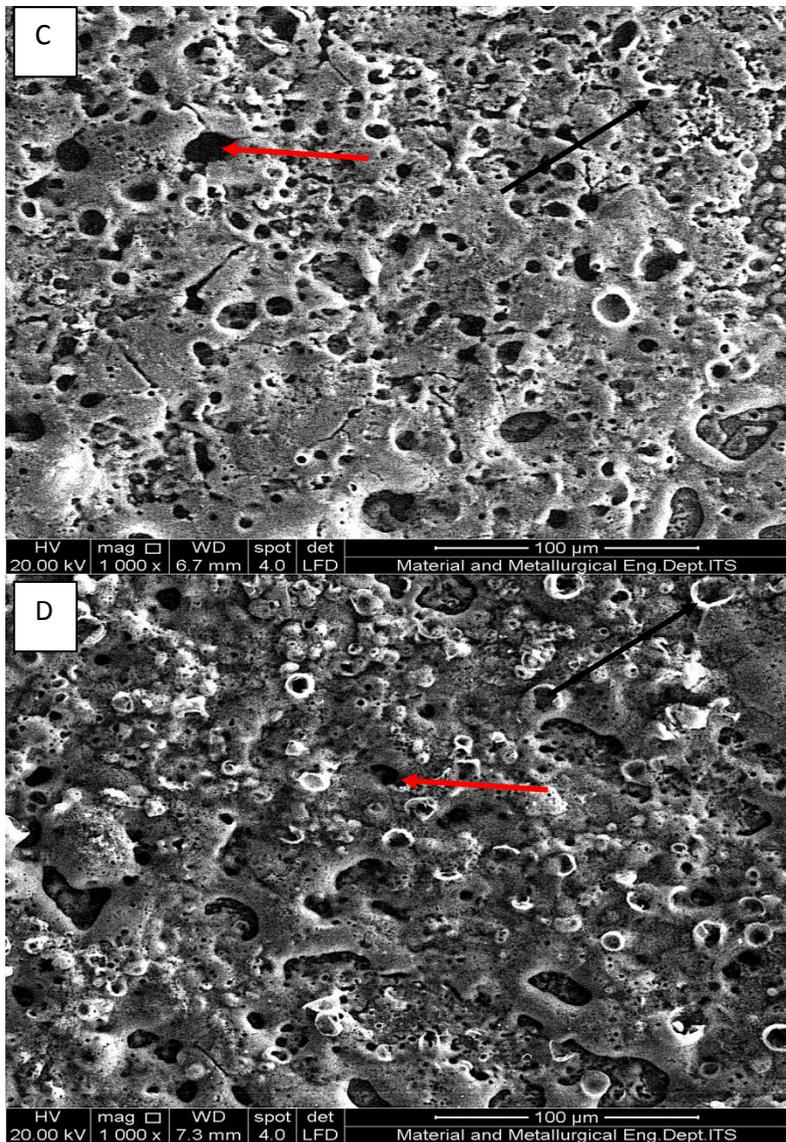
Gambar 4.3 Hasil Perbesaran SEM 250X Pada (a)PEO 10 Menit
(b)PEO 20 Menit (c)PEO 30 Menit (d)PEO 40 Menit

Pada hasil SEM dengan perbedaan waktu oksidasi dengan meningkatnya waktu oksidasi menghasilkan ukuran lembah yang lebih besar seperti ditunjukkan pada anak panah warna merah. Pada hasil SEM semakin terlihat dengan meningkatnya waktu oksidasi menghasilkan struktur yang lebih kasar seperti terlihat pada PEO 40 menit, terlihat struktur kasar yang merata, hasil struktur yang lebih halus ditunjukkan pada PEO 20 menit dan 30 menit dikarenakan bagian bawah yang jauh dari pusat *discharge*, Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Vahid (2014) dengan meningkatnya waktu oksidasi akan menghasilkan

struktur *crater* (anak panah warna merah) dengan diameter yang lebih besar. Untuk lebih jelasnya akan dibandingkan hasil SEM dengan perbesaran 1000X seperti pada gambar 4.4 berikut

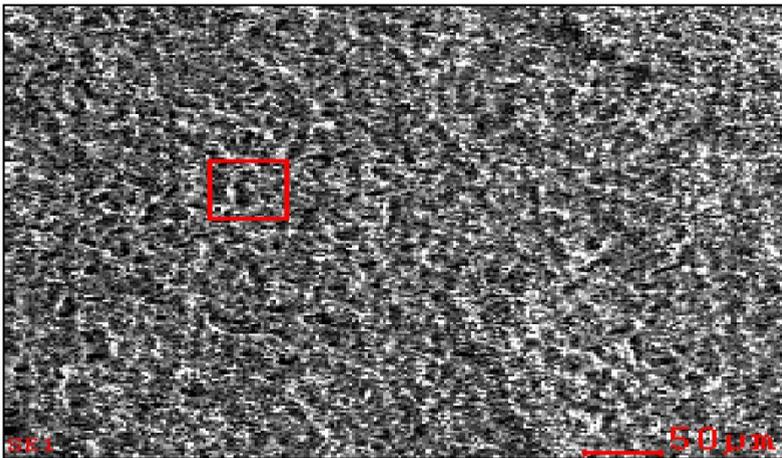


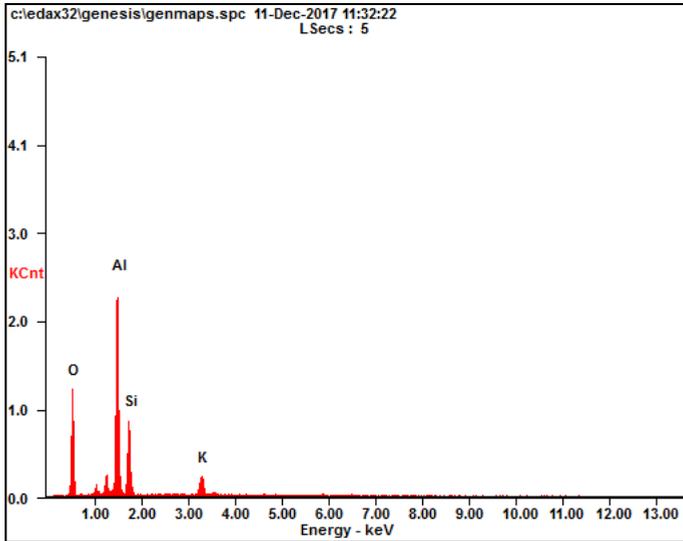
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.4 Hasil SEM Perbesaran 1000X (a)PEO 10 Menit
(b)PEO 20 Menit (c)PEO 30 Menit (d)PEO 40 Menit

Dari gambar 4.4 terlihat jelas pada waktu yang lebih sebentar (10 dan 20 menit) masih terlihat lebih halus dengan banyaknya struktur kelabu *nodular* jika dibandingkan dengan waktu oksidasi yang lebih lama (30 menit dan 40 menit) lebih terdapat banyak struktur berlubang yang gelap. Kandungan dua struktur utama yang terbentuk akibat proses PEO yang lebih lama, yaitu lembah yang berwarna kegelapan ditandai dengan anak panah warna merah dan struktur *nodular* dengan warna kelabu yang ditandai dengan anak panah warna hitam. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Vahid dkk (2015) area lembah terdiri dari aluminium yang teroksidasi dan merupakan pusat *discharge* pada saat proses PEO sehingga aluminium yang meleleh keluar dari dalam lalu dengan cepat membeku karena kontak dengan elektrolit sehingga membentuk kolam atau lembah, pada pengujian EDX yang dilakukan, pada bagian lembah mengandung komposisi aluminium dan oksigen yang tinggi serta kandungan silikon yang rendah. Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Lugovskoy dan Zinigrad (2013) dimana pada bagian *crater* memiliki komposisi aluminium dan oksigen yang tinggi serta kandungan silikon yang rendah.



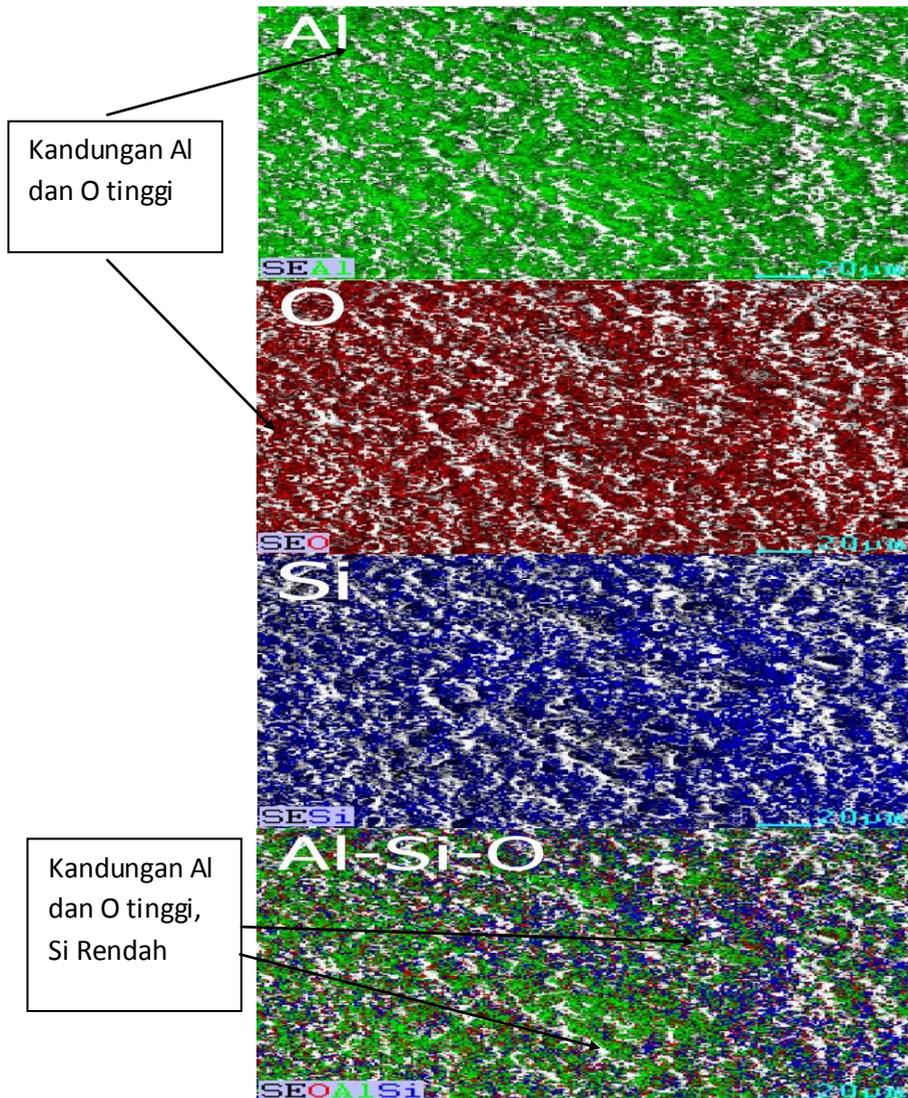


Gambar 4.5 *Spot* EDX Pada PEO 40 Menit di Bagian Lembah

Tabel 4.1 Hasil EDX Pada *Spot* Lembah

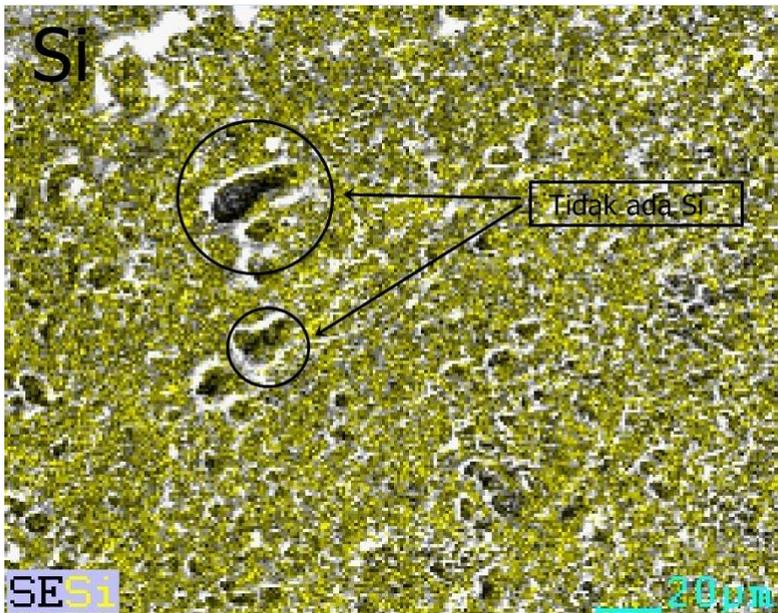
Unsur	Wt%	At%
O K	42,11	56,23
Al K	33,07	26,18
Si K	18,78	14,29
K K	6,04	3,30

Gambar 4.5 dan Tabel 4.1 menunjukkan hasil spot EDX pada bagian lembah, dimana semakin banyaknya aluminium oksida yang terbentuk dengan semakin lamanya waktu oksidasi, hasil ini sesuai dengan pengujian EDX dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Pada hasil mapping di gambar 4.6 terlihat di bagian dengan kandungan yang kaya aluminium dan oksigen ditunjukkan dengan warna merah dan hijau terdapat pada bagian crater.

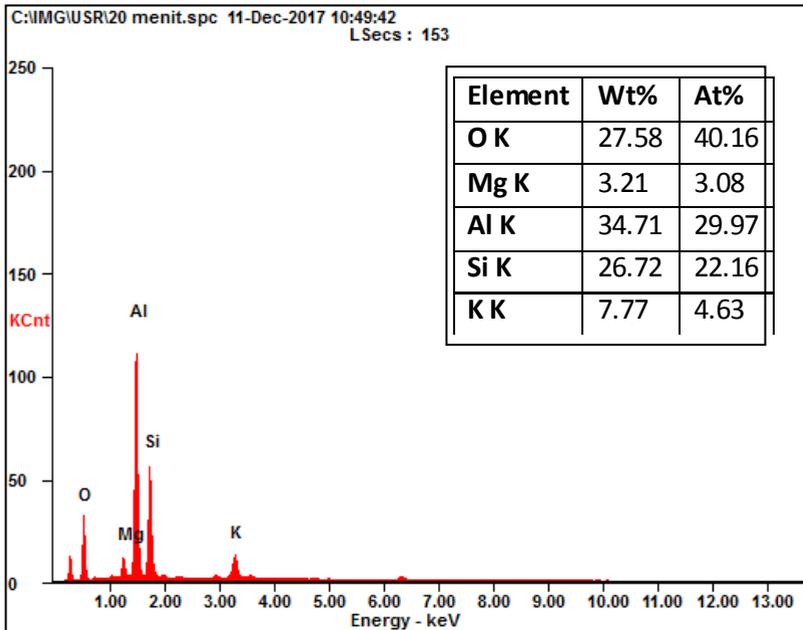


Gambar 4.6 Hasil *Mapping* Pada PEO 40 Menit

Jumlah aluminium dan oksigen yang lebih banyak pada bagian lembah tidak mengesankan karena sesuai pembahasan sebelumnya fasa alumina (Al_2O_3) terbentuk dari bagian dalam, aluminium berasal dari substrat sehingga membentuk lubang dimana oksigen juga berpenetrasi ke dalam lubang membentuk aluminium oksida, sementara itu bagian *nodular* lebih kaya akan silikon di akibatkan proses terbentuknya struktur *nodular* ini dimulai dengan permukaan yang kontak dengan elektrolit (Na_2SiO_3) yang mengandung silikon sehingga pada hasil EDX memperlihatkan kandungan silikon yang tinggi pada bagian *nodular*. Hasil EDX pada substrat dengan perlakuan PEO 20 menit memiliki lebih banyak silikon karena banyaknya struktur *nodular* dibandingkan struktur lembah. Begitu juga hasil *mapping* EDX pada substrat hasil PEO 20 menit.



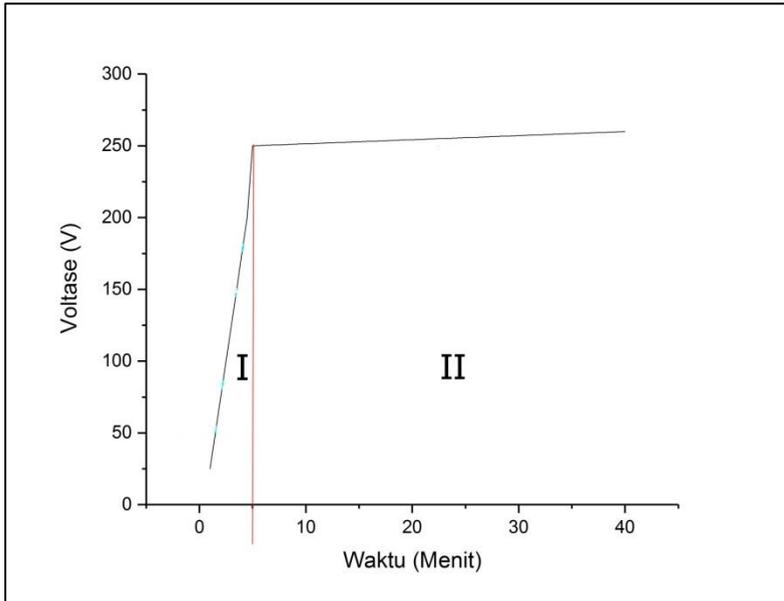
Gambar 4.7 Hasil *Mapping* Unsur Silikon Pada PEO 20 Menit



Gambar 4.8 Grafik EDX Pada PEO 20 Menit

Seperti pada gambar 2.5 lubang atau lembah (*crater*) yang terbentuk pada struktur merupakan hasil penetrasi oksigen dari luar dan aluminium yang meleleh menuju keluar sehingga terbentuk kolam yang banyak mengandung senyawa aluminium oksida seperti pada poin B, sementara senyawa silikat terbentuk akibat kontakannya dengan elektrolit pada poin A. Pengaruh waktu pada proses PEO terhadap morfologi menunjukkan dengan semakin lamanya waktu oksidasi akan menghasilkan diameter lembah yang semakin membesar hasil serupa juga didapat oleh penelitian sebelumnya (Sundarajan dan Rama, 2003) yang selanjutnya akan berpengaruh ke struktur dan morfologi yang terbentuk pada kasus PEO ini dengan semakin lamanya waktu oksidasi akan mendorong terbentuknya struktur aluminium oksida dan semakin lamanya waktu oksidasi juga memungkinkan

terbentuknya lapisan PEO yang lebih tebal yang juga akan berpengaruh ke sifat mekaniknya.

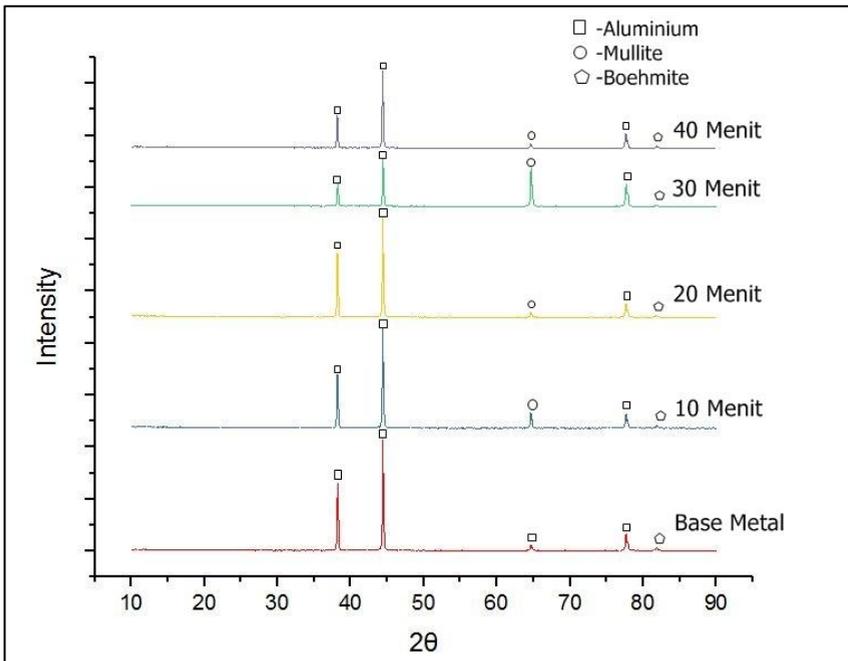


Gambar 4.9 Respon Waktu – Voltase Pada Proses PEO

Pada respon waktu – tegangan yang dijelaskan di bab 2, struktur yang akan terbentuk juga dipengaruhi oleh *spark* yang terbentuk dalam proses PEO ini, bahkan struktur yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh *spark* yang dihasilkan dari respon waktu – tegangan ini. Pada proses ini tahap PEO hanya sampai di tahap II dimana tahap II ini dimulai dari menit ke-5. Adapun waktu disini berpengaruh seperti pada penjelasan – penjelasan sebelumnya dengan semakin lamanya waktu oksidasi semakin memungkinkan terjadinya difusi oksigen ke dalam substrat sehingga tidak mengherankan jika PEO pada menit 40 menghasilkan struktur *crater* paling banyak yang akibatnya PEO dengan waktu oksidasi lebih lama memiliki fasa aluminium oksida yang lebih banyak.

4.2. Analisa Fasa

Untuk mengetahui senyawa yang terbentuk pada substrat paduan aluminium Al2024 setelah di proses PEO, dilakukan pengujian dengan X – Ray Diffraction (XRD). Hasil pengujian tersaji pada gambar 4.10. Pada grafik tersebut, terlihat perbedaan pada hasil XRD antara substrat paduan aluminium Al2024 dengan paduan aluminium setelah di proses dengan PEO



Gambar 4.10 Hasil Uji XRD

Pada hasil XRD yang dilakukan pada *base metal* ditemukan puncak – puncak difraksi pada $2\theta = 38,21^\circ$; $44,40^\circ$; $77,66^\circ$ analisa XRD pada puncak – puncak difraksi menggunakan data JCPDF Card menunjukkan adanya fasa aluminium yang tinggi pada base metal, hal ini sesuai dengan pengujian OES dan EDX.

pada substrat yang di proses dengan PEO menunjukkan puncak – puncak difraksi yang tidak jauh berbeda dengan puncak difraksi yang dihasilkan oleh difraksi sinar – X substrat tanpa perlakuan walaupun pada 2θ tertentu memiliki perbedaan sebagai tanda munculnya fasa baru akibat proses PEO, pada proses PEO dengan variasi waktu oksidasi tidak terjadi perubahan 2θ pada masing – masing perubahan waktu hanya saja menunjukkan intensitas yang berubah, pada hasil XRD dari variasi waktu oksidasi pada proses PEO ini terlihat kecenderungan semakin menurunnya intensitas pada $2\theta = 38,2^\circ$ dan $2\theta = 44,4^\circ$ yang menunjukkan semakin turunnya intensitas aluminium hingga pada lama waktu oksidasi 30 menit intensitas fasa aluminium hampir tidak terlihat, selain itu terdapat juga kecenderungan meningkatnya intensitas – intensitas pada $2\theta = 66,8^\circ$ munculnya puncak – puncak difraksi tersebut menandakan munculnya fasa mullite sebagai akibat pengaruh waktu oksidasi pada proses PEO.

Berdasarkan pola difraksi sinar – X pada gambar 4.10 menunjukkan substrat yang terdiri dari fasa aluminium dan spesimen hasil PEO yang terdiri dari aluminium, Al_2O_3 , boehmite dan mullite. Hal ini membuktikan proses PEO menghasilkan alumina dan dengan kandungan silikat pada elektrolit menghasilkan fasa mullite. Fasa aluminium yang tetap ada setelah proses PEO dapat berasal dari sinar – X yang tembus ke substrat walaupun sudah digunakan *incident angle* yang rendah ($5,5^\circ$) sinar – X dapat dengan mudah menembus lapisan PEO akibat porositas yang tinggi, sehingga *peak* dari substrat terdeteksi, hasil XRD serupa juga didapati oleh Mehdi dan Hossein (2013). Alumina merupakan fasa khas yang muncul pada paduan aluminium dengan proses PEO. Terbentuknya lapisan oksida pada proses PEO dimulai dengan lapisan oksida yang terlontar dari substrat yang mengalami PEO, lapisan yang terlontar akan terkena laju pendinginan yang cepat karena langsung berkontak dengan elektrolit, laju pendinginan ini juga yang mendorong terbentuknya fasa $\gamma-Al_2O_3$ pada solidifikasi *droplet* alumina. Konduktivitas panas alumina yang rendah menyebabkan

pemanasan lokal dibawah lapisan, pada pemanasan lebih lanjut akan terjadi transformasi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ menjadi $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, kandungan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ meningkat dari permukaan hingga ke dalam lapisan sementara kandungan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ menurun dari permukaan hingga ke dalam lapisan (Sundarajan dan Rama. 2003). Pengintian homogen pada solidifikasi *droplet* alumina pada pendinginan proses PEO lebih mudah untuk menghasilkan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dibanding $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ karena $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ membutuhkan energi bebas kritis yang lebih rendah untuk pengintian. Hal ini sesuai dengan hasil XRD pada gambar 4.10 karena pada voltase yang tidak terlalu tinggi untuk proses PEO (260V DC) sulit untuk mempertahankan plasma setelah terbentuk lapisan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, untuk mendapatkan $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ diperlukan voltase yang lebih tinggi untuk mencapai *dielectric breakdown* yang lebih tinggi sehingga didapatkan fasa $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang memiliki kekerasan dan sifat mekanik lebih baik.

Adapun pengaruh waktu terhadap lapisan PEO dengan meningkatnya waktu menghasilkan puncak yang semakin tajam seperti penelitian yang dilakukan oleh (Kasalica dkk 2016) semakin lama waktu PEO menandakan bertumbuhnya fasa kristal. Mekanisme yang terjadi pada pembentukan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$: perubahan amorfus alumina menjadi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ akibat pemanasan lokal pada substrat PEO dan pertumbuhan langsung kristal pada dasar akibat interaksi plasma dengan aluminium cair. Hasil penelitian Kasalica dkk menunjukkan dengan lamanya waktu oksidasi PEO menghasilkan kenaikan persentase fasa kristalin, hal ini sesuai dengan hasil XRD yang ditampilkan oleh gambar 4.10 dimana fasa $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ mengalami kecenderungan kenaikan intensitas, *peak* yang semakin tajam dan tinggi dengan bertambah lamanya waktu oksidasi proses PEO selanjutnya gas yang tersisa akan menjadi penghalang baru untuk *dielectric breakdown* pada tahap PEO selanjutnya, dimana *dielectric breakdown* untuk tahap PEO selanjutnya membutuhkan nilai *breakdown* yang lebih tinggi sehingga dibutuhkan pula tegangan yang lebih tinggi agar terbentuk plasma – plasma atau *microarc* untuk proses lebih lanjutnya. Hasil lain yang didapat dengan semakin lamanya waktu

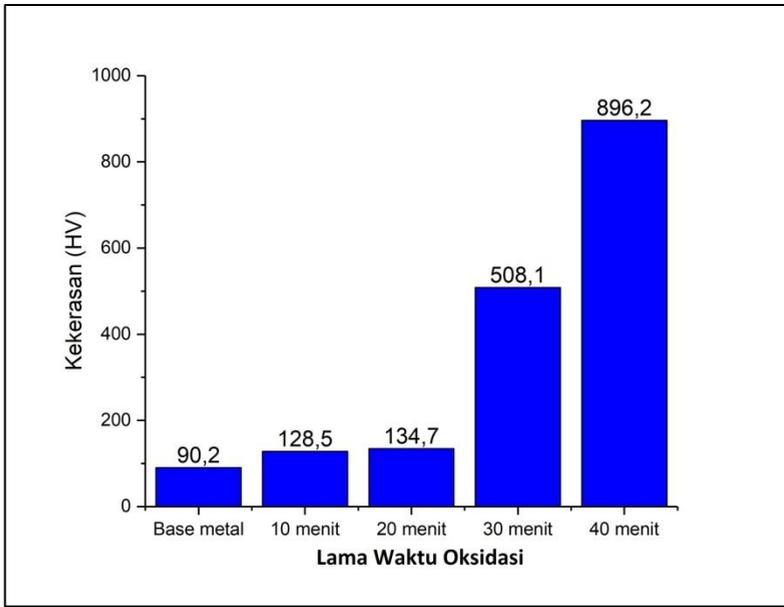
oksidasi pada proses PEO adalah semakin tebalnya lapisan yang terbentuk, hal ini bisa didasarkan pada grafik XRD, jika pada PEO dengan waktu yang lebih sebentar terlihat banyak difraksi 2θ pada aluminium yang terlihat, dengan meningkatnya waktu oksidasi PEO, 2θ aluminium semakin menurun menandakan semakin menipisnya *thin film* pada permukaan, sehingga sinarX yang sebelumnya mudah di difraksikan oleh aluminium menjadi sulit di difraksikan karena adanya penghalang di permukaan berupa lapisan yang terbentuk semakin menebal.

4.3. Analisa Kekerasan

Analisa kekerasan yang dilakukan menggunakan uji kekerasan *microhardness* Vickers seperti pada bab 3, pada masing – masing sampel dilakukan pengujian dengan memberi beban 300gf selama 10 detik dan setelah itu dilihat indentasi diagonal d1 dan d2 sehingga didapat nilai kekerasan spesimen. Selain dilakukan pengukuran kekerasan dari lapisan yang dekat dengan pusat discharge PEO pengukuran kekerasan juga diukur dari beberapa jarak yang diukur dari pusat discharge, 3mm, 6mm dan 12mm.

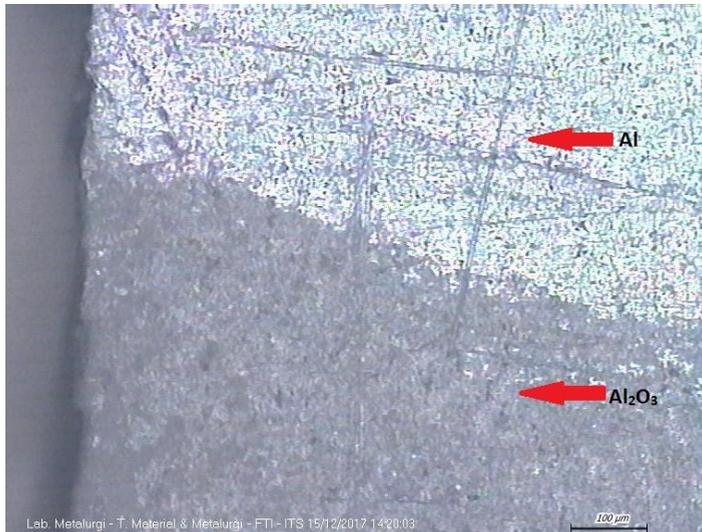
Tabel 4.2 Hasil Uji Kekerasan

Material	Diagonal Indentasi (μm)		Kekerasan (HV)
	d1	d2	
Base metal	80,09	76,94	90,2
PEO 10 menit	63,70	67,88	128,5
PEO 20 menit	67,93	60,58	134,7
PEO 30 menit	33,51	32,67	508,1
PEO 40 menit	27,96	21,87	896,2



Gambar 4.11 Grafik Hasil Uji *Microhardness* Vickers

Dari grafik terlihat bahwa terjadi peningkatan kekerasan pada substrat dengan perlakuan PEO dimulai dari kekerasan *base metal* aluminium sebesar 90,2 HV yang sesuai dengan hasil kekerasan aluminium pada umumnya (Azom, 2017) yang dilanjutkan dengan kekerasan aluminium yang meningkat setelah di *treatment* dengan proses PEO. Terlihat bahwa dengan meningkatnya waktu PEO menghasilkan kekerasan yang semakin meningkat, meningkatnya kekerasan ini mulai terlihat signifikan ketika waktu oksidasi selama 30 menit, terlihat aluminium mengalami kenaikan kekerasan yang cukup tinggi, jika dibandingkan dengan *base metal*, perlakuan PEO waktu 10 menit dan 20 menit tidak begitu memberikan kenaikan kekerasan yang jauh, 90,2 HV menjadi 128,5 dan 134,7 HV akan tetapi ketika waktu oksidasi selama 30 menit kekerasan lapisan PEO mengalami kenaikan yang sangat tinggi sekitar 270% jika dibandingkan dengan kekerasan pada waktu oksidasi 20 menit.

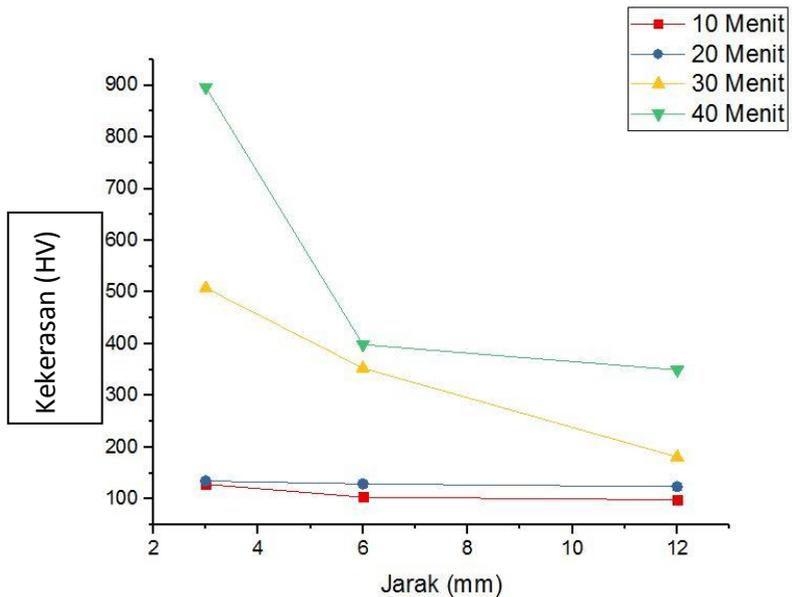


Gambar 4.12 Perbesaran Mikroskop Opti 50X pada Substrat PEO

Kekerasan pada substrat yang di *treatment* dengan PEO terlihat lebih tinggi pada bagian metalografi yang lebih gelap, dimana terbentuk lapisan keramik yang dapat berupa $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ataupun mullite. Kekerasan pada material ditentukan oleh fasa yang terbentuk pada lapisan, pada fasa yang terdapat banyak kandungan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ kekerasan akan menunjukkan kekerasan yang tinggi sementara pada kandungan amorfus alumina yang tinggi serta kandungan aluminium yang masih tinggi pada hasil uji XRD menunjukkan kekerasan yang rendah, hal ini sesuai dengan hasil uji XRD pada sub – bab 4.2 dimana hasil analisa fasa pada *base metal*, perlakuan PEO 10 menit dan perlakuan PEO 20 menit menunjukkan intensitas fasa aluminium yang masih sangat tinggi sementara pada hasil uji XRD pada 30 menit dan 40 menit menunjukkan kandungan aluminium yang tidak terlalu tinggi serta diikuti intensitas $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang meningkat sehingga menghasilkan kekerasan lapisan yang tinggi. Selanjutnya pada tabel 4.3 menunjukkan distribusi kekerasan dari pusat *discharge*.

Tabel 4.3 Distribusi Kekerasan Permukaan

Spesimen	Nilai Kekerasan Pada Jarak (HV)		
	3mm	6mm	12mm
PEO 10 Menit	128,5	103,5	98,5
PEO 20 Menit	134,7	129,1	123,9
PEO 30 Menit	508,1	353,0	181,2
PEO 40 Menit	896,20	398,53	349,4

Gambar 4.13 Grafik Distribusi Kekerasan Dari Pusat *Discharge*

Dalam prosesnya PEO sendiri terdapat daerah yang dekat dengan pusat *discharge* sehingga terbentuk struktur dapat berupa $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ atau mullite, akan tetapi jika kekerasan berada jauh dari pusat *discharge* terbentuk senyawa selain alumina atau mullite yang dapat berupa boehmite dengan kekerasan yang rendah jika dibandingkan dengan mullite dan lapisan alumina.



Gambar 4.14 Diagonal Indentasi *Base Metal*

Pada logam dengan kandungan aluminium yang tinggi dan fasa keramik yang rendah menghasilkan indentasi yang tampak jelas dan lebar seperti pada gambar 4.16, pada kandungan Al_2O_3 yang tinggi seperti pada perlakuan 30 menit dan 40 menit indentasi piramida terlihat samar atau kurang jelas karena keramik yang sulit dipantulkan cahaya oleh mikroskop dibandingkan dengan logam selain itu kekerasan yang tinggi menyebabkan indentasi yang terjadi pada keramik tidak dapat tembus ke dalam dan tidak dapat lebar, sehingga menyebabkan pembacaan diagonal keramik

yang sempit, pembacaan diagonal keramik yang sempit ini membuktikan jika hasil PEO dengan waktu yang lebih lama pada 30 menit dan 40 menit menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa proses PEO serta waktu proses PEO sebentar seperti 10 menit dan 20 menit.

(Halaman Ini Sengaja di Kosongkan)

BAB V

KESIMPULAN

V.1. Kesimpulan

1. Pengaruh waktu oksidasi pada proses PEO menyebabkan struktur *crater* dengan diameter yang lebih besar, struktur *crater* ini bertanggung jawab atas semakin banyaknya komposisi aluminium oksida pada lapisan dengan meningkatnya waktu oksidasi pada PEO.
2. Pengaruh waktu oksidasi pada PEO menyebabkan semakin meningkatnya kekerasan dari lapisan dengan semakin lamanya waktu oksidasi, waktu oksidasi yang lebih lama menghasilkan aluminium oksida yang lebih banyak, kandungan aluminium oksida inilah yang memberikan kekerasan hingga 896,2 HV pada lapisan hasil proses PEO.

V.2. Saran

1. Dari penelitian yang dilakukan merupakan bahasan yang masih relatif baru dan belum banyak penelitian tentang PEO yang dilakukan, terkhusus di Indonesia, oleh karena itu dalam penelitian selanjutnya diharapkan terdapat interdisiplin antara pemahaman elektro dengan material, Karena *core* dari penelitian ini juga bermula dari pembentukan *spark* yang sangat dipengaruhi oleh respon voltase terhadap waktu.
2. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan *power supply* yang *custom*, karena inti dari pembentuk lapisan sangat berpengaruh terhadap kemampuan *power supply* untuk menyuplai arus dan tegangan.

-
3. Penelitian selanjutnya menggunakan *cooling system* dengan pendinginan yang benar – benar terkontrol.
 4. Perlu dilakukan penelitian PEO dengan pengaruh waktu oksidasi yang lebih lama, sehingga terlihat batas waktu yang paling optimal untuk mendapatkan kekerasan yang paling baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Anil M. K., Varsha A. 2014. **Satellite Technology: Principles and Applications**, 3rd Edition. Wiley
- ASM. 1994. **ASM Metal Handbook 1994 Surface Engineering Vol. 5**
- ASM. 2003. **ASM Metal Handbook 2003, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection Vol. 13A**
- Auerkari, Pertti. 1996. **Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics**. Technical Research Center of Finland
- Campo, M., M. Carboneraz, M.D. Lopez, P. Rodrigo, E. Otero, J. Rams. 2009. "Corrosion Resistance of Thermally Sprayed Al and Al/SiC Coatings on Mg". **Surface & Coatings Technology** 203: 3224-E3230
- Curran J.A., H. Kalkançı., Y. Magurova., T.W. Clyne. 2007. **Surf. Coat. Technol** 201 8683 – 8687.
- Davis J.R. 2001. **Handbook of Thermal Spray Technology**. ASM International. Ohio
- Duan H P., Yan C W., Wang F H. 2007. "growth process of plasma electrolytic oxidation films formed on magnesium alloy AZ91D in silicate solution". **Electrochimica Acta** 52 5002–5009
- Dynys, F.W., J.W. Halloran. 1982. "Alpha Alumina Formation in Alum Derived Gamma Alumina". **Journal of American Ceramic Society** 65(2): 442-448

- Fitrianova, Larasati. 2014. **Pengaruh Jarak Nozzle dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan Ni-20Cr dengan Metode Wire Arc Spray terhadap Ketahanan Thermal**. Departemen Teknik Material ITS. Surabaya
- Gerardin, S. Sundaresan., J. Benziger., A. Navrotsky. 1994. **Chem. Mater** 6 160–170
- Harisson, Timothy. 2014. "Modelling the effects of intergranular corrosion around a fastener hole in 7075-T651 aluminium alloy". **Computational Materials Science** 84 74-82
- He J., Cai Q Z., Luo H H., Yu L., Wei B K .2009. "Influence of silicon on growth process of plasma electrolytic oxidation coating on al-Si alloy". **J Alloys Compd** 471 395–399
- Henley V. 1982. **Anodic oxidation of aluminium and its alloys**. Pergamon Press. England
- Hussein R.O., Northwood D.O., A. Yerokhin., Matthews A. 2010. "Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process". **J. Phys. D: Appl. Phys** 43 105 – 203 doi:10.1088/0022-3727/43/10/105203
- Jiang, B. L. 2010. "**Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys** in Dong, Hanshan. **Surface Engineering of Light Alloys**. Woodhead Publishing. England
- Kaisar, Irvan. 2017. **Studi Analisa Kegagalan pada AFT Channel Cargo Pesawat Sriwijaya Air B 737 – 300 PK – CKF**. Departemen Teknik Material ITS. Surabaya

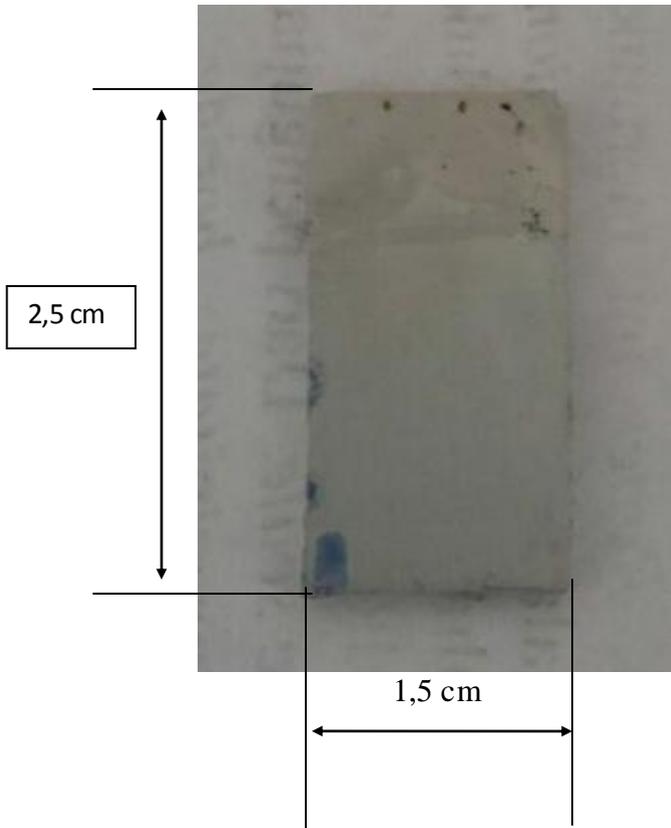
- Karaoglanli, A.C, E. Altuncu, I. Ozdemir, A. Turk., F. Ustel. 2011. "Structure and Durability Evaluation of YSZ + Al₂O₃ Composite TBCs with APS and HVOF Bond Coats Under Thermal Cycling Conditions". **Surface & Coatings Technology** 205: S369–S373
- Kasalica., B. Radic-Peric., dkk. 2016. "The mechanism of evolution of microdischarges at the beginning of the PEO process on aluminum". **Surface & Coatings Technology** 298 24–32
- Kim, B Y., J. G. Kim., D. Y. Lee., M. Jeon, Y. N. Kim, S. Y. Kim., K. Y. Kim. 2012. "Effect of Na₂P₂O₇ Electrolyte and Al Alloy Composition on Physical and Crystallographical properties of PEO Coating Layer : I. Physical Properties of PEO Layer". **Journal of the Korean Ceramic Society** 49-3 (2012), 241-246
- Lugovskoy, Alex dan Zinigrad, Michael. 2013. "Plasma Electrolytic Oxidation of Valve Metals"
- Luo H H, Cai Q Z, Wei B K, Yu B, He J, Li D J. 2009. "Study on the microstructure and corrosion resistance of ZrO₂-containing ceramic coatings formed on magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation". **Journal Alloys Compd** 474 551 – 556
- Maciver, D.S., H. H. Tobin., R. T. Barth. 1963. "Catalyst Aluminas I Surface Chemistry of Eta and Gamma Alumina". **Journal of Catalyst** 2: 485-497
- Malayoglu., K.C. Tekin., U. Malayoglu., S. Shrestha. 2011. "An investigation into the mechanical and tribological properties of plasma electrolytic oxidation and hard-anodized coatings on 6082 aluminum alloy". **Mater. Sci. Eng. A.** 528 7451–7460.

- Markov G A., Markova G V. 1976. **USSR Patent** 526 961 Bul. Inv. 32
- Mehdi Javidi., Hossein Fadaee. 2013. "Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior". **Applied Surface Science** 286 212 – 219
- Mukesh. S.K., Youngjoo, J., Jongmin, Kim., Hyungtae, Kim., Jae, J.P. 2014. "Plasma Electrolytic Oxidation in Surface Modification of Metals for Electronics". **Journal of Welding and Joining** 32, 3:27-33.
- Patel J L., Saka N. 2001. "Microplasmic coatings". **Am Ceram Soc Bull** 80 4 27–29.
- Picas J A., Forn a., Rupérez E., Baile M T., Martín E. 2007. "anodizing of aluminium matrix composite A6061/(Al₂O₃)_p for wear and corrosion resistance improvement". **Plasma Process Polymer** 4(S1) S579–S583.
- Shrestha S., B. D Dunn. 2010. "**Surface Engineering of Light Alloys : Plasma electrolytic oxidation and anodising of aluminium alloys for spacecraft applications**". Woodhead Publishing. England
- Shahid M. 1997. "Mechanism of film growth during anodizing of Al8090/SiC metal matrix composites in sulphuric acid electrolyte". **J Mater Sci** 32 3775–3781
- Sheasby P.G., Pinner R. 2001. **The surface treatment and finishing of aluminium and its alloys Vol. 1 6th Ed.** Finishing Publications Ltd. UK

- Sundararajan G., L. Rama Krishna. 2003. "Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology". **Surf. Coat. Technol.** 167 269–277
- The Canning Handbook. 1982. **Surface Finishing Technology**. Birmingham, England
- Vahid Dehnavi. 2014. **Surface Modification of Aluminum Alloys by Plasma Electrolytic Oxidation**. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2311.
- Vahid Dehnavi dkk. 2015. "Correlation between plasma electrolytic oxidation treatment stages and coating microstructure on aluminum under unipolar pulsed DC mode". **Surface & Coatings Technology** 269 91–99
- Vahid, Dehnavi, David, W.S., Ben, Li., Mehdi, Yari. 2015. "Corrosion properties of plasma electrolytic oxidation coatings on an aluminium alloy". **Materials Chemistry and Physics** 161 49-58
- Voevodin., A. Yerokhin L, Lyubimov V V, Donley M., Zabinski J S. 1996. "Characterization of wear protective al-Si-O coatings formed on al-based alloys by micro-arc discharge treatment". **Surface Coating Technology** 86–87 516–521
- Volynets V D, Gordienko P S, Efimenko A V, Semenova T L. 1991. "Electrochemical nature of the thermally stimulated currents of MOM structures". **Soviet Electrochemistry (English Translation of Elektro-Khimiia)** 26 1371–1376.

- Walsh, F.C., Low, C.T.J., Wood, R.J.K. 2009. "Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys" **Transactions of the Institute of Metal Finishing** 87, 3:122-135
- Wang Y K, Sheng L, Xiong R Z, Li B S. 1999. "Study of ceramic coatings formed by microarc oxidation on al matrix composite surface". **Surface Engineering** 15 2 109–114.
- Wheeler J.A., J A. Curran., S. Shrestha. 2012. "Microstructure and multi-scale mechanical behavior of hard anodized and plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on aluminum alloy 5052". **Surf. Coatings Technol.** 207 480–488.
- Yao Z P, Jiang Y L, Jia F Z, Jiang Z H, Wang F P. 2008. "growth characteristics of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings on Ti-6Al-4V alloy". **Applied Surface Science** 254 4084 – 4091
- Yerokhin A.L., X. Nie., A. Leyland., A. Matthews., S.J. Dowey. 1999. "Plasma electrolysis for surface engineering". **Surf. Coatings Technol.** 122 73 –93.
- Yerokhin A.L., A. Shatrov., V. Samsonov., P. Shashkov., A. Pilkington., A. Leyland., et al. 2005. "Oxide Ceramic Coatings on Aluminium Alloys Produced By a Pulsed Bipolar Plasma Electrolytic Oxidation" **process, Surf. Coatings Technol.** 199 150–157.
- Yerokhin A., R.H.U Khan. 2010. "Anodising of light alloys in Dong, Hanshan **Engineering of Light Alloys.** Woodhead Publishing. England

LAMPIRAN A PERHITUNGAN RAPAT ARUS



$$P = 2,5 \text{ cm} \quad L = 1,5 \text{ cm} \quad W = 0,3 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas Permukaan} &= 2(P*L) + 2(P*W) + 2(L*W) \\ &= 2(2,5*1,5) + 2(2,5*0,3) + 2(1,5*0,3) \\ &= 2(3,75 + 0,75 + 0,45) \\ &= 9,9 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Arus pada Ammeter = min 1,5 – 3A max

Rapat arus min = Arus/Luas Permukaan

$$= 1,5/9,9$$

$$= 0,151 \text{ A/cm}^2$$

Rapat arus max = Arus/Luas Permukaan

$$= 3/9,9$$

$$= 0,303 \text{ A/cm}^2$$

Range rapat arus = 0,151 – 0,303 A/cm²

$$= 151 – 303 \text{ mA/cm}^2$$

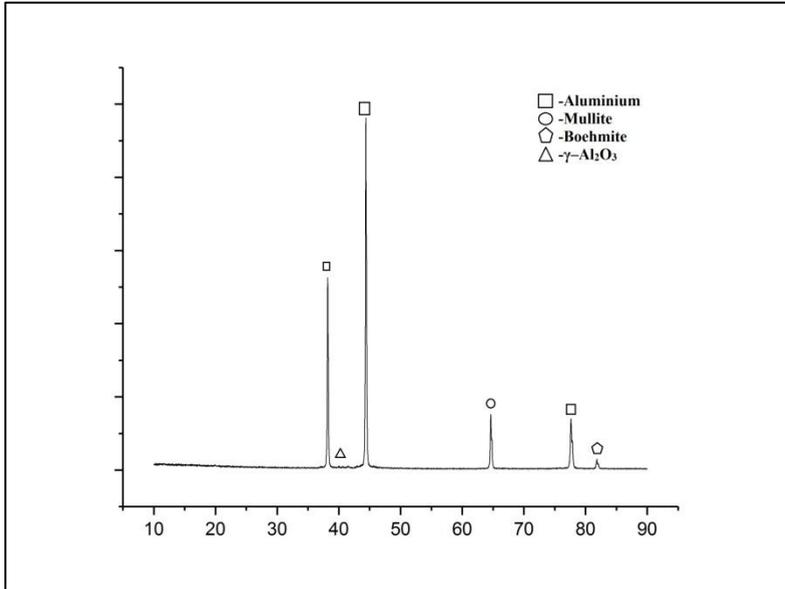


151 mA/cm²

303 mA/cm²

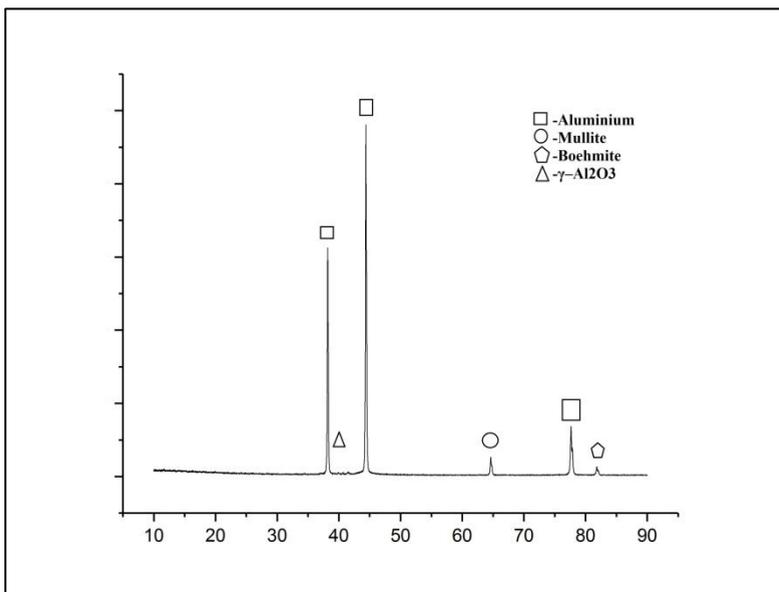
LAMPIRAN B HASIL XRD

PEO 10 Menit



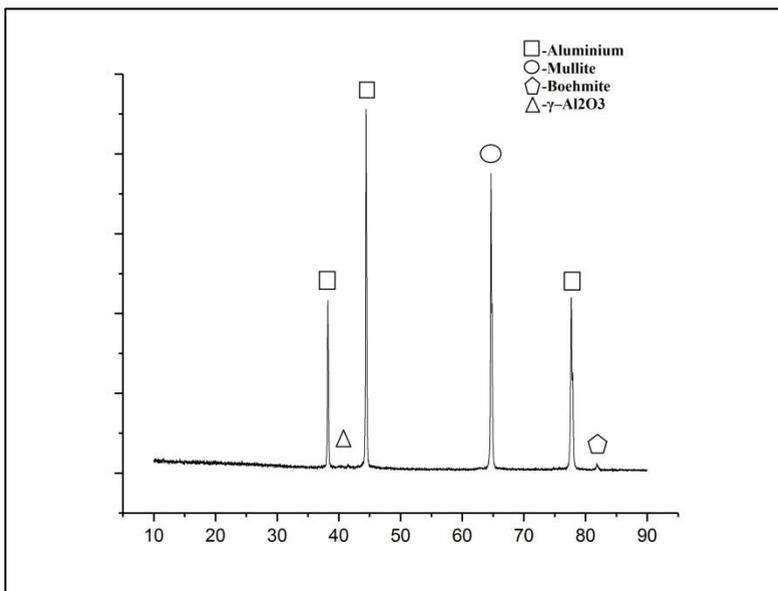
Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
19.8458	12.59	0.8029	4.47379	0.13
38.1860	5140.17	0.1632	2.35491	54.49
38.3052	2648.37	0.0612	2.35370	28.08
39.9649	20.99	0.4080	2.25410	0.22
40.6137	32.36	0.2448	2.21958	0.34
41.5082	36.56	0.3264	2.17379	0.39
44.3742	9432.73	0.1020	2.03981	100.00
44.5088	5220.08	0.0612	2.03901	55.34
64.6207	1462.80	0.1428	1.44115	15.51
64.8300	749.00	0.1020	1.44057	7.94
77.6232	1312.20	0.1836	1.22901	13.91
77.8786	724.37	0.1224	1.22867	7.68
81.8228	226.98	0.0612	1.17622	2.41
82.0661	122.59	0.1224	1.17335	1.30

PEO 20 Menit



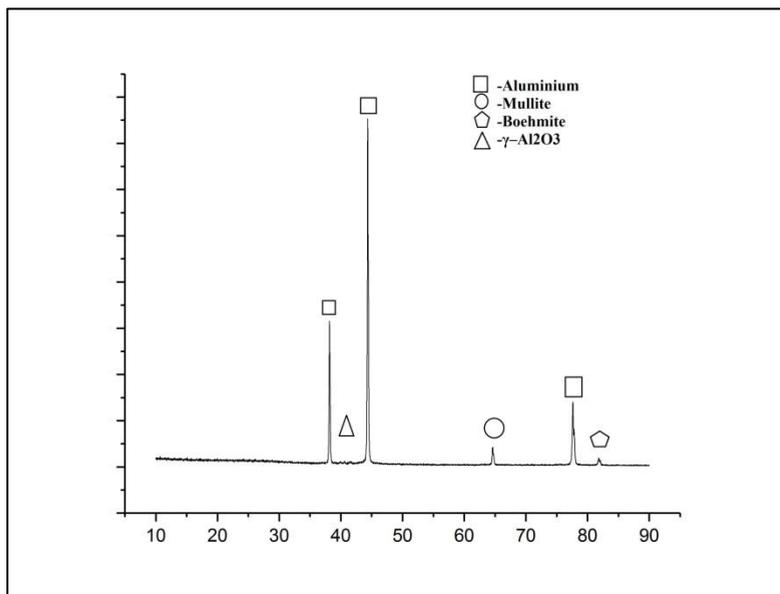
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.4691	4.74	0.8029	8.45017	0.05
34.4285	9.23	0.4015	2.60500	0.10
38.1861	6069.51	0.1428	2.35491	65.21
38.3019	3081.56	0.0612	2.35389	33.11
39.9063	30.18	0.3264	2.25728	0.32
40.6702	31.24	0.1224	2.21663	0.34
41.5092	42.15	0.3264	2.17374	0.45
44.3857	9307.59	0.1224	2.03931	100.00
44.5206	4744.42	0.0816	2.03850	50.97
64.6178	477.09	0.1836	1.44120	5.13
64.8189	247.79	0.0816	1.44079	2.66
77.6505	1283.08	0.1632	1.22865	13.79
77.8853	658.45	0.1224	1.22858	7.07
81.8166	212.16	0.0816	1.17630	2.28
82.0841	107.28	0.1632	1.17314	1.15

PEO 30 Menit



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.2607	9.18	0.4015	8.62135	0.21
38.2037	1999.75	0.1428	2.35387	44.83
38.3296	1173.35	0.0816	2.35225	26.30
41.5805	33.12	0.2448	2.17017	0.74
44.4137	4460.88	0.1224	2.03809	100.00
44.5475	2261.45	0.0612	2.03733	50.70
57.8256	8.85	0.4896	1.59325	0.20
64.6538	3622.80	0.1428	1.44049	81.21
64.8566	1930.18	0.1020	1.44004	43.27
77.6734	2137.00	0.1428	1.22835	47.91
77.9123	1183.80	0.1224	1.22822	26.54
81.8479	74.64	0.1224	1.17593	1.67

PEO 40 Menit



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
38.1598	3002.13	0.1224	2.35647	40.32
38.2858	1356.26	0.0612	2.35484	18.21
39.9225	23.67	0.2448	2.25640	0.32
40.6059	26.88	0.2040	2.21998	0.36
41.4868	31.45	0.3264	2.17486	0.42
44.3539	7446.62	0.1224	2.04070	100.00
44.4895	3656.44	0.0612	2.03985	49.10
64.5682	368.69	0.1428	1.44219	4.95
64.7784	212.30	0.1224	1.44159	2.85
77.6271	1324.19	0.1632	1.22896	17.78
77.8321	698.81	0.0816	1.22928	9.38
81.8126	150.40	0.2040	1.17635	2.02

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian yang dilakukan di dukung oleh laboratorium Konversi Energi Departemen Teknik Elektro ITS dan divisi Karakterisasi Material Departemen Teknik Material ITS. Skripsi ini tidak akan pernah selesai tanpa bantuan dan dukungan dari banyak orang. Oleh karena itu Penulis mengucapkan terimakasih kepada

Pertama, Penulis berterimakasih kepada pembimbing Tugas Akhir Bapak Dr Agung Purniawan, beliau memberikan atmosfir penelitian, dukungan, nasihat, diskusi serta *feedback* yang sangat berpengaruh terhadap apa yang ditulis di dalam Tugas Akhir ini. Terimakasih juga untuk Bapak Haniffudin Nurdiansah selaku dosen pembimbing Tugas Akhir kedua, Beliau memberikan banyak masukan yang membangun sehingga meningkatkan kualitas penelitian dan penulisan buku ini.

Terimakasih juga disampaikan kepada Bapak Naryanto selaku staff laboratorium Konversi Energi Departemen Teknik Elektro ITS atas pengenalan dan pengajaran beliau tentang "elektrikal" serta penggunaan alat - alat listrik. Terimakasih juga kepada Mbak Iis divisi Karakterisasi Material yang dengan sabar dan telaten mengujikan spesimen baik dari pengujian XRD hingga pengujian SEM yang memakan waktu tidak sebentar.

Terimakasih juga tidak luput dari keluarga MT16, banyak hal yang banyak penulis belajar dari pribadi - pribadi luar biasa yang selama 3,5 tahun banyak memberikan penulis pelajaran yang tentunya juga membentuk diri penulis, tidak lupa juga keluarga besar HMMT yang mengajarkan banyak tentang ilmu - ilmu yang tidak didapat di dalam kelas.

Terimakasih juga kepada Alfreda Krisna selaku rekan penulis dalam menulis Tugas Akhir, dikala bersama penulis mengalami kejenuhan dengan hasil penelitian dan deadline yang mencekik untuk tidak pernah menyerah. Terimakasih juga kepada Reyhan dan Ian dimana penulis banyak menulis skripsinya di

kediamannya dan mendukung penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhirnya

Terakhir, Penulis mengucapkan terimakasih sebesar - besarnya kepada Ayahanda Renaldi Muslim dan Ibu Tuti Wardani untuk kasih sayang, dukungan materil dan moril yang tidak pernah putus. Juga untuk saudaraku Jehan Faradika Renaldi, Ridho Akbar Renaldi dan Misykah Khalishah Renaldi. Terimakasih atas dorongan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Irvan Kaisar Renaldi
Surabaya, Januari 2018

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Irvan Kaisar Renaldi lahir di Kota Bekasi pada tanggal 12 Maret 1997. Penulis menempuh pendidikan formal dari SD hingga SMP di Bekasi kemudian dilanjut ke SMA Negeri 1 Bekasi pada tahun 2011, di tahun 2014 Penulis melanjutkan studi ke Departemen Teknik Material FTI – ITS melalui jalur SNMPTN Undangan.

Selama menempuh aktivitas perkuliahan penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan dan perlombaan mahasiswa tingkat nasional salah satunya penulis pernah menjadi staf BSO Material Techno Club HMMT FTI – ITS pada tahun 2015/2016, pada perlombaan mahasiswa, penulis mendapat juara II pada *Smart Competition* Universitas Indonesia pada tahun 2017 dan Juara I pada *Paper Competition Metallurgy and Materials Week* Universitas Indonesia di tahun yang sama. Selain itu penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Korosi dan Analisa Kegagalan untuk praktikum korosi. Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT GMF AeroAsia pada bulan Januari 2017.

Dengan selesainya Tugas Akhir berjudul “Pengaruh Waktu Oksidasi Terhadap Morfologi dan Kekerasan Lapisan Al_2O_3 Pada Aluminium 2024 Menggunakan Metode *Plasma Electrolytic Oxidation*” mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST).

Email : irvan.kaisar@gmail.com