

**PENGARUH *CURRENT DENSITY* DAN *DUTY CYCLE* TERHADAP
KEKERASAN DAN KETEBALAN LAPISAN PERMUKAAN ALUMINIUM
PADA PROSES *PULSE HARD ANODIZING***

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL**

Diajukan untuk memenuhi sebagai persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun Oleh :

**TRI ATMOJO SETIO NUGROHO
NIM. 0310620109**

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN MESIN

MALANG

2010

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH *CURRENT DENSITY* DAN *DUTY CYCLE* TERHADAP
KEKERASAN DAN KETEBALAN LAPISAN PERMUKAAN ALUMINIUM
PADA PROSES *PULSE HARD ANODIZING***

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

**TRI ATMOJO SETIO NUGROHO
NIM. 0310620109**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Sugiarto, ST, MT.
NIP. 19690417 199512 1 001**

**Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc., CSE.
NIP. 19670923 199303 1 002**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH *CURRENT DENSITY* DAN *DUTY CYCLE* TERHADAP
KEKERASAN DAN KETEBALAN LAPISAN PERMUKAAN ALUMINIUM
PADA PROSES *PULSE HARD ANODIZING***

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

**TRI ATMOJO SETIO NUGROHO
NIM. 0310620109**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan **lulus** pada
tanggal 6 Januari 2010

Skripsi I

Skripsi II

**Ir. Masduki, MM
NIP. 19450816 197009 1 001**

**Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng
NIP.19740121 199903 1 001**

Komprehensif

**Ir.Bardji Hadi Pranoto
NIP. 19450714 198103 1 003**

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT
NIP. 19720903 199702 1 001**

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh *Current Density* dan *Duty Cycle* terhadap Kekerasan dan Ketebalan Lapisan Permukaan Aluminium pada Proses *Pulse Hard Anodizing*”** ini dengan baik.

Atas terselesaikannya penulisan skripsi ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M. Eng., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT., selaku Ketua Konsentrasi Teknik Material Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Sugiarto, ST., MT., selaku dosen pembimbing pertama.
5. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc., CSE., selaku dosen pembimbing kedua.
6. Bapak Swastono Hadi dan Ibu Yuli Poedyorini tercinta , serta keluarga besarku atas perlakuan, doa, dukungan material dan spiritual yang diberikan selama ini.
7. Teman-temanku Mesin'03 : Adi, Bayu, Teguh, Yova, Herdian, Bambang, Naro, Edi, Miko, Yadi, Sandra, serta teman-teman angkatan 2003 lainnya.
8. Teman-teman dan segenap pihak yang telah mendukung terselesaikannya skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Saran dan kritik yang bersifat membangun penulis harapkan dari pembaca dan semua pihak. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi para pembacanya. Amin.

Malang, Januari 2010

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terdahulu	4
2.2 Aluminium	4
2.2.1. Klasifikasi paduan aluminium	5
2.2.2. Sifat – sifat aluminium	6
2.2.3. Pengaruh penambahan unsure paduan pada aluminium	7
2.2.4. Aluminium paduan seri 6061	8
2.3 Elektrolisis	8
2.3.1. Reaksi redoks	10
2.3.2. Elektrolit	11
2.4 <i>Current Density</i>	13
2.5 Proses <i>Anodizing</i>	14
2.5.1. Berdasarkan jenis larutan elektrolit yang digunakan	17
2.5.2. Berdasarkan sumber arus	17
2.5.3. Klasifikasi <i>anodizing</i> secara umum	20
2.6 <i>Pulse Hard Anodizing</i>	21
2.7 Pembentukan Lapisan Oksida	22
2.8 Pengujian Kekerasan	24
2.9 Pengujian Ketebalan	26
2.10 Hipotesa	27

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian	28
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	28
3.3 Variabel Penelitian	28
3.3.1. Variabel bebas	28
3.3.2. Variabel terikat	28
3.3.3. Variabel tetap	28
3.4 Peralatan dan Bahan yang digunakan	29
3.4.1. Peralatan yang digunakan	29
3.4.2. Bahan yang digunakan	29
3.5 Prosedur Penelitian	30
3.6 Metode Pengujian Kekerasan dan Ketebalan Lapisan Oksida	31
3.6.1. Metode pengujian kekerasan mikro Vickers	31
3.6.2. Metode pengujian ketebalan lapisan	31
3.7 Metode Pengolahan Data	31
3.7.1. Analisa statistik kecukupan data	31
3.7.2. Analisa statistik varian dua arah	33
3.7.3. Analisa grafik	37
3.8 Diagram Alir Penelitian	37

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian	38
4.2 Analisa Statistik	39
4.2.1. Analisa statistik kecukupan data	39
4.2.2. Analisa statistik varian dua arah	40
4.3 Analisa Grafik	43
4.3.1. Pengaruh <i>current density</i> dan <i>duty cycle</i> terhadap ketebalan lapisan oksida	43
4.3.2. Pengaruh <i>current density</i> dan <i>duty cycle</i> terhadap kekerasan lapisan oksida	44
4.3.3. Interaksi antara <i>current density</i> dan <i>duty cycle</i> terhadap kekerasan dan ketebalan lapisan oksida	47

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan 49

5.2 Saran 49

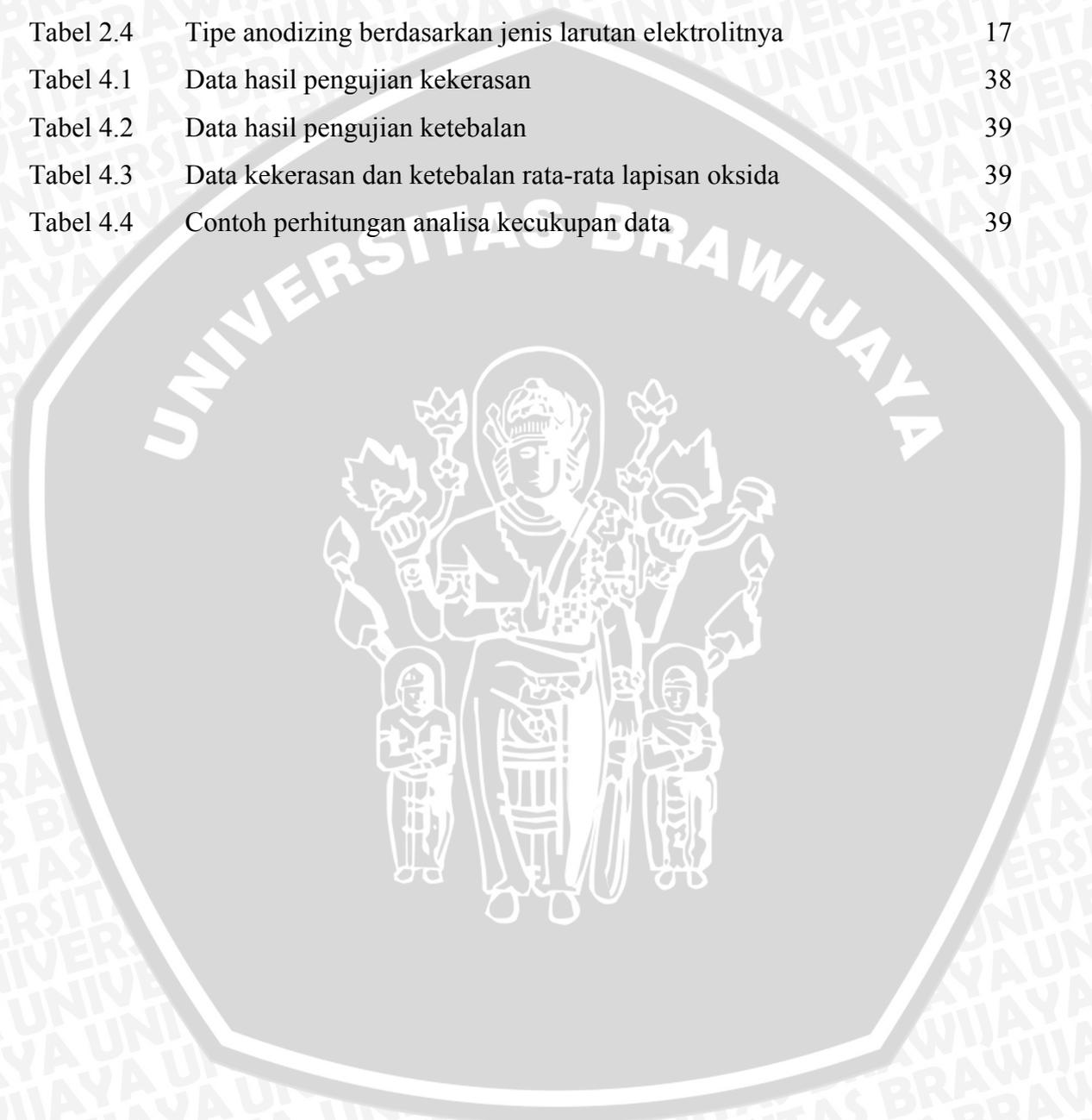
DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Kandungan dan sifat-sifat aluminium 6061	9
Tabel 2.2	Kemampuan anodizing aluminium paduan	9
Tabel 2.3	Informasi dan sifat-sifat asam sulfat	12
Tabel 2.4	Tipe anodizing berdasarkan jenis larutan elektrolitnya	17
Tabel 4.1	Data hasil pengujian kekerasan	38
Tabel 4.2	Data hasil pengujian ketebalan	39
Tabel 4.3	Data kekerasan dan ketebalan rata-rata lapisan oksida	39
Tabel 4.4	Contoh perhitungan analisa kecukupan data	39



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Sel Elektrolitik	10
Gambar 2.2	Struktur Sel Lapisan Oksida	15
Gambar 2.3	Skema Ilustrasi Proses <i>Anodizing</i>	16
Gambar 2.4	<i>The waveform of pulsed current</i>	18
Gambar 2.5	Bentuk aktual <i>pulse anodizing</i>	20
Gambar 2.6	Reaksi Dimana Pembentukan Lapisan Oksida	23
Gambar 2.7	Grafik Perubahan Ketebalan Lapisan terhadap <i>Current Density</i>	23
Gambar 2.8	Mekanisme Pembentukan Lapisan Oksida	23
Gambar 2.9	Prinsip kerja pengujian kekerasan Vickers	26
Gambar 3.1	Instalasi alat <i>Pulse Hard Anodizing</i>	30
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	37
Gambar 4.1	Grafik Hubungan <i>Current Density</i> dan <i>Duty cycle</i> terhadap Ketebalan Lapisan Oksida	44
Gambar 4.2	Foto Mikroskoplogam Pembesaran 250x pada Aluminium Proses <i>Pulse Hard Anodizing</i>	44
Gambar 4.3	Grafik Hubungan <i>Current Density</i> dan <i>Duty Cycle</i> terhadap Kekerasan Lapisan Oksida	45
Gambar 4.4	Lapisan oksida yang Terbentuk Pada Proses <i>Pulse Hard Anodizing</i>	46
Gambar 4.5	Grafik Interaksi antara <i>Current Density</i> dan <i>Duty cycle</i> terhadap Kekerasan	47
Gambar 4.6	Grafik Interaksi antara <i>Current Density</i> dan <i>Duty cycle</i> terhadap Ketebalan	47

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Peralatan dan Bahan	
Lampiran 2.	Tabel Statistika Uji f	
Lampiran 3.	Tabel Perhitungan Kekerasan Vickers	
Lampiran 4.	Foto Ketebalan dan Bekas Indentasi	
Lampiran 5.	Surat Keterangan Pengujian Kekerasan	
Lampiran 6.	Perhitungan Arus dan Waktu	

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

RINGKASAN

Tri Atmojo Setio Nugroho, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2009, *Pengaruh Current Density dan Duty Cycle Terhadap Kekerasan dan Ketebalan Lapisan Permukaan Aluminium pada Proses Pulse Hard Anodizing*, Dosen Pembimbing : Sugiarto ST, MT dan Ir. Tjuk Oerbandono M.Sc.,CSE.

Banyaknya penggunaan aluminium yang ditemukan pada peralatan yang digunakan dalam kehidupan sehari – hari, karena sifat aluminium yang mempunyai berat jenis yang ringan (1/3 dari berat jenis besi) dan ketahanan terhadap oksidasi atmosfer dengan menghasilkan lapisan oksida (Al_2O_3) yang sangat tipis pada permukaannya. Lapisan oksida ini dapat mempunyai kekerasan yang tinggi dan juga dapat dipertebal, yaitu dengan proses *hard anodizing*. *Hard anodizing* diaplikasikan pada industri otomotif atau permesinan yang membutuhkan kekerasan tinggi untuk dapat menahan gesekan-gesekan mekanik. Metode *pulse* pada *hard anodizing* mempunyai kelebihan, yaitu waktu proses lebih singkat, pendinginan yang tidak terlalu besar ($\pm 10^0C$) dan kekerasan yang diperoleh lebih tinggi pada ketebalan lapisan yang sama. Dengan pengaturan *current density* dan *duty cycle* yang tepat pada proses *pulse hard anodizing* dapat menghasilkan kualitas lapisan oksida (kekerasan dan ketebalan) yang tinggi.

Sebelum dilakukan penelitian aluminium melalui proses *degreasing*, *etching*, *desmutting* kemudian *rinsing* untuk mempersiapkan permukaan aluminium. Benda kerja dalam penelitian ini menggunakan aluminium paduan magnesium silikon (6061) dengan diameter 30 mm dan tinggi 10 mm sebagai anoda, direndam dalam bak elektrolisis berisi larutan asam sulfat 20 % dan asam oksalat 1% pada temperatur antara 8^0C - 10^0C kemudian dialiri arus searah (DC) dengan variasi *current density* 4, 5, 6, 7 A/dm^2 dan *duty cycle* 40, 50, 60, 70, 80 % selama 30 menit. Setelah itu dilakukan pengujian kekerasan lapisan dengan *hardness tester Mitutoyo MVK-E3* dengan beban 1kgf selama 10 detik dan foto mikroskop logam dengan pembesaran 250x untuk melihat ketebalan lapisan yang terbentuk.

Hasil dari penelitian ini adalah lapisan oksida dengan kekerasan yang tinggi didapat pada kombinasi *current density* yang besar dengan *duty cycle* yang kecil dan atau *current density* yang kecil dengan *duty cycle* yang besar. Sedangkan pengaruh *current density* dan *duty cycle* yang semakin besar akan meningkatkan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk. Hasil lapisan oksida terbaik pada penelitian ini adalah pada *current density* $6A/dm^2$ dengan *duty cycle* 50%, yang memiliki kekerasan 649,67 VHN dan ketebalan 63,47 μm .

Kata kunci : *pulse hard anodizing*, *current density*, *duty cycle*, kekerasan dan ketebalan lapisan oksida

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Banyaknya penggunaan aluminium yang ditemukan pada peralatan yang digunakan dalam kehidupan sehari – hari karena logam aluminium mempunyai berat jenis yang rendah ($1/3$ dari berat jenis besi), konduktivitas elektrik dan termal yang baik, dan tahan terhadap oksidasi atmosfer. Selain itu proses untuk mendapatkan logam aluminium mudah dan dapat diproses dengan berbagai metode pengerjaan. Berkaitan dengan ketahanan terhadap oksidasi atmosfer karena aluminium memiliki kemampuan untuk melindungi dirinya sendiri dari korosi dengan menghasilkan lapisan oksida (Al_2O_3) yang sangat tipis dan terbentuk secara alami pada permukaannya. Tetapi, lapisan oksida yang alami ini terlalu tipis untuk menahan gesekan-gesekan mekanik, jadi lapisan oksida harus lebih tebal dan lebih keras sehingga sifat-sifat fisik dan kimia lapisan dapat meningkat. Lapisan oksida ini dapat mempunyai kekerasan yang tinggi dan juga dapat dipertebal. Pengaruh perlindungan dari lapisan oksida pada permukaan aluminium tersebut dapat ditingkatkan melalui proses *anodizing* sehingga permukaan aluminium lebih keras, dan lebih tahan korosi. Dalam proses *anodizing* banyak variabel yang mempengaruhi kualitas lapisan oksida (kekerasan dan ketebalan) yang terbentuk, diantaranya jenis dan konsentrasi larutan elektrolit, temperatur elektrolit, waktu proses dan juga *current density* yang digunakan.

Pada jurnal yang diterbitkan oleh Anne Deacon Juhl (2005) yang berisi tentang pengenalan teori *pulse anodizing* menyebutkan bahwa metode pemberian aliran arus metode *continuous* menghasilkan kualitas lapisan oksida yang rendah dibanding dengan metode *pulse*, karena arus listrik yang dialirkan secara terus-menerus dengan besar arus yang konstan menyebabkan temperatur elektrolit berangsur-angsur menjadi naik, sehingga memicu proses peluruhan semakin besar menjadikan lapisan oksida yang terbentuk berpori banyak sehingga kekerasan dan ketebalannya menurun. Pada metode *pulse* rapat arus naik turun secara periodik menjaga agar temperatur elektrolit stabil. Pada penelitian yang dilakukan oleh Anne Deacon Juhl (2006) disebutkan bahwa dengan menggunakan *pulse anodizing* konsumsi energi menurun hingga 31 % dan waktu proses berkurang sampai 50 % dengan kualitas lapisan oksida yang terbentuk sama dengan sebelum menggunakan *pulse anodizing*. Dengan berkurangnya waktu proses maka jumlah produk yang dihasilkan akan lebih banyak.

Untuk menghasilkan lapisan oksida yang rapat dan juga tebal digunakan proses *hard anodizing* sehingga permukaan aluminium lebih tahan terhadap gesekan, tahan terhadap panas, dan tahan terhadap korosi. Proses *hard anodizing* biasanya menggunakan konsentrasi larutan asam sulfat 10% - 20%, menggunakan temperatur elektrolit -5°C sampai $+5^{\circ}\text{C}$ dengan *current density* yang tinggi yaitu $2\text{A}/\text{dm}^2$ sampai dengan $5\text{A}/\text{dm}^2$. *Hard anodizing* diaplikasikan pada industri otomotif atau permesinan, contohnya adalah pada pembuatan *pistons*, *cylinders*, *hydraulic gear*, berbagai jenis komponen industri luar angkasa, dan juga aplikasi lainnya dengan pelapisan permukaan yang tahan terhadap api dan juga kimiawi (Rajendra;2006,41). Penggunaan *pulse hard anodizing* mempunyai kelebihan dibandingkan dengan metode *continuous*, yaitu waktu proses lebih singkat bila dibandingkan dengan metode *continuous*, biaya lebih ekonomis karena pendinginan yang tidak terlalu besar ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) dibandingkan dengan metode *continuous* (-5°C sampai $+5^{\circ}\text{C}$) dan kekerasan yang diperoleh lebih tinggi pada ketebalan lapisan yang sama.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang ada, maka dapat disusun suatu rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimanakah pengaruh *current density* dan *duty cycle* terhadap kekerasan dan ketebalan lapisan permukaan aluminium hasil proses *pulse hard anodizing*?
2. Kombinasi yang bagaimanakah yang mampu menghasilkan lapisan oksida yang keras dan tebal pada permukaan aluminium hasil proses *pulse hard anodizing*?

1.3. Batasan Masalah

Agar pembahasan dari penelitian ini tidak meluas sehingga dapat terfokus, maka ditetapkan batasan masalah adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah aluminium 6061.
2. Pembahasan difokuskan pada pengaruh variasi *current density* dan *duty cycle* terhadap kekerasan dan ketebalan lapisan permukaan aluminium hasil proses *pulse hard anodizing*.
3. Arus listrik yang digunakan adalah arus searah (DC).
4. Larutan elektrolit yang digunakan asam sulfat (H_2SO_4) 20%, asam oxalic ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 1% dan dicampurkan dengan air destilasi.
5. Temperatur elektrolit pada proses tersebut antara 8°C sampai 10°C
6. Waktu proses selama 30 menit.

1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian yang dilakukan ini adalah untuk mengetahui pengaruh *current density* dan *duty cycle* terhadap kekerasan dan ketebalan lapisan permukaan aluminium hasil proses *pulse hard anodizing*.

1.5. Manfaat

Adapun manfaat yang bisa didapatkan dari penelitian ini adalah :

1. Memberi sumbangan pemikiran kepada industri yang bergerak dalam bidang perlakuan permukaan logam khususnya proses *pulse hard anodizing* terutama untuk industri-industri kecil.
2. Dapat dijadikan referensi untuk pengembangan teknologi perlakuan permukaan logam khususnya *pulse hard anodizing* pada aluminium dalam penelitian selanjutnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Sukma Elmie Permata Putra (2008), melakukan penelitian yang berjudul “Pengaruh Densitas Arus Terhadap Ketebalan dan Kekerasan Lapisan Oksida pada Permukaan Aluminium 6063 Hasil Hard Anodizing” dengan densitas arus $1A/dm^2$, $2A/dm^2$, $3A/dm^2$, $4A/dm^2$, $5A/dm^2$; dan konsentrasi larutan H_2SO_4 15% dengan waktu proses 60 menit. Dengan menggunakan alat Ultra Sonohard untuk pengujian kekerasan lapisan dan alat Isoscope MPOD dan foto mikroskop untuk pengujian ketebalan lapisan. Hasil penelitiannya adalah dengan peningkatan densitas arus dari $1A/dm^2$ sampai dengan $3A/dm^2$ kekerasan permukaan aluminium mengalami peningkatan dari 550 HV hingga 769 HV dan ketebalan lapisan oksida pada permukaan aluminium meningkat dari $63,4 \mu m$ hingga $94,8 \mu m$, tetapi pada densitas arus diatas $3A/dm^2$ kekerasan dan ketebalan lapisan oksida menurun.

2.2. Aluminium

Aluminium adalah unsur logam yang mempunyai simbol kimia Al, dengan nomor atom 13 dan massa atom relatif 27. Nukleus atomnya mengandung 13 *proton* dan 14 *neutron*. Aluminium adalah unsur terbanyak ketiga didalam kerak bumi, setelah oksigen dan silikon. Aluminium 8% dari seluruh isi kerak bumi, ini merupakan logam yang sangat berlimpah. Aluminium mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik dan panas yang baik dan sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Penambahan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dan sebagainya secara satu persatu atau bersama-sama akan dapat meningkatkan sifat-sifat tersebut seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian rendah dan sebagainya. Material ini dipergunakan di dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi dan sebagainya (Tata Surdia, 1999:129).

Aluminium memiliki kemampuan untuk melindungi dirinya sendiri dari korosi dengan menghasilkan lapisan oksida yang tipis dan terbentuk secara alami pada permukaannya dengan ketebalan sekitar $0,01 \mu m$. Pengaruh perlindungan dari lapisan oksida pada permukaan aluminium tersebut dapat ditingkatkan melalui proses *anodizing*.

2.2.1. Klasifikasi paduan aluminium

Paduan aluminium diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh berbagai negara di dunia. Saat ini klasifikasi yang umum digunakan adalah standar *Aluminium Association* (AA) di Amerika yang didasarkan atas standar yang terdahulu dari *Alcoa* (*Aluminium Company of America*). Paduan Aluminium berdasarkan cara pembuatannya yaitu :

1. Aluminium *Wrought Alloy*

Paduan aluminium secara tempa/kasar ini merupakan paduan yang memerlukan pengerjaan lanjut.

2. Aluminium *Casting Alloy*

Paduan tuang biasanya digunakan untuk komponen – komponen yang tidak memerlukan pengerjaan lanjut.

Paduan tempaan dinyatakan dengan satu huruf atau dua huruf “S”, sedangkan paduan coran dinyatakan dengan tiga huruf “S”. Standar AA menggunakan penandaan dengan empat angka (Surdia, T. 2000:135) sebagai berikut:

1. Angka pertama menyatakan sistem paduan dengan unsur-unsur yang ditambahkan.
2. Angka kedua menyatakan kemurnian dalam paduan yang dimodifikasi dari aluminium murni.
3. Angka ketiga dan keempat dimaksudkan untuk tanda *Alcoa* terdahulu kecuali huruf S, sebagai contoh, 3S sebagai 3003 dan 63S sebagai 6063.

Aluminium dapat diklasifikasikan menurut paduannya, sebagai berikut:

1. Jenis Al-murni (seri 1XXX)

Aluminium jenis ini kemurniannya 99,0% dan 99,99%. Mempunyai sifat tahan karat, konduksi panas dan konduksi listrik yang baik serta mampu las dan mampu potong yang baik. Hal yang kurang menguntungkan adalah kekuatannya yang relatif rendah.

2. Jenis paduan Al-Cu (seri 2XXX)

Paduan Al-Cu adalah jenis yang dapat di-*heat treatment*. Sifat mekanik paduan ini dapat menyamai sifat dari baja lunak, tetapi ketahanan korosinya rendah bila dibandingkan dengan paduan yang lainnya. Sifat mampu lasnya juga kurang baik, karena itu paduan jenis ini biasanya digunakan pada konstruksi keling dan banyak sekali digunakan dalam konstruksi pesawat terbang seperti duralumin (2017) dan super duralumin (2024).

3. Jenis paduan Al-Mn (seri 3XXX)

Paduan Al-Mn adalah jenis yang tidak dapat di-*heat treatment* sehingga untuk menaikkan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin pada saat proses pembuatan. Sangat mudah untuk dibentuk, mempunyai daya tahan korosi, mampu potong dan sifat mampu las yang baik. Kekuatan pada paduan jenis ini lebih unggul dari pada Al murni.

4. Jenis Paduan Al-Si (seri 4XXX)

Paduan Al-Si termasuk jenis aluminium yang tidak dapat di-*heat treatment*. Paduan jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak. Selain itu paduan ini juga mudah ditempa, dan memiliki koefisien pemuaian panas yang rendah.

5. Jenis Paduan Al-Mg (seri 5XXX)

Paduan Al-Mg termasuk paduan yang tidak dapat di-*heat treatment*, tetapi mempunyai daya tahan korosi yang baik, terutama korosi oleh air laut, dan dalam sifat mampu lasnya. Paduan Al-Mg digunakan tidak hanya dalam konstruksi umum, tetapi juga untuk tangki-tangki penyimpanan gas alam cair dan oksigen cair.

6. Jenis Paduan Al-Mg₂Si (seri 6XXX)

Sebagai paduan coran, paduan ini mudah dibentuk. Paduan Al-Mg₂Si memberikan sifat penuangan, kekuatan, dan ketahanan korosi yang baik.

7. Jenis Paduan Al-Zn (seri 7XXX)

Unsur utama paduan ini adalah Zn. Biasanya kedalam paduan pokok Al-Zn ditambahkan Mg, Cu, dan Cr. Dengan penambahan sedikit Mg dapat menaikkan kekuatan dan masih ke dalam golongan *heat treatable*. Apabila diberi Mg dan Cr dapat memperhalus butir kristalisasi, serta korosi tidak mudah untuk terjadi.

8. 8XXX series.

Golongan ini digunakan untuk mengidentifikasi paduan yang unsur utamanya adalah unsur selain Cu, Mn, Si, Mg, Mg-Si, ataupun Zn.

2.2.2. Sifat-sifat aluminium

a. Kekerasan

Aluminium murni mempunyai kandungan aluminium sebesar 99,99 % dan mempunyai kekerasan 17 BHN. Penambahan unsur paduan dan perlakuan panas menghasilkan paduan Al dengan kekerasan yang lebih tinggi.

b. Kekuatan tarik maksimum

Kekuatan tarik maksimum dapat didefinisikan sebagai kekuatan tarik yang dapat ditahan oleh material sebelum putus. Aluminium dengan kemurnian 99,99% memiliki kekuatan tarik maksimum 4,9 kg/mm².

c. Daya hantar panas

Aluminium mempunyai daya hantar panas yang baik. Pembuktiannya dapat ditunjukkan dengan cepatnya distribusi panas dari daerah yang temperaturnya tinggi ke daerah yang temperaturnya rendah.

d. Daya hantar listrik

Aluminium merupakan penghantar listrik yang baik, hal ini disebabkan aluminium mempunyai daya hantar listrik 65% dari tembaga, sedangkan massa jenisnya kira-kira 1/3 massa jenis tembaga. Tetapi untuk keperluan ini aluminium harus semurni mungkin. Dalam hal ini dapat digunakan aluminium dengan kemurnian 99,0% atau di atasnya.

e. Ketahanan terhadap korosi

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang sangat baik karena memiliki lapisan oksida aluminium (Al_2O_3) yang terbentuk pada permukaannya. Lapisan oksida ini terbentuk pada permukaan aluminium ketika aluminium berkontaminasi dengan udara. Lapisan inilah yang melindungi aluminium dari korosi. Jika lapisan ini rusak, maka dengan sendirinya terbentuk lapisan yang baru hasil reaksi dengan udara.

Dalam lingkungan asam, aluminium cenderung mengalami korosi. Hal ini disebabkan karena reaksi pembentukan lapisan oksidanya lebih lambat dibandingkan dengan reaksi peluruhannya (*dissolution reaction*).

2.2.3. Pengaruh penambahan unsur paduan pada aluminium

Pengaruh akibat penambahan unsur paduan dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Tembaga

Tembaga dalam paduan aluminium dapat meningkatkan kekuatan aluminium pada temperatur tinggi. Paduan aluminium yang mengandung tembaga merupakan paduan yang memiliki sifat mampu mesin yang baik.

2. Silikon

Penambahan silikon dapat meningkatkan sifat mampu cor dan ketahanan korosi, namun penambahan silikon dapat menurunkan sifat *machining*.

3. Magnesium

Penambahan magnesium dapat meningkatkan ketahanan korosi dan tidak menyebabkan berkurangnya sifat *ductile* logam. Selain itu, magnesium dapat meningkatkan sifat *machining* dan mampu bentuk.

4. Mangan

Penambahan mangan dapat meningkatkan ketahanan korosi aluminium.

5. Nikel

Penambahan nikel dapat meningkatkan keuletan aluminium.

6. Zinc

Penambahan zinc dapat meningkatkan kekuatan aluminium. Kekuatan paduan aluminium yang maksimal adalah 5-6% Zn dengan sejumlah Mg dan Cu yang lebih sedikit.

7. Chromium

Penambahan chromium dapat memperbaiki ketahanan korosi, sifat mampu las, tahan panas dan tidak mudah teroksidasi. Namun demikian, jumlah chromium terhadap aluminium yang berlebihan akan menurunkan mampu bentuknya.

2.2.4. Aluminium paduan seri 6061

Aluminium paduan seri 6061 merupakan paduan yang paling luas pemakaiannya pada seri 6XXX. Mempunyai karakteristik ketangguhan yang baik, kekuatannya sedang hingga tinggi dan paduan yang *heat-treatable*. Biasanya digunakan untuk komponen transportasi karena sifat permesinan yang bagus, alat-alat *outdoor* dan sifat mampu bentuk yang baik dan banyak digunakan untuk rangka-rangka konstruksi. Selain itu aluminium seri ini sangat mudah dilas dan disambung dengan beberapa metode, karakteristik *finishing* yang baik dan juga bagus untuk *anodizing* dengan sifat pewarnaan yang baik dan juga kekerasan lapisan yang tinggi. Sifat dan kandungan aluminium seri 6061 pada tabel 2.1. Aluminium paduan seri 6061 mempunyai kualitas yang sangat bagus apabila digunakan untuk proses *anodizing*, terutama untuk tipe *hard anodizing*. Sifat mampu *anodizing* untuk beberapa tipe aluminium diperlihatkan pada tabel 2.2.

2.3. Elektrolisis

Sel tempat berlangsungnya peristiwa reaksi kimia yang melibatkan arus listrik disebut sel elektrokimia. Sel elektrokimia berdasarkan energinya dapat dibedakan menjadi 2, yaitu :

- Sel galvanik (*galvanic cell*), yang merubah reaksi kimia (reaksi redoks) menjadi energi listrik. Aplikasi terdapat pada baterai dan *Accumulator* (aki mobil).
- Sel elektrolitik (*electrolytic cell*), yang menggunakan energi listrik sebagai sumber energi untuk berlangsungnya reaksi kimia (reaksi redoks). Proses yang terjadi dalam sel elektrolitik disebut elektrolisis. Proses elektrolisis menjadi dasar terjadinya proses elektroplating dan proses *anodizing*.

Tabel 2.1. Kandungan dan Sifat – sifat Aluminium 6061

Unsur	Kandungan (%)	Sifat-sifat Aluminium 6061	Nilai
Si	0,4 to 0,8		
Fe	0,7	<i>Density</i>	2,7 g/cm ³
Cu	0,15	<i>Melting Point</i>	580°C
Mn	0,15	<i>Modulus of Elasticity</i>	(70÷80) GPa
Mg	0,8 to 1,2	<i>Co-Efficient of Thermal Expansion (20-100°C)</i>	23,5x10 ⁻⁶ m/m.°C
Zn	0,25	<i>Thermal Conductivity:</i>	173 W/m.K
Ti	0,15	<i>Electrical Resistivity</i>	(3,7 ÷ 4) x10 ⁻⁶ Ω.cm
Cr	0,04		
Al	<i>balance</i>		

Sumber : www.matweb.com

Tabel 2.2. Kemampuan *Anodizing* Aluminium Paduan

ALLOY (AAXXXX)	PROTECTIVE ANODISING	ANODISING AND DYEING	BRIGHT ANODISING	HARD ANODISING	ELECTRO-PLATING
1080	E	E	E	E	-
1050	E	VG	VG	E	VG
1200	VG	VG	VG	E	VG
2011	M - G	M - G *	U	G	-
2014	M	M *	U	G	VG
2031	M	M *	U	G	VG
3103	G	G	M	G	G
3105	G	G	M	G	-
4043	G	M *	U	G	X
5005	E	VG	G	E	-
5056	G	G	M	E	X
5083	G	G	M	G	X
5154	VG	VG	G	E	X
5251	VG	VG	G	E	X
5454	VG	VG	G	E	-
6061	VG	G	M	VG	X
6063	E	VG	G	E	X
6082	G	G	M	G	X
6463	VG	VG	VG	VG	-
7020	G	G	M	G	-

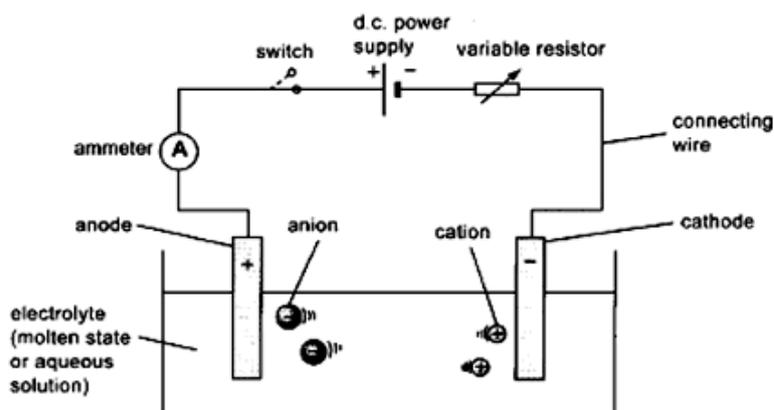
E = Excellent, VG = Very Good, G = Good, M = Moderate, U = Unsuitable

* = Only suitable for dark colours

X = A modified etching technique prior to plating is essential and some initial difficulties may occur

Sumber: Brace, 2001: 27

Cara kerja sel elektrolisis adalah seperti yang terdapat pada gambar 2.1. dibawah ini:



Gambar 2.1. Sel Elektrolitik
Sumber: Richardson, 2002: 46

1. Sumber arus listrik searah memompa elektron dari katoda ke anoda. Elektron ini ditangkap oleh kation (ion positif) pada larutan elektrolit sehingga pada permukaan katoda terjadi reaksi reduksi terhadap kation.
2. Pada saat yang sama, anion (ion negatif) pada larutan elektrolit melepaskan elektron. Dan melalui anoda, elektron dikembalikan ke sumber arus. Dengan demikian, pada permukaan anoda terjadi reaksi oksidasi terhadap anion.

Reaksi yang terjadi pada sel elektrolitik :

Reaksi pada katoda	Reaksi pada anoda
<p>Jika yang menuju katoda adalah ion positif dari:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Logam golongan IA/IIA; Al, Mn. Ion-ion ini tidak tereduksi. Reaksi yang terjadi: $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2(g)$ 2. Ion H^+ dapat tereduksi. Reaksinya : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2(g)$ 3. Ion-ion selain 1 dan 2 dapat tereduksi (mengendap pada anoda). Reaksinya : $Mn^{n+} + n e^- \rightarrow M$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Jika anoda <i>inert</i> (Pt, Au, C) Yang menuju anoda ion negatif dari : <ol style="list-style-type: none"> a) ion OH^- dapat teroksidasi. Reaksinya : $4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ b) ion halogen (Cl, Br, I) dapat teroksidasi. Reaksinya : $2X^- \rightarrow X_2 + 2e^-$ c) ion sisa asam beroksigen (SO_4^{2-}, NO_3^-) tidak teroksidasi. Reaksi yang terjadi : $2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$ 2. Jika anodanya aktif (selain Pt, Au, C) dapat teroksidasi. Reaksinya : $M \rightarrow Mn^+ + n e^-$

2.3.1. Reaksi redoks

Redoks (reduksi dan oksidasi) dapat ditinjau dari penangkapan dan pelepasan elektron; dan pengurangan dan penambahan bilangan oksidasi. Bilangan oksidasi adalah bilangan yang menunjukkan kecenderungan suatu atom bermuatan positif atau negatif

di dalam senyawanya. Dalam sel elektrolitik, melibatkan reaksi redoks tidak spontan dan memerlukan arus listrik dari luar.

Reaksi oksidasi adalah :	Reaksi reduksi adalah :
1. Peristiwa pelepasan elektron.	1. Peristiwa penangkapan elektron.
2. Terjadi pertambahan (naiknya) bilangan oksidasi.	2. Terjadi pengurangan (turunnya) bilangan oksidasi.
3. Pada sel elektrolitik oksidasi terjadi di anoda.	3. Pada sel elektrolitik reduksi terjadi di katoda.
4. Zat yang mengalami proses oksidasi disebut reduktor.	4. Zat yang mengalami proses reduksi disebut oksidator.
5. Reaksi suatu zat dengan oksigen.	5. Reaksi pengurangan oksigen.

2.3.2. Elektrolit

Elektrolit adalah komposisi kimia yang akan terpisah menjadi ion-ion apabila dilarutkan dalam pelarut, hasil dari pemisahan ini berupa ion-ion yang menjadi penghantar listrik. Fungsi dari larutan elektrolit disini adalah sebagai penghantar arus dan penambah ion logam pelapis. Daya hantar listrik larutan elektrolit bergantung pada jenis dan konsentrasinya. Macam-macam larutan elektrolit adalah diantaranya larutan asam, basa dan garam.

1. Elektrolit asam (*Acid Electrolyte*)

Elektrolit asam adalah elektrolit yang bila dilarutkan dalam air akan melepas ion (H^+). Elektrolit-elektrolit asam tersebut bila dilarutkan dalam pelarut (biasanya adalah air) maka akan terurai menjadi ion H^+ , contoh elektrolit asam diantaranya adalah asam sulfat (H_2SO_4), asam pospat (H_3PO_4) dan asam klorida (HCl). Berdasarkan kandungan ion H^+ , elektrolit asam dapat dibagi tiga, yaitu asam *monoprotik*, asam *diprotik*, dan asam *tripotik*.

a. Asam *monoprotik*

Asam *monoprotik* adalah asam yang hanya memiliki satu ion H^+ di dalam elektrolit. Contoh dari asam *monoprotik* adalah HNO_3 .



b. Asam *diprotik*

Asam *diprotik* adalah asam yang memiliki dua ion H^+ di dalam elektrolit. Contoh dari asam *diprotik* adalah H_2SO_4 dan $C_2H_2O_4$.

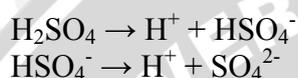
❖ **Asam sulfat (*sulphuric acid*)**

Asam sulfat (H_2SO_4) merupakan asam yang paling sering digunakan dalam proses *anodizing*. Molekul dari asam sulfat terdiri dari dua atom hidrogen, satu atom belerang dan empat atom oksigen.

Asam sulfat adalah asam kuat yang diperoleh dari pemecahan belerang *trioksida* (SO_3) dalam air.



Asam sulfat memiliki sifat yang sangat korosif (merusak logam). Sering juga digunakan untuk membersihkan bekas-bekas kotoran ataupun lemak pada permukaan logam. Asam sulfat mengalami *disosiasi* dalam air melalui dua tahap:



Beberapa informasi dan sifat-sifat dari asam sulfat dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.3. Informasi dan Sifat Larutan Asam Sulfat

Informasi dan Sifat- sifat Asam sulfat	
Densitas	1,84 g cm ⁻³
Titik Lebur	10 °C (283 K)
Titik Didih	338 °C (611 K)
Massa Molar	98,07848 g mol ⁻¹
Rumus Molekul	H ₂ SO ₄
Wujud	Cair

Sumber : www.wikipedia.org

❖ **Asam oksalat (*oxalic acid*)**

Asam oksalat adalah senyawa kimia yang memiliki rumus $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ dengan nama sistematis asam etanadioat. Asam *dikarboksilat* paling sederhana ini biasa digambarkan dengan rumus HOOC-COOH .



c. Asam *triprotik*

Asam *triprotik* adalah asam yang memiliki tiga ion H^+ di dalam elektrolit. Contoh dari asam *triprotik* adalah H_3PO_4 .

2. Elektrolit basa (*bases electrolyte*)

Adalah elektrolit yang bila dilarutkan dalam air akan melepaskan ion (OH^-). Contoh dari elektrolit *alkali* adalah NaOH (*Caustic soda*) apabila dilarutkan dalam air maka terurai menjadi ion Na^+ dan ion OH^- .

3. Elektrolit garam (*salts electrolyte*)

Adalah elektrolit yang bila dilarutkan dalam air akan terbentuk ion – ion selain H^+ dan ion OH^- . Contoh elektrolit garam adalah natrium klorida (NaCl). Apabila dilarutkan dalam air maka akan terurai menjadi ion Na^+ dan ion Cl^- .

2.4. Current Density (kerapatan arus listrik)

Bila suatu penghantar diberikan beda potensial di antara kedua ujungnya, maka dalam penghantar itu akan timbul arus listrik. Arus listrik adalah pergerakan muatan-muatan listrik. Sebenarnya yang bergerak adalah elektron-elektron dalam sebuah penghantar, tapi dalam prakteknya digunakan asumsi arus listrik adalah pergerakan muatan listrik dari positif (+) ke negatif (-). Besarnya arus listrik yang melewati penghantar ini tergantung pada besarnya kuat medan listriknya (E). Sedangkan sifat penghantaran bahan dinyatakan oleh hambatan jenis bahan (ρ). Hambatan jenis suatu bahan didefinisikan sebagai perbandingan antara kuat medan listrik dengan rapat arusnya (J). Satuan arus listrik adalah Ampere yang diartikan, banyaknya muatan (dq) yang mengalir per satuan waktu (dt). Daya dalam fisika adalah laju energi yang dihantarkan atau kerja yang dilakukan per satuan waktu.

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (2-1)$$

Jika suatu penghantar dengan panjang l diberikan beda potensial listrik di antara kedua ujungnya sebesar V_{ab} , maka kuat medannya E adalah :

$$E = \frac{V_b - V_a}{l} = \frac{V_{ab}}{l} \quad (2-2)$$

karena $J = \frac{i}{A}$,

maka $\rho = \frac{E}{J} = \frac{V_{ab}/l}{i/A}$, sehingga

$$i = \frac{V_{ab}}{\rho l / A}$$

selanjutnya $\left(\frac{\rho l}{A}\right)$ disebut sebagai hambatan atau resistansi dari suatu penghantar, dan persamaan tersebut dapat ditulis sebagai :

$$i = \frac{V_{ab}}{R}, \text{ persamaan ini dikenal sebagai hukum Ohm.} \quad (2-3)$$

$$i = \frac{dq}{dt} \longrightarrow 1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ coulomb}}{\text{detik}}$$

$$\begin{aligned} \text{Arus 1 ampere dapat diartikan juga} &= \frac{1 \text{ coulomb} / \text{detik}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ coulomb} / \text{elektron}} \\ &= 6,3 \times 10^{18} \text{ elektron/detik.} \end{aligned}$$

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{atau} \quad W = P.t \quad (2-4)$$

$$W = V.i.t = i.R.i.t = i^2.R.t \quad (2-5)$$

keterangan :

V = tegangan listrik atau beda potensial (Voltase)

R = hambatan (ohm)

W = energi atau usaha (watt.detik)

P = daya (watt)

T = waktu (detik)

Current density atau kerapatan arus adalah arus yang mengalir per satuan luas penampang. Satuan *current density* adalah A/dm². Biasanya pada proses *hard anodizing* menggunakan *current density* 4 A/dm², misal kita mempunyai spesimen (aluminium), dengan bentuk silinder pejal dengan diameter 30 mm dan tinggi 10 mm yang akan di diproses *hard anodizing*; maka kita memerlukan arus listrik sebesar 0,942 A. Dengan perhitungan sebagai berikut :

$$CD = \frac{i}{A} \quad \text{atau} \quad i = CD.A \quad (2-6)$$

keterangan :

CD = *current density* (A/dm²)

i = arus yang dialirkan (A)

A = luas permukaan spesimen (dm²)

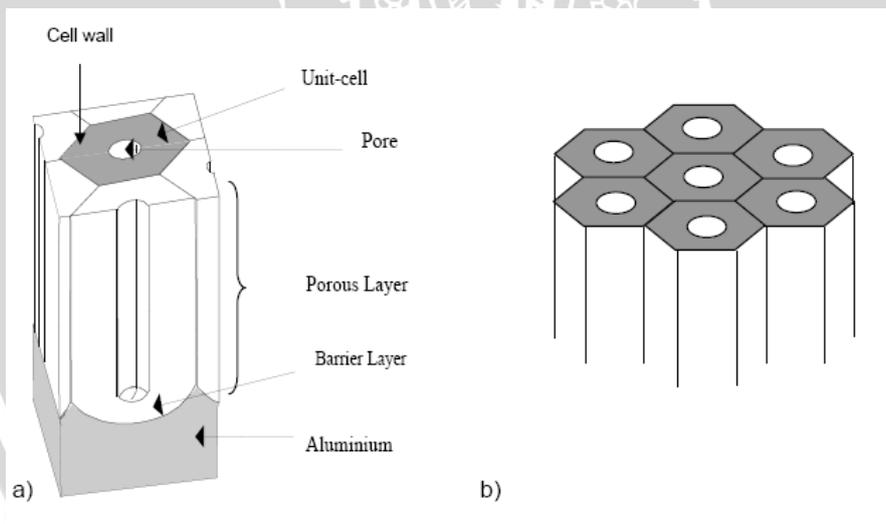
$$\begin{aligned} A_{\text{silinder pejal}} &= 2 \times \text{Luas lingkaran} + \text{Luas selimut silinder} = 2.\pi r^2 + 2\pi r.t \\ &= 2. 3,14.15^2 + 3,14.30.10 = 2355 \text{ mm}^2 = 0,2355 \text{ dm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Maka didapatkan : } i = CD.A = 4 \text{ A/dm}^2 \cdot 0,2355 \text{ dm}^2 = 0,942 \text{ A}$$

2.5. Proses Anodizing

Anodizing merupakan perlakuan permukaan yang paling banyak digunakan pada aluminium. *Anodizing* adalah proses pembentukan lapisan oksida pada permukaan logam dengan proses elektrolisis. Mekanisme proses *anodizing* berbeda dengan *electroplating*, pada proses *anodizing* benda kerja diposisikan pada anoda dan logam yang berada pada katoda hanya berfungsi sebagai penghantar arus dan tidak berfungsi sebagai logam pelapis. *Anodizing* biasa dilakukan pada logam yang memiliki lapisan oksida yang terbentuk secara alami pada permukaannya seperti aluminium, niobium, tantalum, titanium, tungsten, zirconium, dan magnesium.

Pada prinsipnya proses *anodizing* pada aluminium menghasilkan lapisan aluminium oksida (Al_2O_3) yang terbentuk menjadi lebih tebal pada permukaan aluminium ketika arus listrik dan *voltage* tertentu dialirkan pada larutan elektrolit. Dengan lapisan oksida yang semakin tebal akan terbentuk lapisan yang lebih tahan korosi dan tahan aus. Untuk proses lebih lanjut lapisan ini dapat diberi pewarnaan sehingga dapat memberikan penampilan yang lebih menarik.



Gambar 2.2. a.) Struktur sel pada lapisan oksida
b.) Penampang lapisan oksida berpori(*porous*)
Sumber: Juhl, 2005: 2

Lapisan oksida aluminium pada gambar 2.2 terdiri dari lapisan oksida yang tipis dan padat yang disebut *barrier layer*, dan lapisan oksida yang berpori yang disebut *porous layer*. Ketebalan *barrier layer* sekitar 0,1 – 2,0% dari total ketebalan lapisan dan banyak dipengaruhi oleh konsentrasi larutan elektrolit dan *voltage* yang digunakan.

Untuk mendapatkan benda kerja yang baik dilakukan proses *pre-treatment* untuk mempersiapkan permukaan benda kerja sebelum dilakukan proses *anodizing*. Proses *pre-treatment* tersebut antara lain:

1. **Degreasing**

Degreasing adalah langkah pertama yang dilakukan dalam proses *pre-treatment*, dimana tujuan dari proses *degreasing* ini adalah untuk menghilangkan minyak atau lemak yang terdapat pada permukaan aluminium.

2. **Etching**

Etching dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan lapisan oksida murni yang terdapat pada permukaan aluminium.

3. **Desmuting**

Desmuting adalah proses pembersihan bercak - bercak hitam yang diakibatkan oleh proses *etching*.

4. **Rinsing**

Rinsing adalah proses pembersihan aluminium setelah *pre-treatment* (*degreasing, etching, desmuting*) ataupun *anodizing* dengan menggunakan air murni (*destilated water*). Tujuan dari proses *rinsing* ini adalah untuk menghilangkan sisa-sisa zat kimia yang terbawa dari proses sebelumnya. Setelah itu aluminium siap untuk proses *anodizing*.

Setelah proses *anodizing* dilakukan proses *last-treatment*. Proses *last-treatment* tersebut antara lain:

1. **Coloring**

Coloring adalah proses pemberian warna pada pori - pori lapisan oksida yang terbentuk akibat proses *anodizing*.

2. **Sealing**

Sealing dilakukan setelah proses pewarnaan selesai, Proses *sealing* merupakan tahap paling akhir dalam *anodizing* yang bertujuan untuk:

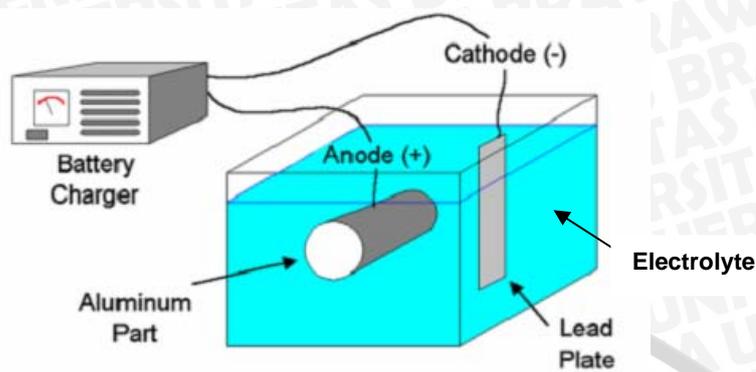
- Meningkatkan ketahanan korosi lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan aluminium.
- Menahan pewarna agar tetap berada dalam pori.
- Meningkatkan kerataan warna dari lapisan oksida yang diwarnai.

Sealing biasanya dilakukan dengan cara meletakkan spesimen pada uap air selama 5 menit.

3. **Drying**

Drying adalah proses pengeringan benda kerja setelah proses *sealing*. *Drying* dilakukan dengan cara mengusap benda kerja dengan kain yang halus dan meletakkannya pada tempat yang kering.

Secara umum proses *anodizing* diperlihatkan pada gambar 2.3. dibawah ini:



Gambar 2.3. Skema Ilustrasi Proses *Anodizing*

Sumber : ATM Page Anodizing, 2001

2.5.1. *Anodizing* berdasarkan jenis larutan elektrolit yang digunakan.

Tipe *anodizing* berdasarkan jenis larutan elektrolit yang digunakan diperlihatkan pada tabel berikut ini :

Tabel 2.4. Tipe *Anodizing* Berdasarkan Jenis Larutan Elektrolit yang digunakan :

Electrolyte composition	Current density (A/dm ²)	Voltage (V DC)	Temperature (°C)	Treatment time (min)	Film thickness (µm)	Application
Bengough Stuart (Chromic acid) Process CrO ₃ : 2,5 - 3,0 %	0,1 - 0,5	0 - 40	40	40 - 60	2 - 15	For protection base for organic coating
Phosphoric acid Process H ₃ PO ₄ : 10 - 12%	0,3 - 1,8	10 - 20	15 - 30	15 - 30	2 - 5	Pretreatment prior to adhesive bond, Nanostructural template
Accelerated Chromic acid Process CrO ₃ : 5 - 10 %	0,15 - 0,3	0 - 40	35	20 - 30	2 - 3	For protection
Sulphuric acid Process H ₂ SO ₄ : 10 - 20 %	1,0 - 2,0	10 - 20	20 - 30	10 - 30	5 - 35	For protection, Good base for dyes, Good thermal radiation properties
Oxalic acid Process (COOH) ₂ : 3-10%	1,0 - 3,0	40 - 65	20 - 35	30 - 60	10 - 65	Protective and decorative
Boric acid Process H ₃ BO ₃ : 9 - 15%	1,0 - 3,0	50-500	0 - 95	20 - 60	0,25 - 7,5	Thin dielectric film for electrolytic condensers
Hard Anodization Mixed electrolyte H ₂ SO ₄ : 10 - 20 % (COOH) ₂ : 0,5-1%	3,0 - 4,0	20 - 90	-5 - 5	20 - 80	40 - 80	Hard and thick abrasion resistant coating
E-matal Process (COOH) ₂ + Ti or Zr or Ti salt	0,2 - 0,3	120	50 - 70	20 - 60	10 - 20	Protective and decorative for non metallic appearance
Micro-Arc Oxidation (alkali-silicate electrolyte)	0,2 - 0,3 A/sq.cm	1000 - 1100 AC	30 - 35	25 - 30	45 - 50	Wear & corrosion resistance, Insulation

Sumber: Rajendra, 2006: 36

2.5.2. Anodizing berdasarkan sumber arus

Berdasarkan sumber arus saat proses, *anodizing* dibagi menjadi 2, yaitu :

1) AC *anodizing*

AC *anodizing* adalah *anodizing* yang menggunakan arus bolak-balik (*alternating current*). Proses pembentukan oksida pada AC *anodizing* lebih lambat daripada DC *anodizing* karena polaritas positif dan negatif *power supply* bergantian secara cepat dengan frekuensi tertentu. *Anodizing* tipe ini sering digunakan dengan tujuan memperoleh hasil pelapisan dengan kekerasan rendah. Aplikasi *anodizing* tipe ini adalah pada pembuatan aluminium *foil*. Apabila pembuatan aluminium *foil* dilakukan menggunakan DC *anodizing*, maka akan diperoleh hasil *anodizing* dengan kekerasan tinggi yang mengakibatkan aluminium *foil* akan patah jika di tekuk atau di rol. Apabila pembuatan aluminium *foil* ini dilakukan dengan menggunakan AC *anodizing* maka akan diperoleh aluminium *foil* dengan sifat tahan tekuk dan rol.

2) DC *anodizing*

DC *anodizing* adalah *anodizing* yang menggunakan arus searah (*direct current*). Proses pembentukan oksida pada DC *anodizing* lebih cepat daripada AC *anodizing* karena polaritas positif *power supply* selalu berada pada benda kerja. *Anodizing* tipe ini sering digunakan dengan tujuan memperoleh hasil pelapisan dengan kekerasan tinggi. DC *anodizing* dapat dilakukan dengan dua metode yaitu *continuous anodizing* dan *pulse anodizing*.

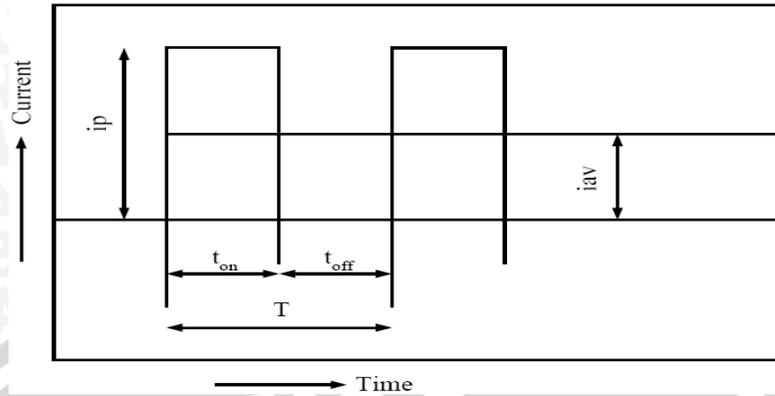
a) *Continuous anodizing*

Continuous anodizing adalah jenis *anodizing* yang paling sering dilakukan. *Continuous anodizing* dilakukan dengan besar arus yang dialirkan saat proses *anodizing* dijaga konstan.

b) *Pulse anodizing*

Pulse anodizing adalah jenis *anodizing* yang dilakukan dengan rapat arus naik turun secara periodik seperti gambar 2.4. *Pulse anodizing* ini dilakukan dengan merubah rapat arus yang diberikan secara cepat. Dengan demikian pada saat *On Time* (t_1), pembentukan lapisan oksida akan lebih banyak terjadi karena alat aktif atau arus mengalir. Sedangkan pada saat *Off Time* (t_2) tidak ada pemberian arus atau alat tidak aktif, untuk mencegah panas yang ditimbulkan selama arus yang mengalir (*joule heat*), panas yang terjadi

akan memicu proses peluruhan yang semakin cepat dan menyebabkan lapisan yang terbentuk porositasnya semakin besar (Juhl, 2005).



Gambar 2.4. *The waveform of pulsed current.*

Sumber: Fhang-Hsin Kao, 2004: 11

keterangan :

i_p = arus puncak (A)

i_{av} = arus rata-rata (A)

t_{on} = waktu arus dialirkan (detik)

t_{off} = waktu arus diputus atau arus tidak dialirkan (detik)

❖ **Duty cycle**

Duty cycle dapat diartikan, proporsi dari waktu yang mana selama alat aktif (t_{on}).

Dapat dilihat pada rumus :

$$Duty\ cycle\ (\%) = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \times 100\ \% = t_1 \times f \times 100\ \% \quad (2-7)$$

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (2-8)$$

keterangan :

t_1 = *On Time* (detik)

t_2 = *Off Time* (detik)

f = frekuensi (Hz)

t_1 dan t_2 dalam satuan milli - detik.

Misal kita menggunakan *duty cycle* 40% untuk proses *pulse anodizing*, maka kita tetapkan terlebih dahulu nilai *On Time* atau frekuensi yang akan digunakan. Jika ditetapkan nilai *On Time* adalah 0,1 detik, maka nilai *Off Time* nya adalah dapat dicari dengan perhitungan sebagai berikut :



$$\text{Duty cycle (\%)} = t_1 \times f \times 100\% \longrightarrow 40\% = 0,1 \times f \times 100\% ,$$

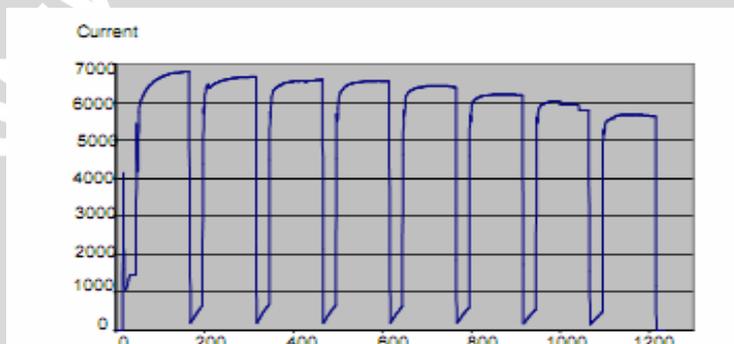
maka didapat : $f = 4 \text{ Hz}$

Nilai *Off Time* dapat ditentukan dari nilai *On Time* dengan persamaan:

$$t_2 = \frac{1 - ft_1}{f} \quad (2-9)$$

$$t_2 = \frac{1 - ft_1}{f} = \frac{1 - 4 \times 0,1}{4} = 0,15 \text{ detik}$$

Pada kenyataanya, proses *pulse anodizing* tidak dapat terjadi dengan ideal. Ketika arus terletak pada titik paling rendah (i_2) dan menuju ke titik paling tinggi (i_1), kenaikan arus tidak bisa terjadi seketika. Sedangkan penurunan arus dari i_1 menuju i_2 dapat turun secara drastis. Proses *Pulse Anodizing* aktual dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Bentuk aktual *Pulse Anodizing*.

Sumber : Juhl, 2005: 4

2.5.3. Klasifikasi *anodizing* secara umum

Umumnya ada tiga macam tipe *anodizing*, yaitu:

1. *Chromic Acid Anodizing (CAA)*

Pada tipe ini larutan elektrolit yang digunakan adalah asam kromat (*chromic acid*) dan jika dibandingkan dengan yang lain lapisan oksida yang dihasilkan pada tipe ini paling tipis. Tebal lapisan yang dihasilkan antara 0,5 sampai 2,5 μm . *Chromic acid anodizing* memberikan sedikit pengaruh terhadap kekuatan *fatigue* dan sedikit korosif. Tipe ini sangat baik untuk pelapisan aluminium cor, dan biasa digunakan dalam kebutuhan militer, serta aplikasi *aerospace* yang memiliki fungsi dekoratif.

2. *Sulfuric Acid Anodizing (SAA)*

Sulfuric Acid Anodizing ini paling umum digunakan pada industri pelapisan aluminium. Larutan elektrolit yang digunakan pada tipe ini adalah larutan asam

sulfat (*sulfuric acid*). Dengan memanfaatkan asam sulfat ketebalan lapisan oksida yang dihasilkan naik sampai 25 μm . *Sulfuric anodizing* juga baik jika diberi pewarnaan yang dikarenakan lapisannya yang berpori. Selain itu *Sulfuric Acid Anodizing* memberikan ketahanan terhadap korosi dan sangat kuat. Tipe ini biasanya dipakai dalam kebutuhan arsitektur, *aerospace*, perusahaan otomotif dan komputer.

3. *Hard Coating Anodizing (HCA)*

Pada *Hard Coating Anodizing* ini dibutuhkan larutan elektrolit dengan konsentrasi asam sulfat yang lebih tinggi dan temperatur elektrolit yang lebih rendah dengan *current density* yang besar sehingga akan dihasilkan lapisan oksida yang keras dan tebal dengan ketahanan abrasi, ketahanan korosi yang lebih baik bila dibandingkan dengan tipe lainnya. Lapisan permukaan yang dihasilkan sangat keras (Rockwell C-Scale naik sampai 70). Ketebalan lapisan yang dihasilkan dari 12,5 sampai 100 μm . Logam yang dihasilkan dari proses *hard coating anodizing* ini kekerasan permukaannya meningkat. Umumnya aluminium hasil *hard coating anodizing* digunakan dalam bahan non-dekoratif seperti peralatan pengemas makanan, piston, *cylinder*, *hydraulic gear*, gir, dan lain-lain .

2.6. *Pulse Hard Anodizing*

Pulse Hard Anodizing adalah jenis *anodizing* yang menghasilkan lapisan oksida yang rapat dan tebal, dengan metode *pulse*, yaitu rapat arus naik turun secara periodik dan juga temperatur elektrolit yang digunakan tidak terlalu rendah ($\pm 10^\circ\text{C}$). Paduan aluminium yang perlu dihindarkan penggunaannya untuk proses *hard anodizing* adalah paduan aluminium yang memiliki kadar tembaga dan mangan yang tinggi, karena paduan ini jika dilakukan proses *hard anodizing* akan menghasilkan lapisan oksida yang kurang baik.

Larutan elektrolit yang umum digunakan adalah asam sulfat (H_2SO_4) dengan konsentrasi yang digunakan sebesar 10% - 20% berat. Kelarutan kembali aluminium oksida (peluruhan) meningkat dengan meningkatnya konsentrasi asam. Pada konsentrasi asam yang lebih tinggi berarti semakin besar konduktifitas arus. Apabila arus terkonsentrasi akan menyebabkan kenaikan temperatur, yang berakibat proses peluruhan. Salah satu modifikasi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas lapisan oksida pada *hard anodizing* adalah penambahan asam oksalat ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) dengan

konsentrasi sebesar 0,5% - 1% pada larutan elektrolitnya. Lapisan oksida yang dihasilkan dari modifikasi diatas bersifat lebih tebal dan keras. Asam oksalat ini berperan untuk mengurangi kelarutan kembali lapisan oksida, sehingga lapisan oksida yang dihasilkan lebih tebal dan lebih keras serta jumlah porositasnya lebih kecil.

Arus listrik yang diberikan pada proses *hard anodizing* berkisar antara 2 A/dm² - 5 A/dm² dan menggunakan temperatur elektrolit -5⁰C sampai +5⁰C (Gabe D, 2002:53). Rapat arus yang rendah biasanya untuk lapisan oksida yang tipis dan digunakan pada tipe *anodizing* biasa, sedangkan rapat arus yang tinggi untuk mendapatkan lapisan oksida yang tebal dan digunakan pada *hard anodizing*. Besar potensial berkisar 20V – 100V. Besar potensial yang diberikan akan meningkat dengan semakin kecilnya konsentrasi asam dan temperatur elektrolit karena penghantaran arus. Untuk Al murni, paduan Al-Zn, paduan Al-Zn-Cu memerlukan potensial yang lebih rendah. Sedangkan untuk Al-Si, Al-Cu-Mg, dan Al-Mg, memerlukan potensial yang lebih besar.

Temperatur kerja larutan elektrolit *hard anodizing* adalah sekitar -5 sampai +5⁰C pada metode *continous*, tetapi dengan metode *pulse* temperatur dapat ± 10⁰C. Hal yang mempengaruhi peluruhan adalah temperatur. Lapisan oksida yang terbentuk pada temperatur rendah akan lebih keras karena porositas lapisan kecil atau lapisan padat, lapisan dengan porositas kecil didapat karena proses peluruhan yang lambat daripada proses pembentukan lapisan oksida. Pengaturan temperatur larutan elektrolit sangat penting karena kelarutan aluminium oksida akan bertambah dengan naiknya temperatur larutan elektrolit.

2.7. Pembentukan Lapisan Oksida

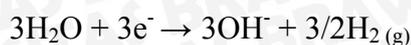
Jika arus searah mulai dijalankan pada sel *anodizing* seperti pada gambar 2.1 dengan larutan elektrolit asam sulfat maka katoda akan bermuatan negatif dan anoda akan bermuatan positif. Asam sulfat akan terurai menjadi kation H⁺ dan ion SO₄²⁻. Kation – kation H⁺ akan bergerak menuju katoda dan di sisi lain akan dinetralkan oleh elektron – elektron katoda sehingga akan terbentuk gas H₂.



Al pada anoda akan terurai menjadi ion Al³⁺ dan bergerak ke katoda.



Karena ion positif Al³⁺ tidak tereduksi pada katoda, reaksi yang terjadi :



Demikian juga pada ion SO_4^{2-} tidak teroksidasi pada anoda, reaksi diganti oleh :



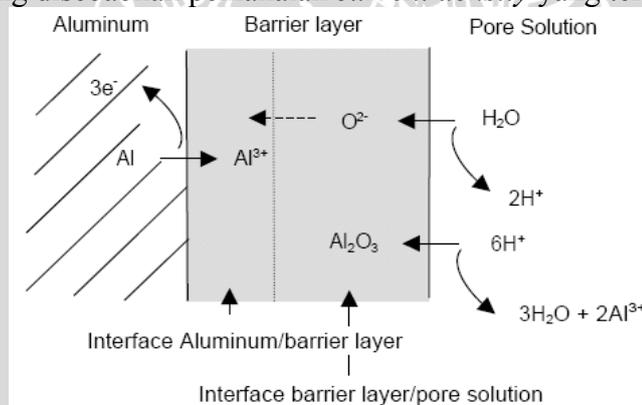
Pada permukaan anoda (antara logam dan lapisan *barrier*) gambar 2.6, terjadi reaksi antara ion Al^{3+} dengan oksida atau *hidroksida* untuk menghasilkan aluminium oksida (ion hidrogen akan terlepas menuju larutan dan membentuk gas H_2).



Sehingga didapatkan reaksi keseluruhan:

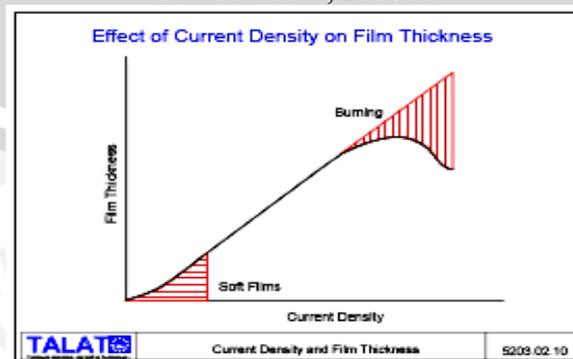


Ketebalan lapisan oksida yang dihasilkan dari proses *anodizing*, dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain, jenis larutan elektrolit, *current density*, durasi proses *anodizing*, dan lain – lain. Pada gambar 2.7 dijelaskan tentang pengaruh *current density* (rapat arus) terhadap pertumbuhan lapisan oksida dimana secara teori peningkatan ketebalan akan terjadi secara konstan sedangkan pada kenyataannya peningkatan ketebalan akan semakin berkurang, hal ini dipengaruhi oleh adanya peluruhan *local Joule's heating* yang disebabkan pemakaian *current density* yang terlalu besar.



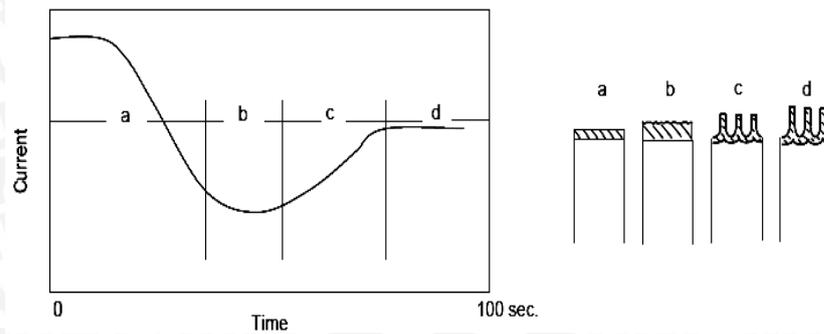
Gambar 2.6. Reaksi Dimana Pembentukan Lapisan Oksida

Sumber: Juhl, 2005: 5



Gambar 2.7. Grafik Perubahan Ketebalan Lapisan terhadap *Current Density*

Sumber: Gazzapo, 1994:12

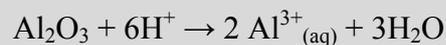


Gambar 2.8. Mekanisme Pembentukan Lapisan Oksida

Sumber: Juhl, 2005: 6

Lapisan oksida yang terbentuk pada hasil *anodizing* dengan larutan elektrolit asam sulfat akan menghasilkan lapisan yang berpori seperti pada gambar 2.8. Pada mulanya arus yang melewati elektroda aluminium tinggi karena hanya melewati logam aluminium. Kemudian arus mulai menurun karena *barrier* atau *non porous layer* yang rapat dan tipis terbentuk. Lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan aluminium ini mempunyai hambatan yang lebih tinggi daripada aluminium sendiri (periode a). Lapisan oksida yang terbentuk menjadi lebih tebal oleh karena itu hambatan menjadi lebih tinggi yang menyebabkan arus terus menurun (periode b). Kecenderungan kurva keatas pada periode b berdasar pada lapisan oksida yang terbentuk akan kasar pada *barrier layer*. Aliran arus akan lebih terkonsentrasi pada permukaan yang lebih tipis, yang menyebabkan temperatur elektrolit meningkat sehingga terjadi peluruhan pada daerah ini. Peluruhan akan terus terjadi yang menyebabkan lapisan yang semakin tipis, ini menyebabkan *resistansi* didaerah ini lebih kecil yang menyebabkan arus akan meningkat (periode c). Pada tahap ini pembentukan lapisan *porous* oksida mulai terbentuk dan arus akan stabil, dimana kecepatan pembentukan dan peluruhan tetap atau stabil (periode d).

Proses peluruhan terjadi karena pemberian energi yang terlalu besar melebihi energi ikatan Al-O pada Al_2O_3 . Reaksi peluruhan yang terjadi adalah sebagai berikut:



Peluruhan yang terjadi ada dua, yaitu peluruhan secara kimia (*chemical dissolution*) dan peluruhan karena medan listrik yang terlalu besar dan terkonsentrasi (*field-assisted dissolution*). Peluruhan secara kimia karena tingkat keasaman dari elektrolit. Peluruhan karena medan listrik yang terkonsentrasi pada *barrier layer* menyebabkan kenaikan temperatur pada ketebalan lapisan yang lebih tipis sehingga memicu proses peluruhan, ini disebut *local Joule's heating*. Peluruhan karena medan listrik sangat besar, yaitu

sekitar 300 nm lapisan oksida yang luruh setiap satu menit dan peluruhan secara kimia lebih lambat, yaitu sekitar 0,1 nm lapisan oksida yang luruh setiap satu menit.

2.8. Pengujian Kekerasan

Dalam ilmu pengetahuan logam, kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu bahan untuk menahan indentasi atau penetrasi. Ada beberapa cara pengujian kekerasan standar yang sering digunakan untuk menguji kekerasan logam, yaitu :

1. Pengujian kekerasan Brinell

Pengujian Brinell adalah salah satu cara pengujian kekerasan yang paling banyak digunakan. Pada pengujian Brinell digunakan bola baja yang dikeraskan sebagai indentor.

Kekerasan Brinell dihitung sebagai :

$$BHN = \frac{P}{\pi D / 2 \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2-10)$$

keterangan :

P = gaya tekan (kg)

D = diameter bola indentor (mm)

d = diameter tapak tekan (mm)

2. Pengujian kekerasan Rockwell

Pada pengujian Brinell harus dilakukan pengukuran diameter tapak tekan secara manual, sehingga hal ini memberi peluang akan terjadinya kesalahan pengukuran, disamping itu juga akan memakan waktu. Pada cara Rockwell, pengukuran langsung dilakukan oleh mesin dan mesin langsung menunjukkan angka kekerasan dari bahan yang diuji. Cara ini lebih cepat dan akurat.

3. Pengujian kekerasan Vickers

Metode uji kekerasan Vickers dilakukan dengan cara menekan material uji menggunakan sebuah indentor intan yang berbentuk piramid beratas bujur sangkar dan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan 136°, material diuji dengan gaya tekan antara 1gf sampai 120 kgf. Hasil optimal dapat diketahui dengan waktu tekan selama 10 sampai 15 detik. Dua garis diagonal bekas indentasi pada permukaan spesimen setelah beban dihilangkan diukur menggunakan sebuah mikroskop dan di hitung rata-ratanya. Kekerasan Vickers dapat diketahui dengan membagi beban dengan luas daerah

indentasi. Jika diagonal rata-rata telah diketahui maka kekerasan Vickers dapat dihitung dengan persamaan di atas. Alat uji kekerasan Vickers yang lebih modern menunjukkan perhitungan ini secara otomatis dan menampilkan hasil kekerasan dengan tepat.

Kekerasan Vickers dihitung sebagai :

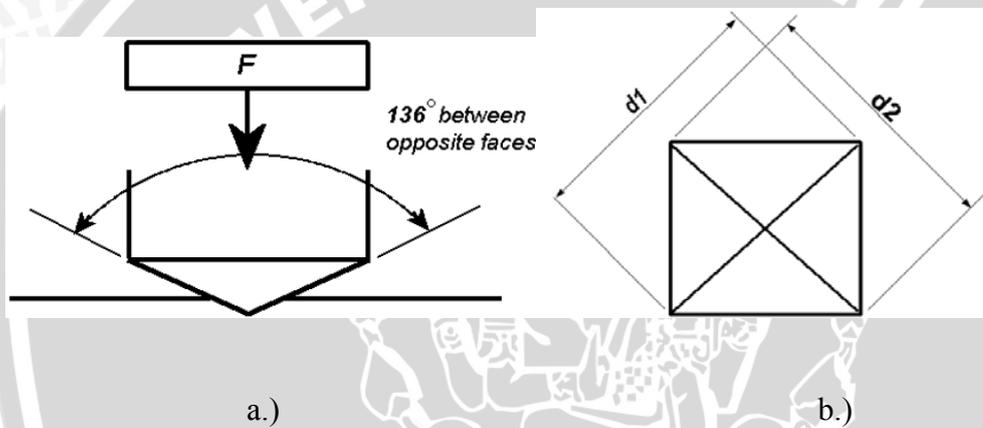
$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (\text{mendekati}) \quad HV = 1,854 \frac{F}{d} \quad (2-11)$$

keterangan :

F = gaya tekan (kgf)

d = diagonal tapak tekan rata-rata (mm)

HV = *Vickers Hardness Number* (VHN)



Gambar 2.9. a.) prinsip kerja pengujian kekerasan vickers
b.) diagonal bekas indentasi

Sumber : *Indentec Hardness Testing Machines Ltd.*

Pada mikro Vickers indenter yang digunakan juga sama dengan Vickers biasa, begitu juga dengan cara perhitungan angka kekerasannya. Tetapi pada mikro vickers gaya tekan yang digunakan sangat kecil sekali yaitu 1 sampai 1000 gf dan panjang diagonal indentasi diukur dalam mikrometer.

2.9. Pengujian Ketebalan

Ketebalan *plating* dispesifikasikan menjadi dua kategori, yaitu ketebalan rata-rata dan ketebalan minimum. Ketebalan rata-rata menyatakan ketebalan *plating* di seluruh permukaan bahan yang *di-plating*, diperlukan untuk penggunaan produk pada lingkungan tertentu. Ketebalan minimum adalah ketebalan yang diuji pada daerah tertentu pada permukaan logam, bukan seluruhnya, oleh karena untuk memproduksi *plating* yang sifatnya *uniform* cukup sulit. Pengujian ketebalan dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu destruktif, semi-destruktif, dan non-destruktif.

Pengujian destruktif dilakukan hingga baik *plating* maupun bahan tidak dapat digunakan lagi. Contohnya adalah *microscopic examination* (pengamatan mikroskopik), dengan menggunakan mikroskoplogam. Pengujian semi-destruktif dilakukan hingga *plating* rusak namun bahan masih dapat digunakan untuk *di-plating* ulang. Pengujian non-destruktif tidak merusak baik *plating* maupun bahan. Metode pengujian non-destruktif menggunakan berbagai alat-alat tertentu, yang mempunyai prinsip utama menentukan ketebalan berdasarkan perubahan sifat antara bahan dan *plating*, yang dapat dirasakan oleh pengukur melalui berbagai cara, diantaranya dengan magnet, *Eddy Current*, *coulometer*, *x-ray*, dan *beta-backscatter*. Semua metode pengujian ketebalan ini mempunyai tingkat ketepatan tidak lebih dari 5%. Namun demikian, hal ini tidak merupakan batasan yang serius, berdasar pada fakta bahwa permukaan bahan dan permukaan *plating* tidak rata sempurna, mengukur ketebalan secara tepat menjadi hal yang tidak mungkin dilakukan.

Mikroskoplogam membutuhkan cahaya khusus yang dipasang sedemikian rupa sehingga akan terjadi pemantulan dan penguraian pada permukaan logam yang diamati. Mikroskop berprinsip pada pembesaran optik dengan fokus yang rendah sehingga diperlukan spesimen yang benar-benar rata permukaannya serta bersih dari goresan-goresan. Struktur logam dapat tampak pada mikroskop karena adanya perbedaan sifat-sifat permukaan terhadap cahaya yang datang, dimana makin banyak dapat memantulkan cahaya maka makin terang pula kenampakan strukturnya.

2.10. Hipotesa

Berdasarkan teori, kenaikan *current density* akan mempercepat pembentukan oksida, tetapi pemakaian *current density* yang terlalu besar akan meningkatkan temperatur elektrolit secara lokal dan pada tempat tersebut akan memicu proses peluruhan semakin besar dan penggunaan *duty cycle* untuk menahan naiknya temperatur elektrolit. Dengan pemakaian *current density* dan *duty cycle* yang tepat pada proses *pulse hard anodizing* akan didapatkan kualitas lapisan oksida yang baik, yaitu kekerasan dan ketebalan lapisan yang tinggi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental nyata dan pengkajian literatur dari berbagai sumber baik dari buku maupun jurnal-jurnal dari internet yang bertujuan untuk mengetahui hubungan antara variabel bebas (*current density* dan *duty cycle*) dengan variabel terikat (kekerasan dan ketebalan lapisan oksida). Metode ini menggunakan analisa varian dua arah dengan interaksi. Pemilihan ini karena penelitian ini menggunakan dua variabel bebas.

3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian *pulse hard anodizing* dilakukan di Laboratorium Riset Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Untuk pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional dan pengujian ketebalan di Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Brawijaya Malang.

3.3. Variabel Penelitian

3.3.1. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel lain, besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya diubah-ubah untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dari obyek penelitian. Dalam hal ini variabel bebasnya adalah variasi *current density* yaitu 4; 5; 6; 7 A/dm² dan variasi *duty cycle* 40, 50, 60, 70, 80 % (Lampiran 6).

3.3.2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah kekerasan dan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk.

3.3.3. Variabel tetap

Variabel tetap adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian, variabel yang dikonstantakan dalam penelitian ini adalah :

- Waktu proses selama 30 menit.
- Temperatur elektrolit 8 °C sampai 10 °C.

- c. Larutan elektrolit yang digunakan campuran asam sulfat (H_2SO_4) 20% dan asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$)1%.

3.4. Peralatan dan Bahan yang digunakan

3.4.1. Peralatan yang digunakan

1. Instalasi *pulse hard anodizing*
2. Gergaji
3. Mesin bubut
4. Kertas gosok
5. Termometer raksa
6. *Heater*
7. Gelas ukur
8. *Stop watch*
9. Alat *safety* (sarung tangan plastik dan masker)
10. Wadah plastik (*tupper ware*)
11. Lempengan *stainless steel*
12. Alat uji Kekerasan Mikro Vickers
13. Mikroskoplogam

3.4.2. Bahan yang digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini :

- a. Aluminium 6061 (benda kerja) mempunyai kekerasan 112 VHN dengan diameter 30 mm dan tebal 10 mm. Komposisi Al 6061 sebagai berikut :

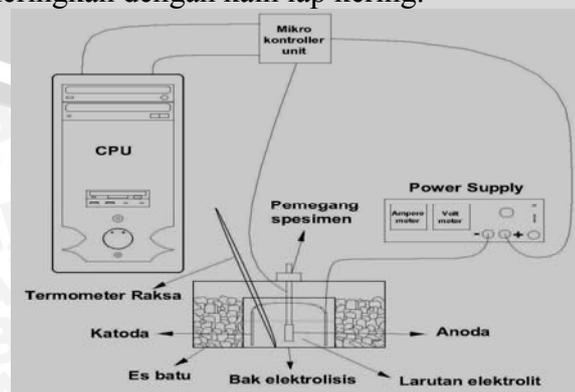
Unsur	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
Kandungan (%)	0,6	0,7	0,15	0,15	1,0	0,25	0,15	0,04	97

- b. Larutan asam sulfat
- c. Asam oksalat
- d. *Caustic soda* (NaOH)
- e. Larutan asam nitrat
- f. Air murni (*destilated water*)
- g. Es batu
- h. Kain lap

3.5. Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang diambil dalam penelitian ini meliputi :

1. Persiapan peralatan dan benda kerja.
2. Proses *pulse hard anodizing* ada tiga tahap, yaitu:
 - Perlakuan awal (*pre-treatment*), yaitu :
 - a) *Degreasing*, menggunakan larutan H_2SO_4 dengan konsentrasi 15 %, larutan H_2SO_4 dipanaskan pada temperatur $60^\circ C$ sampai $80^\circ C$ dan aluminium direndam selama 5 – 15 menit, kemudian aluminium direndam dalam air murni.
 - b) *Etching*, menggunakan larutan $NaOH$ (*caustic soda*). Proses ini dilakukan pada temperatur $30^\circ C$ sampai $50^\circ C$ dan aluminium direndam selama 3 - 10 menit, kemudian aluminium direndam dalam air murni.
 - c) *Desmutting*, menggunakan larutan asam nitrat dengan konsentrasi 10%, proses ini dilakukan pada temperatur $25^\circ C$ sampai $40^\circ C$ dan aluminium direndam selama 5 - 10 menit, kemudian aluminium direndam dalam air murni.
 - Proses *pulse hard anodizing*, yaitu aluminium hasil *pre-treatment* dihubungkan pada sisi anoda (kutub positif) di *power supply* kemudian direndam dalam *tupper ware* (bak elektrolisis) $12 \times 12 \times 10$ cm yang berisi larutan campuran asam sulfat 20% dan asam oksalat 1% dengan air murni sebanyak 700ml pada temperatur 8 sampai $10^\circ C$, dan pada sisi katoda (kutub negatif) di *power supply* dihubungkan ke lempengan *stainless steel* 6×6 cm dengan tebal 3mm, setelah itu pengaturan *current density* dan *duty cycle* yang telah direncanakan pada *power supply* dan CPU. Kemudian *power supply* dinyalakan dan proses berjalan selama 30 menit.
 - Perlakuan akhir (*last-treatment*), yaitu aluminium hasil proses *pulse hard anodizing* dikeringkan dengan kain lap kering.



Gambar 3.1. Instalasi alat *Pulse Hard Anodizing*

3.6. Metode Pengujian Kekerasan dan Ketebalan Lapisan Oksida

3.6.1. Metode pengujian kekerasan mikro Vickers

Metode uji kekerasan mikro Vickers dilakukan dengan cara menekan material uji menggunakan sebuah indenter intan yang berbentuk piramid beratas bujur sangkar dan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan 136° , material diuji dengan gaya tekan 1000 gf, dengan waktu tekan selama 10 detik. Dua garis diagonal bekas indentasi pada permukaan spesimen setelah beban dihilangkan diukur menggunakan sebuah mikroskop logam dan dihitung rata-ratanya. Kekerasan Vickers dapat diketahui dengan membagi beban yang digunakan dengan luas daerah bekas indentasi.

3.6.2. Metode pengujian ketebalan lapisan

Metode pengujian ketebalan dengan foto mikroskop lapisan oksida dengan pembesaran 250 kali. Foto hasil pembesaran, kemudian diukur berapa tebal lapisan yang terbentuk (mm) dibagi dengan skala pembesaran untuk mengetahui tebal sesungguhnya lapisan yang terbentuk (μm).

$$X_n = \frac{T'n}{250}$$

keterangan :

X_n = tebal sesungguhnya pada data ke-n (μm)

$T'n$ = tebal hasil foto mikroskop (μm)

250 = pembesaran yang digunakan.

3.7. Metode Pengolahan Data

3.7.1. Analisa statistik kecukupan data

Untuk mengetahui apakah data yang diperoleh sudah cukup dan dapat dianalisa, atau perlu adanya penambahan data baru.

No.	Data observasi x_i	x_i^2	$[x_i - \bar{x}]$	$[x_i - \bar{x}]^2$
1	x_1	x_1^2	$[x_1 - \bar{x}]$	$[x_1 - \bar{x}]^2$
2	x_2	x_2^2	$[x_2 - \bar{x}]$	$[x_2 - \bar{x}]^2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	x_n	x_n^2	$[x_n - \bar{x}]$	$[x_n - \bar{x}]^2$
Jumlah				

1. Nilai tengah contoh

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2. Ragam contoh (σ^2)

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

3. Standar deviasi contoh

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

4. Tingkat ketelitian (*degree of accuracy*) DA:

$$s = DA = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

5. Tingkat kepercayaan (*confidence level*) CL:

$$CL = 100\% - DA$$

6. Kecukupan data observasi (N')

$$N' = \left[\frac{k}{s} \sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \right]^2$$

keterangan :

N' = jumlah pengamatan/pengukuran yang seharusnya dilaksanakan.

n = jumlah pengamatan yang dilakukan

k = harga indeks yang besarnya tergantung dari tingkat kepercayaan yang diambil.

Untuk tingkat kepercayaan 68 % harga k adalah 1

Untuk tingkat kepercayaan 95 % harga k adalah 2

Untuk tingkat kepercayaan 99 % harga k adalah 3

Bila $N' \leq n$ maka data sudah mencukupi untuk dianalisa. Bila $N' \geq n$, maka perlu dilakukan penambahan jumlah data.

3.7.2. Analisa statistik varian dua arah

Penelitian akan memberikan hasil atau jawaban yang sesuai dengan sasaran penelitian jika didukung oleh data yang mewakili populasi yang diteliti. Untuk itu diperlukan rancangan penelitian yang sesuai.

Dalam percobaan ini akan diteliti pengaruh dari *current density* dan *duty cycle* pada proses *pulse hard anodizing* terhadap kekerasan dan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk.

Metode rancangan percobaan yang sesuai dengan keadaan ini adalah Metode Analisis Varian Dua Arah karena 2 variabel bebas yang diamati, yaitu variasi *current density* susunan *c* kolom dan variasi *duty cycle* susunan *r* baris dengan 1 variabel terikat (kekerasan) dengan *n* kali pengulangan. Dengan Analisis Varian Dua Arah ini akan diketahui apakah *current density* dan *duty cycle* pada proses *pulse hard anodizing* berpengaruh terhadap kualitas (kekerasan dan ketebalan) lapisan oksida aluminium tipe 6061.

Pengamatan data dimasukkan dalam tabel berikut :

		<i>Current Density</i> (A/dm ²)			
		4	5	6	7
<i>Duty Cycle</i> (%)	40	Y ₁₁₁	Y ₁₂₁	Y ₁₃₁	Y ₁₄₁
		Y ₁₁₂	Y ₁₂₂	Y ₁₃₂	Y ₁₄₂
		Y ₁₁₃	Y ₁₂₃	Y ₁₃₃	Y ₁₄₃
	50	Y ₂₁₁	Y ₂₂₁	Y ₂₃₁	Y ₂₄₁
		Y ₂₁₂	Y ₂₂₂	Y ₂₃₂	Y ₂₄₂
		Y ₂₁₃	Y ₂₂₃	Y ₂₃₃	Y ₂₄₃
	60	Y ₃₁₁	Y ₃₂₁	Y ₃₃₁	Y ₃₄₁
		Y ₃₁₂	Y ₃₂₂	Y ₃₃₂	Y ₃₄₂
		Y ₃₁₃	Y ₃₂₃	Y ₃₃₃	Y ₃₄₃
	70	Y ₄₁₁	Y ₄₂₁	Y ₄₃₁	Y ₄₄₁
		Y ₄₁₂	Y ₄₂₂	Y ₄₃₂	Y ₄₄₂
		Y ₄₁₃	Y ₄₂₃	Y ₄₃₃	Y ₄₄₃
	80	Y ₅₁₁	Y ₅₂₁	Y ₅₃₁	Y ₅₄₁
		Y ₅₁₂	Y ₅₂₂	Y ₅₃₂	Y ₅₄₂
		Y ₅₁₃	Y ₅₂₃	Y ₅₃₃	Y ₅₄₃

keterangan :

Y_{ijk} adalah data pengamatan yang berupa data pengujian kekerasan pada variasi *duty cycle* ke $-i$ dan variasi *current density* ke $-j$ serta ulangan ke $-k$.

Kemudian dibuat tabel total untuk mendapatkan jumlah kuadrat total, seperti dibawah :

		Current Density (A/dm ²)				Total
		4	5	6	7	
Duty Cycle(%)	40	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	$T_{1..}$
	50	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{24}	$T_{2..}$
	60	T_{31}	T_{32}	T_{33}	T_{34}	$T_{3..}$
	70	T_{41}	T_{42}	T_{43}	T_{44}	$T_{4..}$
	80	T_{51}	T_{52}	T_{53}	T_{54}	$T_{5..}$
Total		$T_{.1}$	$T_{.2}$	$T_{.3}$	$T_{.4}$	$T_{...}$

keterangan :

T_{ij} adalah jumlah dari data kekerasan pada variasi *duty cycle* ke $-i$ dan variasi *current density* ke $-j$.

$T_{i..}$ adalah jumlah data kekerasan pada variasi *duty cycle* ke $-i$.

$T_{.j}$ adalah jumlah data kekerasan pada variasi *current density* ke $-j$.

$T_{...}$ adalah jumlah semua data kekerasan.

Untuk data pada Tabel, digunakan taraf nyata 0.05 untuk menguji hipotesis berikut :

(a) H_0' : tidak ada beda kekerasan rata-rata untuk kelima *duty cycle* yang digunakan, berarti $H_0' : \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 0$; jadi

H_1' : sekurang-kurangnya satu γ_i tidak sama dengan nol.

(b) H_0'' : tidak ada beda kekerasan rata-rata untuk kelima *current density* yang digunakan, berarti $H_0'' : \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = 0$; jadi

H_1'' : sekurang-kurangnya satu δ_j tidak sama dengan nol.

(c) H_0''' : tidak ada interaksi antara *duty cycle* dan *current density*, berarti $H_0''' : (\gamma\delta)_{11} = (\gamma\delta)_{12} = \dots = (\gamma\delta)_{55} = 0$; jadi

H_1''' : sekurang-kurangnya satu $(\gamma\delta)_{ij}$ tidak sama dengan nol.

Dimana γ_i merupakan pengaruh baris ke $-i$, δ_j merupakan pengaruh kolom ke $-j$, dan $(\gamma\delta)_{ij}$ merupakan pengaruh interaksi antara baris ke $-i$ dan kolom ke $-j$.

Masing-masing uji tersebut akan didasarkan pada perbandingan nilai dugaan yang bebas bagi σ^2 , yaitu dengan cara menguraikan jumlah kuadrat total menjadi empat komponen melalui identitas :

$$JKT = JKB + JKK + JK(BK) + JKG$$

Rumus Hitung Jumlah Kuadrat :

1. Jumlah Kuadrat Total

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{T^2}{r.c.n}$$

2. Jumlah Kuadrat bagi Nilaitengah Baris

$$JKB = \frac{\sum_{i=1}^r T_{i..}^2}{c.n} - \frac{T^2}{r.c.n}$$

3. Jumlah Kuadrat bagi Nilaitengah Kolom

$$JKK = \frac{\sum_{j=1}^c T_{.j.}^2}{r.n} - \frac{T^2}{r.c.n}$$

4. Jumlah Kuadrat bagi Interaksi Baris dan Kolom

$$JK(BK) = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T_{ij}^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^r T_{i..}^2}{c.n} - \frac{\sum_{j=1}^c T_{.j.}^2}{r.n} + \frac{T^2}{r.c.n}$$

5. Jumlah Kuadrat Galat

$$JKG = JKT - JKB - JKK - JK(BK)$$

Kemudian didapatkan :

Analisis Ragam pada data diatas

Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat Tengah	f hitung
Nilaitengah Baris	JKB	$r - 1$	$s_1^2 = \frac{JKB}{r - 1}$	$f_1 = \frac{s_1^2}{s_4^2}$
Nilaitengah Kolom	JKK	$c - 1$	$s_2^2 = \frac{JKK}{c - 1}$	$f_2 = \frac{s_2^2}{s_4^2}$
Interaksi	JK(BK)	$(r - 1)(c - 1)$	$s_3^2 = \frac{JK(BK)}{(r - 1)(c - 1)}$	$f_3 = \frac{s_3^2}{s_4^2}$
Galat	JKG	$rc(n - 1)$	$s_4^2 = \frac{JKG}{rc(n - 1)}$	
Total	JKT	$rcn - 1$		

keterangan :

r = banyak susunan baris

c = banyak susunan kolom

n = banyak pengulangan

s_i^2 = nilai dugaan

Untuk menguji Hipotesis H_0' bahwa pengaruh baris semuanya sama, dengan menghitung rasio

$$f_1 = \frac{s_1^2}{s_4^2},$$

yang merupakan nilai bagi peubah acak f_1 yang mempunyai sebaran F dengan $(r-1)$ dan $rc(n-1)$ derajat bebas bila H_0' benar. Hipotesis nol itu ditolak pada taraf nyata $\alpha = 0,05$ bila $f_1 > f_{\alpha} [r-1, rc(n-1)]$, yang berarti ada beda nilai kekerasan untuk variasi *duty cycle* yang digunakan.

Begitu pula, untuk menguji Hipotesis H_0'' bahwa pengaruh kolom semuanya sama, dengan menghitung rasio

$$f_2 = \frac{s_2^2}{s_4^2},$$

yang merupakan nilai bagi peubah acak F_2 yang mempunyai sebaran F dengan $(c-1)$ dan $rc(n-1)$ derajat bebas bila H_0'' benar. Hipotesis nol itu ditolak pada taraf nyata $\alpha = 0,05$ bila $f_2 > f_{\alpha} [c-1, rc(n-1)]$, yang berarti ada beda nilai kekerasan untuk variasi *current density* yang digunakan.

Terakhir untuk menguji Hipotesis H_0''' bahwa pengaruh interaksi semuanya sama, dengan menghitung rasio

$$f_3 = \frac{s_3^2}{s_4^2},$$

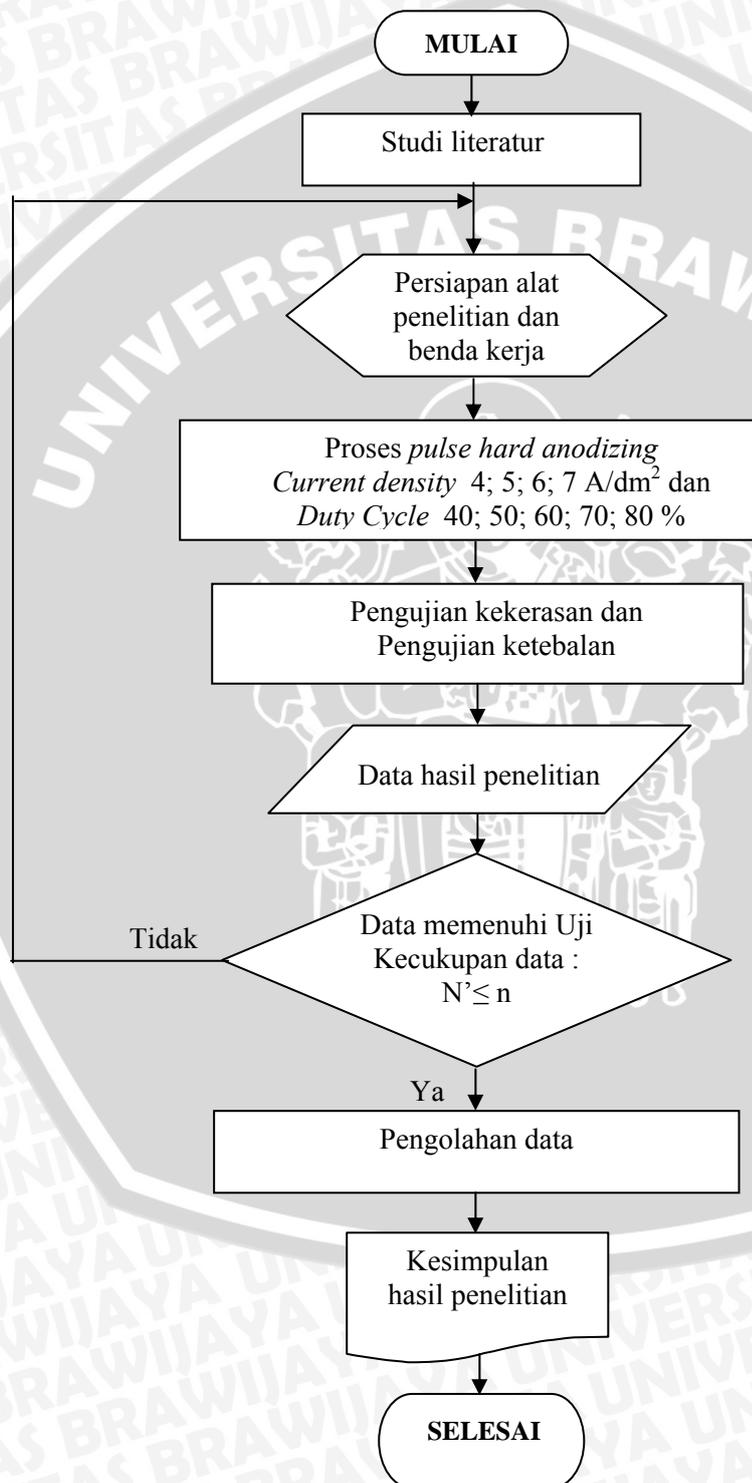
yang merupakan nilai bagi peubah acak F_3 yang mempunyai sebaran F dengan $(r-1)(c-1)$ dan $rc(n-1)$ derajat bebas bila H_0''' benar. Hipotesis nol itu ditolak pada taraf nyata $\alpha = 0,05$ bila $f_3 > f_{\alpha} [(r-1)(c-1), rc(n-1)]$, yang berarti adanya interaksi antara *duty cycle* dan *current density* yang digunakan terhadap nilai kekerasan lapisan.

Adanya interaksi dalam suatu percobaan dapat menyembunyikan atau menutupi beda yang nyata antar pengaruh baris atau pengaruh kolom. Karena alasan inilah maka setiap uji yang menghasilkan setiap penerimaan hipotesis tersebut dianggap tidak sah bila interaksi nyata.

3.7.3. Analisa grafik

Analisa grafik dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Microsoft Excel*, Analisa grafik dilakukan melalui pengamatan perubahan *trend* data pada grafik yang diperoleh dari *plotting* data.

3.8. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Pengujian

Untuk mendukung pembahasan tentang lapisan oksida yang terbentuk dan dalam pembuatan grafik, data hasil pengujian dipakai data rata-rata untuk *plotting* data. Dalam analisa grafik dilakukan melalui pengamatan perubahan *trend* data pada grafik yang diperoleh dari *plotting* data. Berikut tabel data hasil pengujian kekerasan mikro Vickers (Lampiran 3) dan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk pada alat mikroskoplogam (Lampiran 4), dan data rata-rata dalam setiap pengujian kekerasan dan ketebalan :

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Kekerasan (VHN)

		<i>Current Density (A/dm²)</i>			
		4	5	6	7
<i>Duty Cycle (%)</i>	40	284	302	518	487
		277	280	510	469
		234	276	496	445
	50	345	344	660	518
		300	334	657	509
		315	312	632	486
	60	512	347	445	464
		509	322	420	483
		502	312	408	450
	70	576	368	398	248
		567	332	376	220
		524	318	348	215
80	534	567	278	320	
	516	553	225	288	
	512	518	218	245	

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Ketebalan (μm)

		Current Density (A/dm^2)			
		4	5	6	7
Duty Cycle (%)	40	16,7	31,3	25,9	41
		18,6	38,2	30,6	44,5
		27	46,2	41,1	57,1
	50	25,1	29,5	59,7	32,2
		31,1	33,2	61	42,4
		33,2	35,4	69,7	44,3
	60	21,4	24,6	32,4	49,8
		22,1	28,8	32,9	55,7
		28,4	34	33,5	58,5
	70	18	37,7	55,1	69,8
		28,9	64,3	65,1	75,5
		30	68,6	69,8	75,8
80	25,2	21,2	39,7	40,8	
	29	33,4	45,7	48,7	
	30,2	35,5	56,3	56,8	

Tabel 4.3 Data Kekerasan dan Ketebalan Rata-rata Lapisan Oksida

Kekerasan (VHN)	Current Density (A/dm^2)				Ketebalan (μm)	Current Density (A/dm^2)					
	4	5	6	7		4	5	6	7		
Duty cycle (%)	40	265	286	508	467	Duty cycle (%)	40	20,77	38,57	32,53	47,53
	50	320	330	649,67	504,33		50	29,80	32,70	63,47	39,63
	60	507,67	327	424,33	465,67		60	23,97	29,13	32,93	54,67
	70	555,67	339	374	227,67		70	25,63	56,87	63,33	73,70
	80	520,67	546	240,33	284,33		80	28,13	30,03	47,23	48,77

4.2. Analisa Statistik

4.2.1. Analisa statistik kecukupan data

Tabel 4.4 Contoh perhitungan analisa kecukupan data

No.	Data observasi x_i	x_i^2	$[x_i - \bar{x}]$	$[x_i - \bar{x}]^2$
1	29,5	87,25	3,2	10,24
2	33,2	1102,24	0,5	0,25
3	35,4	1253,16	2,7	7,29
Jumlah	98,1	3225,65	6,4	17,78

Contoh data ketebalan pada *current density* 5 A/dm^2 dan *duty cycle* 50%.

1. Nilai tengah contoh

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{98,1}{3} = 32,7$$

2. Ragam contoh (σ^2)

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{17,78}{2} = 8,89$$

3. Standar deviasi contoh

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{8,89} = 2,98$$

4. Tingkat ketelitian (*degree of accuracy*) DA:

$$s = DA = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{2,98}{32,7} = 0,09$$

5. Tingkat kepercayaan (*convidence level*) CL:

$$CL = 100\% - DA$$

6. Kecukupan data observasi (N')

Penelitian dilaksanakan dengan tingkat kepercayaan 95 %, maka harga $k = 2$.

$$N' = \left[\frac{\frac{k}{s} \sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}}{\sum_{i=1}^n x_i} \right]^2 = \left[\frac{2}{0,09} \sqrt{3.3225,65 - (98,1)^2}}{98,1} \right]^2 = 2,6667$$

Dari perhitungan diperoleh $N' = 2,6667$ jadi $N' \leq n$ atau $2,6667 \leq 3$, maka data dapat dinyatakan cukup untuk dianalisa.

4.2.2. Analisa statistik varian dua arah

Metode Analisis Varian Dua Arah digunakan dalam penelitian ini karena 2 variabel bebas yang diamati, yaitu variasi *current density* susunan 4 kolom dan variasi *duty cycle* susunan 5 baris dengan 1 variabel terikat (kekerasan) dengan 3 kali pengulangan. Dengan Analisis Varian Dua Arah ini akan diketahui apakah *current density* dan *duty cycle* pada proses *pulse hard anodizing* berpengaruh terhadap kualitas (kekerasan dan ketebalan) lapisan oksida aluminium tipe 6061.

Untuk data hasil pengujian pada table 4.1, digunakan taraf nyata 0,05 untuk menguji hipotesis sebagai berikut :

- (a) H_0' : tidak ada beda kekerasan rata-rata untuk kelima *duty cycle* yang digunakan, berarti H_0' : $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 0$; jadi
 H_1' : sekurang-kurangnya satu γ_i tidak sama dengan nol.
- (b) H_0'' : tidak ada beda kekerasan rata-rata untuk kelima *current density* yang digunakan, berarti H_0'' : $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = 0$; jadi
 H_1'' : sekurang-kurangnya satu δ_j tidak sama dengan nol.
- (c) H_0''' : tidak ada interaksi antara *duty cycle* dan *current density*, berarti H_0''' : $(\gamma\delta)_{11} = (\gamma\delta)_{12} = \dots = (\gamma\delta)_{55} = 0$; jadi
 H_1''' : sekurang-kurangnya satu $(\gamma\delta)_{ij}$ tidak sama dengan nol.

Pengujian hipotesis dengan wilayah kritik :

- (a) $f_1 > f_{0,05}(4,40) = f_1 > 2,61$ (Lampiran 2)
 (b) $f_2 > f_{0,05}(3,40) = f_2 > 2,84$ (Lampiran 2)
 (c) $f_3 > f_{0,05}(12,40) = f_3 > 2,00$ (Lampiran 2)

Kemudian dibuat tabel total untuk mendapatkan jumlah kuadrat total :

		Current Density (A/dm ²)				Total
		4	5	6	7	
Duty Cycle (%)	40	795	858	1524	1401	4578
	50	960	990	1949	1513	5412
	60	1523	981	1273	1397	5174
	70	1667	1018	1122	683	4490
	80	1562	1638	721	853	4774
Total		6507	5485	6589	5847	24428

1. Jumlah Kuadrat Total

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{T^2 \dots}{r.c.n} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 284^2 + 277^2 + \dots + 245^2 - \frac{24428^2}{5.4.3}$$

$$JKT = 876068,9$$

2. Jumlah Kuadrat bagi Nilaitengah Baris

$$JKB = \frac{\sum_{i=1}^r T_{i..}^2}{c.n} - \frac{T^2 \dots}{r.c.n} = \frac{\sum_{i=1}^5 4578^2 + 5412^2 + \dots + 4774^2}{4.3} - \frac{24428^2}{5.4.3}$$

$$JKB = 51986,93$$

3. Jumlah Kuadrat bagi Nilaitengah Kolom

$$JKK = \frac{\sum_{j=1}^c T_{.j}^2}{r.n} - \frac{T_{...}^2}{r.c.n} = \frac{\sum_{j=1}^4 6507^2 + 5485^2 + \dots + 5847^2}{5.3} - \frac{24428^2}{5.4.3}$$

$$JKK = 56453,87$$

4. Jumlah Kuadrat bagi Interaksi Baris dan Kolom

$$JK(BK) = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T_{ij}^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^r T_{i..}^2}{c.n} - \frac{\sum_{j=1}^c T_{.j}^2}{r.n} + \frac{T_{...}^2}{r.c.n}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 795^2 + 960^2 + \dots + 853^2}{3} - \frac{\sum_{i=1}^5 4578^2 + \dots + 4774^2}{4.3} - \frac{\sum_{i=1}^4 6507^2 + \dots + 5847^2}{5.3} + \frac{24428^2}{5.4.3}$$

$$JK(BK) = 748768,8$$

5. Jumlah Kuadrat Galat

$$JKG = JKT - JKB - JKK - JK(KB) = 876068,9 - 51986,93 - 56453,87 - 748768,8$$

$$JKG = 18859,33$$

Didapatkan tabel analisis ragam pada data kekerasan diatas :

Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat	Derajat bebas	Kuadrat Tengah	f hitung
Nilaitengah Baris	JKB = 1986,93	r-1 = 4	$s_1^2 = \frac{JKB}{r-1}$ $s_1^2 = 12996,73$	$f_1 = \frac{s_1^2}{s_4^2}$ $f_1 = 27,56$
Nilaitengah Kolom	JKK = 56453,87	c-1 = 3	$s_2^2 = \frac{JKK}{c-1}$ $s_2^2 = 18817,96$	$f_2 = \frac{s_2^2}{s_4^2}$ $f_2 = 39,91$
Interaksi	JK(BK) = 748768,8	(r-1)(c-1) = 12	$s_3^2 = \frac{JK(BK)}{(r-1)(c-1)}$ $s_3^2 = 62397,4$	$f_3 = \frac{s_3^2}{s_4^2}$ $f_3 = 132,34$
Galat	JKG = 18859,33	rc(n-1) = 40	$s_4^2 = \frac{JKG}{rc(n-1)}$ $s_4^2 = 471,48$	
Total	JKT = 876068,9	rcn(n-1) = 59		

Keputusan :

- (a) $f_1 > 2,61$ Tolak H_0' dan simpulkan bahwa ada perbedaan nilai kekerasan untuk variasi *duty cycle* yang digunakan.
- (b) $f_2 > 2,84$; Tolak H_0'' dan simpulkan bahwa ada perbedaan nilai kekerasan untuk variasi *current density* yang digunakan.
- (c) $f_3 > 2,00$; Tolak H_0''' dan simpulkan bahwa ada interaksi antara *current density* dengan *duty cycle* yang digunakan terhadap nilai kekerasan.

Perhitungan yang sama dilakukan pada table 4.2 sehingga didapatkan :

- (a) $f_1 = 16,8$; sehingga $f_1 > 2,61$; Tolak H_0' dan simpulkan bahwa ada perbedaan nilai ketebalan untuk variasi *duty cycle* yang digunakan.
- (b) $f_2 = 45,12$; sehingga $f_2 > 2,84$; Tolak H_0'' dan simpulkan bahwa ada perbedaan nilai ketebalan untuk variasi *current density* yang digunakan.
- (c) $f_3 = 5,65$; sehingga $f_3 > 2,00$; Tolak H_0''' dan simpulkan bahwa ada interaksi antara *current density* dengan *duty cycle* yang digunakan terhadap nilai kekerasan.

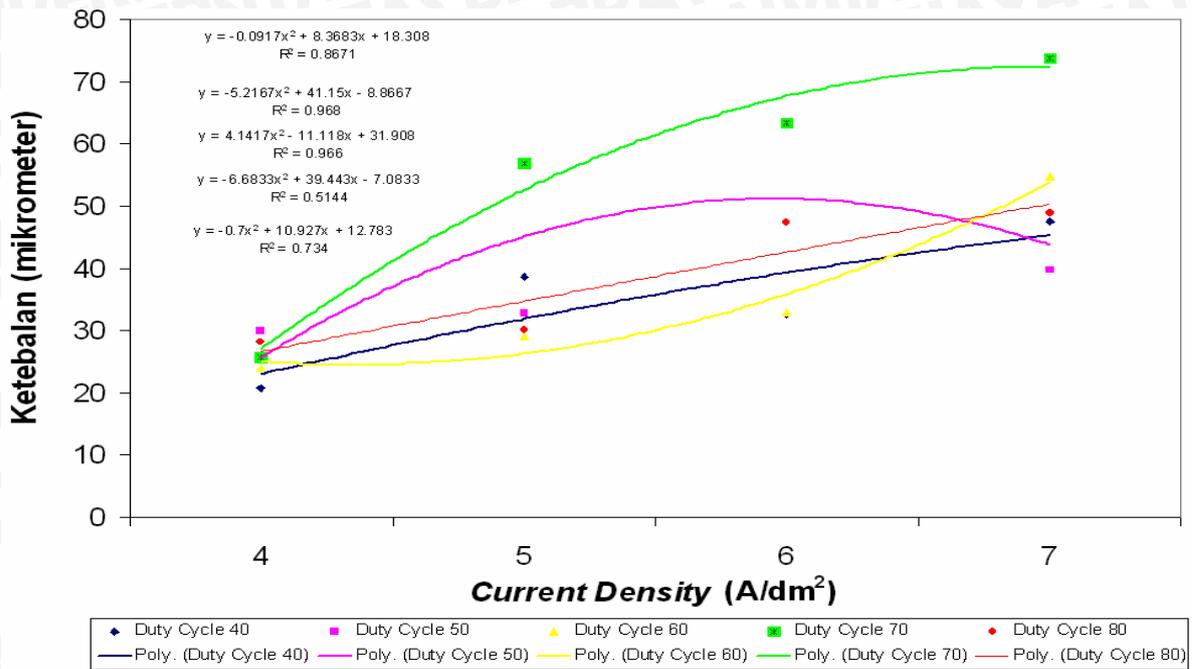
4.3. Analisa Grafik

4.3.1. Pengaruh *current density* dan *duty cycle* terhadap ketebalan lapisan oksida

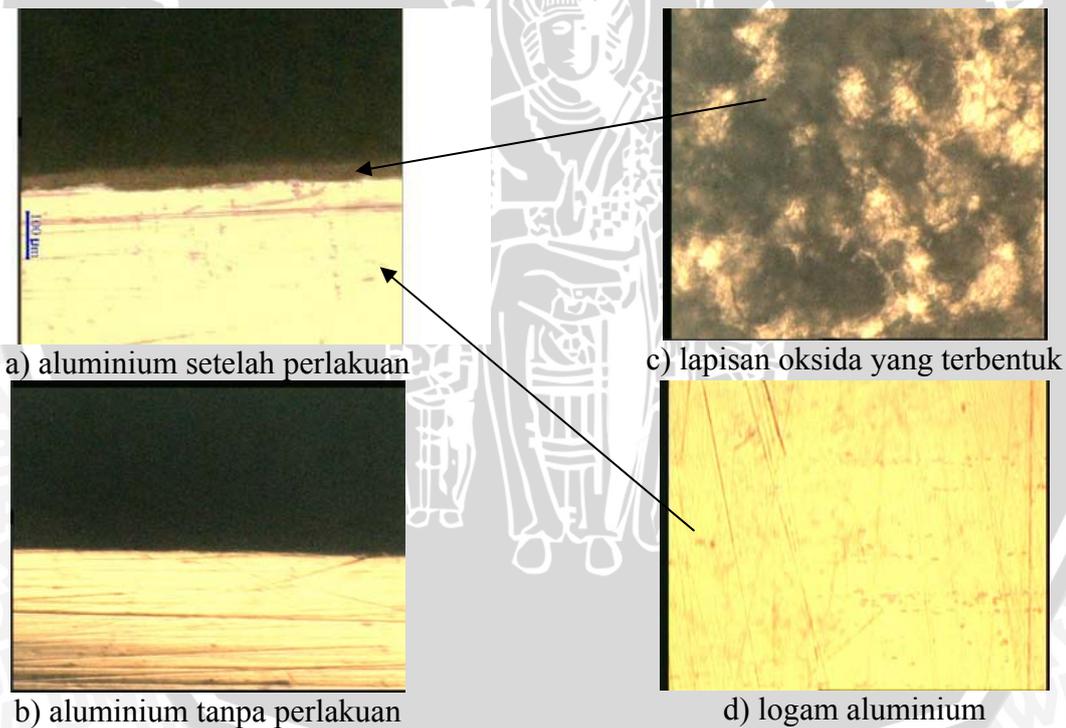
Berdasarkan analisa varian dua arah diatas pada tabel 4.2, didapat bahwa H_0' dan H_0'' ditolak yang artinya bahwa ada perbedaan nilai ketebalan lapisan oksida yang terbentuk untuk variasi *current density* dan *duty cycle* yang digunakan pada proses *pulse hard anodizing*. Hasil *plotting* grafik dibawah didapat dari tabel 4.3. Foto hasil mikroskop logam didapat ketebalan lapisan yang terbentuk dengan pembesaran 250x pada gambar 4.2.

Lapisan oksida Al_2O_3 pada proses elektrolisis merupakan ikatan ion. Pada gambar 4.1 pemakaian *current density* maupun *duty cycle* yang semakin besar memperlihatkan *trend* nilai ketebalan yang semuanya naik. Hal ini disebabkan karena pemakaian *current density* dan *duty cycle* yang semakin besar, berarti ion-ion dalam larutan elektrolit akan semakin banyak. Arus membawa elektron yang akan membuat ion-ion dalam larutan elektrolit, jika arus yang dialirkan semakin besar maka elektron juga semakin banyak yang akan membuat ion-ion dalam larutan akan semakin banyak. Dengan ion-ion yang semakin banyak maka terbentuklah lapisan oksida yang semakin tebal.

Nilai ketebalan rata-rata tertinggi pada *current density* 7 A/dm² dan *duty cycle* 70 % dengan ketebalan lapisan yang terbentuk adalah 73,7 μ m; sedangkan nilai ketebalan rata-rata terendah yaitu 20,77 μ m pada *current density* 4 A/dm² dan *duty cycle* 40 %.



Gambar 4.1. Grafik Hubungan *Current Density* dan *Duty cycle* terhadap Ketebalan Lapisan Oksida



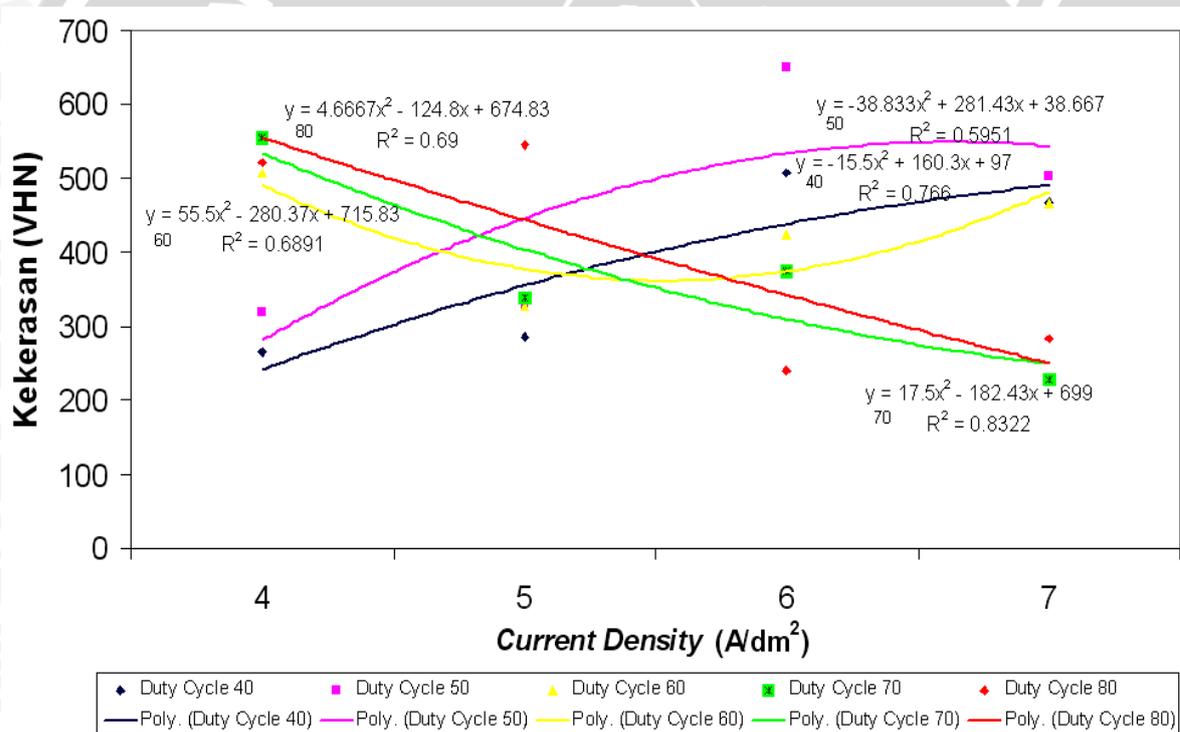
Gambar 4.2. Foto Mikroskoplogam Pembesaran 250x pada Aluminium Proses *Pulse Hard Anodizing*

4.3.2. Pengaruh *current density* dan *duty cycle* terhadap kekerasan lapisan oksida

Berdasarkan analisa varian dua arah diatas pada tabel 4.1, didapat bahwa H_0' dan H_0'' ditolak yang artinya bahwa ada perbedaan nilai kekerasan untuk variasi *current density* dan *duty cycle* yang digunakan pada proses *pulse hard anodizing*. Hasil *plotting* grafik dibawah didapat dari tabel 4.3.

Dari gambar 4.3 dapat dilihat, terjadi perubahan *trend* nilai kekerasan dengan pemakaian *current density* yang semakin besar. Untuk *trend* nilai kekerasan yang naik, *duty cycle* yang dipakai 40 %, 50 % dan 60 %; dan untuk *trend* nilai kekerasan yang turun, *duty cycle* yang dipakai, 70% dan 80 %.

Pemakaian *current density* yang semakin besar akan meningkatkan proses pembentukan lapisan oksida, karena jumlah elektron yang dialirkan akan semakin banyak sehingga lapisan oksida yang terbentuk semakin cepat yang menyebabkan lapisan oksida yang semakin banyak, sehingga kekerasan lapisan meningkat. Akan tetapi pemakaian *current density* yang besar akan menyebabkan *local Joule's heating*, yaitu peluruhan karena medan listrik yang terkonsentrasi pada *barrier layer* menyebabkan kenaikan temperatur pada ketebalan lapisan yang lebih tipis sehingga memicu proses peluruhan yang semakin cepat yang menghasilkan lapisan berpori besar yang menyebabkan kekerasan lapisan oksida menurun (gambar 4.4).



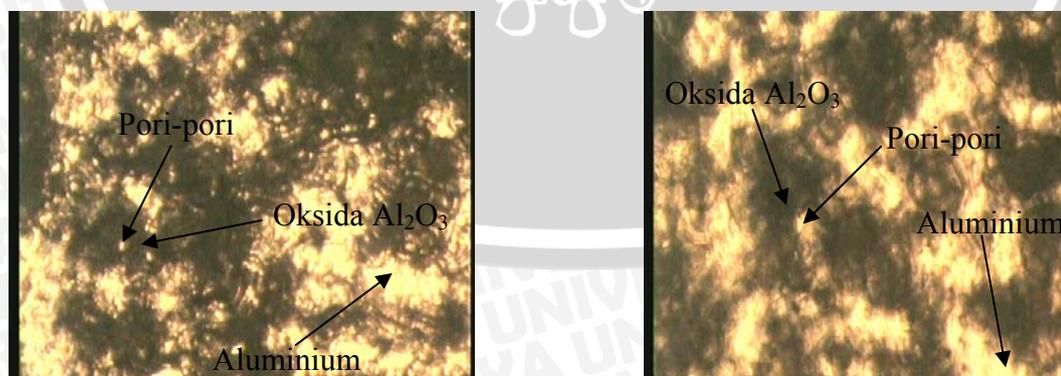
Gambar 4.3. Grafik Hubungan *Current Density* dan *Duty Cycle* terhadap Kekerasan Lapisan Oksida

Pada *trend* nilai kekerasan yang naik dengan pemakaian *current density* yang semakin besar, pemakaian *duty cycle* 40%, 50% dan 60% mampu menahan laju proses peluruhan lapisan oksida atau *local Joule's heating*, sehingga pembentukan lapisan oksida semakin padat yang menyebabkan kekerasan lapisan semakin tinggi. Sedangkan untuk *trend* nilai kekerasan yang turun dengan pemakaian *current density* yang semakin besar, disebabkan pemakaian *duty cycle* 70% dan 80% tidak mampu menahan naiknya temperatur

elektrolit karena *local Joule's heating* yang memicu proses peluruhan semakin cepat sehingga lapisan menjadi berpori besar, yang menyebabkan kekerasan yang dihasilkan menurun.

Dari gambar 4.3 terlihat juga peningkatan kekerasan, pada *current density* 4 A/dm² dan 5 A/dm² seiring dengan *duty cycle* yang semakin besar; Sedangkan peningkatan kekerasan pada *current density* 6 A/dm² dan 7 A/dm² seiring dengan *duty cycle* yang semakin kecil. Penggunaan *duty cycle* pada proses *pulse hard anodizing* bertujuan untuk menahan naiknya temperatur elektrolit yang disebabkan pemakaian *current density* yang besar. Penggunaan *duty cycle* yang semakin besar, berarti *off time* yang semakin singkat. Pada pemakaian *duty cycle* yang terlalu besar berarti hampir sama dengan metode *continuous*, karena *off time* yang sangat singkat sekali.

Penggunaan *duty cycle* yang semakin besar pada *current density* 4 A/dm² dan 5 A/dm² menunjukkan *trend* kenaikan nilai kekerasan, karena arus yang dialirkan tidak terlalu besar, masih dapat menahan *local Joule's heating*, yaitu peluruhan karena medan listrik (*field assisted dissolution*) yang terkonsentrasi pada *barrier layer* yang menyebabkan kenaikan temperatur maka peluruhan dapat diperlambat, sehingga pembentukan lapisan oksida menjadi lebih padat atau berpori sempit yang menyebabkan kekerasan lapisan tinggi (gambar4.4.a). Pada *current density* 6 A/dm² dan 7 A/dm² penggunaan *duty cycle* yang semakin besar menurunkan nilai kekerasan, ini disebabkan arus yang dialirkan terlalu besar sehingga penggunaan *duty cycle* yang semakin besar tidak memiliki pengaruh yang besar untuk menahan naiknya temperatur elektrolit atau terjadi *local Joule's heating*, sehingga terjadi proses peluruhan yang cepat dan lapisan oksida yang terbentuk berpori besar dan kekerasan lapisan yang dihasilkan menurun (gambar4.4.b).



a. Lapisan oksida pada *current density* 6A/dm² dan *duty cycle* 50% (kekerasan tinggi)

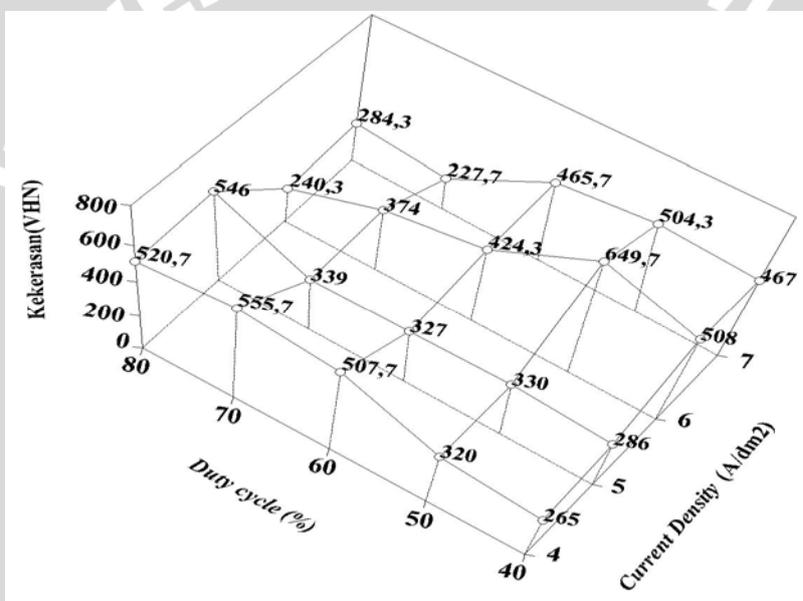
b. Lapisan oksida pada *current density* 7A/dm² dan *duty cycle* 70% (kekerasan rendah)

Gambar 4.4. Lapisan oksida yang Terbentuk Pada Proses *Pulse Hard Anodizing*

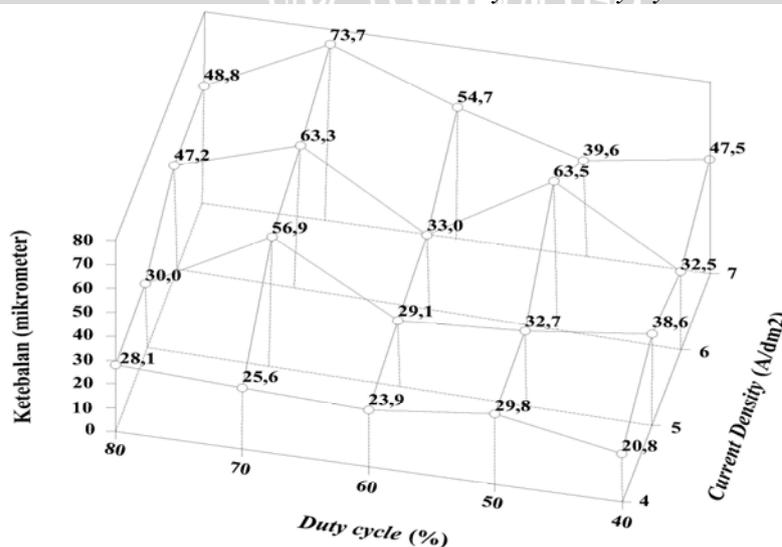
4.3.3. Interaksi antara *current density* dan *duty cycle* terhadap kekerasan dan ketebalan lapisan oksida

Berdasarkan analisa varian dua arah, didapat bahwa H_0 ditolak yang artinya ada interaksi antara *current density* dengan *duty cycle* yang digunakan terhadap nilai kekerasan dan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk.

Pada gambar 4.5 interaksi antara *current density* dan *duty cycle*, terlihat kekerasan yang tinggi didapat pada *current density* yang besar dengan *duty cycle* yang kecil dan atau *current density* yang kecil dengan *duty cycle* yang besar. Untuk mendapatkan kekerasan lapisan yang tinggi lapisan oksida yang terbentuk haruslah padat, atau yang mengalami peluruhan yang lambat sehingga pembentukan lapisan menjadi padat dan keras. Kombinasi diatas dapat menahan naiknya temperatur elektrolit sehingga laju peluruhan dapat diperkecil sehingga pembentukan lapisan menjadi lebih padat dan keras.



Gambar 4.5. Grafik Interaksi antara *Current Density* dan *Duty cycle* terhadap Kekerasan



Gambar 4.6. Grafik Interaksi antara *Current Density* dan *Duty cycle* terhadap Ketebalan

Pada gambar 4.6 interaksi antara *current density* dan *duty cycle* terhadap ketebalan terlihat dengan semakin besarnya *current density* dan *duty cycle* yang digunakan akan meningkatkan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk. Karena semakin besar *current density* dan *duty cycle* yang digunakan, arus yang mengalir juga akan semakin besar yang membuat ketebalan lapisan meningkat.

Nilai kekerasan rata-rata tertinggi yaitu 649,67 VHN pada *current density* 6 A/dm² dengan *duty cycle* 50 % dan nilai kekerasan rata-rata terendah pada *current density* 7 A/dm² dengan *duty cycle* 70 %, yaitu 227,67 VHN. Sedangkan nilai ketebalan rata-rata tertinggi pada *current density* 7 A/dm² dengan *duty cycle* 70%, yaitu 73,70 μm , dan nilai ketebalan rata-rata terendah, yaitu 20,77 μm pada *current density* 4 A/dm² dengan *duty cycle* 40 %. Hasil optimum pada penelitian ini pada *current density* 6 A/dm² dengan *duty cycle* 50 %, yaitu dengan kekerasan lapisan 649,67 VHN dan ketebalan lapisan 63,47 μm .



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah :

1. a. Pemakaian *current density* dan *duty cycle* yang semakin besar akan meningkatkan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk pada proses *pulse hard anodizing*. Ketebalan tertinggi pada penelitian ini adalah 73,70 μm pada *current density* 7 A/dm^2 dengan *duty cycle* 70%.
b. Terjadi perubahan *trend* nilai kekerasan dengan pemakaian *current density* yang semakin besar . Untuk *trend* nilai kekerasan yang naik, *duty cycle* yang dipakai 40 %, 50 % dan 60 %; dan untuk *trend* nilai kekerasan yang turun, *duty cycle* yang dipakai, 70% dan 80 %. Kekerasan tertinggi pada penelitian ini adalah 649,7 VHN pada *current density* 7 A/dm^2 dengan *duty cycle* 50%.
2. Untuk mendapatkan lapisan oksida yang baik, dengan kekerasan yang tinggi didapat pada *current density* yang besar dengan *duty cycle* yang kecil dan atau *current density* yang kecil dengan *duty cycle* yang besar. Hasil optimum pada penelitian ini pada *current density* 6 A/dm^2 dengan *duty cycle* 50 %, yaitu dengan kekerasan lapisan 649,67 VHN dan ketebalan lapisan 63,47 μm .

5.2. Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi penambahan waktu proses dan pemakaian jenis larutan elektrolit yang berbeda.
2. Sebaiknya penelitian lebih lanjut menggunakan permodelan persamaan matematika yang berbeda agar didapat nilai regresi yang lebih mendekati atau sama dengan 1.
3. Sebaiknya proses dilakukan pada ruangan dengan sirkulasi udara yang baik.



Lampiran 1. Alat dan Bahan



Bak Elektrolisis



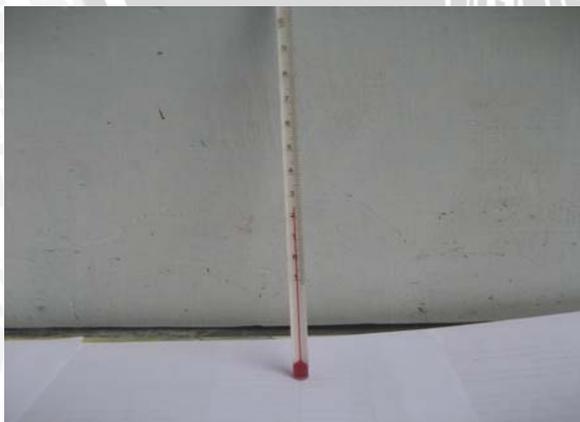
Gergaji



Mesin bubut



Kertas Gosok



Termometer Raksa



Heater



Gelas Ukur



Stop Watch



Masker dan Sarung tangan Plastik



Wadah Plastik (*tupper ware*)



Lempeng Stainless Steel

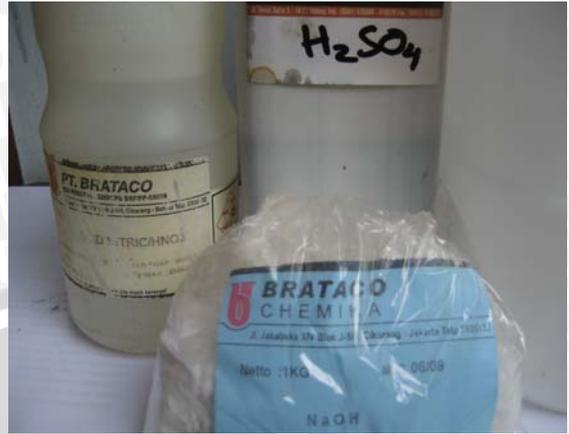


Mikroskoplogam





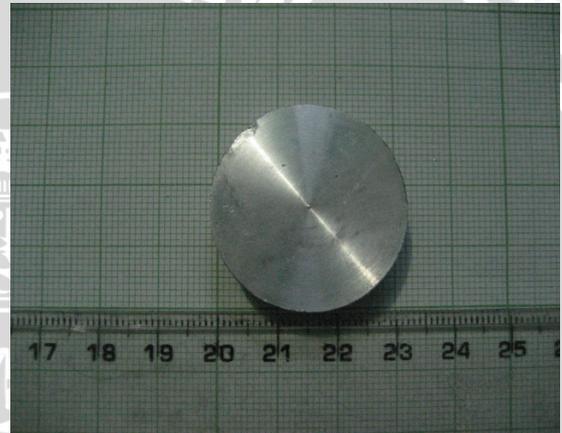
Alat Uji Kekerasan Mikro Vickers



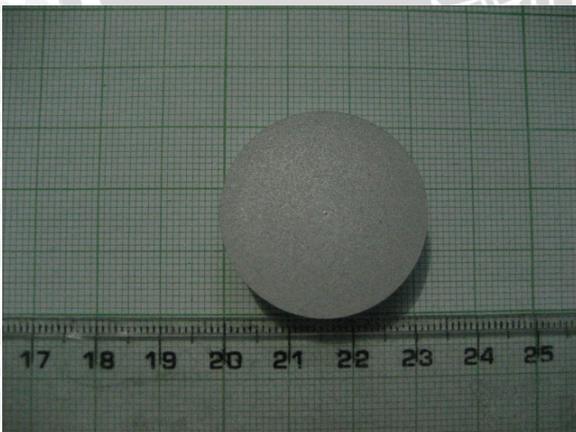
Asam Sulfat, *Caustic Soda*, Asam Nitrat



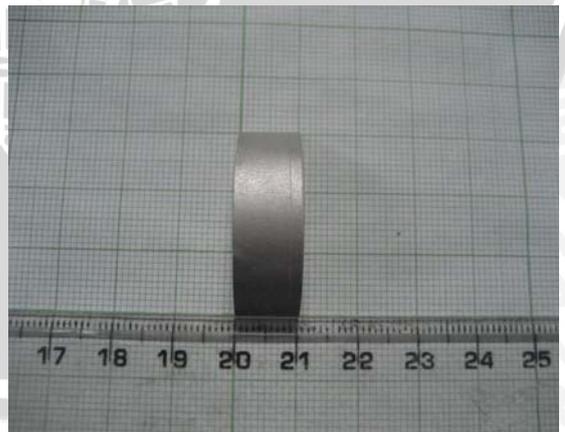
Asam Oksalat



Aluminium (tanpa perlakuan)



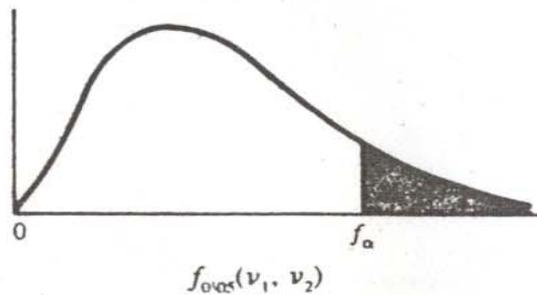
Aluminium (dengan perlakuan)



Tebal Aluminium

Lampiran 2. Tabel Distribusi F ($\alpha; \nu_1; \nu_2$) untuk $\alpha = 5\%$

TABEL A.7
Nilai Kritis Sebaran F

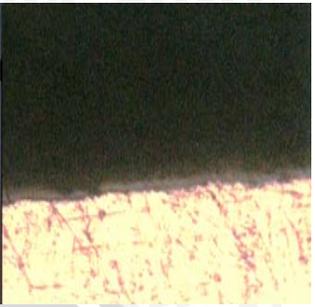


ν_2	ν_1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88

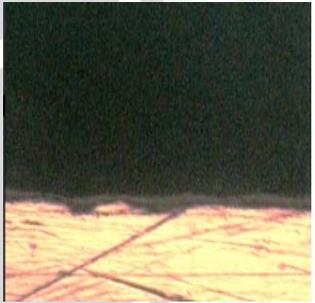
*Direproduksi dari Tabel 18 *Biometrika Tables for Statisticians*, Vol. I, dengan izin dari E. S. Pearson dan Biometrika Trustees.

Sumber : Walpole, 1995

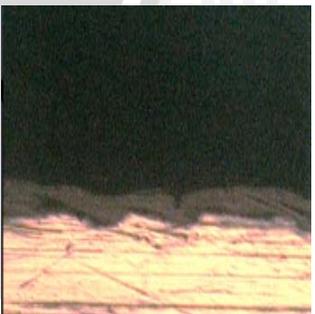
Lampiran 4. Foto Ketebalan dan Bekas Indentasi



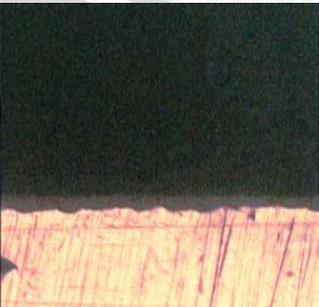
Current Density
4 A/dm² dan Duty Cycle 40%



Current Density
4 A/dm² dan Duty Cycle 80%



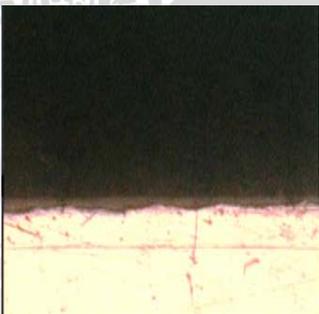
Current Density
5 A/dm² dan Duty Cycle 70%



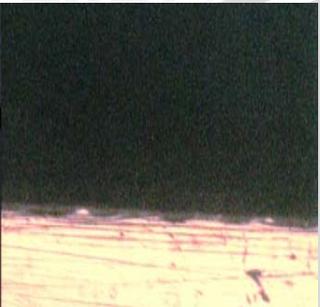
Current Density
4 A/dm² dan Duty Cycle 50%



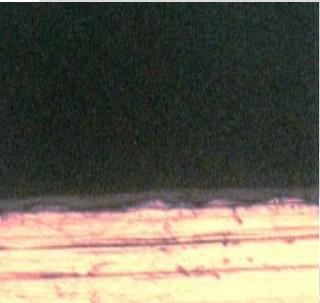
Current Density
5 A/dm² dan Duty Cycle 40%



Current Density
5 A/dm² dan Duty Cycle 80%



Current Density
4 A/dm² dan Duty Cycle 60%



Current Density
5 A/dm² dan Duty Cycle 50%



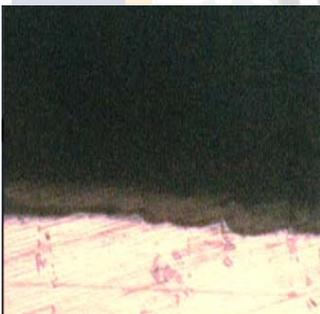
Current Density
6 A/dm² dan Duty Cycle 40%



Current Density
4 A/dm² dan Duty Cycle 70%



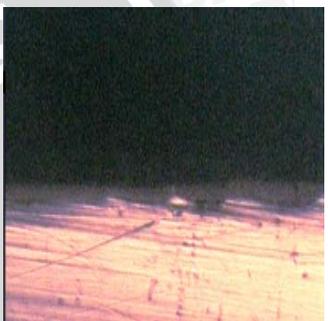
Current Density
5 A/dm² dan Duty Cycle 60%



Current Density
6 A/dm² dan Duty Cycle 50%



Current Density
6 A/dm² dan Duty Cycle 60%



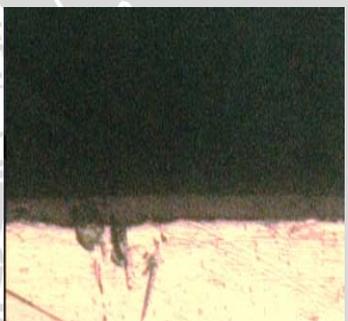
Current Density
7 A/dm² dan Duty Cycle 50%



Tanpa perlakuan



Current Density
6 A/dm² dan Duty Cycle 70%



Current Density
7 A/dm² dan Duty Cycle 60%



Bekas indentasi mikroVickers
tanpa perlakuan



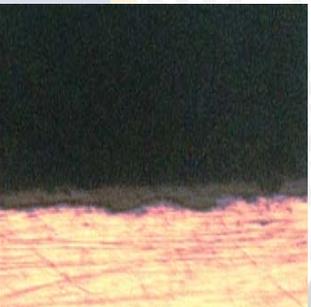
Current Density
6 A/dm² dan Duty Cycle 80%



Current Density
7 A/dm² dan Duty Cycle 70%



Bekas indentasi mikroVickers
dengan perlakuan



Current Density
7 A/dm² dan Duty Cycle 40%



Current Density
7 A/dm² dan Duty Cycle 80%

Lampiran 6. Perhitungan Arus dan Waktu

- ❖ Perhitungan penggunaan *Current Density* dan *Duty Cycle* yang digunakan dalam penelitian, dengan benda kerja yang digunakan silinder aluminium dengan diameter $d=30\text{mm}$ dan tinggi $t=10\text{mm}$.

- Perhitungan arus yang dialirkan : $CD = \frac{i}{A}$

keterangan : $CD = \text{current density (A/dm}^2\text{)}$

$i = \text{arus yang mengalir (A)}$

$A = \text{luas permukaan spesimen (dm}^2\text{)}$

$$A = 2xL.\text{Lingkaran} + L.\text{Selimut Silinder}$$

$$A = 2355 \text{ mm}^2 = 0,2355 \text{ dm}^2$$

CD(A/dm ²)	Arus yang digunakan(A)
4	0.942
5	1.1775
6	1.413
7	1.6485
8	1.884

- Perhitungan *Duty cycle*

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2}$$

$$\text{Duty cycle (\%)} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \times 100 \%$$

keterangan :

$f = \text{frequency (Hz)}$

$t_1 = \text{on time (detik)}$

$t_2 = \text{off time (detik)}$

$DC = \text{duty cycle (\%)}$

No.	Frequency (f) (Hz)	on time (x) (sekon)	off time (z) (sekon)	Duty Cycle (DC) (%)
1	4	0.1	0.15	40
2	5	0.1	0.10	50
3	6	0.1	0.07	60
4	7	0.1	0.04	70
5	8	0.1	0.03	80

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2001. *ATM Page Anodizing*. <http://www.atmpage.com/anode.pdf>. (diakses 12 Maret 2008).
- Anonim. 2006. *AtoZ Material*. <http://www.matweb.com> (diakses 12 Maret 2008).
- Bhusman, B & Gupta, B. K. 1991. *Handbook of Tribology*. New York : Mc Graw Hill.
- Brace, A. W. & Sheasby P. G. 2001. *Alubook-lexical knowledge about aluminium*. England, <http://www.alu-info.dk> (diakses 12 Maret 2008).
- Budinski, K. G. 1988. *Surface Engineering for Wear Resistance*. New Jersey : Prentice Hall.
- Elmie, S. 2008. *Pengaruh Densitas Arus Terhadap Ketebalan dan Kekerasan Lapisan Oksida pada Permukaan Aluminium 6063 Hasil Hard Anodizing*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- Faisol. 1990. *Pengaruh Penambahan Asam Oksalat pada Hard Anodizing*. Skripsi tidak dipublikasikan. Jakarta : Universitas Indonesia.
- Gazzapo, J. L. 1994. *Anodizing of Aluminium. Talat lecture 5203*. European Aluminium Association. <http://www.bygg.ntnu.no.com.pdf>. (diakses 24 November 2008).
- Gabe, D. R. 2002. *Hard Anodizing-What do we mean by hard?*. Inggris: <http://www.metalfinishing.com.pdf>. (diakses 24 November 2008).
- Juhl, A. D. 2005. *Pulse Anodizing in an Existing Anodizing Line*. Denmark: AluConsult, <http://www.AluConsult.dk.com> .pdf. (diakses 8 Agustus 2008).
- Juhl, A. D. 2005. *Theoretical Introduction to Pulse Anodizing*. Denmark: AluConsult, <http://www.AluConsult.dk.com.pdf>. (diakses 24 November 2008).
- Juhl, A. D. 2006. *A new approach to Pulse Anodizing – Decreasing energy consumption-Increasing productivity*. Denmark: AluConsult,<http://www.AluConsult.dk.com.pdf>. (diakses 8 Agustus 2008).
- Kao, F. H. & Shih, H. H. 2004. *Blackening Of Anodic Film Of Aluminium In Silver Nitrate Solution*. Cina : Departement of Chemical Engineering Tatung University.<http://etd.ncsi.iisc.ernet.in/bitstream/2004/214/1/%BO%AA%AA.pdf> (diakses 4 Juni 2008)
- Rajendra, A. 2006. *Chapter 3 : Pressure Sensor Development Using Hard Anodized Aluminium Diaphragm and Thin Film Strain Gauges*. India : Depatment of Instrumentation Indian Institute of Science. <http://etd.ncsi.iisc.ernet.in/bitstream/2006/344/1/G20364.pdf>. (diakses 22Juni 2008)
- Richardson, J.F. 2002. *Redoks Reaktion and Electrochemistry*. Boston: Butterworth Heinmann.
- Sato T, 1997, *Theories of Anodized Aluminium-100 Q&A*. Japan: <http://www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp>(diakses 5 Juni 2008)
- Surdia, T. 1999. *Pengetahuan Bahan dan Teknik*. Jakarta: PT Pradnya Paramita

Tripler, P. A. 2001. *Fisika edisi ketiga*. Jakarta : Erlangga.

Walpole, R. E. 1995. *Pengantar Statistika edisi ketiga*. Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama.

Zaky, I. 2008. *Panduan Penulisan Skripsi*. Malang : UPT Penerbitan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

