



TUGAS AKHIR - RE 184804

**APLIKASI ELEKTROLISIS DENGAN ELEKTRODA PLATINA
UNTUK *RECOVERY* ALUMINA DARI LUMPUR PDAM**

ATIKA RIZQI SYAVIRA
03211540000101

DOSEN PEMBIMBING:
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RE 184804

**APLIKASI ELEKTROLISIS DENGAN ELEKTRODA
PLATINA UNTUK *RECOVERY* ALUMINA DARI LUMPUR
PDAM**

ATIKA RIZQI SYAVIRA
03211540000101

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2019



FINAL PROJECT - RE 184804

**APPLICATION OF ELECTROLYSIS USING PLATINUM AS
ELECTRODES FOR ALUMINA RECOVERY FROM PDAM
SLUDGE**

ATIKA RIZQI SYAVIRA
NRP. 03211540000101

ADVISOR
Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

Department of Environmental Engineering
Faculty of Civil Environmental and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2019

LEMBAR PENGESAHAN

APLIKASI ELEKTROLISIS DENGAN ELEKTRODA PLATINA UNTUK *RECOVERY* ALUMINA DARI LUMPUR PDAM

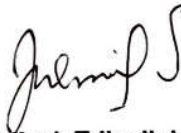
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ATIKA RIZQI SYAVIRA
NRP.03211540000101

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc.
NIP.19530706 198403 2 004



APLIKASI ELEKTROLISIS DENGAN ELEKTRODA PLATINA UNTUK *RECOVERY* ALUMINA DARI LUMPUR PDAM

Nama Mahasiswa : Atika Rizqi Syavira
NRP : 03211540000101
Departemen : Teknik Lingkungan ITS
Pembimbing : Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

ABSTRAK

Proses koagulasi menggunakan koagulan aluminium sulfat (Al_2SO_4) dalam pengolahan air minum oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) menghasilkan lumpur alum dalam jumlah yang besar. Lumpur alum PDAM mengandung konsentrasi aluminium dan kandungan organik yang cukup tinggi sehingga bersifat toksik terhadap lingkungan. Tujuan penelitian ini adalah menentukan karakteristik fisik dan kimiawi lumpur alum hasil pengolahan air minum PDAM, menentukan pengaruh penurunan kontaminan organik pada *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM, dan menentukan nilai pH optimum dalam elektrolisis untuk *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM dengan elektroda jenis platina (Pt).

Sampel lumpur alum diambil dari unit *clearator* IPAM X PDAM Surabaya. Karakteristik lumpur alum yang diuji adalah karakteristik fisik dan kimiawi seperti pH, *Total Dissolved Solids (TDS)*, kadar air, *Total Volatile Solids (TVS)*, *Total Fixed Solids (TFS)*, *Total Solids (TS)*, *Total Suspended Solids (TSS)*, Kadar Al, Fe, Pb, Cu, Cr, Zn, *Chemical Oxygen Demand (COD)*, *Biochemical Oxygen Demand (BOD₅)*, *Sludge Volume Index (SVI)*, alkalinitas, dan konduktivitas. Sampel lumpur alum dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam. Kemudian sampel dihaluskan dan diasidifikasi menggunakan H_2SO_4 hingga pH 2. Filtrat hasil asidifikasi disentrifugasi selama 20 menit dengan kecepatan 4000 rpm. Supernatan hasil sentrifugasi digunakan sebagai elektrolit untuk elektrolisis. Penurunan kontaminan organik dilakukan melalui *pre-treatment* dengan oksidasi menggunakan H_2O_2 dan pemaparan sinar UV. Larutan elektrolit yang digunakan adalah filtrat tanpa oksidasi, filtrat hasil oksidasi dengan penambahan H_2O_2 dengan perbandingan $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}] = \frac{1}{2}$, serta filtrat hasil

oksidasi dengan penambahan H_2O_2 yang sama dan paparan sinar UV 254 nm. Pengadukan pada proses oksidasi untuk penyisihan kandungan organik menggunakan *magnetic stirrer* 700 rpm selama 4 jam. Nilai pH awal proses elektrolisis yang ditetapkan adalah 3 dan 4. Kuat arus yang digunakan adalah 700 mA untuk larutan tanpa oksidasi dan 200 mA untuk larutan yang telah dioksidasi berdasarkan hasil uji polarisasi. Elektrolisis dilakukan pada reaktor *batch recirculation* satu kompartemen berkapasitas 0,2 L selama 8 jam. Jenis elektroda yang digunakan adalah platina (panjang 8 cm; lebar 3 cm) sebagai katoda dan anoda. Kapasitas *feed tank* yang digunakan adalah 0,8 L untuk filtrat/larutan tanpa oksidasi dan 1 L untuk filtrat teroksidasi. Pengukuran pH, TDS, konduktivitas, tegangan listrik, dan COD dilakukan setiap jam selama elektrolisis. Alumina yang terdeposisi di katoda ditimbang dan dianalisis kadar logamnya menggunakan *Inductively Coupled Plasma (ICP)*.

Hasil karakterisasi utama lumpur alum PDAM adalah pH $6,7 \pm 0,25$; TDS 222 mg/L; kadar Al 6736,3 mg/L; kadar Fe 1077,09 mg/L; COD $2166,67 \pm 115,47$ mg/L; dan konduktivitas $825 \pm 10,15$ μ S/cm. Persentase *recovery* Al yang didapat untuk elektrolisis pH 4 dengan filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H_2O_2 , dan filtrat dengan oksidasi $H_2O_2 + UV$ 254 nm masing-masing adalah 6,59%; 3,51%; dan 1,30%. Sedangkan elektrolisis pH 3 filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H_2O_2 , dan filtrat dengan oksidasi $H_2O_2 + UV$ menghasilkan *recovery* Al sebesar 9,63%; 4,94%; dan 3,93%. Persentase *recovery* alumina tertinggi adalah pada proses elektrolisis pH 3 pada kuat arus 700 mA dengan filtrat tanpa oksidasi.

Kata kunci : Alumina, Elektrolisis, Hidrogen Peroksida, Kontaminan Organik, Lumpur Alum, PDAM Surabaya

APPLICATION OF ELECTROLYSIS USING PLATINUM AS ELECTRODES FOR RECOVERY ALUMINA FROM PDAM SLUDGE

Student Name : Atika Rizqi Syavira
ID Number : 03211540000101
Department : Environmental Engineering ITS
Supervisor : Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc

ABSTRACT

Coagulation process using Al_2SO_4 as coagulant in water treatment process at Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) generates high volume of alum sludge. The alum sludge contains high concentration of aluminium and organic matters, which might cause toxic effect to the environment. The aims of this study are to determine the physical and chemical characteristics of alum sludge, to determine the effect of organic matters reduction, and to determine optimum pH for alumina recovery from the alum sludge using platinum as electrodes.

The alum sludge samples were collected from clearator unit at IPAM X PDAM Surabaya. The alum sludge characterization were measured according to physical and chemical characteristics such as pH, Total Dissolved Solids (TDS), moisture content, Total Volatile Solids (TVS), Total Fixed Solids (TFS), Total Solids (TS), Total Suspended Solids (TSS), concentration of Al, Fe, Pb, Cu, Cr, Zn, Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD_5), Sludge Volume Index (SVI), alkalinity, and conductivity. The fresh alum sludge samples were dewatered at 105°C for 24 hours. Then, the sludge samples were mashed up and acidified with H_2SO_4 to pH 2. Then, filtrate from acidification process was centrifuged at 4000 rpm for 20 minutes. Supernatant from centrifugation were used as electrolyte in electrolysis. Pretreatment for organic matters reduction was done by oxidation with H_2O_2 addition and UV radiation. Variation of electrolyte solution are non-oxidized filtrate, oxidized filtrate with H_2O_2 addition with ratio of $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}] = \frac{1}{2}$, also oxidized filtrate with the same H_2O_2 concentration and radiation of UV with 254 nm wavelength for 4 hours. Mixing in oxidation process was done by using using

magnetic stirrer in 700 rpm for 4 hours. Initial pH of electrolysis were 3 and 4. Electrical current used for electrolysis were 700 mA for non-oxidized filtrate and 200 mA for oxidized filtrate based on polarization test results.

Electrolysis was conducted with one compartment in a batch recirculation reactor with 0,2 L capacity for 8 hours. Platinum was used as cathode and anode with dimentions of length 8 cm and width 3 cm. The feed tank capacity for electrolyte were 0,8 L for non-oxidized filtrate and 1 L for oxidized filtrate. The pH, TDS, conductivity, voltage, and COD were measured every hours. Deposited alumina at cathode were weighed and analysed by Inductively Coupled Plasma (ICP). The main characteristics of PDAM alum sludge were pH 6.7 ± 0.25 ; TDS 222 mg/L; Al concentration 6736,3 mg/L; Fe concentration 1077,09 mg/L; COD 2166.67 ± 115.47 mg/L; and conductivity 825 ± 10.15 μ S/cm. Percentage of Al recovery from electrolysis in pH 4 with non-oxidized filtrate, oxidized filtrate with H₂O₂, and oxidized filtrate with H₂O₂ and UV 254 nm with pH 4 respectively were 6.59%; 3.51%; and 1.30%. Electrolysis in pH 3 with non-oxidized filtrate and oxidized filtrate with H₂O₂ percentage of Al recovery respectively were 9.63%; 4.94%; and 3.93%. The highest Al recovery percentage was observed in electrolysis at pH 3 and electric current of 700 mA with non-oxidized electrolyte filtrate.

Keywords : Alum Sludge, Alumina, Electrolysis, Hydrogen Peroxide, Organic Contaminant, PDAM Surabaya

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas rahmat dan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan ilmu, perlindungan, serta hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Aplikasi Elektrolisis dengan Elektroda Platina untuk *Recovery* Alumina dari Lumpur PDAM”. Atas arahan dan bimbingan yang telah diberikan hingga sampai pada tahap ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir. Terima kasih atas arahan, bimbingan, ilmu, doa, perhatian, serta motivasinya selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
2. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., Ph.D., Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, MT., dan Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM. selaku dosen pengarah tugas akhir. Terima kasih atas arahan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Welly Herumurti, ST., M.Sc. selaku dosen koordinator tugas akhir. Terima kasih atas arahannya selama periode pengerjaan tugas akhir.
4. Bapak Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM. selaku dosen wali. Terima kasih atas bimbingan, saran, arahan, dan perhatiannya selama penulis menjalankan studi di Departemen Teknik Lingkungan.
5. Rizkiy Amaliyah Barakwan. Terima kasih atas ilmu, motivasi, dan kerjasamanya selama proses pengerjaan tugas akhir.
6. Bapak Hadi Sutrisno, Bapak Ashari, dan Ibu Merry selaku laboran yang senantiasa membantu ketika bekerja di laboratorium.
7. Kementerian Ristekdikti atas bantuan pendanaan penelitian dalam Beasiswa Program Pendidikan Magister Menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU).
8. PDAM Surya Sembada atas bantuannya selama proses *sampling* lumpur PDAM.
9. Mama, Papa, Adik, serta keluarga besar penulis. Terima kasih atas segala dukungan, doa, dan semangat yang senantiasa menyertai penulis.

10. Teman-teman Teknik Lingkungan angkatan 2015 khususnya Pingky, Alda, Cindy, Bagas, Dian, Rudi, Lifa, Arum, Rofiqoh, Marisa, Dewi, Ino, dan Emil yang telah memberikan semangat, saran, dan bantuan selama pelaksanaan penelitian.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan oleh penulis agar penulisan dapat lebih baik lagi. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan	4
1.4. Ruang Lingkup.....	4
1.5. Manfaat	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Lumpur Alum.....	7
2.1.1. Karakteristik Lumpur Alum dalam Pengolahan Air Minum	7
2.1.2. Karakteristik Aluminium dan Alumina	9
2.2. Teknologi Pengolahan Lumpur Alum.....	11
2.3. Proses Oksidasi	14
2.4. Proses Asidifikasi.....	15
2.5. Proses Elektrolisis.....	15
2.5.1. Mekanisme Elektrolisis	15
2.5.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Elektrolisis	25
2.5.3. Penurunan Kontaminan Organik pada <i>Recovery</i> Alumina dengan Metode Elektrolisis.....	28

2.6.	Perhitungan Efisiensi Proses	29
BAB 3 METODE PENELITIAN		31
3.1.	Deskripsi Umum	31
3.2.	Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.3.	Kerangka Penelitian	31
3.4.	Penentuan Variabel Penelitian	35
3.4.1.	Penurunan Kontaminan Organik.....	35
3.4.2.	Keasaman Larutan (pH).....	35
3.5.	Persiapan Alat dan Bahan	36
3.6.	Pengambilan Sampel Lumpur PDAM	38
3.7.	Karakterisasi Lumpur PDAM.....	39
3.8.	Tahapan Proses Elektrolisis.....	40
3.9.	Analisis Data	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		52
4.1.	Karakterisasi Lumpur Alum PDAM.....	53
4.1.1.	Karakteristik Fisik Lumpur Alum.....	54
4.1.2.	Karakteristik Kimiawi Lumpur Alum.....	55
4.1.3.	Kandungan Organik pada Lumpur Alum.....	56
4.1.4.	Kandungan Logam pada Lumpur Alum	56
4.2.	Persiapan Penelitian	56
4.2.1.	Pengeringan Lumpur Alum	57
4.2.2.	Asidifikasi dan Sentrifugasi Lumpur Alum Kering ...	57
4.2.3.	<i>Pre-Treatment</i> untuk Penurunan Kontaminan Organik	58
4.2.4.	Uji Polarisasi Elektroda Platina	62
4.3.	Penelitian Utama	65
4.3.1.	Hasil Proses Elektrolisis.....	66
4.3.2.	Filtrat Lumpur Alum dengan pH 4	66

4.3.3. Filtrat Lumpur Alum dengan pH 3	74
4.4. Persentase Komposisi Logam	81
4.5. Perhitungan Kesetimbangan Massa	85
4.6. Konsumsi Energi Spesifik Proses Elektrolisis	89
4.7. Aplikasi Elektrolisis untuk <i>Recovery</i> Alumina	92
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	95
5.1. Kesimpulan	95
5.2. Saran	95
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM	111
LAMPIRAN B HASIL ANALISIS DAN PERHITUNGAN	121
LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN	153
BIOGRAFI PENULIS	157

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Fisik dan Kimiawi Lumpur Alum Kering...	8
Tabel 2. 2 Karakteristik Lumpur Alum IPA Badak Singa PDAM Tirtawening	8
Tabel 2. 3 Karakteristik Lumpur Alum IPA X Kota Surabaya	8
Tabel 2. 4 Teknologi Pengolahan Lumpur Alum	11
Tabel 2. 5 Keunggulan dan Kelemahan Jenis Elektroda	17
Tabel 3. 1 Variabel Penelitian	36
Tabel 3. 2 Alat dan Bahan dalam Penelitian	36
Tabel 3. 3 Parameter dan Metode Pengujian Karakteristik Lumpur PDAM	39
Tabel 3. 4 Parameter yang Diuji pada Proses Elektrolisis	48
Tabel 4. 1 Hasil Karakterisasi Lumpur Alum PDAM.....	53
Tabel 4. 2 Hasil Penurunan COD dengan Proses Oksidasi.....	59
Tabel 4. 3 Konsentrasi Al Sebelum dan Sesudah Oksidasi.....	61
Tabel 4. 4 Berat Endapan di Elektroda pada Akhir Elektrolisis dengan pH 4	71
Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran [COD] Selama Proses Elektrolisis pH 4.....	73
Tabel 4. 6 Berat Endapan di Elektroda pada Akhir Elektrolisis dengan pH 3	79
Tabel 4. 7 Hasil Pengukuran [COD] Selama Proses Elektrolisis pH 3.....	81
Tabel 4. 8 Konsumsi Energi Spesifik Proses Reduksi Elektrolisis	89
Tabel 4. 9 Konsumsi Energi Spesifik Proses Oksidasi Elektrolisis	91

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Hubungan pH dan Kelarutan Aluminium.....	10
Gambar 2. 2 Reaktor Oksidasi dengan Pemaparan Sinar UV	14
Gambar 2. 3 Rangkaian Reaktor Elektrolisis	16
Gambar 3. 1 Diagram Kerangka Pelaksanaan Penelitian.....	34
Gambar 3. 2 Diagram Alir Tahapan Proses Elektrolisis.....	41
Gambar 3. 3 Reaktor Oksidasi	44
Gambar 3. 4 Kurva Polarisasi	46
Gambar 3. 5 Skema Reaktor Elektrolisis	48
Gambar 3. 6 Konfigurasi Sel Elektrolisis	49
Gambar 3. 7 Reaktor Elektrolisis.....	50
Gambar 4. 1 Kadar Logam dalam Filtrat Lumpur Alum	58
Gambar 4. 2 Perbedaan Warna Larutan Sebelum dan Sesudah Oksidasi.....	60
Gambar 4. 3 Ion Al dan Alumina dalam Reaksi Al dengan H ₂ O ₂	61
Gambar 4. 4 Diagram Pourbaix Aluminium.....	62
Gambar 4. 5 Hasil Uji Polarisasi pada Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3	63
Gambar 4. 6 Hasil Uji Polarisasi pada Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3,5.....	64
Gambar 4. 7 Hasil Uji Polarisasi pada Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4	64
Gambar 4. 8 Hasil Uji Polarisasi pada Filtrat dengan Oksidasi pH 4.....	65
Gambar 4. 9 Fluktuasi pH pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4	67
Gambar 4. 10 Fluktuasi Tegangan Listrik pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4	68
Gambar 4. 11 Fluktuasi TDS pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4	69
Gambar 4. 12 Fluktuasi Konduktivitas (DHL) pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4.....	70
Gambar 4. 13 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4	72
Gambar 4. 14 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4	72
Gambar 4. 15 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ pH 4	72

Gambar 4. 16 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ pH 4	72
Gambar 4. 17 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV pH 4	73
Gambar 4. 18 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV pH 4	73
Gambar 4. 19 Fluktuasi pH pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3	75
Gambar 4. 20 Fluktuasi Tegangan Listrik pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3	76
Gambar 4. 21 Fluktuasi TDS pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3	77
Gambar 4. 22 Fluktuasi Konduktivitas (DHL) pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3	78
Gambar 4. 23 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3	79
Gambar 4. 24 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3	79
Gambar 4. 25 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ pH 3	79
Gambar 4. 26 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ pH 3	79
Gambar 4. 27 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV pH 3	80
Gambar 4. 28 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV pH 3	80
Gambar 4. 29 Persentase Cu pada Endapan di Katoda	80
Gambar 4. 30 Kandungan Logam pada Endapan di Katoda Elektrolisis pH 4	82
Gambar 4. 31 Kandungan Logam pada Endapan di Katoda Elektrolisis pH 3	83
Gambar 4. 32 Kestimbangan Massa Al pada Elektrolisis pH 4	85
Gambar 4. 33 Kestimbangan Massa Al pada Elektrolisis pH 3	86
Gambar 4. 34 Diagram Alir Spesifikasi Al	88
Gambar 4. 35 Skema Mekanisme Pengukuran Potensial Standar	92

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. 1 Analisis Kadar Air.....	111
Lampiran A. 2 Analisis <i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i> dengan Metode <i>Close Reflux</i> dan <i>Titimetric</i>	111
Lampiran A. 3 Analisis <i>Total Solids (TS)</i>	113
Lampiran A. 4 Analisis <i>Total Volatile Solids (TVS)</i> dan <i>Total Fixed Solids (TFS)</i>	113
Lampiran A. 5 Analisis <i>Total Suspended Solids (TSS)</i>	114
Lampiran A. 6 Analisis <i>Sludge Volume Index (SVI)</i>	115
Lampiran A. 7 Analisis Konduktivitas (DHL).....	115
Lampiran A. 8 Analisis TDS.....	115
Lampiran A. 9 Analisis pH	116
Lampiran A. 10 Analisis <i>Biochemical Oxygen Demand (BOD)</i> . ..	116
Lampiran A. 11 Analisis Kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn	119
Lampiran A. 12 Analisis Alkalinitas	119
Lampiran A. 13 Asidifikasi	119
Lampiran B. 1 Karakterisasi Lumpur Alum.....	121
Lampiran B. 2 Perhitungan Penambahan H_2O_2 untuk <i>Pre-Treatment</i> Penurunan Kontaminan Organik....	124
Lampiran B. 3 Hasil Uji Polarisasi	125
Lampiran B. 4 Hasil Analisis pH	129
Lampiran B. 5 Hasil Analisis TDS	132
Lampiran B. 6 Hasil Analisis Konduktivitas (DHL)	135
Lampiran B. 7 Hasil Analisis COD.....	138
Lampiran B. 8 Perhitungan Berat Endapan di Katoda	141
Lampiran B. 9 Hasil Analisis Kadar Logam	142
Lampiran B. 10 Perhitungan <i>Mass Balance</i> Al.....	145
Gambar LC. 1 Kondisi Eksisting Pengelolaan Lumpur Alum PDAM	153
Gambar LC. 2 Persiapan Lumpur Kering	153
Gambar LC. 3 Karakterisasi Lumpur Alum.....	154
Gambar LC. 4 Proses Asidifikasi dan Sentrifugasi	154
Gambar LC. 5 Proses Oksidasi dengan H_2O_2 dan Sinar UV 254 nm.....	154
Gambar LC. 6 Reaktor Elektrolisis	155
Gambar LC. 7 Hasil Proses Elektrolisis	155

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Proses koagulasi dalam pengolahan air minum oleh PDAM menghasilkan lumpur alum. Tujuan utama proses koagulasi adalah untuk mendestabilisasi partikel agar dapat menyatu dengan partikel lain dan membentuk agregat yang lebih besar. Partikel dalam air akan lebih mudah mengendap dan lebih mudah disisihkan pada saat proses filtrasi apabila telah melalui proses koagulasi (Notodarmojo dan Devina, 2004). Untuk membentuk agregat yang lebih besar tersebut diperlukan suatu zat dengan muatan positif seperti aluminium (misalnya $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) yang sering digunakan sebagai koagulan karena memiliki muatan positif yang besar (Arnoldsson, 2008). Menurut penelitian Mbaeze *et al.* (2017), koagulasi juga berperan penting dalam menghilangkan bakteri patogen. Banyak penelitian juga mengaplikasikan koagulasi untuk menghilangkan turbiditas dan bahan organik lain atau *natural organic matters (NOM)*.

Menurut penelitian Lukasiwicz (2016), jumlah lumpur yang dihasilkan pada proses koagulasi dapat mencapai 750.000 ton/tahun untuk pengolahan air minum sebanyak 15.000.000 m³. Kuantitas, komposisi, dan sifat lumpur tergantung dari kualitas dan kuantitas air yang diolah, bagaimana tipe dan dosis koagulan yang digunakan, dan proses yang dilakukan dengan pengadukan (Lukasiwicz, 2016). Menurut penelitian Ayu (2018), lumpur alum PDAM mengandung berbagai jenis logam seperti Al (126,1 g/L), Fe (55,4 g/L), Cu (23 mg/L), dan Cr (59 mg/L). Kandungan aluminium serta logam-logam lainnya dalam lumpur alum ini menyebabkan lumpur PDAM harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan. Aluminium dalam tawas dapat membentuk sebagai ion logam berat yang dapat bersifat toksik pada konsentrasi tertentu. Apabila aluminium masuk ke dalam tubuh manusia melalui rantai makanannya dan terakumulasi, maka ion logam tersebut dapat terserap ke dalam darah dan kemudian akan terikat pada eritrosit dan plasma. Jika ion aluminium tersebut terdistribusi ke seluruh jaringan dalam konsentrasi yang tinggi maka akan menimbulkan efek racun (Cheung *et al.*, 2001).

Dalam penelitian Primadipta dan Titah (2017) juga dijelaskan bahwa lumpur alum hasil pengolahan air minum di PDAM Surabaya saat ini jumlahnya mencapai 626 m³ tiap tahunnya dan belum dilakukan pengolahan khusus sebelum membuangnya ke badan air. Lumpur alum dari IPAM X tersebut memiliki konsentrasi aluminium 250 mg/L, pH 8,61, dengan suhu 31°C, massa jenis 1240 kg/m³, serta kadar air 98%. Sementara menurut Sari *et al.* (2017), lumpur alum PDAM memiliki kandungan Al yang cukup tinggi yakni sebesar 11,71%, sehingga memungkinkan untuk dilakukannya proses pengambilan kembali (*recovery*) alumina. Hasil *recovery* alumina lumpur alum PDAM dapat dimanfaatkan kembali sebagai koagulan. Salah satu teknologi *recovery* alumina yang efektif adalah dengan menggunakan metode elektrokimia yakni elektrolisis. Metode elektrolisis dipilih karena prosesnya cepat, sederhana, dan efisiensi pengolahannya tinggi sehingga dapat diperoleh alumina dengan kuantitas maksimal dan tingkat kemurnian yang tinggi (Prastika *et al.*, 2009).

Lumpur alum juga mengandung banyak kontaminan organik. Kontaminan organik dalam air limbah dapat dinyatakan dalam COD dan BOD (Yuningrat *et al.*, 2012). Konsentrasi COD lumpur alum PDAM yakni sebesar 9666,6 mg/L (Ayu, 2018). Kandungan kontaminan organik pada lumpur alum PDAM sebaiknya dihilangkan karena dapat menghambat proses *recovery* alumina. Selain itu, kandungan kontaminan organik yang tinggi pada koagulan juga dapat menurunkan efisiensi proses saat direaksikan dengan air baku (Moerdiyanti *et al.*, 2014). Apabila kontaminan organik juga terkandung dalam larutan elektrolit maka konduktivitas dan mobilitas ion-ion akan menurun, sehingga dapat menurunkan efektivitas *recovery* alumina pada saat elektrolisis (Huitle *et al.*, 2018). Dalam penelitian ini dilakukan proses *recovery* alumina dengan metode elektrolisis dengan menggabungkan metode oksidasi (penambahan H₂O₂ dan pemaparan sinar UV) serta metode asidifikasi (penambahan H₂SO₄).

Penambahan hidrogen peroksida (H₂O₂) bertujuan untuk menyisahkan kontaminan organik pada lumpur alum (Moerdiyanti *et al.*, 2014). H₂O₂ merupakan suatu oksidator yang berfungsi untuk menguraikan senyawa-senyawa organik. Terurainya senyawa-senyawa organik ini berpengaruh terhadap penurunan

konsentrasi COD, TSS, dan TDS (Chuango *et al.*, 2013). Berdasarkan penelitian Collivignarelli, *et al.* (2017), penambahan H_2O_2 dengan konsentrasi $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}] = 1/2$ serta pemaparan sinar UV 254 nm selama 4 jam dapat menurunkan kadar COD hingga >70%. H_2O_2 merupakan senyawa oksidator kuat yang termasuk ramah lingkungan. Wulandari dan Soedjono (2017) juga menyatakan bahwa dengan sifat H_2O_2 yang dapat terurai menjadi air dalam reaksinya, sehingga penambahan H_2O_2 tidak menghasilkan limbah yang berbahaya bagi lingkungan. H_2O_2 juga dapat digunakan untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dengan reaktivitas yang tinggi. Selain itu, pada kondisi asam H_2O_2 sangat stabil dan pada kondisi basa mudah terurai (Coniwanti *et al.*, 2015).

Untuk proses *recovery* dengan metode asidifikasi diperlukan penambahan H_2SO_4 (Panswad dan Chanman, 1992). Melalui proses asidifikasi menggunakan asam kuat diharapkan aluminium dapat diperoleh kembali dalam bentuk Al^{3+} . Proses selanjutnya adalah elektrolisis untuk memperoleh hasil *recovery* berupa alumina. Dalam proses elektrolisis terjadi pembentukan hidrogen pada anoda. Hal ini menyebabkan senyawa asam dapat berpindah ke anoda, sehingga terjadi pembentukan ion H^+ akibat pelepasan O_2 . Akibatnya pH dalam area anoda akan relatif lebih rendah selama proses elektrolisis. Sementara pada area katoda akan terjadi proses reduksi dengan pembentukan OH^- akibat pelepasan senyawa H_2 sehingga pH pada katoda akan relatif lebih tinggi (Cherifi *et al.*, 2016). Berdasarkan penelitian Keeley *et al.* (2014), pH untuk *recovery* lumpur alum yang sesuai berkisar antara 2 hingga 4. Penelitian lain juga menyatakan bahwa pengkondisian pH yang sesuai untuk *recovery* lumpur alum adalah 3 dan 3,5 (Prakash dan Sengupta, 2003).

Katoda dan anoda yang digunakan berupa logam platina (Pt). Elektroda Pt dipilih karena sifatnya yang tidak bereaksi dengan larutan elektrolit serta dapat meningkatkan transfer massa, sehingga dapat mempercepat proses deposisi logam pada katoda (Ciblak *et al.*, 2012). Penggunaan jenis elektroda platina dapat menyisihkan 30% kontaminan organik melalui proses elektrolisis (Chen, 2004) dan aluminium yang menempel di katoda mencapai 99,8% setelah elektrolisis pada suhu ruang dengan tegangan 0,5-1,5 V (Ali *et al.*, 1999).

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terkait karakteristik lumpur alum baik secara fisik maupun kimiawi, nilai pH optimum pada proses elektrolisis dengan menggunakan elektroda jenis platina (Pt), serta pengaruh penurunan kontaminan organik pada *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM. Hasil penelitian tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam pengolahan lumpur alum yang merupakan hasil samping dari produksi air minum di PDAM, khususnya dalam pengembangan teknologi *recovery* alumina yang dapat dimanfaatkan kembali menjadi koagulan.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang menjadi dasar dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik fisik dan kimiawi lumpur alum hasil pengolahan air minum PDAM Surabaya?
2. Bagaimana pengaruh penurunan kontaminan organik pada *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM?
3. Berapa nilai pH optimum dalam elektrolisis untuk *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM dengan elektroda jenis platina (Pt)?

1.3. Tujuan

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan karakteristik fisik dan kimiawi lumpur alum hasil pengolahan air minum PDAM.
2. Menentukan pengaruh penurunan kontaminan organik pada *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM.
3. Menentukan nilai pH optimum dalam elektrolisis untuk *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM dengan elektroda jenis platina (Pt).

1.4. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Limbah berupa lumpur alum yang digunakan sebagai sampel adalah limbah lumpur dari IPAM X PDAM Surabaya.
2. Waktu *sampling* adalah pada bulan Januari 2019.
3. Karakteristik fisik dan kimiawi lumpur alum PDAM yang akan diuji adalah pH, TDS, kadar air, kadar *volatile Solids*, alkalinitas,

konduktivitas, COD, BOD₅, *sludge volume index*, dan kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn.

4. Pembuatan reaktor elektrolisis dilakukan dalam skala laboratorium.
5. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengelolaan Limbah Padat dan Limbah B3 serta Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Departemen Teknik Lingkungan ITS.

1.5. Manfaat

Manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi ilmiah tentang alternatif teknologi untuk mengolah limbah lumpur alum hasil pengolahan air minum.
2. Memberikan teknologi *recovery* sumber daya logam alumina (Al₂O₃) yang tidak dapat diperbarui.

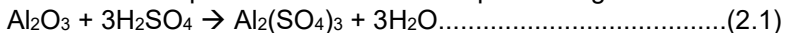
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lumpur Alum

2.1.1. Karakteristik Lumpur Alum dalam Pengolahan Air Minum

Proses pengolahan air baku menjadi air minum yang digunakan oleh PDAM menghasilkan endapan atau lumpur yang berasal dari proses pengendapan flok-flok pada air (koagulasi dan flokulasi). Endapan tersebut terjadi akibat adanya penambahan tawas $[Al_2(SO_4)_3]$. Menurut Nurcahyo *et al.* (2014), aluminium sulfat dapat dihasilkan dari reaksi antara asam sulfat (H_2SO_4) dengan aluminium atau mineralnya (alumina). Reaksi antara asam sulfat dan alumina dapat dituliskan secara empiris sebagai berikut:



Fitri (2013) juga menyatakan bahwa PDAM dalam proses produksi air bersihnya menghasilkan limbah berupa lumpur. Kandungan dalam lumpur tersebut terdeteksi mengandung aluminium akibat dari penggunaan aluminium sulfat/tawas pada proses pengolahan air bersih. Menurut (Lewis, 1990) lumpur yang mengandung logam aluminium (dari pemakaian senyawa aluminium sulfat) tergolong sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3).

Cheung *et al.* (2001) menjelaskan bahwa aluminium dalam tawas adalah ion logam berat yang toksik. Guyton dan Hall (1996) juga menyatakan bahwa toksisitas logam berat dapat menyebabkan dampak negatif pada manusia, seperti kerusakan jaringan detoksifikasi dan ekskresi yakni hati dan ginjal. Berdasarkan penelitian Joshi dan Shrivastava (2011), lumpur alum mengandung 40 sampai 50% alum yang tidak terpakai. Lumpur Alum PDAM memiliki kandungan alumina (Al_2O_3) yang cukup tinggi yakni sebesar 11,71%, sehingga memungkinkan untuk dilakukannya proses pengambilan kembali (*recovery*) alumina (Sari *et al.*, 2017). Karakteristik lumpur alum kering berdasarkan penelitian Abhilash dan Ahammed (2015) dapat dilihat dalam Tabel 2. 1. Sementara untuk karakteristik lumpur alum IPA Badak Singa PDAM Tirtawening Kota Bandung berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Az-Zahra *et al.* (2014) dan karakteristik lumpur

alum IPA X Kota Surabaya berdasarkan penelitian Ayu (2018) dapat dilihat pada Tabel 2. 2 dan Tabel 2. 3.

Tabel 2. 1 Karakteristik Fisik dan Kimiawi Lumpur Alum Kering

Parameter	Nilai	Satuan
Ph	6,40	-
Kadar Solids	5,40	%
TVSS/TSS	0,24	-
Aluminium (Al)	112,47	mg/g lumpur kering
Ferro (Fe)	48,33	mg/g lumpur kering
Magnesium (Mg)	20,51	mg/g lumpur kering
Cadmium (Ca)	10,89	mg/g lumpur kering
Silicon (Si)	3,82	mg/g lumpur kering

Sumber: Abhilash dan Ahammed (2015)

Tabel 2. 2 Karakteristik Lumpur Alum IPA Badak Singa PDAM Tirtawening

Sampel	TS (%)	FS (%)	VS (%)	Aluminium (Al) (mg/L)
Lumpur Accelerator	2,53	73,03	27,83	4,79
Lumpur Sedimentasi	6,92	74,33	29,58	8,30
Lumpur Manhole	1,81	72,09	28,78	2,74

Sumber: Az-Zahra et al. (2014)

Tabel 2. 3 Karakteristik Lumpur Alum IPA X Kota Surabaya

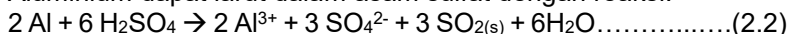
Parameter	Nilai	Satuan
Kadar air	99,08 ± 0,0056	%
Sludge volume index (SVI)	114,18 ± 1,97	mL/g
Volatile Solids (VS)	1.733 ± 4,05	mg/L
Total dissolved Solids (TDS)	352,7 ± 1,54	mg/L
pH	7,46 ± 0,0047	-
Alkalinitas	70,8 ± 7,21	mg.L/HCO ₃
COD	9.666,6 ± 11,54	mg/L
BOD ₅	1.443,5 ± 17,33	mg/L
Aluminium (Al)	1,148519	mg/L
Ferro (Fe)	0,504583	mg/L
Copper (Cu)	0,000537	mg/L
Chromium (Cr)	0,000209	mg/L
Plumbum (Pb)	Tidak terdefinisi	mg/L

Sumber: Ayu (2018)

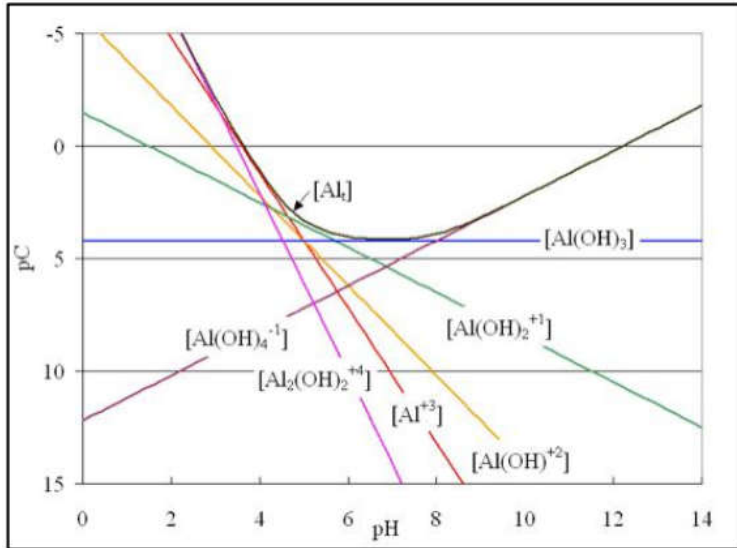
2.1.2. Karakteristik Aluminium dan Alumina

Aluminium dapat dijumpai dalam berbagai bentuk yang berbeda dalam air, seperti senyawa hidroksil monomerik dan polimerik, larutan polimer koloid dan gel, serta endapan, semua berdasarkan ion positif atau hidroksilasi aluminat. Aluminium juga dapat membentuk senyawa kompleks dengan berbagai senyawa organik (misalnya asam humat atau asam fulvat) dan ligan anorganik (misalnya fluorida, klorida dan sulfat), sebagian besar senyawa kompleks ini dapat larut. Sifat kimia aluminium dalam air adalah kompleks. Beberapa parameter kimia, termasuk pH, dapat digunakan untuk menentukan jenis aluminium yang ada dalam larutan (World Health Organization, 2010). Roesky dan Kumar (2005) menjelaskan bahwa sebagian besar senyawa aluminium yang ada memiliki bilangan oksidasi +3 untuk atom aluminium, sehingga ion aluminium dapat dinyatakan memiliki tingkat stabilitas yang tinggi.

Berdasarkan penelitian Vogel (1990), aluminium merupakan logam berwarna putih dalam bentuk padat dan berwarna abu-abu dalam bentuk bubuk, serta memiliki titik lebur pada 659°C. Aluminium dapat larut dalam asam sulfat dengan reaksi:



Aluminium juga memiliki polaritas tinggi dan lebih mudah larut dalam pelarut polar, seperti H₂O dan NaOH. Kation dan anion dalam larutan aluminium dapat membentuk garam yang tidak larut seperti Al(OH)₃ (Lukasiewicz, 2016). Pengaruh pH terhadap kelarutan Al(OH)₃ dapat dilihat pada Gambar 2. 1. Aluminium adalah logam yang dapat terhidrolisis dan relatif tidak larut dalam kisaran pH netral antara 6,0 sampai dengan 8,0. Berdasarkan Gambar 2. 1 menunjukkan bahwa jumlah semua jenis senyawa aluminium dalam larutan sama dengan presipitat dari Al(OH)₃. Dalam pH yang rendah, aluminium yang terlarut hadir dalam bentuk larutan (Al³⁺). Al³⁺ merupakan senyawa yang dominan dalam pH 2. Proses hidrolisis terjadi saat pH meningkat dan menghasilkan hidroksida kompleks yang tidak mudah larut seperti Al(OH)²⁺ (Lukasiewicz, 2016).



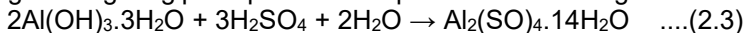
Gambar 2. 1 Hubungan pH dan Kelarutan Aluminium
Sumber: Lukasiewicz (2016)

Alumina adalah salah satu adsorben yang paling banyak digunakan untuk menghilangkan polutan terlarut pada air. Kandungan zat kimia, terutama ion dapat teradsorpsi pada alumina. Selain itu alumina adalah salah satu zat yang berguna untuk pembentukan katalis (Miyazaki dan Balint, 2011). Alumina dapat diperoleh dari proses *recovery* lumpur alum PDAM. Keuntungan dari aplikasi proses *recovery* alumina pada lumpur alum PDAM adalah mengurangi jumlah lumpur PDAM dan menaikkan nilai ekonomisnya. Alumina yang dihasilkan berguna sebagai koagulan yang dapat digunakan kembali dalam proses pengolahan air baku (Sari, 2010). Penggunaan alumina dalam pengolahan air minum dapat dijadikan sebagai alternatif jenis koagulan yang lebih murah karena alumina termasuk produk sampingan dari hasil produksi berupa lumpur alum yang dianggap limbah (Stefanescu *et al.*, 2015). Berdasarkan penelitian Moerdiyanti, *et al* (2014), alumina dari hasil *recovery* dapat digunakan sebagai koagulan dan memiliki persen penyisihan kekeruhan sebesar 99,26%.

2.2. Teknologi Pengolahan Lumpur Alum

Ada beberapa teknologi yang dapat digunakan untuk pengolahan lumpur alum, seperti asidifikasi (Cheng *et al.*, 2014), kalsinasi (Sari *et al.*, 2017), bioremediasi (Primadipta dan Titah, 2017), serta elektrokimia dengan metode elektrolisis (Ali *et al.*, 1999). Elektrolisis adalah metode yang efektif untuk *recovery* alumina karena metode ini merupakan metode yang efisien karena prosesnya cepat, sederhana, serta memiliki efisiensi *recovery* logam yang tinggi (Prastika *et al.*, 2009).

Menurut penelitian Boaventura *et al.* (2000), lumpur kering dari pengolahan air minum memiliki kandungan aluminium yang tinggi, *recovery* logam ini akan membawa dampak positif bagi lingkungan. Menurut Cheng *et al.* (2014), metode yang dapat digunakan untuk *recovery* lumpur alum dari pengolahan air adalah dengan pengasaman/asidifikasi dan pertukaran ion. Karena aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) adalah senyawa amfoter, maka senyawa ini dapat dilarutkan dalam larutan asam atau basa. $\text{Al}(\text{OH})_3$ akan bereaksi dengan asam untuk membentuk ion aluminium terlarut, dan membentuk ion $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ yang terlarut dalam alkali. Berdasarkan penelitian Evuti (2011), reaksi kimia yang berlangsung pada proses ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Terdapat beberapa pertimbangan terkait keunggulan dan kelemahan dalam menentukan teknologi/metode penanganan limbah lumpur alum. Berikut ini merupakan Tabel 2. 4 yang menunjukkan perbandingan kelebihan dan kelemahan pada teknologi pengolahan lumpur alum.

Tabel 2. 4 Teknologi Pengolahan Lumpur Alum

Metode Pengolahan Lumpur Alum	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
Asidifikasi	<ul style="list-style-type: none">Dapat mengikat kandungan aluminium yang terdapat dalam lumpur sehingga akan dihasilkan cairan atau filtrat	<ul style="list-style-type: none">Dalam prosesnya perlu dilakukan pengadukan yang merata dalam waktu tertentu (± 30 menit), sehingga memerlukan energi yang cukup tinggi.	Kurniawan (2009), Keenan (1986), Asmawati (2011), dan Cundari <i>et al.</i> (2016)

Metode Pengolahan Lumpur Alum	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
	<p>yang kaya akan aluminium.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Penambahan asam kuat (H_2SO_4) dapat mempercepat reaksi dan laju elektrolisis. • Asam kuat menyebabkan temperatur meningkat sehingga molekul-molekul akan bergerak lebih cepat dan menyebabkan benturan antar partikel lebih sering terjadi. Sehingga energi untuk bereaksi lebih cepat terpenuhi, dan reaksi antara asam sulfat dan lempung lebih cepat terjadi dan memperoleh lebih banyak alumina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan biaya yang relatif tinggi. • Efisiensi dalam <i>recovery</i> aluminium dalam lumpur alum relatif rendah yakni sebesar 29,12%. 	
Kalsinasi	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat memecah ikatan dalam senyawa kompleks, sehingga dapat meluruhkan zat padat. • Efisiensi <i>recovery</i> aluminium dapat mencapai 60,9%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan energi yang tinggi. • Biaya yang dibutuhkan relatif tinggi. • Prosesnya cukup lama. 	Boaventura <i>et al.</i> (2000)
Elektrolisis	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah dalam pengoperasian prosesnya. • Bahan dan alat yang dibutuhkan relatif sedikit (larutan elektrolit, sel 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan reaktor khusus yang harus disesuaikan dengan jenis dan volume larutan yang akan dielektrolisis. 	Abdullah dan Bagastyo (2015), Liani <i>et al.</i> (2014), Ali <i>et al.</i> (1999), Prastika <i>et al.</i>

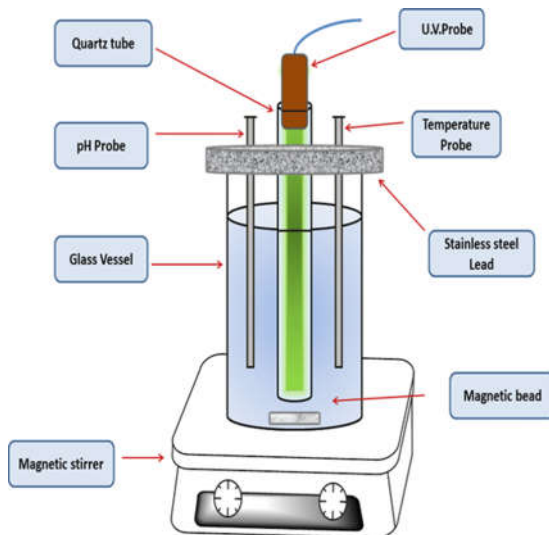
Metode Pengolahan Lumpur Alum	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
	<p>elektrolisis, elektroda, pompa, neraca analitik, DC power supply, selang, dan kontainer).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dapat menurunkan kadar kandungan organik. • Dapat digunakan untuk <i>recovery</i> alumina dalam lumpur alum dengan efisiensi mencapai 99,8%. 		(2009), dan Haris <i>et al.</i> (2005)
Bioremediasi	<ul style="list-style-type: none"> • Ekonomis. • Ramah lingkungan 	<ul style="list-style-type: none"> • Memanfaatkan mikroorganisme dalam prosesnya, sehingga terdapat banyak faktor yang dapat mengganggu proses, seperti suhu, kelembapan, dan pH. • Tingkat efisiensi penyisihan aluminium pada lumpur alum relatif rendah yakni sebesar 8 hingga 10%. 	Primadipta dan Titah (2017)

Berdasarkan Tabel 2. 3 dapat diketahui bahwa teknologi pengolahan lumpur alum yang efektif untuk *recovery* alumina dari pumpur alum adalah melalui proses asidifikasi dan elektrolisis. Dengan penggabungan dua proses tersebut, diharapkan lumpur alum dari PDAM dapat diolah untuk diperoleh kembali (*recovery*) kandungan aluminyanya.

2.3. Proses Oksidasi

Menurut penelitian Chuango *et al.* (2013), proses oksidasi dapat menurunkan kontaminan organik dalam bentuk COD, yaitu dengan penambahan hidrogen peroksida (H_2O_2). Collivignarelli *et al.* (2017) menyatakan bahwa konsentrasi COD dapat berkurang hingga >70% melalui penambahan H_2O_2 dengan perbandingan $[H_2O_2]/[COD] = 1/2$ serta pemaparan sinar UV 254 nm selama 4 jam.

Wulandari dan Soedjono (2017) menyatakan bahwa H_2O_2 merupakan senyawa oksidator kuat yang termasuk ramah lingkungan. H_2O_2 sendiri biasa berbentuk cairan yang yang tidak berwarna dan mudah larut dalam air. Di sisi lain, H_2O_2 hanyalah air dengan molekul oksigen tambahan dan akan terurai menjadi oksigen dan air dalam reaksinya. Dengan sifat hidrogen peroksida yang dapat terurai menjadi air, menyebabkan penambahan H_2O_2 tidak menghasilkan limbah yang berbahaya bagi lingkungan. H_2O_2 juga dapat digunakan untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet OH$) dengan reaktivitas kedua setelah fluorin. Reaktor untuk proses oksidasi dengan pemaparan UV dapat dilihat dalam Gambar 2. 2.



Gambar 2. 2 Reaktor Oksidasi dengan Pemaparan Sinar UV
Sumber: Rudrashetti et al. (2017)

2.4. Proses Asidifikasi

Asidifikasi adalah salah satu teknik *recovery* alumina di dalam lumpur dengan menggunakan asam kuat yang disertai dengan pengadukan dan pengendapan (Moerdiyanti *et al.*, 2014). Menurut penelitian Kurniawan (2009), proses asidifikasi dengan asam kuat bertujuan untuk mengikat kandungan aluminium yang terdapat dalam lumpur sehingga akan dihasilkan cairan atau filtrat yang kaya akan aluminium. Dalam penelitian Panswad dan Chanman (1992) juga dijelaskan bahwa pH lumpur alum akan berkurang dengan adanya penambahan H_2SO_4 , sehingga efisiensi *recovery* alumina dapat mencapai 70 hingga 90%.

2.5. Proses Elektrolisis

2.5.1. Mekanisme Elektrolisis

Menurut penelitian Dogra (1990), elektrolisis adalah suatu proses dimana reaksi kimia terjadi pada elektroda yang tercelup dalam larutan elektrolit. Zat-zat yang dapat di elektrolisis adalah leburan ion dan larutan yang mengandung ion terlarut. Elektrolisis terjadi ketika tegangan listrik dihantarkan pada elektroda. Media tempat berlangsungnya elektrolisis disebut sel elektrolisis. Dalam sel ini elektroda sebagai penghantar arus listrik masuk ke dalam dan keluar dari zat-zat yang bereaksi, perpindahan elektron antara elektroda dan zat-zat dalam sel menghasilkan reaksi terjadi pada permukaan elektroda.

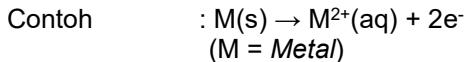
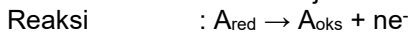
Reaksi oksidasi/reduksi pada katoda dan anoda dapat merubah konduksi ionik menjadi konduksi elektron, sehingga dapat mempercepat perpindahan ion. Secara umum, elektroda yang digunakan dalam elektrolisis adalah *inert* dan berbentuk plat. Gelembung gas akan terbentuk pada antarmuka pelarut dan elektroda. Karena menyangkut reaksi redoks logam, deposisi logam cenderung terjadi pada permukaan katoda (Huang *et al.*, 2007). Elektroda *inert* adalah elektroda yang tidak ikut bereaksi saat elektrolisis. Contoh elektroda inert antara lain, platina (Pt) dan emas (Au). Sedangkan elektroda tidak *inert* atau yang biasa disebut *alloy* adalah elektroda yang ikut bereaksi dalam proses elektrolisis. Contoh elektroda *alloy* adalah *stainless steel* (Syukri, 1999). Elektroda memiliki kriteria cepat dan tidaknya tereduksi yang dapat dilihat pada deret volta berikut:

Li – K – Ba – Sr – Ca – Na – Mg – Al – Mn – Zn – Cr – Fe – Cd – Co – Ni – Sn – Pb – H⁺ – Cu – Hg – Ag – Pt – Au

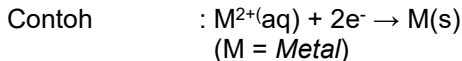
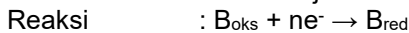
Semakin ke kiri nilai potensi reduksinya semakin rendah yang berarti logam tersebut semakin sulit mengalami reduksi dan cenderung mengalami oksidasi dan begitu juga sebaliknya.

Syukri (1999) juga menjelaskan mengenai katoda dan anoda, yakni:

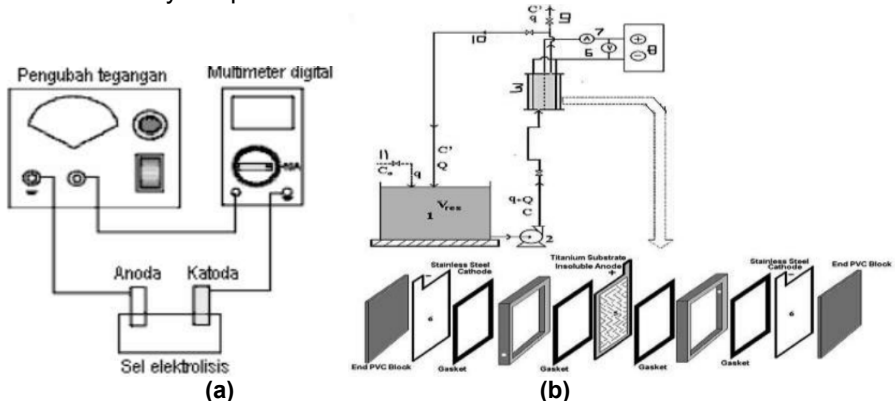
- Anoda → merupakan tempat terjadinya oksidasi. Pelepasan elektron dari larutan ke elektroda berlangsung selama reaksi oksidasi terjadi.



- Katoda → merupakan tempat terjadinya reduksi. Pelepasan elektron dari larutan ke elektroda berlangsung selama reaksi oksidasi terjadi.



Gambar rangkaian proses elektrolisis dan beberapa jenis elektroda yang dapat digunakan dalam proses elektrolisis diantaranya dapat dilihat dalam Gambar 2. 3 dan Tabel 2. 5.



Gambar 2. 3 Rangkaian Reaktor Elektrolisis
(a) Sistem *Batch* (b) Sistem *Batch Recirculation*
Sumber: Basuki et al. (2009) dan Selvakumar et al. (2016)

Tabel 2. 5 Keunggulan dan Kelemahan Jenis Elektroda

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
1	<p><i>Stainless steels alloy:</i> Hastelloy G (HG) Ni (45,3%), Cr (21,87%), Mo (6,35%), Cu (1,79%), Mn (1,35%), Si (0,34%), C (0,02%)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pada uji polarisasi di larutan asam (40% H₃PO₄, 20°C), tahan korosi karena kandungan Ni dan Cr yang tinggi pada material elektroda dapat membentuk Ni dan Cr oksida pada permukaan anoda. • Kromium oksida dan nikel pada elektroda dapat menurunkan laju korosi dan rapat arus saat elektrolisis. • Kandungan Mo juga dapat meningkatkan ketahanan elektroda terhadap korosi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah terkorosi dibandingkan jenis grafit. Hal ini dikarenakan stabilnya permukaan grafit dalam larutan asam. 	<p>Iken <i>et al.</i> (2007)</p>
2	<p>Seng-<i>Stainless</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi <i>recovery</i> logam cukup tinggi yakni sebesar 74 hingga 92%. • Mudah didapat. • Harga relatif murah. • Waktu pengoperasian relatif singkat (30 hingga 60 menit). 	<ul style="list-style-type: none"> • Membutuhkan kuat arus yang tinggi. 	<p>Supratno (2011)</p>

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
3	Karbon (C)	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah didapat. • Harga relatif murah. • Dapat mereduksi logam berat dalam jumlah besar pada katoda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rentan korosi (pada jenis tertentu). 	Supratno (2011)
4	Grafit (katoda/ anoda)	<ul style="list-style-type: none"> • Elektroda inert sehingga dapat mereduksi Co^{2+}. • Pada uji polarisasi di larutan asam (40% H_3PO_4, 20°C), tahan korosi dengan laju korosi sebesar $2,5 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. • Tahan terhadap larutan asam dengan densitas arus yang rendah (kurang dari 10^{-7} A/cm^2) hingga tegangannya 0,5 V/sce 	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat membentuk oksida grafit sebagai tanda terjadinya korosi pada tegangan tinggi dan arus yang tinggi. • Terkorosi di dalam larutan asam (H_2SO_4 (1-18 M) dan HClO_4 (1-12 M)) karena terjadi oksidasi lambat pada permukaan grafit menjadi C-H_2SO_4 atau C-HClO_4, CO, dan CO_2. • Stabilitas grafit menurun seiring dengan meningkatnya suhu proses elektrolisis. 	Iken <i>et al.</i> (2007) dan Wulansari <i>et al.</i> (2013)
5	Seng-Grafit	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi <i>recovery</i> cukup tinggi. • Mudah didapat. • Harga relatif murah. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seng mudah mengalami korosi sehingga bisa menjadi pengotor tambahan untuk proses elektrolisis. 	Wulansari <i>et al.</i> (2013)
6	Aluminium-Grafit	<ul style="list-style-type: none"> • Efisiensi yang ditunjukkan oleh elektroda Al-C menunjukkan hasil tertinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Al merupakan pereduksi yang kuat karena mudah sekali membentuk Al^{3+}. 	Wulansari <i>et al.</i> (2013)

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
		pada proses elektrolisis tanpa pengotor.		
7	Rangkaian A Katoda: Karbon (C) Anoda: Aluminium (Al) – Karbon (C) paralel	<ul style="list-style-type: none"> • Penyusunan secara seri dapat menurunkan kadar BOD, COD, DO, pH dan absorbansi. • Semakin banyak kuat arus yang dialirkan maka semakin banyak proses oksidasi yang terjadi di anoda. Dengan demikian, elektroda Al di anoda mengalami oksidasi menjadi Al^{3+} dan elektroda C di anoda terjadi reaksi oksidasi Cl^- menjadi Cl_2 juga semakin banyak. • Di katoda jumlah air yang tereduksi menjadi OH^- juga semakin banyak. Jumlah ion Al^{3+}, OH^- dan Cl_2 pada proses tersebut mempengaruhi proses degradasi dan koagulasi limbah (dapat dilihat dari fluktuasi pH dan absorbansi). 	<ul style="list-style-type: none"> • Membutuhkan kuat arus yang tinggi apabila disusun secara paralel. • Ion Al^{3+} yang terbentuk di anoda diendapkan di katoda dan tidak bereaksi dengan OH^- untuk membentuk koagulan. Dampak peristiwa tersebut, limbah yang terkoagulasi menjadi sedikit. • Semakin banyak $Al(OH)_3$ terbentuk, maka pH semakin tinggi. 	Wiratini <i>et al.</i> (2016)
8	Rangkaian B Katoda: Aluminium (Al) Anoda: Aluminium (Al) – Karbon (C) paralel			

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
9	Kadmium (Cd)	<ul style="list-style-type: none"> • Melebur pada 321°C. • Melarut dengan lambat dalam asam encer dengan melepaskan hidrogen (disebabkan potensial elektrodanya yang negatif). • Kadmium adalah logam bivalen yang lunak, elastis, dan berwarna putih kebiruan. • Tahan terhadap korosi, oleh karena itu digunakan sebagai lapisan pelindung ketika diendapkan pada logam lain. • Tidak larut dalam air dan tidak mudah terbakar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dalam bentuk serbuknya, ia dapat terbakar dan melepaskan asap beracun. • Asam klorida, asam sulfat dan asam nitrat melarutkan kadmium dengan membentuk kadmium klorida (CdCl_2), kadmium sulfat (CdSO_4), atau kadmium nitrat ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$). 	Vogel (1985) dan Mulyono (2006)

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
10	Zink (Zn)	<ul style="list-style-type: none"> Zink murni, melarut lambat sekali dalam asam dan dalam alkali, adanya zat-zat pencemar atau kontak dengan platinum atau tembaga yang dihasilkan oleh penambahan beberapa tetes larutan garam dari logam-logam dapat mempercepat reaksi. Liat pada suhu 100-150°C. Merupakan konduktor listrik. 	<ul style="list-style-type: none"> Zink mudah larut dalam HCl encer dan H₂SO₄ encer dengan mengeluarkan hidrogen. Dapat rapuh pada suhu biasa. Pada suhu tinggi terbakar disertai asap putih oksidanya. Unsur elektropositif, mudah bereaksi dengan O₂ tetapi terbentuk bersifat melapisi dan menghambat oksidasi. 	Vogel (1985) dan Widowati, (2008)
11	Katoda: Inert Anoda: PbO ₂	<ul style="list-style-type: none"> Material anoda PbO₂ dapat memaksimalkan proses oksidasi kontaminan organik di anoda karena menghasilkan H₂O₂ yang merupakan oksidator. Pada proses sampel dengan kadar ion Fe rendah dapat ditambahkan garam Fe agar terjadi reaksi elektro-Fenton sehingga 	<ul style="list-style-type: none"> Terjadi pembentukan ion Pb²⁺ dari korosi elektrokimia. 	Chen (2004) dan Vance <i>et al.</i> (1984)

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
		<p>degradasi organik mencapai 95%.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pada elektrooksidasi secara langsung menghasilkan radikal hidroksil teradsorpsi ($\bullet\text{OH}$) dan tidak langsung menghasilkan H_2O_2, serta terjadi elektro-Fenton. • Umum digunakan sebagai bahan anoda untuk peningkatan proses oksidasi organik, terutama pada larutan H_2SO_4. • Penggunaan elektroda PbO_2 dapat menyisihkan 80-95% COD pada proses elektrokimia selama 1 jam dengan pH awal adalah 2, larutan elektrolit H_2SO_4. • Tahan lama. 		
12	Platina (katoda/ anoda)	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat memaksimalkan proses oksidasi kontaminan organik pada densitas arus yang rendah karena dapat 	<ul style="list-style-type: none"> • Proses oksidasi ekstra tidak berjalan maksimum pada rapat arus yang tinggi karena tidak dihasilkan radikal 	Ciblak <i>et al.</i> (2012), Chen (2004), dan Ali <i>et al.</i> (1999)

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
		<p>menghasilkan radikal hidroksil teradsorpsi ($\bullet\text{OH}$)</p> <ul style="list-style-type: none"> Jenis elektroda inert sehingga tidak dapat bereaksi dengan larutan elektrolit dan dapat meningkatkan transfer massa sehingga mempercepat proses deposisi logam pada katoda Tahan lama. Penggunaan jenis elektroda platina dapat menyisihkan 30% kontaminan organik melalui proses elektrolisis. Aluminium yang menempel di katoda mencapai 99,8% setelah elektrolisis pada suhu ruang dengan tegangan 0,5-1,5 V. 	<p>hidroksil teradsorpsi ($\bullet\text{OH}$).</p> <ul style="list-style-type: none"> Penurunan pembentukan endapan aluminium di katoda disebabkan oleh peningkatan rapat arus. 	
13	Besi (katoda/ anoda)	<ul style="list-style-type: none"> Pembentukan besi hidroksida dapat menurunkan kontaminan organik pada elektrolit 	<ul style="list-style-type: none"> pH elektrolit meningkat dari 5,4-10,5 karena pembentukan ion H^+ yang terbatas di anoda besi untuk menetralkan OH^- yang dilepaskan 	Ciblak <i>et al.</i> (2012)

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
		<ul style="list-style-type: none"> • Harga elektroda besi lebih ekonomis. 	<p>katoda. Sebaliknya, pelepasan ion Fe^{2+} mendominasi reaksi pada anoda. Ion Fe^{2+} akan membentuk $Fe(OH)_2$.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Katoda besi larut dan terkorosi pada larutan asam (pada pH 5 sudah terkorosi). 	
14	TiO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • pH elektrolit tidak terlalu berubah secara signifikan karena H^+ diproduksi di anoda dan OH^- diproduksi di katoda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Harga elektroda jenis TiO₂ relatif mahal dan sulit didapatkan. 	Ciblak <i>et al.</i> (2012)
15	<p>Anoda: aluminium alloy A360 (Al (76,2%), Si (15,75%), Cu (4,52%), Zn (2,24%), Fe (0,38%), Mn (0,104%), Ni (0,106%), Mg (0,105%), Ti (0,06%), Cr (0,046%)</p> <p>Katoda: tembaga/aluminium alloy</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Energi yang dibutuhkan rendah karena densitas arus pengoperasian yang juga rendah, mulai dari 10 A/m² (4,51 – 5,32 kWh/kg Al). • Waktu operasi elektrolisis adalah 5 jam. • Elektrolisis dengan tegangan -0,53 V, pada suhu 50°C, dengan pengadukan 60 rpm selama 5 jam terbentuk deposit aluminium setebal 4-6 mm pada 	<ul style="list-style-type: none"> • Harga elektroda mahal. • Sulit didapatkan. 	Pradhan dan Reddy (2012) serta Reddy dan Zhang (2016)

No.	Jenis Elektroda	Keunggulan	Kelemahan	Sumber
		katoda (84-99% aluminium). <ul style="list-style-type: none"> Elektrolisis pada suhu ruang dengan densitas arus 10 A/m² menghasilkan endapan aluminium di katoda sampai 90% aluminium. 		

Berdasarkan Tabel 2. 4 dapat diketahui bahwa elektroda platina (Pt) merupakan jenis elektroda yang paling efektif untuk digunakan dalam aplikasi elektrolisis untuk *recovery* alumina dari lumpur alum PDAM. Sehingga dalam penelitian ini elektroda Pt digunakan sebagai katoda dan anoda dalam sel elektrolisis.

2.5.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Elektrolisis

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses elektrolisis. Beberapa faktor tersebut diantaranya adalah:

- **Penggunaan katalisator**
Katalisator yang biasa digunakan pada elektrolisis adalah NaOH, KOH dan H₂SO₄. Katalisator ini dapat mempermudah proses penguraian air menjadi hidrogen dan oksigen karena ion-ion katalisator mampu mempengaruhi kesetabilan molekul air menjadi menjadi ion H⁺ dan OH⁻ yang lebih mudah di elektrolisis karena terjadi penurunan energi pengaktifan. Zat tersebut tidak mengalami perubahan yang kekal (tidak dikonsumsi dalam proses elektrolisis) (Wahyono *et al.*, 2017).
- **Luas permukaan tercelup**
Semakin besar luas permukaan yang menyentuh larutan elektrolit maka semakin cepat proses transfer elektronnya. Jika luasan yang tercelup sedikit maka semakin mempersulit larutan elektrolit untuk melepaskan elektron dikarenakan sedikitnya luas penampang penghantar yang menyentuh larutan elektrolit, sehingga transfer elektron berlangsung lambat (Wahyono *et al.*, 2017).

- **Konsentrasi pereaksi (larutan elektrolit)**

Semakin besar konsentrasi suatu larutan pereaksi maka akan semakin besar pula laju reaksinya. Hal ini dikarenakan semakin banyak dan tinggi konsentrasi katalis maka reduksi hambatan pada elektrolit akan semakin tinggi. Hal ini menyebabkan transfer elektron dapat lebih cepat dalam mengelektrolisis elektrolit. Terjadi hubungan sebanding terhadap persentase katalis dengan transfer elektron (Wahyono *et al.*, 2017). Menurut Day dan Underwood (1993), elektrolit adalah senyawa yang menghasilkan ion positif dan ion negatif dalam larutan. Larutan elektrolit dikelompokkan menjadi elektrolit kuat dan lemah (Johari, 2004). Semakin tinggi konsentrasi elektrolit akan berpengaruh terhadap perilaku sel elektrolisis yang menyebabkan terjadi perubahan temperatur yang semakin tinggi dalam selang waktu tertentu, demikian juga akan berpengaruh pada pH. Konsentrasi elektrolit yang meningkat menyebabkan pH di ruang katoda dan anoda semakin bervariasi (Isana, 2010). Basuki *et al.* (2009) juga menjelaskan bahwa keberhasilan proses elektrolisis dipengaruhi oleh keasaman larutan (pH), luas dan jarak elektroda, kerapatan arus listrik.

- **Besar tegangan eksternal (Voltase)**

Semakin tinggi tegangan yang diberikan akan semakin tinggi pula laju reaksinya. Hal ini dikarenakan tingginya nilai tegangan dapat memperbesar arus yang dihantarkan oleh ion-ion bebas yang ada didalam larutan. Semakin tinggi arus listrik maka semakin banyak ion-ion yang terlibat dalam penghantaran arus listrik sehingga membuat laju reaksi semakin tinggi (Wahyono *et al.*, 2017). Menurut penelitian Topayung (2011), hubungan antara beda potensial dalam elektrolit dan kekuatan arus listrik yang mengalir menurut Hukum Ohm yaitu:

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

I = Kuat arus listrik (Ampere)

V = Beda potensial (Volt)

R = Tahanan listrik (ohm)

Sementara perhitungan besarnya listrik yang mengalir dapat dinyatakan dengan Coulomb yang merupakan perhitungan arus listrik dikalikan dengan waktu seperti dalam rumus berikut ini:

$$Q = I \times t \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

Q = Muatan listrik (Coulomb)

I = Kuat arus listrik (Ampere)

t = Waktu (detik)

- **Waktu**

Waktu merupakan faktor yang mempengaruhi banyaknya logam yang mengendap di katoda. Secara umum semakin banyak waktu yang digunakan untuk proses maka semakin tebal lapisan pada katoda (Marwati *et al.*, 2009).

- **Suhu**

Berdasarkan penelitian Marwati, *et al.* (2009), suhu sangat penting untuk menyeleksi tepat tidaknya proses elektrolisis yang berlangsung. Keseimbangan suhu ditentukan oleh beberapa faktor misalnya jarak antara anoda dan katoda serta arus yang digunakan.

- **Jenis, luas, dan jarak elektroda**

Berdasarkan penelitian Notianingsih dan Yusman (2013), dijelaskan bahwa variasi jenis elektroda, variasi luas penampang elektroda, dan variasi jarak antar elektroda mempengaruhi besar tegangan sel yang dihasilkan pada sel elektrolisis. Chen *et al.* (2018) dalam penelitiannya juga menyebutkan bahwa ukuran elektroda pada elektrolisis dapat ditentukan berdasarkan kriteria proses yang diinginkan dengan mempertimbangkan pengaruh ukuran elektroda pada proses elektrolisis sebagai berikut:

- Reaksi ion dan perpindahan. Hal ini hanya terjadi pada perbesaran ukuran elektroda dalam skala 0,03 cm, selebihnya tidak akan ada peningkatan reaksi.
- Zona aktif dalam sel elektrolisis dipengaruhi radius dan tipisnya elektroda.
- Lama waktu pengoperasian elektrolisis dapat ditentukan dengan mengukur arus elektrolisis dan luas permukaan elektroda.

- Ukuran elektroda yang diperbesar akan meningkatkan Beberapa penelitian juga menyatakan bahwa elektroda akan bekerja secara efektif apabila ukuran elektroda tidak jauh berbeda dengan ukuran sel elektrolisis (Chen (2004) dan Samaranyake (2004)).
- **Keasaman larutan (pH)**

Berdasarkan penelitian Isana (2010), dijelaskan bahwa setiap sel elektrolisis dengan berbagai material yang berbeda-beda akan menghasilkan pH optimum yang berbeda-beda, baik pada ruang katoda maupun anoda. Hal ini menunjukkan perilaku sel elektrolisis yang berbeda untuk setiap sistem elektrolisis akan menghasilkan pH larutan yang berbeda. Hubungan pH dan kuantitas material dalam proses elektrolisis dapat dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$E_{sel} = E^o_{sel} - \frac{R \times T}{n \times F} \times \ln Q \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

- E_{sel} = Potensial sel
- E^o_{sel} = Potensial sel standar
- R = Tetapan gas universal
- T = Temperatur dalam Kelvin
- N = Jumlah elektron yang terlibat dan bilangan Faraday
- Q = Perbandingan aktivitas teroksidasi terhadap tereduksi

Bila dalam proses elektrolisis melibatkan ion-ion H⁺ dan OH⁻ maka dalam besaran Q terdapat kuantitas ion-ion tersebut, sehingga ada hubungan antara potensial sel dan pH larutan.

2.5.3. Penurunan Kontaminan Organik pada Recovery Alumina dengan Metode Elektrolisis

Berdasarkan penelitian Hamid *et al.* (2017), proses elektrolisis dapat berpengaruh terhadap penurunan nilai konsentrasi COD pada suatu limbah/larutan. Proses penurunan COD ini juga dipengaruhi oleh waktu tinggal larutan atau waktu pengoperasian elektrolisis. Hal ini disebabkan semakin lama waktu tinggal larutan dalam sel elektrolisis akan memberikan kesempatan kontaminan dalam limbah untuk terurai dan proses elektrolisis juga akan berlangsung lebih lama, sehingga nilai konsentrasi COD pada air limbah semakin rendah. Dengan

peningkatan waktu elektrolisis, ada peningkatan dalam efisiensi *removal* COD. Peningkatan waktu elektrolisis ini akan memperbanyak ion-ion yang terbentuk di antara elektroda dengan larutan sehingga menghasilkan COD *removal* yang lebih tinggi (Khandegar dan Saroha, 2012).

Hudha *et al.* (2014) juga menyatakan bahwa semakin lama waktu elektrolisis maka bahan-bahan organik yang teroksidasi semakin banyak. Pernyataan yang lain juga dikemukakan oleh Michael Faraday dalam Hudha *et al.* (2014), bahwa semakin lama waktu elektrolisis hasil dari suatu reaksi kimia yang dikehendaki juga akan semakin bertambah. Soemargono *et al.* (2006) juga menyatakan bahwa waktu yang panjang memberikan kesempatan yang lama untuk berlangsungnya proses elektrolisis, sehingga makin banyak bahan kimia dalam limbah yang dapat dinetralkan. Berdasarkan penelitian Ciblak *et al.* (2012), elektroda jenis platina juga dapat memaksimalkan proses oksidasi kontaminan organik pada densitas arus yang rendah karena dapat menghasilkan radikal hidroksil teradsorpsi ($\bullet\text{OH}$). Elektrolisis dengan sistem *batch* resirkulasi juga dapat mengoptimalkan proses oksidasi pada sel elektrolisis dan pada *feed tank*, sehingga dapat menurunkan kontaminan organik pada filtrat elektrolit (Selvakumar *et al.*, 2016).

2.6. Perhitungan Efisiensi Proses

Menurut penelitian Guven *et al.* (2012), proses elektrokimia (elektrolisis) merupakan salah satu teknologi pengolahan air limbah yang memerlukan energi dan biaya yang relatif tinggi apabila diterapkan dalam skala yang besar. Biaya operasional ini biasanya diperhitungkan dari listrik yang digunakan yang dapat dihitung melalui konsumsi energi spesifik proses. Konsumsi energi spesifik didefinisikan sebagai jumlah energi yang dikonsumsi per unit massa beban organik (misalnya COD).

Menurut penelitian Panizza *et al.* (2001), konsumsi energi spesifik untuk oksidasi dan reduksi selama proses elektrolisis dapat dihitung dengan nilai *Instantaneous Current Efficiency (ICE)*. Konsumsi energi spesifik untuk proses oksidasi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$ICE = \frac{4 \times F \times V \times [(COD_t) - (COD_{(t+\Delta t)})]}{I \times \Delta t} \dots\dots\dots(2.7)$$

Sementara konsumsi energi spesifik untuk proses reduksi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$ICE = \frac{4 \times F \times V \times [(Al_t) - (Al_{(t+\Delta t)})]}{I \times \Delta t} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

F = Nilai Faraday, 96.500 C/mol

V = Volume elektrolit yang diolah (L)

I = Kuat Arus Listrik (A)

Δt = Selisih waktu operasi elektrolisis (jam)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Deskripsi Umum

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui mekanisme *recovery* alumina lumpur PDAM menggunakan metode elektrolisis. Penelitian dilakukan di PDAM Surabaya tepatnya di IPAM X yang merupakan produsen air minum terbesar di Kota Surabaya, yaitu sebesar 2.750 L/detik. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan karakteristik lumpur PDAM serta menghitung kebutuhan energi spesifik proses. Penelitian dimulai dengan proses mendapatkan supernatan yang digunakan dalam proses elektrolisis (proses asidifikasi dan sentrifugasi) serta menentukan kuat arus listrik yang akan digunakan saat elektrolisis (uji polarisasi). Variasi dilakukan pada perbedaan tingkat keasamaan larutan (pH) pada awal elektrolisis serta *pre-treatment* untuk penurunan kontaminan organik dengan memvariasikan sampel yang telah dioksidasi (penambahan H₂O₂ dan paparan sinar UV) dan tanpa dioksidasi. Pada akhir penelitian ini diharapkan dapat diperoleh kembali produk berupa alumina.

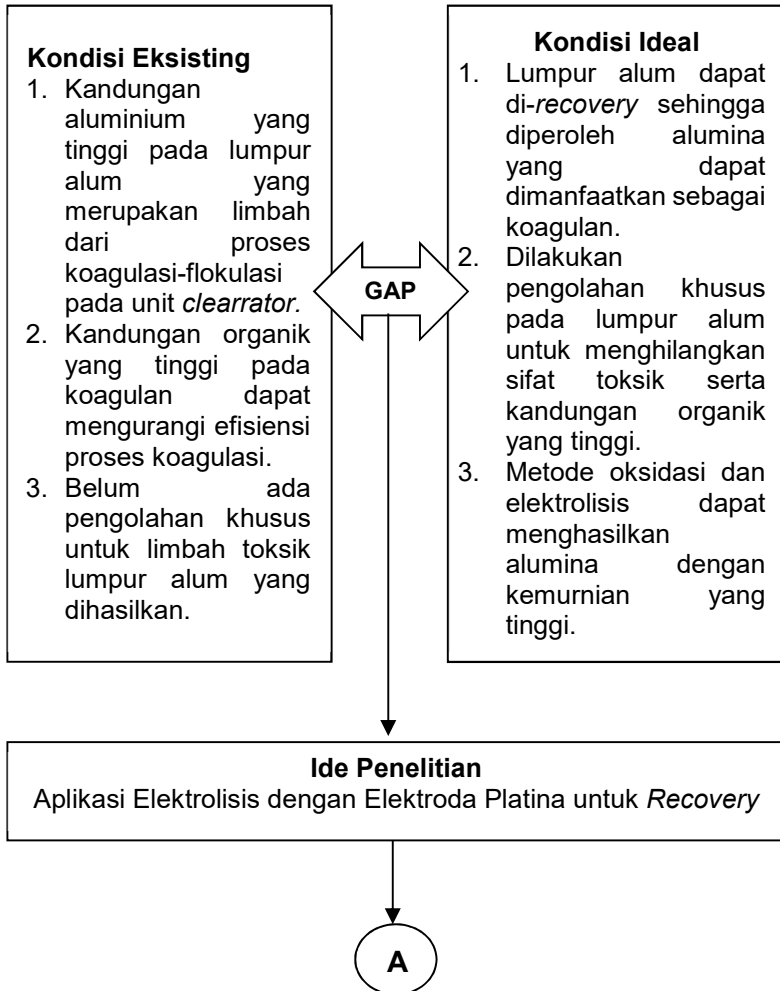
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

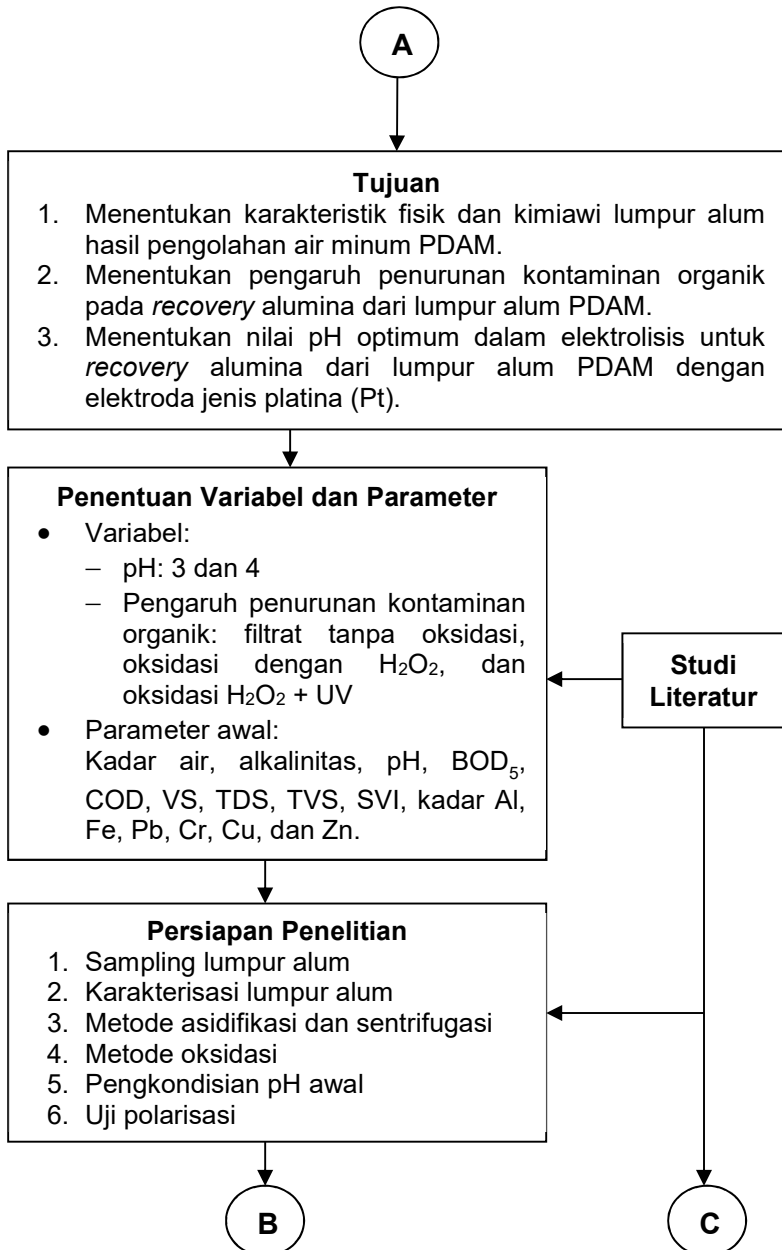
Lokasi pengambilan sampel di IPAM X PDAM Surabaya. Pemilihan lokasi pengambilan sampel di IPAM X dikarenakan produksi air minum terbesar ada pada IPAM X yaitu sebesar 2.750 L/detik (Candraditya, 2018). Karena produksi air minum di IPAM X merupakan yang terbesar, maka produksi lumpur alum pada proses koagulasinya juga semakin banyak. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengelolaan Limbah Padat dan Limbah B3 serta Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Departemen Teknik Lingkungan ITS. Penelitian dilakukan selama lima bulan dari bulan Januari sampai bulan Mei 2019.

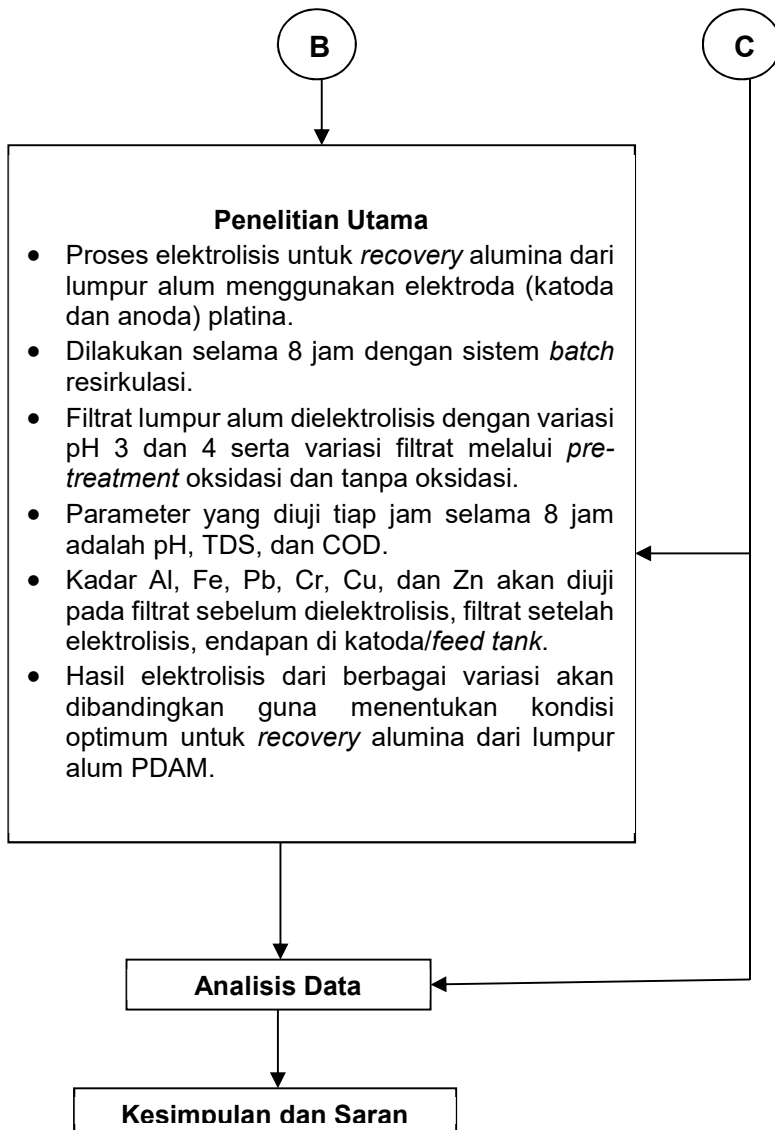
3.3. Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan gambaran alur pikir penelitian ini. Penyusunan langkah-langkah penelitian yang jelas dan sistematis bertujuan untuk mempermudah pelaksanaan penelitian. Kerangka penelitian diawali dengan perumusan ide

penelitian sampai dengan penarikan kesimpulan. Secara garis besar penelitian yang akan dilakukan yaitu *recovery* alumina lumpur alum PDAM dengan metode elektrolisis. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.







Gambar 3. 1 Diagram Kerangka Pelaksanaan Penelitian

3.4. Penentuan Variabel Penelitian

Metode penelitian kuantitatif yang sistematis memerlukan variasi penelitian untuk mendapatkan hubungan sebab akibat yang dapat dianalisis (Sarwono, 2006). Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1. Penurunan Kontaminan Organik

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan konsentrasi kandungan organik pada filtrat hasil *recovery* alumina dari lumpur alum yang melalui proses oksidasi (penambahan H_2O_2 dan pemaparan sinar UV) dan tidak melalui proses oksidasi. Penurunan kontaminan organik dilakukan dengan penambahan hidrogen peroksida (H_2O_2) dengan perbandingan $[H_2O_2]/[COD] = 1/2$ serta pemaparan sinar UV 254 nm selama 4 jam (Collivignarelli *et al.*, 2017). Oksidasi dilakukan setelah larutan lumpur alum diasidifikasi dengan penambahan H_2SO_4 hingga pH 2 dan sentrifugasi selama 1 jam. Sehingga lumpur alum yang akan dioksidasi sudah berbentuk filtrat. Pengukuran COD juga dilakukan sebelum dan sesudah oksidasi. Penambahan H_2O_2 yang merupakan suatu oksidator ke dalam larutan sampel ini berfungsi untuk menguraikan senyawa-senyawa organik dalam sampel. Terurainya senyawa-senyawa organik ini berpengaruh terhadap penurunan kadar COD, TSS, dan TDS (Chuango *et al.*, 2013). Sementara pemaparan sinar UV berfungsi untuk mempercepat pembentukan radikal hidroksil ($\bullet OH$), sehingga menyebabkan terjadinya reaksi fotolisis secara tidak langsung.

3.4.2. Keasaman Larutan (pH)

Penambahan asam sulfat (H_2SO_4) dilakukan pada proses asidifikasi dengan variasi pH 3 dan 4 sebelum dilakukan proses elektrolisis, hal ini dikarenakan pH lumpur alum akan berkurang dengan adanya penambahan H_2SO_4 sehingga efisiensi *recovery* alumina dapat lebih besar hingga mencapai 70 hingga 90% (Panswad dan Chanman, 1992). Variabel yang diteliti dalam penelitian ini dapat dilihat di Tabel 3. 1.

Tabel 3. 1 Variabel Penelitian

Penurunan Kontaminan Organik	pH Larutan	
	3	4
Tanpa oksidasi	OH3	OH4
Oksidasi penambahan H ₂ O ₂ ([H ₂ O ₂]/[COD] = 1/2)	HH3	HH4
Oksidasi penambahan H ₂ O ₂ ([H ₂ O ₂]/[COD] = 1/2) + UV 254 nm	UH3	UH4

3.5. Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan mencakup seluruh proses yang dilakukan dalam penelitian ini, dimulai dari persiapan sampel hingga diperoleh hasil pengujian parameter-parameter dari proses elektrolisis. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3. 2.

Tabel 3. 2 Alat dan Bahan dalam Penelitian

No.	Alat/Bahan	Keterangan
1.	Oven	Digunakan untuk mengeringkan/ menghilangkan kadar air pada sampel dengan suhu 105°C.
2.	Cawan porselen	Sebagai wadah untuk meletakkan sampel saat dioven.
3.	Neraca analitik	Digunakan untuk mengukur berat cawan porselen, elektroda, dan sampel di awal dan akhir proses.
4.	Larutan H ₂ SO ₄	Digunakan untuk mengontrol pH pada awal proses sebelum dilakukan proses elektrolisis, asam sulfat bersifat korosif dan bersuhu tinggi.
5.	Labu erlenmeyer 50 mL	Digunakan sebagai wadah sampel saat pengadukan.
6.	<i>Magnetic stirrer</i>	Digunakan untuk menghomogenkan larutan dengan cara pengadukan.
7.	Mikropipet, makropipet, pipet ukur, dan propipet	Digunakan untuk mengambil larutan dengan volume tertentu.
8.	Botol <i>centrifuge</i>	Sebagai wadah sampel saat proses sentrifugasi.

No.	Alat/Bahan	Keterangan
9.	<i>Centrifuge</i>	Digunakan untuk memisahkan larutan dengan padatnya dengan gaya sentrifugal.
10.	Kertas saring	Digunakan untuk memisahkan larutan dengan padatnya secara gravitasi.
11.	Kabel dan <i>crocodile clip</i>	Digunakan untuk menyalurkan arus listrik.
12.	Elektroda platina (Pt)	Sebagai katoda dan anoda.
13.	Pompa peristaltik	Digunakan untuk mengalirkan air pada reaktor dengan debit 0,25 LPM.
14.	Selang diameter 3 mm	Untuk pengaliran larutan elektrolit.
15.	DC <i>adjustable power supply</i>	Sebagai sumber listrik.
16.	Gelas ukur dan <i>beaker glass</i>	Digunakan untuk mengukur larutan dengan volume tertentu.
17.	Larutan elektrolit	Larutan yang akan dielektrolisis.
18.	Reaktor elektrolisis	Reaktor dijalankan dengan sistem <i>batch</i> dengan resirkulasi yang terdiri dari satu kompartemen. Dimensi kompartemen yang digunakan adalah panjang x lebar x tinggi = 5 cm x 2 cm x 20 cm. reaktor terbuat dari akrilik.
19.	Corong kaca	Untuk memasukkan larutan atau memindahkan larutan dari suatu tempat ke tempat yang lain dan untuk proses penyaringan setelah sampel diletakkan di atas kertas saring.
20.	Spatula plastik dan logam	Untuk mengambil bahan-bahan kimia dalam bentuk padatan.
21.	<i>Conductivity meter</i>	Untuk menguji konduktivitas.
22.	<i>Inductively Coupled Plasma (ICP)</i>	Untuk pengujian kadar logam. Tipe yang digunakan adalah merk Agilent Technologies series 700 ICP-OES.
23.	Botol Jerigen PE	Sebagai wadah saat pengambilan sampel.
24.	<i>pH meter</i>	Untuk mengukur pH larutan.
25.	<i>Conductivity meter</i>	Untuk mengukur kadar TDS dan DHL larutan.

No.	Alat/Bahan	Keterangan
26.	Lumpur alum PDAM Surabaya	Sebagai sampel yang akan diolah/diteliti.
27.	Aquades	Sebagai pelarut dan blanko dalam analisis karakteristik lumpur PDAM.
28.	Larutan H ₂ O ₂	Untuk proses oksidasi.
29.	Larutan HNO ₃	Untuk pengawetan larutan sampel saat pengujian parameter tertentu.
30.	Lampu UV 254 nm	Untuk proses oksidasi

3.6. Pengambilan Sampel Lumpur PDAM

Pengambilan sampel dilakukan pada unit *clearator* pada Bulan Januari 2019 di musim penghujan. Pengambilan lumpur dengan botol jerigen berbahan polyethylene (PE) (Hadi, 2005). Lumpur alum yang dibutuhkan dalam satu kali *running* yakni sebesar 20% dari volume total larutan (1 L). jumlah *running* yang dilakukan adalah sebanyak 10 kali (6 kali elektrolisis dan 4 kali uji polarisasi). Jumlah lumpur yang dibutuhkan berdasarkan perhitungan adalah sebagai berikut:

- Kebutuhan lumpur satu kali *running* = 200 g
- *Running* yang dilakukan = 10 kali
- Total kebutuhan lumpur = 200 g x 10 = 2.000 g ... (3.1)
- Kadar Solids lumpur = 0,95 %
- Lumpur yang dibutuhkan = $\frac{2.000 \text{ g}}{0,95\%}$ = 210.526,32 g ... (3.2)

Perhitungan volume lumpur yang dibutuhkan menggunakan data densitas lumpur alum. Perhitungan densitas lumpur adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{\text{massa lumpur}}{10 \text{ ml}} = \frac{9,5 \text{ g}}{10 \text{ ml}} = 0,95 \text{ g/ml} \quad \dots (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Volume lumpur} &= \frac{\text{massa lumpur yang diperlukan}}{\rho} \\ &= \frac{210.526,32 \text{ g}}{0,95 \text{ g/ml}} \\ &= 221.606 \text{ mL} \\ &= 222 \text{ L} \quad \dots (3.4) \end{aligned}$$

Selanjutnya sampel lumpur dikeringkan dan dihancurkan, lalu diawetkan untuk menjaga kualitas lumpur alum yang akan

diuji. Untuk meminimalisasi potensi terjadinya volatilisasi atau biodegradasi di sela waktu pengambilan dan analisis sampel, maka sampel harus disimpan dalam keadaan sedingin mungkin tanpa dilakukan pembekuan (dijaga dalam suhu ruang $\pm 25^{\circ}\text{C}$). Sampel harus secepat mungkin dianalisis setibanya di laboratorium. Jika analisis langsung tidak memungkinkan, maka dilakukan penyimpanan sampel pada suhu 4°C di dalam lemari pendingin. Pengawetan sampel dapat menggunakan bahan pengawet kimia apabila bahan pengawet tersebut tidak mengganggu analisis yang akan dilakukan (APHA, AWWA, WPCF, 2005).

3.7. Karakterisasi Lumpur PDAM

Karakterisasi lumpur diperlukan untuk menentukan kandungan yang ada pada lumpur yang akan diuji. Karakteristik juga diperlukan untuk menentukan potensi *recovery* alumina. karakteristik fisik dan kimiawi seperti pH, *Total Dissolved Solids (TDS)*, kadar air, *Total Volatile Solids (TVS)*, *Total Fixed Solids (TFS)*, *Total Solids (TS)*, *Total Suspended Solids (TSS)*, Kadar Al, Fe, Pb, Cu, Cr, Zn, *Chemical Oxygen Demand (COD)*, *Biochemical Oxygen Demand (BOD₅)*, *Sludge Volume Index (SVI)*, alkalinitas, dan konduktivitas. Pengujian sampel dilakukan secara triplo, kecuali uji kadar unsur-unsur yang hanya diambil satu sampel saja pada tiap kali sampling. Metode uji parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Parameter dan Metode Pengujian Karakteristik Lumpur PDAM

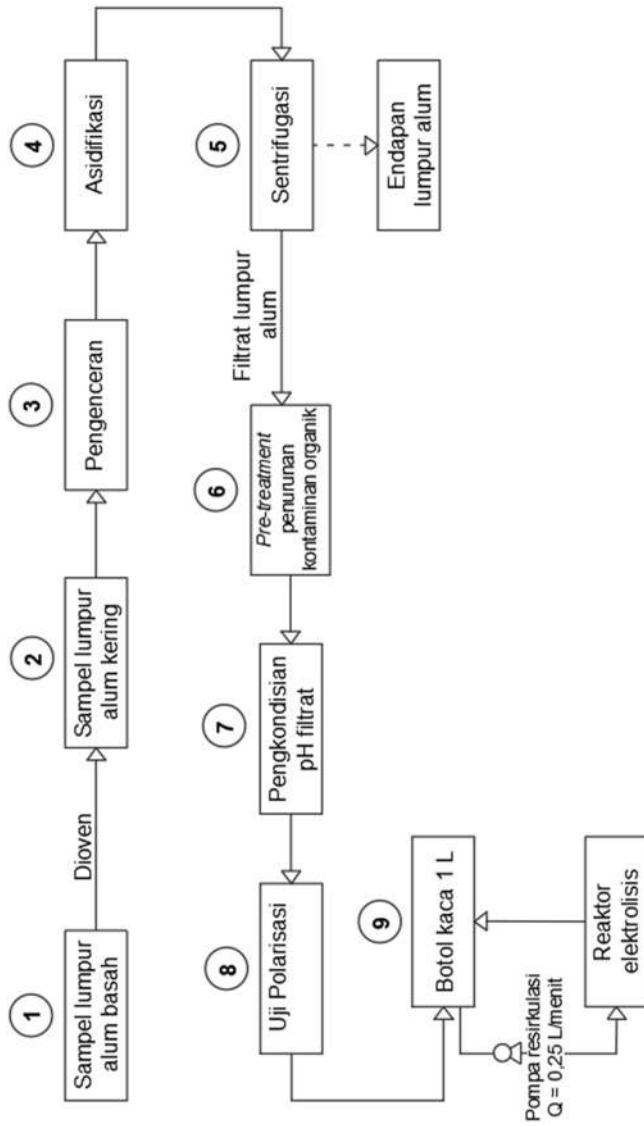
No.	Parameter	Metode Pengujian
1.	Nilai pH	Voltmetri (pH meter)
2.	TDS	Voltmetri (<i>conductivity meter</i>)
3.	TSS, TVS, TFS, TS	Gravimetri
4.	Kadar air	Gravimetri
5.	Kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, Mg, dan Zn	<i>Inductively Coupled Plasma (ICP)</i>
6.	Alkalinitas	Titimetri
7.	Konduktivitas	Voltmetri (<i>conductivity meter</i>)
8.	<i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	<i>Close reflux</i> dan titimetri

No.	Parameter	Metode Pengujian
9.	<i>Biochemical Oxygen Demand (BOD₅)</i>	Titimetri-winkler
10.	<i>Sludge Volume Index (SVI)</i>	<i>Settling test (Imhoff cone)</i>

Sumber: APHA, AWWA, WPCF (2012)

3.8. Tahapan Proses Elektrolisis

Sebelum dilakukan penelitian utama yakni elektrolisis, ada beberapa tahapan proses yang dilakukan pada lumpur alum untuk menjadi larutan elektrolit. Tahapan ini lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3. 2.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Tahapan Proses Elektrolisis

Keterangan:

1. Sampel lumpur alum basah

Lumpur alum yang diambil dari unit *clearator* berupa lumpur basah dan segar. Lumpur alum basah dihilangkan kadar airnya dengan dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C selama 24 jam.

2. Sampel lumpur alum kering

Setelah kering kemudian lumpur dihancurkan dengan mortar dan penumbuk hingga halus. Perhitungan kadar air dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{(X-Y)}{X} \times 100\% \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana:

X = Berat lumpur sebelum dikeringkan (g)

Y = Berat lumpur sesudah dikeringkan (g)

3. Pengenceran

Lumpur yang telah halus diambil dan ditimbang sebanyak 200 g menggunakan neraca analitik, kemudian dimasukkan dalam *beaker glass*. Selanjutnya 200 g lumpur tersebut ditambahkan 1 L aquades untuk diencerkan/dihomogenkan.

4. Asidifikasi

Berdasarkan penelitian Sengupta dan Prakash (2002), asidifikasi lumpur dilakukan dengan penambahan asam sulfat (H₂SO₄) pH 2. Saat dilakukan ekstraksi dengan H₂SO₄ dengan pH 2 maka Al(OH)₃ akan larut dan dihasilkan filtrat yang kaya akan Al(OH)₃.H₂SO₄ yang merupakan jenis asam paling baik yang dapat digunakan dalam proses elektrokimia. Hal ini dikarenakan Al(OH)₃.H₂SO₄ dapat mengurangi potensi terjadinya proton *jumping*/loncatan proton (Choi *et al.*, 2001). Proses pelarutan lumpur kering dengan asam menggunakan asam sulfat 0,1 N dengan komposisi lumpur 200 g dan H₂SO₄ sebanyak 20 mL. Komposisi lumpur dan asam sulfat merujuk pada kondisi lumpur sebesar 20% (Hovsepyan dan Bonzongo, 2009). Lumpur yang telah diasamkan hingga pH 2 berfungsi untuk mengekstrak aluminium yang ada pada lumpur. Kemudian lumpur diaduk

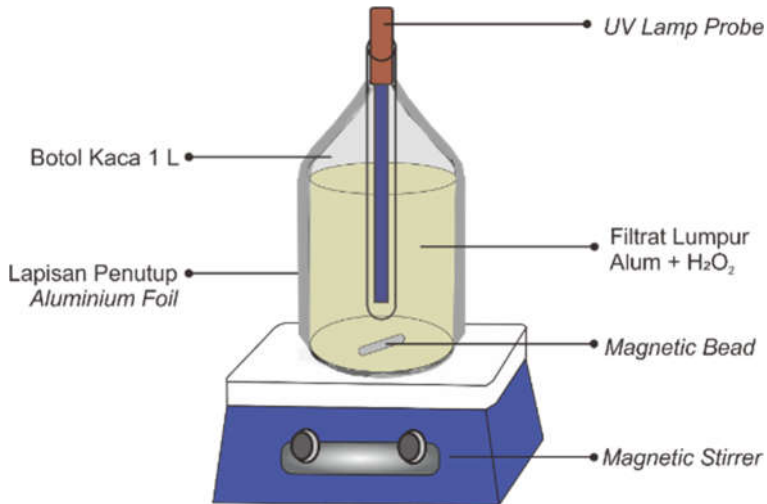
dengan *magnetic stirrer* selama 2 jam dengan kecepatan 300 rpm (Sari *et al.*, 2017).

5. Sentrifugasi

Sentrifugasi merupakan salah satu metode untuk memisahkan zat padat tak terlarut. Sentrifugasi umumnya digunakan untuk memisahkan partikel-partikel padat dengan ukuran kecil dan sulit untuk disaring. Metode ini memanfaatkan perbedaan densitas antara zat padat dan fluida di sekitarnya. Prinsipnya, saat suatu suspensi didiamkan, zat padat akan bergerak ke bawah dengan dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Sentrifugasi bekerja dengan mempercepat pergerakan ini dengan memanfaatkan medan gaya sentrifugal (Adam *et al.*, 2017). Proses sentrifugasi menggunakan alat *centrifuge* dengan memasukkan sampel pada botol *centrifuge* yang terbuat dari plastik. Proses sentrifugasi berlangsung selama 60 menit dengan kecepatan 5000 rpm (Prastanto *et al.*, 2014). Zat padat hasil sentrifugasi kemudian diletakkan pada kertas saring sehingga didapatkan cairan/filtrat yang digunakan pada proses selanjutnya. Proses sentrifugasi dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengelolaan Limbah Padat dan Limbah B3 Departemen Teknik Lingkungan ITS.

6. *Pre-treatment* penurunan kontaminan organik

Dalam penelitian ini akan diuji pengaruh penurunan kontaminan organik terhadap efisiensi *recovery* alumina, sehingga dilakukan variasi berupa *pre-treatment* berupa proses oksidasi dan tanpa oksidasi pada larutan sampel. Proses oksidasi dilakukan dengan penambahan H₂O₂ dengan perbandingan [H₂O₂]/[COD] = 1/2 serta pemaparan sinar UV 254 nm dengan lampu UV berkekuatan 15 watt/L selama 4 jam. Untuk mengetahui volume H₂O₂ yang ditambahkan, perlu dilakukan pengujian kadar COD pada filtrat. Oksidasi larutan sampel dilakukan setelah asidifikasi (penambahan H₂SO₄ pada larutan hingga pH 2) dan sentrifugasi. Reaktor yang digunakan dalam proses oksidasi dapat dilihat dalam Gambar 3. 3.



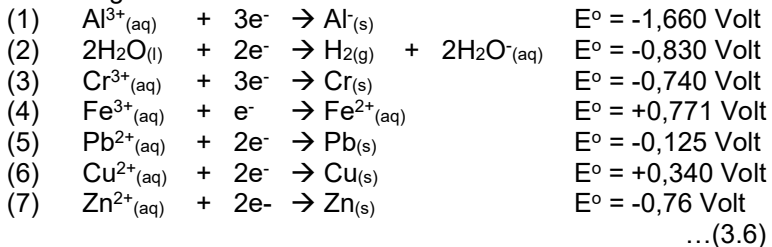
Gambar 3. 3 Reaktor Oksidasi

7. Pengkondisian pH filtrat

Pengkondisian pH filtrat/larutan elektrolit yang semula memiliki nilai pH 2 dilakukan dengan menambahkan NaOH hingga pH 3 dan 4 sesuai variasi yang telah ditentukan. Kemudian filtrat diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 2 jam dengan kecepatan 300 rpm (Sari *et al.*, 2017).

8. Uji polarisasi

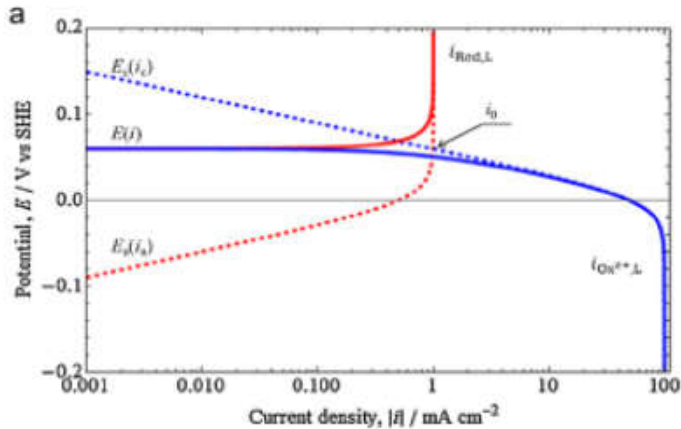
Tegangan minimum yang diperlukan untuk elektrolisis alumina dapat diketahui dengan cara menghitung besar potensial reduksi standar, E° (Volt). Nilai E° (Volt) yang digunakan disesuaikan dengan ion-ion yang ada pada larutan elektrolisis, yaitu sebagai berikut:



Berdasarkan perhitungan didapatkan bahwa tegangan minimal yang diperlukan agar semua kemungkinan reduksi dan oksidasi bisa terjadi yaitu 5,226 Volt. Tegangan minimum tersebut diperoleh dari perhitungan penjumlahan E° ion-ion sebagaimana berikut ini:

$$\begin{aligned}
 E^\circ \text{ sel} &= E^\circ (1) + E^\circ (2) + E^\circ (3) + E^\circ (4) + E^\circ (5) + E^\circ (6) + \\
 &\quad E^\circ (7) \dots \dots \dots (3.7) \\
 &= 1,660 + 0,830 + 0,740 + 0,771 + 0,125 + 0,340 + 0,76 \\
 &= 5,226 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

Uji polarisasi dilakukan untuk mengetahui hubungan voltase dan densitas arus pada variasi jenis filtrat serta mengetahui *range* nilai kuat arus yang dapat digunakan. Pemilihan voltase uji disesuaikan dengan nilai potensial reduksi ion yang akan digunakan pada proses elektrolisis. Langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian dengan pemasangan reaktor elektrolisis menggunakan larutan filtrat lumpur yang telah diasidifikasi dan disentrifugasi. Kondisi pada uji polarisasi perlu disesuaikan dengan kondisi pada saat proses elektrolisis. Penelitian dilakukan dengan meningkatkan nilai voltase pada setiap 0,2 Volt. Uji polarisasi dilakukan selama 3 menit untuk nilai voltase per titik. Kemudian dicatat kuat arus saat gelembung udara mulai terbentuk di katoda, karena keberhasilan proses reduksi dapat diukur dari terbentuknya gas di katoda. Pada tiap kenaikan kuat arus maupun tegangan listrik dilakukan pengukuran nilai TDS. Data yang diperoleh kemudian diolah menjadi grafik. Penyisihan nilai TDS terbesar mempengaruhi pemilihan kuat arus listrik dalam penelitian. Contoh kurva polarisasi elektroda tercantum pada Gambar 3. 4. Salah satu contoh uji polarisasi yang dilakukan oleh Seri dan Itoh (2016) dengan menggunakan elektroda platina dalam larutan asam. Densitas arus pada elektroda platina terdapat dalam kisaran 0.001 hingga 100 mA/cm².



Gambar 3. 4 Kurva Polarisasi
Sumber: Seri dan Itoh (2016)

9. Proses elektrolisis

Pada penelitian utama, yakni proses elektrolisis dilakukan pengamatan sesuai waktu operasi yang ditentukan yaitu selama 8 jam (Elicker *et al.*, 2014). Dua variabel yang digunakan yaitu variasi tingkat keasaman larutan (pH) dan *pre-treatment* berupa penurunan kontaminan organik dengan proses oksidasi, sehingga menghasilkan 6 variasi sampel. Dalam penelitian ini, data diambil sebanyak tiga kali (triplo). Elektrolisis dilakukan dengan sistem *batch* resirkulasi. Hal ini dilakukan karena sistem *batch* resirkulasi dapat mengoptimalkan proses oksidasi pada sel elektrolisis dan pada *feed tank*, sehingga dapat menurunkan kontaminan organik pada filtrat elektrolit (Selvakumar *et al.*, 2016). Volume filtrat/sampel yang digunakan pada satu siklus adalah 1 L. Hal ini ditetapkan dengan mempertimbangkan rasio antara volume sampel yang diperlukan dan volume efektif reaktor.

Proses elektrolisis diawali dengan pencucian elektroda platina (Pt) dengan *aquades* untuk menghilangkan kontaminan pada elektroda. Elektroda yang telah dicuci perlu dikeringkan pada oven dengan suhu 105°C selama 1 jam untuk menghilangkan kadar air, kemudian dilakukan penimbangan elektroda untuk mengetahui berat awal elektroda. Reaktor elektrolisis yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Terbuat dari akrilik dengan tebal 2 cm.
- Filtrat lumpur alum diletakkan dalam *feed tank* dengan volume 1 L.
- Terdiri dari satu kompartemen dengan dimensi: panjang x lebar x tinggi = 5 cm x 2 cm x 20 cm.
- Menggunakan elektroda jenis platina (Pt) dengan dimensi: panjang x lebar = 8 cm x 3 cm.
- Jarak antar elektroda (katoda dan anoda) yakni 1,5 cm.
- Dijalankan dengan sistem *batch* resirkulasi.
- Filtrat dalam *feed tank* dialirkan melalui selang berdiameter 3 mm dengan pompa peristaltik dengan kecepatan 0,25 LPM.
- Arus listrik dialirkan dari DC *power supply* melalui kabel dan konduktor listrik (baut) yang dijepit dengan *crocodile clip*.

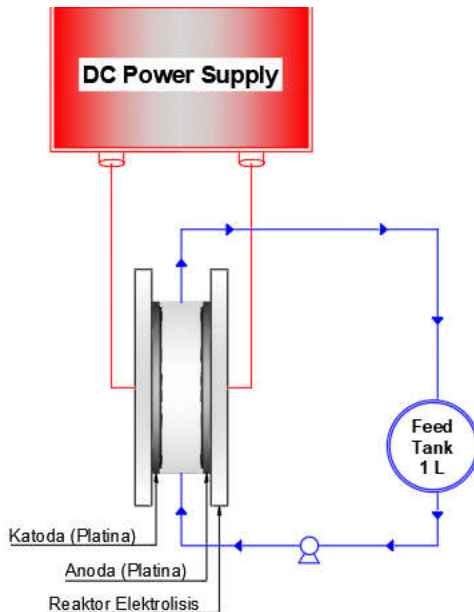
Skema, konfigurasi, dan dimensi reaktor elektrolisis dapat dilihat dalam Gambar 3. 5 – 3. 7.

Sampling dilakukan pada setiap jam pada proses elektrolisis yang berdurasi 8 jam. Pada setiap kali pengambilan sampel diuji nilai pH, TDS, konduktivitas, COD, tegangan listrik, dan volume yang tersisa pada titik sampling untuk memudahkan perhitungan kesetimbangan massa (Verma *et al.*, 2013). Hasil elektrolisis yakni berupa endapan di katoda platina (Pt) yang dikeringkan dan ditambahkan asam nitrat (HNO₃) pH 2 untuk selanjutnya diuji kandungan Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn yang terkandung di dalamnya dengan menggunakan alat *Inductively Coupled Plasma* (ICP). Untuk pengujian parameter pH, TDS, konduktivitas, dan COD maka diambil 10 mL sampel tiap satu kali pengujian. Sementara uji kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn dengan alat ICP juga dilakukan pada filtrat lumpur alum/larutan elektrolit dan endapan yang mengendap di dasar reaktor, untuk uji ini dibutuhkan 50 mL sampel + HNO₃ untuk satu kali pengujian. Parameter yang diuji serta metode pengujian pada proses elektrolisis selengkapnya dapat dilihat dalam Tabel 3. 4.

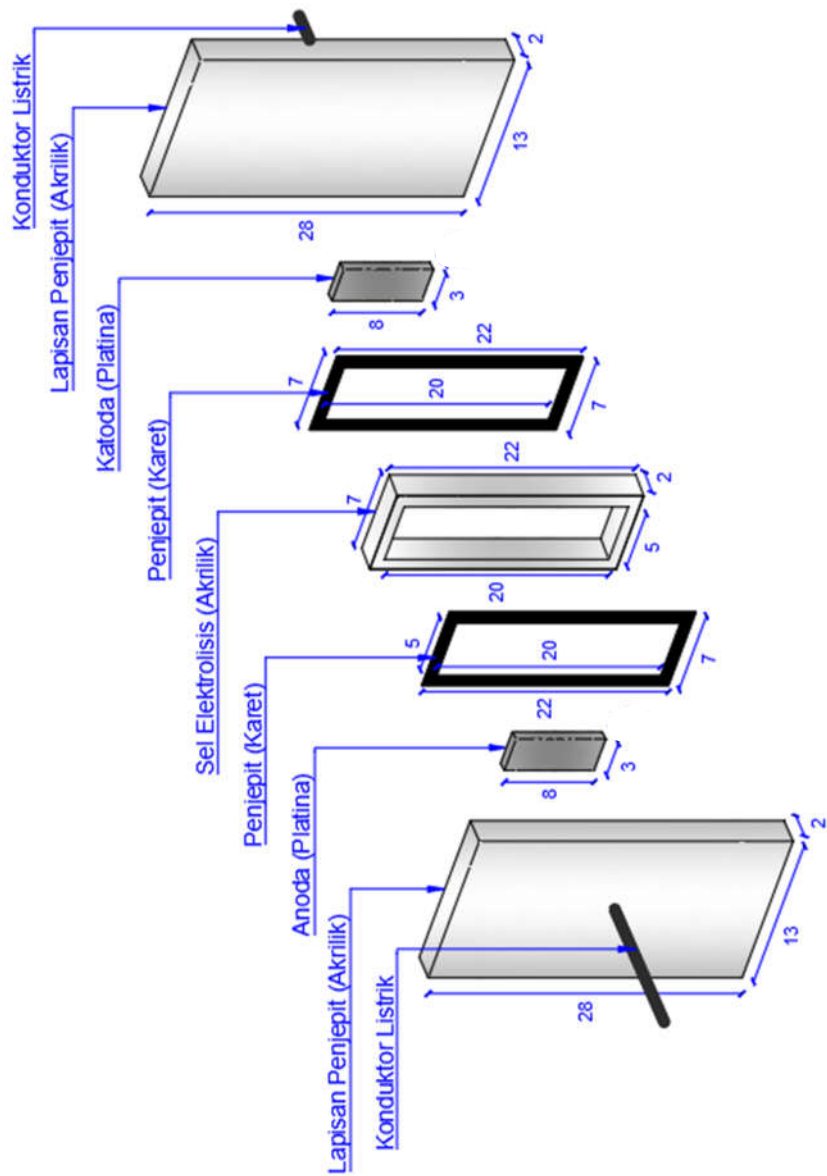
Tabel 3. 4 Parameter yang Diuji pada Proses Elektrolisis

No.	Parameter	Metode Pengujian
1.	Nilai pH	Voltmetri menggunakan pH meter
2.	<i>Total Dissolved Solids (TDS)</i> dan konduktivitas	Voltmetri menggunakan <i>conductivity meter</i>
3.	Kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn	ICP dengan tipe alat yang digunakan adalah Agilent Technologies Series 700 ICP-OES
4.	<i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	<i>Close reflux</i> dan <i>colorimetric</i>
5.	Tegangan listrik	Dengan membaca kuat arus saat pengambilan sampel melalui <i>DC adjustable power supply</i>
6.	Volume pada reaktor	Pengukuran volume sampel yang diambil dengan <i>beaker glass</i> untuk memudahkan perhitungan <i>mass balance</i>

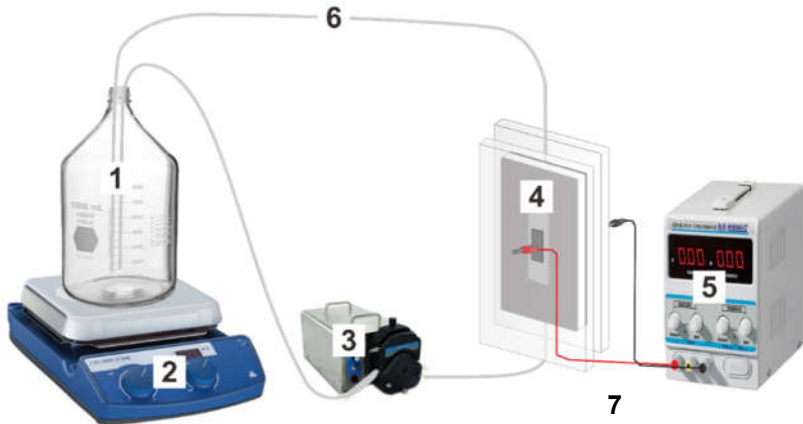
Sumber: APHA, AWWA, WPFC (2012)



Gambar 3. 5 Skema Reaktor Elektrolisis



Gambar 3. 6 Konfigurasi Sel Elektrolisis



- | | |
|--|-----------------------------|
| 1: Feed tank (botol kaca 1 L) | 5: DC power supply |
| 2: Magnetic stirrer | 6: Selang berdiameter 7 mm |
| 3: Pompa peristaltik 5 mL/detik | 7: Kabel dan crocodile clip |
| 4: Sel elektrolisis dengan elektroda platina | |

Gambar 3. 7 Reaktor Elektrolisis

3.9. Analisis Data

Penulisan secara deskriptif untuk menjelaskan penelitian akibat pengaruh parameter dan variabel yang telah ditentukan sebelumnya ditulis dalam bagian analisis data. Analisis data hasil penelitian meliputi beberapa hal berikut:

1. Hasil uji karakteristik dibandingkan dengan baku mutu Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.
2. Perhitungan nilai *recovery* alumina yang berhasil diperoleh dari berbagai variasi (pengaruh pH dan hasil *pre-treatment* penurunan kontaminan organik) dibandingkan guna menentukan kondisi optimum proses *recovery* disajikan dalam tabel dan grafik.
3. Perhitungan *mass balance* digunakan untuk mengetahui jumlah alumina terbanyak yang dapat di-*recovery* disajikan dalam tabel dan grafik.

4. Data hasil analisis kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn dibandingkan pada awal dan akhir elektrolisis, kemudian disajikan dalam tabel dan grafik.
5. Data hasil analisis parameter yang diukur pada proses elektrolisis (TDS, pH, konduktivitas, COD, dan tegangan listrik/voltase) disajikan pada tabel dan grafik.
6. Perhitungan efisiensi energi proses.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakterisasi Lumpur Alum PDAM

Karakterisasi lumpur alum PDAM bertujuan untuk mengetahui komposisi/kandungan awal lumpur yang akan diolah serta untuk mengetahui potensi *recovery* alumina dari lumpur alum. Selain itu karena kondisi eksisting lumpur alum di PDAM saat ini masih belum diolah dan langsung dibuang ke badan air atau ditampung di *sludge lagoon*, maka hasil karakterisasi lumpur alum perlu dibandingkan dengan baku mutu Lampiran XLVII Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Karakterisasi lumpur alum menggunakan lumpur basah kecuali untuk analisa kadar logam menggunakan lumpur yang telah dikeringkan. Hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1 Hasil Karakterisasi Lumpur Alum PDAM

Parameter	Konsentrasi	Baku Mutu	Satuan	Metode Pengujian
pH	6,70 ± 0,25	6,0 - 9,0	-	Voltmetri
<i>Total Dissolved Solids (TDS)</i>	222	4000	mg/L	Voltmetri
Kadar air	97,73	-	%	Gravimetri
<i>Total Solids (TS)</i>	2,21 ± 0,01	-	mg/L	Gravimetri
<i>Total Volatile Solids (TVS)</i>	1438,67 ± 26,63	-	mg/L	Gravimetri
<i>Total Fixed Solids (TFS)</i>	20,67 ± 0,09	-	mg/L	Gravimetri
<i>Total Suspended Solids (TSS)</i>	24056,82 ± 1147,44	400	mg/L	Gravimetri
Kadar Al	6736,3	-	mg/L	Spektrofotometri (ICP-OES)
Kadar Fe	1077,09	10	mg/L	Spektrofotometri (ICP-OES)

Parameter	Konsentrasi	Baku Mutu	Satuan	Metode Pengujian
Kadar Pb	0,1757	1	mg/L	Spektrofotometri (ICP-OES)
Kadar Cu	13,468	3	mg/L	Spektrofotometri (ICP-OES)
Kadar Cr	1,34	0,5	mg/L	Spektrofotometri (ICP-OES)
Kadar Zn	11,616	10	mg/L	Spektrofotometri (ICP-OES)
<i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	2166,67 ± 115,47	300	mg/L	<i>Close reflux-titrimetry</i>
<i>Biochemical Oxygen Demand (BOD₅)</i>	598,5 ± 34,55	150	mg/L	<i>5 days BOD test</i>
<i>Sludge Volume Index (SVI)</i>	40,08 ± 4,73	-	mL/g	<i>Settling test</i>
Alkalinitas	353,33 ± 25,66	-	mg/L HCO ₃	Voltmetri
Konduktivitas	825 ± 10,15	-	µS/cm	Titimetri
= Belum memenuhi baku mutu				

Karakterisasi lumpur alum PDAM dibagi menjadi dua jenis, yakni karakteristik fisik dan kimiawi. Karakteristik fisik terdiri atas parameter TVS, TFS, TSS, TS, TDS, SVI, dan kadar air. Karakteristik kimiawi terdiri atas parameter pH, alkalinitas, dan konduktivitas, kandungan organik (BOD dan COD), serta kandungan logam pada lumpur alum.

4.1.1. Karakteristik Fisik Lumpur Alum

Parameter-parameter dalam karakteristik lumpur alum perlu diukur untuk mengetahui mekanisme penyipaan filtrat yang akan digunakan untuk elektrolisis. Hasil pengukuran TDS dapat menunjukkan konsentrasi ion terlarut, garam anorganik, dan sebagian kecil senyawa organik (Rusydi, 2018). Konsentrasi TDS pada lumpur alum PDAM adalah 222 mg/L.

Pengukuran kadar air pada lumpur alum menggunakan metode gravimetri dan diperoleh hasil 97,73%. Menurut penelitian Pascal *et al.* (2016), kadar air lumpur akan mempengaruhi volumenya sehingga juga akan mempengaruhi efektivitas dan biaya operasional pengolahan lumpur. Oleh karena itu, kadar air (atau konsentrasi padatan) dari lumpur adalah parameter yang berdampak pada langkah-langkah dari keseluruhan pengolahan.

Menurut penelitian Yousuf (2013), *Sludge Volume Index* (SVI) adalah volume dalam mL yang memiliki kadar 1 gram suspensi setelah 30 menit pengendapan. Untuk menghitung SVI, harus diketahui terlebih dahulu konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) pada lumpur. Parameter SVI diukur dengan metode *settling-test* menggunakan alat *imhoff cone*. Diperoleh hasil SVI lumpur alum adalah $40,08 \pm 4,73$ mL/g.

Padatan (*Solids*) adalah sejumlah cairan atau campuran semi cair yang tertinggal pada sampel saat kadar air dihilangkan. Kadar padatan dalam air/lumpur dapat berpengaruh pada kandungan nutrisi, proses pengolahan, dan prosedur penanganannya (Hamilton dan Zhang, 2015). Pengukuran TFS, TVS, TSS, dan TS dilakukan berdasarkan metode penimbangan berat (gravimetri) dalam sampel lumpur alum. Berdasarkan Tabel 4. 1 kadar TSS pada lumpur alum adalah $24056,82 \pm 1147,44$ mg/L sementara sesuai dengan baku mutu pada Lampiran XLVII KepMenLH No. 5 tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, kadar TSS maksimum pada air limbah adalah 400 mg/L sehingga perlu dilakukan pengolahan terlebih dahulu sebelum dibuang ke badan air/sungai.

4.1.2. Karakteristik Kimiawi Lumpur Alum

Menurut penelitian Verlicchi dan Masotti (2001), pH atau derajat kesamaan lumpur alum hasil pengolahan air minum adalah 5,5 – 8,5. Nilai pH pada lumpur alum PDAM adalah $6,70 \pm 0,25$ sehingga Al berada dalam kelarutan tertentu yakni berupa $Al_2(OH)_2^{+4}$ (Lukasiewicz, 2016).

Nilai alkalinitas pada lumpur alum adalah $353,33 \pm 25,66$ mg/L HCO_3 . Alkalinitas adalah konsentrasi basa yang dapat dititrasi dalam air. Basa akan bereaksi untuk menetralkan ion hidrogen (H^+), misalnya dalam reaksi $H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$, OH^- (ion hidroksil) adalah basa. Beberapa zat dalam air umumnya bereaksi

dengan H⁺, seperti hidroksida, bikarbonat, karbonat, amonia, fosfat, dan asam organik (Boyd *et al.*, 2016).

Berdasarkan penelitian Hayashi (2013), konduktivitas adalah indikator adanya konduksi arus dalam larutan elektrolit (konsentrasi ion). Nilai konduktivitas lumpur alum PDAM adalah $825 \pm 10,15 \mu\text{S/cm}$.

4.1.3. Kandungan Organik pada Lumpur Alum

Parameter yang diuji untuk mengukur kandungan organik pada lumpur alum PDAM adalah COD dan BOD₅. Diperoleh kadar COD pada lumpur alum PDAM adalah $2166,67 \pm 115,47 \text{ mg/L}$ dan BOD₅ adalah $598,5 \pm 34,55 \text{ mg/L}$, sehingga diperoleh rasio BOD/COD lumpur adalah 0,28. Berdasarkan penelitian Murthy *et al.* (2011), limbah dengan rasio BOD/COD 0,15 hingga 0,3 mengandung senyawa organik rekalsitran yakni senyawa organik yang sulit diurai. Pengolahan dengan cara elektrokimia dapat meningkatkan rasio BOD/COD hingga 82,7%, hal ini dikarenakan terjadinya proses oksidasi bahan organik yang terjadi secara langsung pada permukaan anoda dan oksidasi tidak langsung di area sekitar permukaan anoda.

4.1.4. Kandungan Logam pada Lumpur Alum

Kandungan logam pada lumpur diuji dengan menggunakan alat *inductively coupled plasma - optical emission spectrometry (ICP-OES)*. Lumpur yang diuji dalam kondisi telah dikeringkan dengan oven 105°C. Diketahui kadar logam pada lumpur alum PDAM dengan parameter Al, Fe, Pb, Cr, Cu, Cr, dan Zn masing-masing adalah 6736,3; 1077,09; 0,1757; 13,468; 1,34; dan 11,616 mg/L. Kandungan logam yang tinggi ini berasal dari koagulan yang digunakan (aluminium sulfat) saat proses koagulasi dan flokulasi. Dimana pada proses tersebut terjadi pengikatan dan adsorpsi kontaminan organik, partikulat, koloid, dan zat sehingga menjadi flok aluminium hidroksida (Boaventura *et al.*, 2000). Untuk mengekstrak Al dari lumpur alum diperlukan metode khusus yakni dengan metode asidifikasi dan sentrifugasi.

4.2. Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian bertujuan untuk mendapatkan filtrat lumpur alum yang akan digunakan untuk elektrolisis. Filtrat lumpur

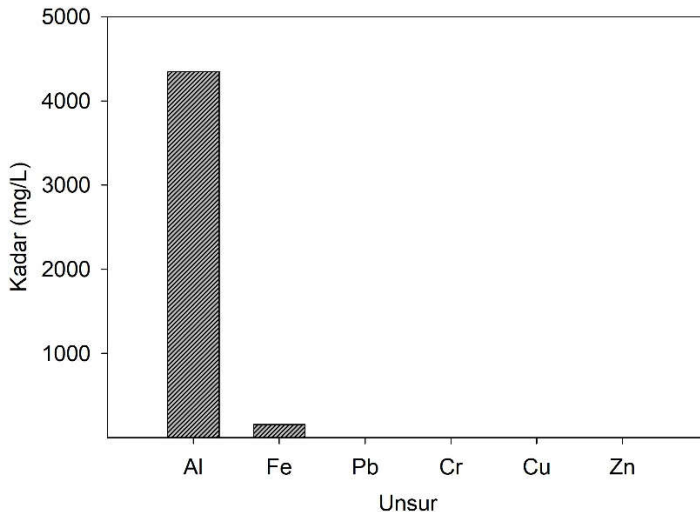
alum juga akan melalui proses *pre-treatment* untuk menurunkan kadar kontaminan organik (COD) dengan cara oksidasi. Dilakukan dua metode oksidasi pada filtrat lumpur alum, yakni oksidasi dengan penambahan H_2O_2 dan oksidasi dengan penambahan H_2O_2 serta pemaparan sinar UV 254 nm selama 2 jam. Kemudian dilakukan uji polarisasi untuk menentukan kuat arus optimum yang digunakan saat elektrolisis pada penelitian utama.

4.2.1. Pengeringan Lumpur Alum

Pengeringan lumpur alum bertujuan untuk memperoleh padatan lumpur alum dengan kadar *Solids* yang lebih banyak. Menurut penelitian Graham-Jones (2014), lumpur alum yang tidak melalui proses pengeringan hanya mengandung 1% *Solids* atau padatan, sementara setelah dikeringkan kadar padatannya akan meningkat hingga 20–50%. Melalui proses pengeringan, kandungan Al pada lumpur alum akan lebih mudah diekstraksi melalui proses asidifikasi dan sentrifugasi (Sengupta dan Prakash, 2002 dan Graham Jones, 2014). Lumpur alum basah membutuhkan waktu 24 jam hingga benar-benar kering apabila dipanaskan dalam suhu 105°C. Lumpur kering ini kemudian dihaluskan dengan mesin penghancur. Lumpur kering memiliki karakteristik fisik berwarna abu-abu kecoklatan dan tidak berbau.

4.2.2. Asidifikasi dan Sentrifugasi Lumpur Alum Kering

Proses asidifikasi bertujuan untuk mengekstrak Al pada lumpur kering. Berdasarkan penelitian Ayu (2018), pH optimum untuk mengekstrak Al dari lumpur alum adalah 2, dimana 94,8% Al dapat terekstraksi. Setelah asidifikasi, larutan lumpur alum dan H_2SO_4 disentrifugasi sehingga didapatkan filtrat dengan kandungan Al_2SO_4 pada supernatan/filtrat lumpur alum yang berwarna kecoklatan. Grafik kadar unsur yang terkandung pada filtrat lumpur alum setelah asidifikasi dan sentrifugasi dapat dilihat pada Gambar 4. 1.



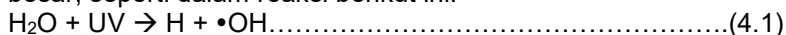
Gambar 4. 1 Kadar Logam dalam Filtrat Lumpur Alum

Gambar 4. 1 menunjukkan bahwa proses asidifikasi dan sentrifugasi menghasilkan filtrat lumpur alum dengan kadar Al yang tinggi, yakni 4346 mg/L. Asidifikasi juga dapat merubah bentuk Al menjadi ion Al^{3+} yang memiliki kelarutan tinggi pada pH 2-3 (Bahena *et al.*, 2002). Berdasarkan penelitian Sengupta dan Prakash (2002), selain Al logam-logam lain yang terkandung dalam lumpur alum juga dapat terekstraksi melalui proses asidifikasi. Seperti yang dapat dilihat dalam Gambar 4. 1 terdapat unsur Fe, Pb, Cu, Cr, dan Zn yang terekstrak dengan konsentrasi masing-masing adalah 156,1; 0,005673; 0,0146; 0,002; dan 0,0092 mg/L. Setelah proses asidifikasi dan sentrifugasi juga dilakukan pengukuran COD pada filtrat lumpur alum. Diperoleh hasil COD filtrat lumpur alum adalah $1733,333 \pm 230,940$ mg/L dan pH filtrat lumpur alum adalah 2.

4.2.3. Pre-Treatment untuk Penurunan Kontaminan Organik

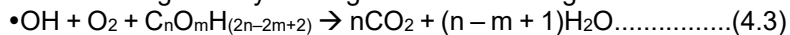
Penurunan kontaminan organik menggunakan dua metode oksidasi yakni dengan penambahan H_2O_2 dan penggabungan penambahan H_2O_2 serta pemaparan sinar UV 254 nm 15 watt.

Berdasarkan penelitian Collivignarelli *et al.* (2017), dalam proses oksidasi gabungan H₂O₂ dan sinar UV, radiasi UV dapat mengaktifkan H₂O₂, yang dapat mempercepat pembentukan radikal hidroksil (•OH) karena adanya reaksi fotolisis secara tidak langsung. Menurut penelitian Elfiana (2010), semakin banyak radikal hidroksil yang dihasilkan maka semakin cepat reaksi penurunan kontaminan organiknya dan efisiensinya semakin besar, seperti dalam reaksi berikut ini:



Pada reaksi 4.1 diketahui bahwa reaksi oksidasi dengan pemaparan sinar UV saja akan menghasilkan senyawa radikal hidroksil (•OH) yang lebih sedikit daripada dengan penambahan H₂O₂ seperti pada reaksi 4.2.

Pada penelitian Yuningrat *et al.* (2012) juga dijelaskan bahwa H₂O₂ merupakan oksidator yang kuat karena mengandung radikal hidroksil (•OH). Radikal hidroksil merupakan suatu atom/molekul/ion yang memiliki elektron tak berpasangan. Elektron yang tak berpasangan membuat radikal hidroksil sangat reaktif terhadap senyawa lain termasuk senyawa organik yang kompleks. Dengan adanya ikatan radikal hidroksil dan senyawa organik kompleks, maka akan terbentuk senyawa organik yang lebih sederhana ikatan atau unsur pembentuknya. Reaksi radikal hidroksil dengan senyawa organik adalah sebagai berikut:



Pada proses ini filtrat lumpur alum ditambahkan dengan H₂O₂ 30% sebanyak 200 mL dengan perbandingan [H₂O₂]/[COD] = 1/2. Kadar COD pada filtrat lumpur alum adalah 1733,333 ± 230,940 mg/L sehingga konsentrasi H₂O₂ yang ditambahkan adalah sebesar 866,666 mg/L yang setara dengan 68 mL H₂O₂ 30% yang dilarutkan dalam 200 mL aquades. Hasil penurunan kontaminan organik/COD dengan proses oksidasi dapat dilihat dalam Tabel 4. 2.

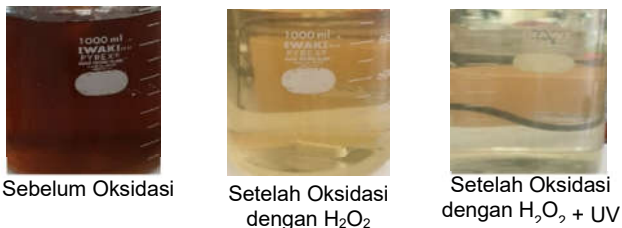
Tabel 4. 2 Hasil Penurunan COD dengan Proses Oksidasi

Jenis Oksidasi	[COD] Awal (mg/L)	[COD] Akhir (mg/L)	Persentase Penurunan COD
Penambahan H ₂ O ₂	1733,333 ± 230,940	733,333 ± 208,167	57,69%

Jenis Oksidasi	[COD] Awal (mg/L)	[COD] Akhir (mg/L)	Persentase Penurunan COD
Penambahan H ₂ O ₂ + pemaparan sinar UV 254 nm	1733,333 ± 230,940	433,333 ± 57,735	75%

Proses oksidasi dengan penambahan H₂O₂ dimulai dari pencampuran 800 mL filtrat lumpur alum dengan 200 mL larutan H₂O₂ yang kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 4 jam. Sementara untuk oksidasi dengan penambahan H₂O₂ dengan konsentrasi yang sama serta pemaparan sinar UV 254 nm juga dilakukan selama 4 jam.

Diperoleh kadar COD setelah proses oksidasi dengan H₂O₂ dan H₂O₂ serta UV masing-masing adalah 733,333 ± 208,167 dan 433,333 ± 57,735 mg/L, sehingga presentase penurunan COD/kontaminan organik pada filtrat lumpur alum melalui proses oksidasi dengan penambahan H₂O₂ adalah 57,69% dan oksidasi dengan penambahan H₂O₂ dan pemaparan sinar UV 240 nm adalah 75%. Setelah melalui proses oksidasi larutan berubah warna dari yang semula kecoklatan menjadi lebih jernih namun masih tampak sedikit kekuningan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4. 2, selain itu terdapat banyak gelembung udara di larutan. pH filtrat lumpur alum juga cenderung naik dari yang semula 2 menjadi 2,5. Hal ini dapat terjadi karena oksidasi dengan penambahan H₂O₂ dapat menghasilkan radikal hidroksil (•OH) (Wulandari dan Soedjono, 2017). Radikal hidroksil adalah salah satu jenis oksigen radikal yang merupakan bahan aktif untuk menghentikan aktivitas mikroba pada air elektrolisis yang bersifat asam atau *acid electrolyzed water (AEW)* (Mokudai *et al.*, 2012).



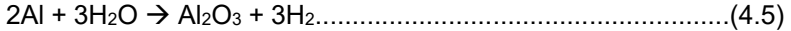
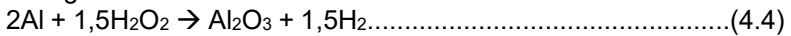
Gambar 4. 2 Perbedaan Warna Larutan Sebelum dan Sesudah Oksidasi

Pengukuran kadar Al juga dilakukan pada filtrat lumpur alum sebelum dan sesudah oksidasi. Kadar Al sebelum dan sesudah proses oksidasi dapat dilihat pada Tabel 4. 3.

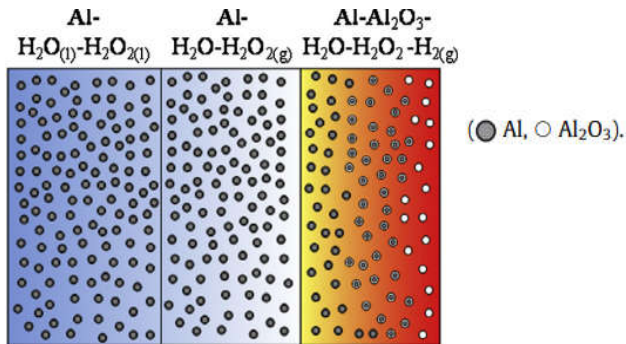
Tabel 4. 3 Konsentrasi Al Sebelum dan Sesudah Oksidasi

Filtrat	Konsentrasi Al	Persentase Al yang berkurang
Tanpa oksidasi	4346 mg/L	
Dengan oksidasi H ₂ O ₂ ([H ₂ O ₂]/[COD] = 1/2)	2437,86 mg/L	44%
Dengan oksidasi H ₂ O ₂ ([H ₂ O ₂]/[COD] = 1/2) + sinar UV (254 nm, 15 watt)	2770 mg/L	36,26%

Penurunan kadar Al pada filtrat yang telah dioksidasi dengan penambahan H₂O₂ dapat terjadi akibat berubahnya ion Al⁺ menjadi Al₂O₃ (alumina) yakni senyawa yang lebih kompleks (Sundaram dan Yang, 2014). Reaksi pembentukan alumina adalah sebagai berikut:



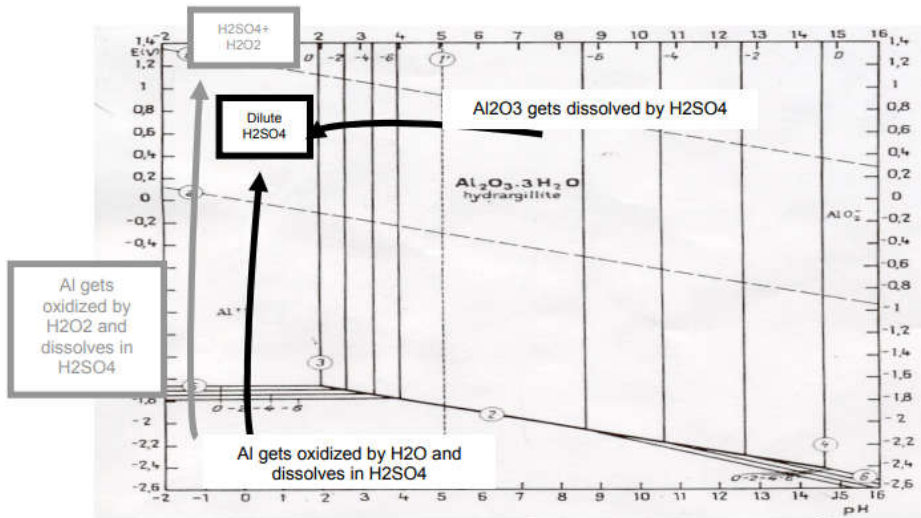
Ilustrasi perubahan ion Al ini dapat dilihat pada Gambar 4. 3.



Gambar 4. 3 Ion Al dan Alumina dalam Reaksi Al dengan H₂O₂
Sumber: (Sundaram dan Yang, 2014)

Sementara menurut penelitian Verhaveberke *et al.*, (2008), Alumina sebagai senyawa yang kompleks dalam larutan yang

mengandung H₂O₂ dapat bersifat pasif dan mudah larut. Kelarutan alumina dalam larutan yang mengandung H₂O₂ ini juga dipengaruhi oleh pH yang rendah (asam) akibat adanya H₂SO₄ dalam larutan, seperti yang dapat dilihat dalam Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Diagram Pourbaix Aluminium
Sumber: Verhaveberke et al., (2008)

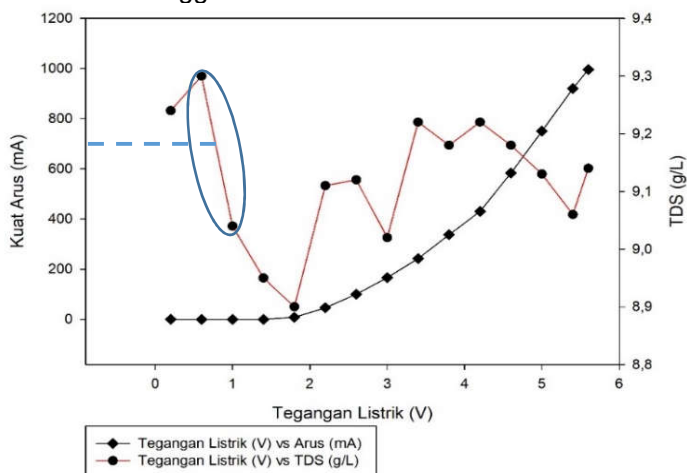
Selain itu konsentrasi Al yang menurun setelah oksidasi juga dapat disebabkan oleh reaksi pemecahan Al organik oleh radikal hidroksil yang terbentuk saat oksidasi (Sundaram dan Yang, 2014). Reaksi Al organik (Al-R) dengan radikal hidroksil adalah sebagai berikut:



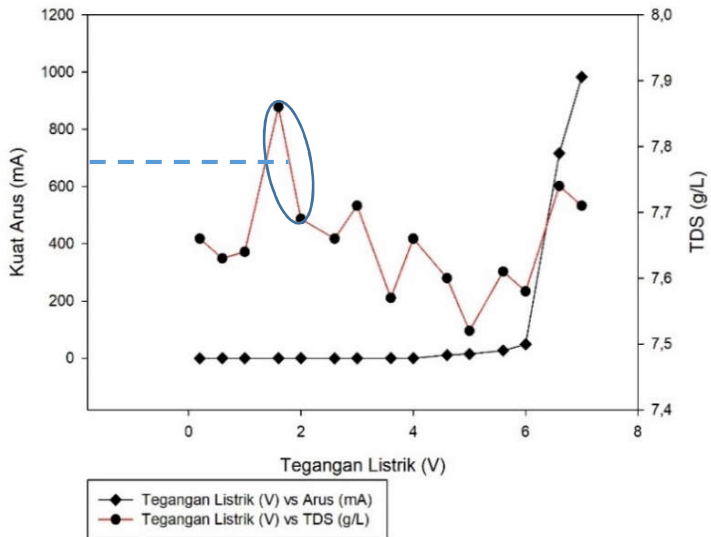
4.2.4. Uji Polarisis Elektroda Platina

Uji polarisis dilakukan selama empat kali untuk menentukan besarnya kuat arus (mA) yang digunakan pada saat elektrolisis. Uji polarisis pada elektroda platina berfungsi untuk membedakan sifat pada katoda dan anoda platina. Ketika

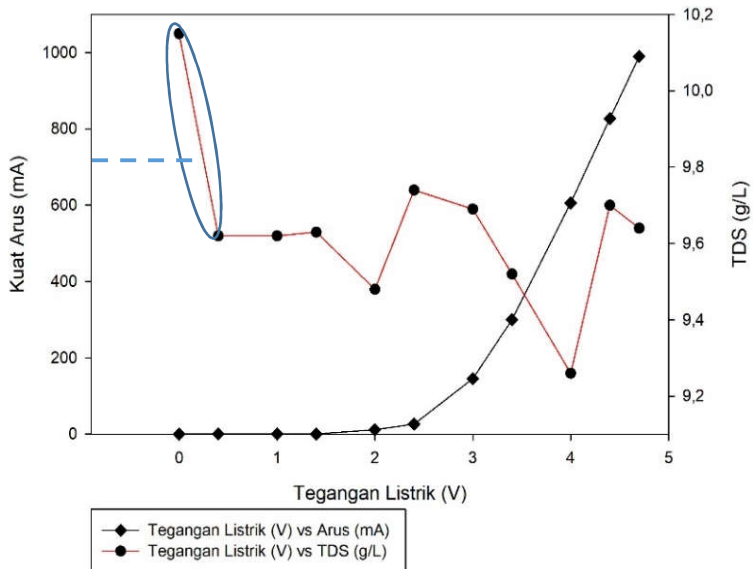
polarisasi katoda akan terpolarisasi secara positif dan anoda terpolarisasi secara negatif, sehingga gaya gerak listrik pada sel elektrolisis akan bergerak secara berlawanan. Gaya gerak listrik pada polarisasi ini adalah penyebab turunnya TDS secara drastis pada kekuatan arus tertentu (Maxwell, 2011). Uji polarisasi dilakukan pada kondisi sel elektrolisis dan filtrat yang sama pada saat elektrolisis. Polarisasi dimulai dari pengaturan arus pada 0,2 volt yang kemudian setiap 3 menit akan dinaikkan voltasenya sebesar 0,2 volt, polarisasi akan dihentikan saat mencapai volt maksimum ketika voltase tidak dapat dinaikkan lagi. Pada saat polarisasi juga diukur kadar TDS filtrat sehingga dapat diketahui pada arus berapa filtrat mengalami penurunan TDS yang signifikan. Berikut adalah grafik hasil uji polarisasi pada filtrat lumpur alum tanpa oksidasi dengan pH 3; 3,5; 4; dan filtrat dengan oksidasi pada pH 4. Hubungan antara voltase/tegangan listrik, kuat arus, dan TDS yang diperoleh dari hasil uji polarisasi dapat dilihat pada Gambar 4. 5 hingga Gambar 4. 8.



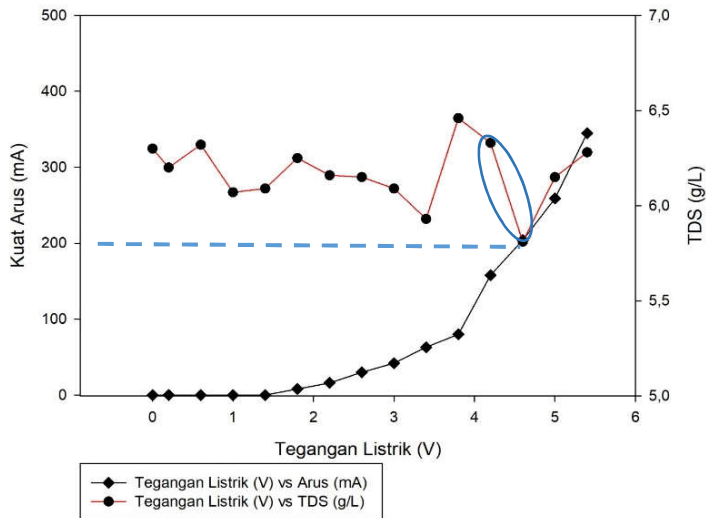
Gambar 4. 5 Hasil Uji Polarisasi pada Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3



Gambar 4. 6 Hasil Uji Polarisisasi pada Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3,5



Gambar 4. 7 Hasil Uji Polarisisasi pada Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4



Gambar 4. 8 Hasil Uji Polarisasi pada Filtrat dengan Oksidasi pH 4

Berdasarkan Gambar 4. 5 hingga Gambar 4. 8 diperoleh kuat arus optimum untuk proses elektrolisis selama 8 jam pada filtrat lumpur alum tanpa oksidasi adalah 700 mA. Hal ini dikarenakan saat uji polarisasi mencapai arus 700 mA pada larutan dengan pH 3; 3,5; dan 4 mengalami penurunan TDS yang signifikan. Pada Gambar 4. 8 menunjukkan bahwa uji polarisasi pada larutan yang telah dioksidasi mengalami penurunan TDS paling signifikan adalah pada arus 200 mA. Hal ini menandakan bahwa ion-ion terlarut pada filtrat lumpur alum sudah tereduksi pada katoda sehingga ion terlarut pada sel/reaktor elektrolisis menjadi berkurang. Pada uji polarisasi filtrat tanpa oksidasi pH 3; 3,5; dan 4, arus optimum yang digunakan untuk elektrolisis diperoleh pada voltase yang berbeda-beda. Untuk mengetahui tegangan listrik yang optimum untuk *recovery* alumina maka perlu dilakukan pengukuran potensial standar.

4.3. Penelitian Utama

Variasi yang dilakukan dalam elektrolisis adalah variasi jenis filtrat lumpur alum yang akan dielektrolisis. Derajat keasaman (pH)

filtrat divariasikan pada pH 3 dan 4. Variasi kondisi awal pH filtrat lumpur alum perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum untuk *recovery* alumina melalui proses elektrolisis (Isana, 2010).

Selain itu filtrat untuk elektrolisis terdiri dari tiga variasi, yakni filtrat lumpur alum tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H_2O_2 , dan filtrat dengan oksidasi H_2O_2 + pemaparan sinar UV 254 nm 15 watt. Tujuan dari variasi yang diterapkan adalah untuk mengetahui pengaruh pengondisian awal pH filtrat serta pengaruh *pre-treatment* untuk penurunan kontaminan organik dalam peningkatan efisiensi *recovery* alumina. Penyajian data seluruh parameter uji merupakan hasil rata-rata dari hasil analisis tiga kali pengujian dengan standar deviasi.

4.3.1. Hasil Proses Elektrolisis

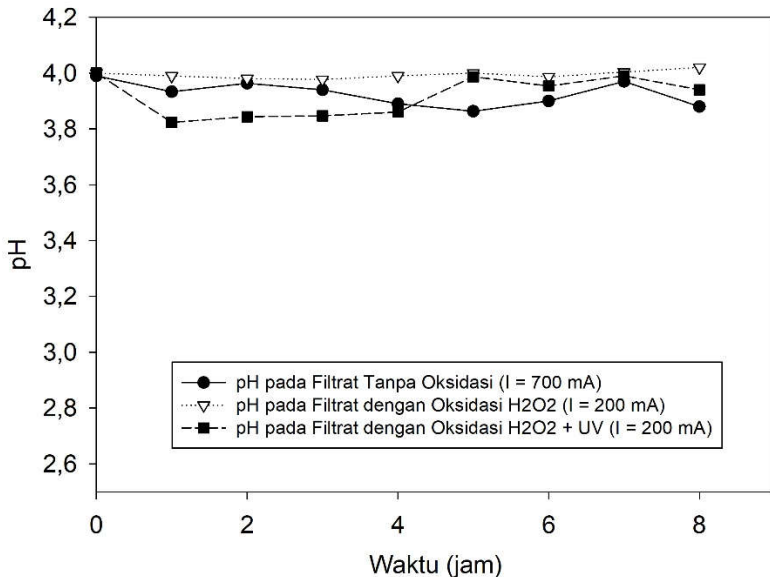
Pada saat proses elektrolisis terjadi perpindahan kation dan anion secara reduksi dan oksidasi dalam sel elektrolisis. Pada elektroda yang merupakan penghantar arus listrik terjadi perpindahan elektron antara elektroda dan zat-zat dalam filtrat sehingga menghasilkan reaksi pada permukaan elektroda (Dogra, 1990). Saat proses elektrolisis terjadi perpindahan kation seperti Al^{3+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{2+} , dan Zn^{2+} dari filtrat dalam reaktor/sel elektrolisis menuju elektroda platina yang dialiri listrik dengan muatan negatif (katoda). Perpindahan anion seperti SO_4^{2-} terjadi melalui sel elektrolisis menuju elektroda platina yang dialiri listrik dengan muatan positif (anoda). Akibat adanya perpindahan kation dan anion menyebabkan terjadinya penurunan konsentrasi TDS pada filtrat yang dielektrolisis.

4.3.2. Filtrat Lumpur Alum dengan pH 4

Dalam variasi pH 4 dilakukan proses elektrolisis pada filtrat lumpur alum tanpa oksidasi, dengan oksidasi penambahan H_2O_2 , dan oksidasi penambahan H_2O_2 serta pemaparan sinar UV 254 nm. pH filtrat tanpa oksidasi pada awalnya adalah 2 dan pH filtrat yang telah dioksidasi adalah 2,5. Larutan ini kemudian ditambahkan NaOH 4N hingga pH menjadi 4. Setelah penambahan NaOH 4N larutan berubah menjadi keruh dan terbentuk suspensi/endapan berupa koloid. Terbentuknya kekeruhan ini dapat terjadi akibat penurunan solubilitas Al yang

dapat terjadi apabila ion Al berada dalam kondisi pH 4 (Taghizadeh *et al.*, 2014).

Setiap satu jam selama proses elektrolisis (8 jam) dilakukan pengujian parameter pH, TDS, konduktivitas (DHL), tegangan listrik (Voltase), dan COD pada filtrat di *feed tank* dengan diambil sampel sebanyak 10 mL setiap jamnya. Selain itu di awal elektrolisis (t_0) sampel diambil sebanyak 50 mL untuk diuji kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn dengan alat ICP-OES. Fluktuasi nilai pH, TDS, DHL, Voltase, dan COD pada elektrolisis filtrat dengan pH 4 dapat dilihat pada Gambar 4. 9 hingga Gambar 4. 12. Pada awal dan akhir proses elektrolisis juga dilakukan pengeringan elektroda pada suhu 105°C dan penimbangan elektroda platina, hal ini bertujuan untuk mengetahui massa alumina yang dapat *recovery* di katoda. Hasil penimbangan berat elektroda dapat dilihat pada Tabel 4. 4.



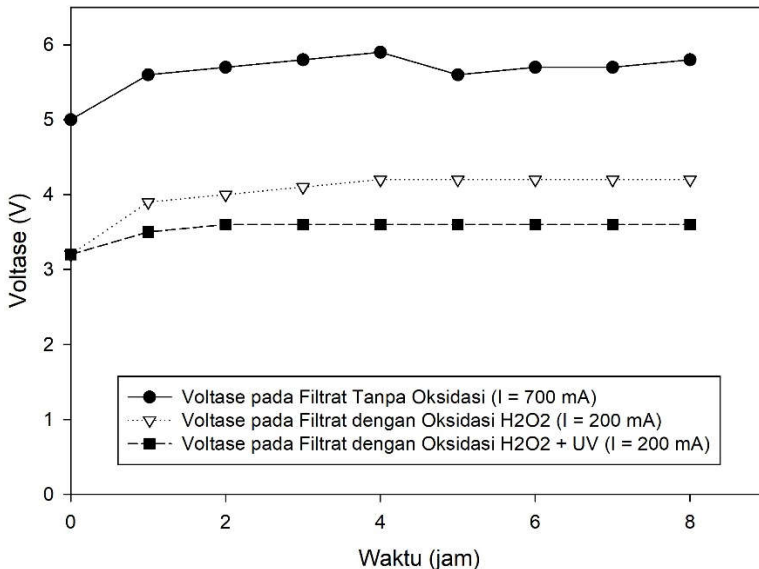
Gambar 4. 9 Fluktuasi pH pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4

Berdasarkan Gambar 4. 9 pH pada saat elektrolisis dengan kondisi pH awal 4 cenderung fluktuatif, namun pada filtrat tanpa

oksidasi dan oksidasi dengan $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{UV}$ pada awal (t_0) dan akhir (t_8) elektrolisis nilai pH relatif turun meskipun tidak terlalu signifikan. Pada filtrat tanpa oksidasi pH awal saat t_0 adalah 3,990 dan pada akhir elektrolisis (t_8) adalah 3,880, sehingga persentase penurunannya adalah 2,76%.

Sementara pada filtrat dengan oksidasi H_2O_2 pH larutan mengalami penurunan 1,5% dimana pada t_0 nilai pH larutan adalah 4 dan di akhir elektrolisis (t_8) nilai pH yakni 3,940. Sedangkan pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H_2O_2 pH selama proses cenderung stabil namun di akhir elektrolisis mengalami kenaikan sebesar 0,5% dimana pada saat t_0 pH larutan adalah 4 dan di akhir elektrolisis (t_8) nilai pH larutan adalah 4,020. Nilai pH terendah terjadi pada filtrat tanpa oksidasi.

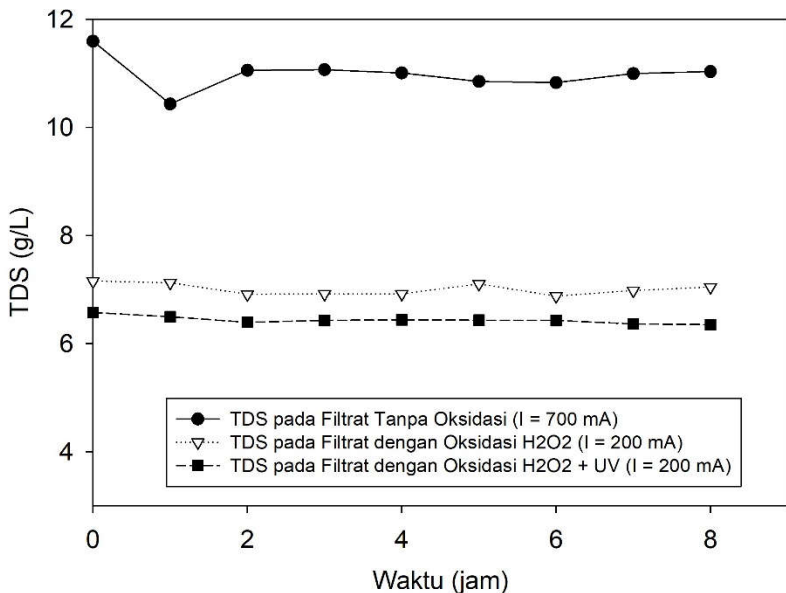
Terjadinya penurunan pH yang tidak signifikan dapat terjadi pada elektrolisis dengan elektroda inert. Hal ini karena elektrolisis dengan elektroda berjenis inert seperti platina dapat menghasilkan H^+ di anoda dan OH^- di katoda dengan proporsi yang sama kuatnya (Ciblak *et al.*, 2012).



Gambar 4. 10 Fluktuasi Tegangan Listrik pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4

Dari Gambar 4. 10 diketahui bahwa nilai voltase cenderung meningkat selama waktu elektrolisis (8 jam). Dari ketiga jenis filtrat yakni tanpa oksidasi, oksidasi dengan H_2O_2 , dan oksidasi $H_2O_2 + UV$ semuanya mengalami kenaikan voltase dimana nilai voltase di awal dan akhir elektrolisis masing-masing adalah 5,0 V dan 5,8; 3,2 dan 4,2; serta 3,2 dan 3,6. Dari Gambar 4. 10 diketahui peningkatan voltase tertinggi adalah pada elektrolisis dengan filtrat yang telah dioksidasi dengan H_2O_2 yakni sebesar 1 V.

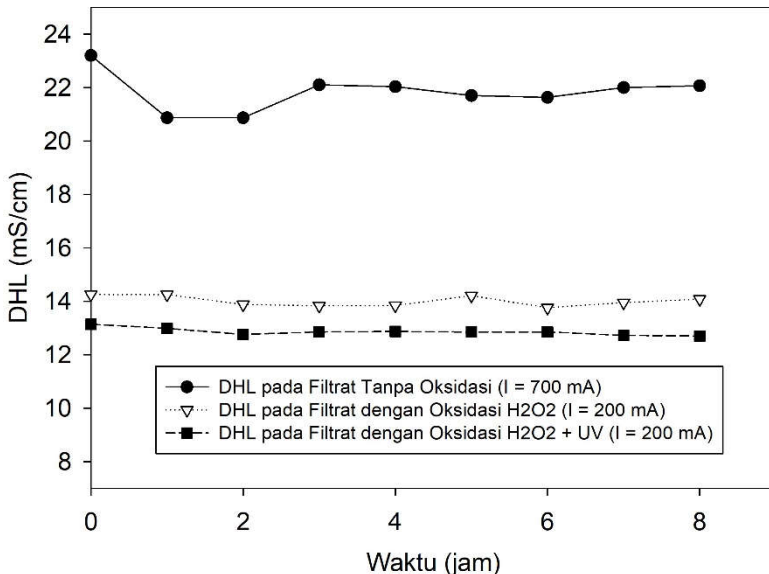
Menurut penelitian Opu (2015), meningkatnya tegangan listrik/voltase ini dapat terjadi karena larutan elektrolit yang kehilangan sifat kelistrikkannya (*ohmic*) akibat adanya hambatan listrik dari elektroda dan sel elektrolisis.



Gambar 4. 11 Fluktuasi TDS pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4

Pada Gambar 4. 11 terlihat bahwa konsentrasi TDS pada filtrat di awal dan akhir proses cenderung turun meskipun di tengah proses elektrolisis mengalami fluktuasi, namun nilai kenaikan dan penurunannya tidak terlalu signifikan. Pada filtrat tanpa oksidasi saat t_0 kadar TDS filtrat adalah 11,590 g/L dan saat t_8 adalah

11,030 g/L. Sementara untuk TDS pada filtrat dengan oksidasi H_2O_2 mengalami penurunan dari semula saat t_0 7,153 g/L dan di akhir elektrolisis (t_8) sebesar 7,043 g/L. Kadar TDS pada elektrolisis pada filtrat dengan oksidasi H_2O_2 dan UV saat t_0 adalah 6,537 g/L dan saat t_8 adalah 6,347 g/L. Sehingga penurunan kadar TDS paling tinggi pada elektrolisis dengan pH 4 adalah ketika filtrat tanpa oksidasi dimana penurunan kadar TDS dari t_0 hingga t_8 adalah 0,560 g/L atau 4,8%. Berdasarkan penelitian Abdallah *et al.* (2013), konsentrasi TDS yang tinggi menyebabkan arus listrik pada elektroda lebih baik dengan adanya penurunan tegangan listrik.

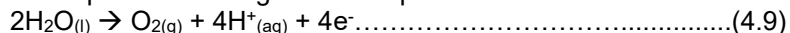


Gambar 4. 12 Fluktuasi Konduktivitas (DHL) pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 4

Berdasarkan Gambar 4. 12 terjadi penurunan konduktivitas terhadap semua variasi filtrat pada saat elektrolisis. Terjadi pula fluktuasi nilai konduktivitas pada saat proses elektrolisis, namun tidak terlalu signifikan kecuali pada filtrat tanpa oksidasi pada titik t_0 hingga t_1 . Nilai konduktivitas pada t_0 filtrat tanpa oksidasi adalah 23,200 mS/cm dan saat t_8 adalah 22,067 mS/cm. Filtrat dengan

oksidasi H₂O₂ juga mengalami penurunan nilai konduktivitas, yakni saat t₀ adalah 14,253 mS/cm dan saat t₈ yakni 14,080 mS/cm. Sementara untuk filtrat dengan oksidasi H₂O₂ dan UV nilai konduktivitas saat t₀ adalah 13,140 mS/cm dan 12,700 mS/cm saat t₈. Sehingga penurunan nilai konduktivitas paling tinggi saat elektrolisis dengan pH larutan 4 adalah pada filtrat tanpa oksidasi, dimana penurunannya dari t₀ hingga t₈ mencapai 1,133 mS/cm atau sama dengan 4,8%.

Konduktivitas larutan semakin menurun akibat adanya reaksi pada elektroda yang menghasilkan gas hidrogen dan oksigen. Berdasarkan penelitian Yuvaraj dan Santhanaraj (2014), reaksi pembentukan gas selama proses elektrolisis adalah:



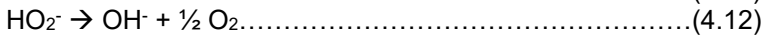
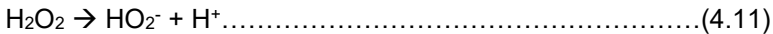
Reaksi (4.9) merupakan reaksi oksidasi yang terjadi pada anoda dan Reaksi (4.10) merupakan reaksi reduksi yang terjadi di katoda selama proses elektrolisis. Kedua reaksi ini dapat mengakibatkan penurunan konduktivitas larutan dan dapat mengurangi kuat arus yang mengalir pada filtrat saat elektrolisis sehingga sifat elektrolit larutan berkurang (Sequiera *et al.*, 2013).

Penurunan konsentrasi TDS dan konduktivitas pada filtrat yang dielektrolisis juga berpengaruh pada banyaknya kation yang terdeposisi/mengendap pada katoda. Hal ini dikarenakan ion-ion yang terukur sebagai TDS telah terdeposisi pada katoda. Selain itu di akhir proses elektrolisis dengan pH 4 terbentuk endapan berupa koloid di filtrat elektrolisis pada *feed tank*. Endapan koloid tersebut kemudian disentrifugasi dengan kecepatan 4000 rpm selama 20 menit dan dioven pada suhu 105°C sebelum ditimbang. Berat endapan di katoda, anoda, dan berat koloid yang didapatkan pada akhir elektrolisis dapat dilihat pada Tabel 4. 4.

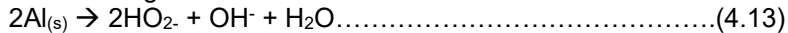
Tabel 4. 4 Berat Endapan di Elektroda pada Akhir Elektrolisis dengan pH 4

Jenis Larutan Elektrolit	Berat Endapan (g)		
	Katoda	Anoda	Feed Tank
Filtrat Tanpa Oksidasi	0,1971	0,0112	6,7692
Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂	0,0756	0,0118	3,3079
Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV	0,0318	0,0885	1,7995

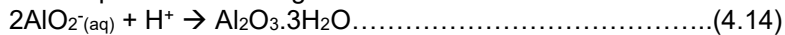
Dari Tabel 4. 4 diketahui bahwa berat katoda mengalami kenaikan paling besar saat elektrolisis dengan pH 4 pada elektrolisis dengan filtrat tanpa oksidasi yakni sebesar 0,1971 g. Sementara pada filtrat dengan oksidasi baik dengan penambahan H₂O₂ maupun H₂O₂ + UV endapan yang menempel di katoda cenderung lebih sedikit. Berdasarkan penelitian Batmanghelich (2016), hal ini dapat dikarenakan adanya penambahan H₂O₂ yang dapat menyebabkan kation Al bersifat pasif dan berubah menjadi senyawa aluminat (AlO₂⁻). Reaksi yang terbentuk adalah sebagai berikut:



Kemudian HO₂⁻ ini dapat bereaksi dengan kation Al membentuk reaksi sebagai berikut:



Sementara pembentukan aluminat dapat membentuk Al yang bersifat pasif sesuai dengan reaksi:



Setelah proses elektrolisis juga terjadi perubahan warna dan penambahan massa pada anoda. Perubahan karakteristik fisik katoda dan anoda pada akhir elektrolisis dengan pH 4 dapat dilihat pada Gambar 4. 13 – 4.18.



Gambar 4. 13 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4



Gambar 4. 14 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4



Gambar 4. 15 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ pH 4



Gambar 4. 16 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ pH 4



Gambar 4. 17 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ + UV pH 4



Gambar 4. 18 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ + UV pH 4

Pada Gambar 4. 14 dan 4. 16 terlihat anoda Pt mengalami perubahan warna menjadi kecoklatan. Sementara pada Gambar 4.18 terlihat anoda Pt berubah warna menjadi abu-abu kehitaman. Menurut penelitian Asgharyan *et al.* (2018), perubahan warna pada anoda dapat terjadi akibat adanya reaksi asam humat atau asam fulvat yang teroksidasi oleh anoda Pt. Asam humat dapat terikat dan membentuk zat kompleks dalam ion logam serta menghasilkan bau dan warna pada filtrat. Reaksi oksidasi anoda Pt yang dapat mengikat asam humat menurut penelitian Asgharyan *et al.* (2018) adalah sebagai berikut:



Proses elektrolisis dengan elektroda platina juga mampu menurunkan kadar COD pada filtrat. Hasil pengukuran COD tiap jam pada proses elektrolisis pH 4 dapat dilihat dalam Tabel 4. 5.

Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran [COD] Selama Proses Elektrolisis pH 4

Waktu (jam)	Konsentrasi COD (mg/L)		
	Filtrat Tanpa Oksidasi	Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂	Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV
0	1440	800	440
1	1540	840	410
2	1950	1200	330
3	2160	180	610
4	1320	280	440
5	1880	250	360
6	1570	270	320
7	1540	160	360

Waktu (jam)	Konsentrasi COD (mg/L)		
	Filtrat Tanpa Oksidasi	Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂	Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV
8	1060	240	160
Persentase Penurunan Maksimum	50,9%	86,7%	73,8%

Dari Tabel 4. 5 dapat diketahui bahwa persentase penurunan COD tertinggi adalah saat proses elektrolisis pada filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pada pH 4 dan kuat arus 200 mA dimana penurunan COD mencapai 86,7%. Menurut penelitian Ghimire *et al.* (2019), penurunan konsentrasi COD pada proses elektrokimia dapat terjadi akibat adanya proses oksidasi anodik secara langsung maupun tidak langsung. Oksidasi secara langsung terjadi pada permukaan anoda melalui radikal hidroksil yang teradsorpsi secara fisik, yang menghasilkan karbon dioksida sebagai produk akhir. Sementara oksidasi secara tidak langsung terjadi akibat adanya klorin dan hipoklorit yang dihasilkan secara anodik. Klorin dan hipoklorit ini berperan sebagai agen pengoksidasi untuk dekomposisi organik dengan adanya ion klorida.

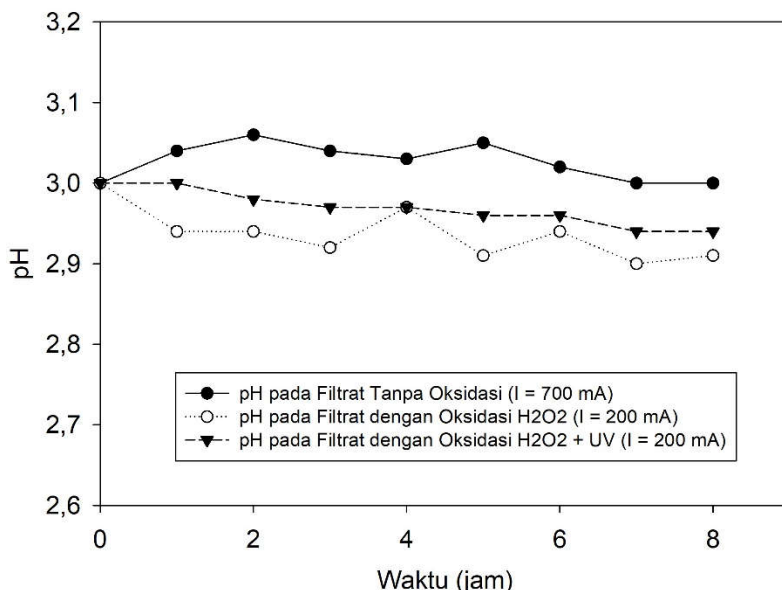
Konsentrasi COD di tiap jam selama proses elektrolisis mengalami fluktuasi. Pada filtrat tanpa oksidasi pH 4 konsentrasi COD tertinggi (2160 mg/L) dan terendah (1060 mg/L) terjadi setelah 3 jam dan 8 jam proses elektrolisis. Elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH 4 menghasilkan konsentrasi COD tertinggi (1200 mg/L) setelah 2 jam proses dan konsentrasi COD terendah (160 mg/L) pada jam ke-7. Sementara elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV pH 4 konsentrasi COD tertinggi (610 mg/L) terjadi setelah 3 jam proses dan konsentrasi COD terendah (160 mg/L) terjadi setelah 8 jam proses. Fluktuasi konsentrasi COD dapat terjadi karena adanya senyawa natrium sulfit, natrium sulfida, dan besi sulfat yang terukur sebagai COD (Yong, 2017).

4.3.3. Filtrat Lumpur Alum dengan pH 3

Proses elektrolisis dengan pH 3 juga dilakukan pada filtrat lumpur alum tanpa oksidasi, dengan oksidasi penambahan H₂O₂, dan oksidasi penambahan H₂O₂ serta pemaparan sinar UV 254

nm. Sama halnya dengan elektrolisis pada filtrat dengan pH 4, penambahan NaOH 4N dilakukan untuk mengubah pH filtrat dari 2 dan 2,5 menjadi 3. Setelah ditambahkan NaOH 4 N tidak terlihat perubahan yang signifikan pada ketiga jenis filtrat, hal ini berbeda dengan filtrat pada pH 4 yang berubah menjadi keruh dan membentuk endapan/koloid.

Fluktuasi nilai pH, TDS, tegangan listrik (Voltase), konduktivitas (DHL), dan COD pada elektrolisis filtrat dengan pH 3 dapat dilihat pada Gambar 4.19 hingga Gambar 4. 22. Pada awal dan akhir proses elektrolisis juga dilakukan pengovenan dan penimbangan elektroda platina, hal ini bertujuan untuk mengetahui massa alumina yang dapat *recovery* di katoda. Hasil penimbangan berat elektroda dapat dilihat pada Tabel 4. 6.

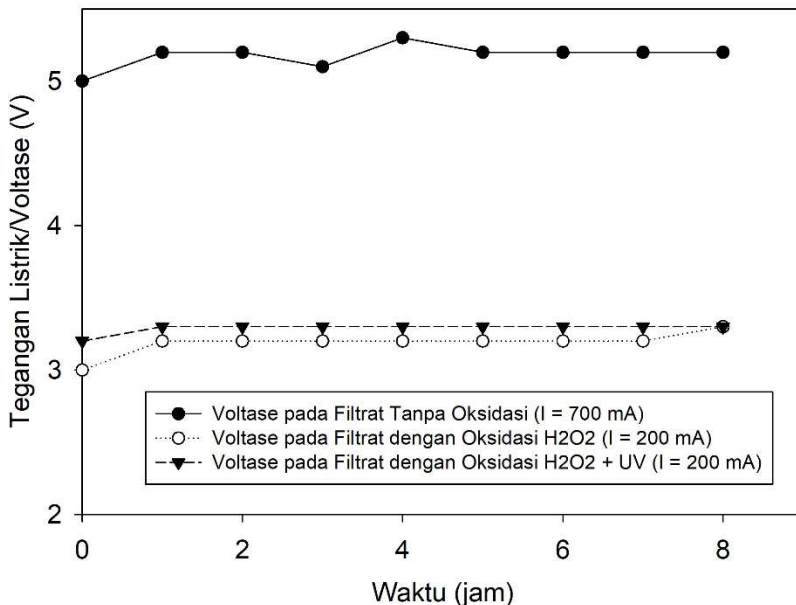
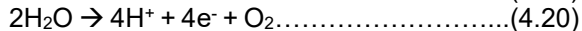


Gambar 4. 19 Fluktuasi pH pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3

Dari Gambar 4. 19 diketahui bahwa elektrolisis dengan pH 3 mengalami fluktuasi nilai pH yang cenderung turun namun tidak terlalu signifikan. Pada filtrat tanpa oksidasi pH relatif tetap meski

saat proses elektrolisis mengalami sedikit peningkatan. pH di awal elektrolisis filtrat tanpa oksidasi di awal dan akhir proses adalah 3.

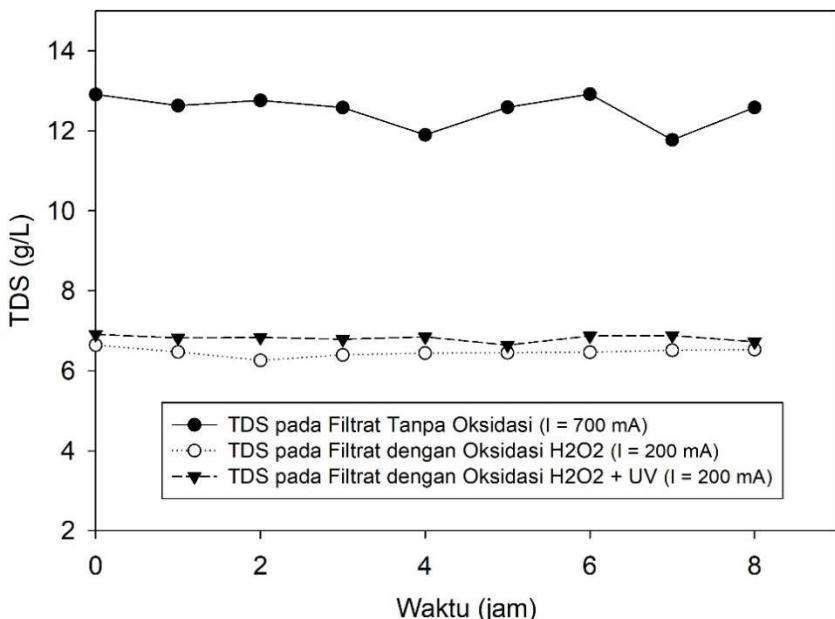
Filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH awal dan akhir masing-masing adalah 3,01 dan 2,91. Sementara untu filtrat dengan oksidasi H₂O₂ serta pemaparan sinar UV 254 nm di awal dan akhir elektrolisis masing-masing adalah 3 dan 2,940. Penurunan pH paling tinggi yakni pada saat elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ dimana penurunan pH mencapai 0,1. Penurunan pH dapat terjadi akibat reaksi pelepasan OH⁻ dan pembentukan asam saat elektrolisis seperti sebagai berikut:



Gambar 4. 20 Fluktuasi Tegangan Listrik pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3

Dari Gambar 4. 20 diketahui bahwa pada elektrolisis dengan pH 3 terjadi kenaikan voltase baik pada filtrat tanpa oksidasi

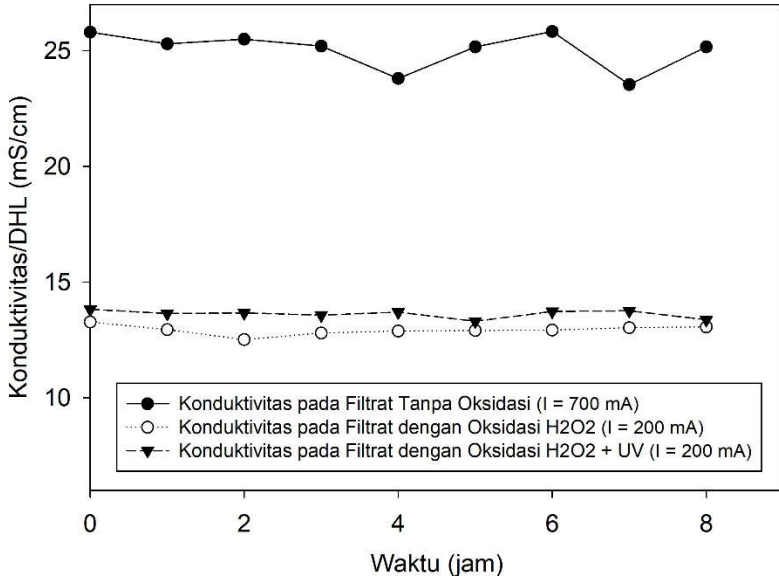
maupun filtrat yang telah dioksidasi dengan H_2O_2 . Pada filtrat tanpa oksidasi voltase awal adalah 5 V dan di akhir adalah 5,2 V. Pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H_2O_2 tegangan listrik awal dan akhir masing-masing adalah 3 V dan 3,3 V. Sementara pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H_2O_2 dan UV tegangan listrik juga cenderung naik, dimana pada t0 adalah 3,2 V dan di akhir adalah 3,3 V. Peningkatan voltase ini dapat terjadi karena adanya tegangan berlebih akibat reaksi terbentuknya gas oksigen dan hidrogen (Opu, 2015).



Gambar 4. 21 Fluktuasi TDS pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3

Gambar 4. 21 menunjukkan bahwa pada elektrolisis dengan pH 3 terjadi penurunan TDS baik pada filtrat tanpa oksidasi maupun filtrat yang telah dioksidasi dengan H_2O_2 . Pada filtrat tanpa oksidasi TDS awal adalah 13,147 g/L dan di akhir adalah 11,803 g/L. Pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H_2O_2 TDS awal dan akhir masing-masing adalah 6,640 g/L dan 6,530 g/L. Sementara pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H_2O_2 dan UV

konsentrasi TDS saat t0 adalah 6,910 g/L dan saat t8 adalah 6,723 g/L.



Gambar 4. 22 Fluktuasi Konduktivitas (DHL) pada Filtrat Elektrolisis dengan pH 3

Gambar 4. 22 menunjukkan bahwa konduktivitas (DHL) larutan cenderung turun pada ketiga jenis filtrat. Pada filtrat tanpa oksidasi DHL awal adalah 26,30 mS/cm dan di akhir adalah 23,60 mS/cm. Pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ konduktivitas larutan di awal dan akhir proses masing-masing adalah 13,27 mS/cm dan 13,06 mS/cm. Sedangkan pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ dan UV konduktivitas larutan juga menurun, dimana saat t0 konduktivitas larutan adalah 13,82 mS/cm dan saat t8 adalah 13,37 mS/cm.

Sementara untuk berat endapan baik di katoda maupun di anoda pada akhir proses elektrolisis dapat dilihat pada Tabel 4. 6. Berat endapan ini diukur dengan terlebih dahulu mengeringkan katoda dan anoda dalam oven bersuhu 105°C selama 1 jam, kemudian ditimbang dengan neraca analitik sehingga diketahui

berat awal dan akhir elektroda yang menghasilkan data berat endapan.

Tabel 4. 6 Berat Endapan di Elektroda pada Akhir Elektrolisis dengan pH 3

Jenis Larutan Elektrolit	Berat Endapan (g)	
	Katoda	Anoda
Filtrat Tanpa Oksidasi	0,3493	0
Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂	0,1538	0,0015
Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV	0,1281	0

Dari tabel 4. 6 diketahui bahwa filtrat tanpa oksidasi menghasilkan berat endapan yang lebih banyak dibandingkan pada elektrolisis dengan filtrat dengan oksidasi. Pada ketiga proses elektrolisis juga tidak terjadi perubahan warna pada anoda meskipun saat elektrolisis dengan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ (pH 3) terjadi penambahan massa yang relatif rendah pada anoda (ada endapan/anion yang menempel). Perubahan karakteristik fisik pada katoda dan anoda setelah elektrolisis pada filtrat dengan pH 3 dapat dilihat dalam Gambar 4. 23 hingga 4. 28.



Gambar 4. 23 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3



Gambar 4. 24 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3



Gambar 4. 25 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ pH 3



Gambar 4. 26 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ pH 3

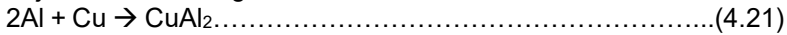


Gambar 4. 27 Katoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ + UV pH 3

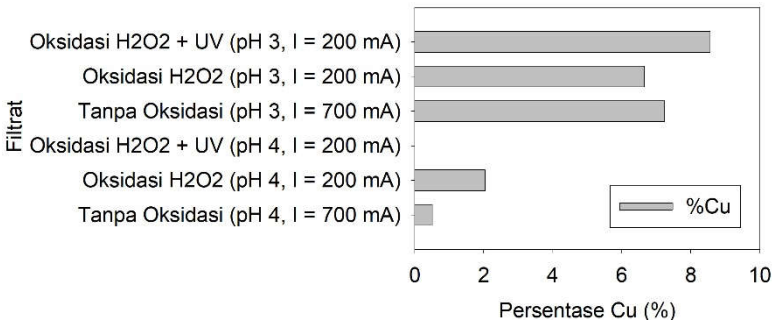


Gambar 4. 28 Anoda Pt Setelah Elektrolisis Filtrat dengan Oksidasi H₂O₂ + UV pH 3

Pada Gambar 4. 25 dan 4. 27 terlihat endapan di katoda berwarna putih dan sedikit berwarna abu-abu atau kehitaman. Karakteristik fisik endapan tersebut, dapat mengindikasikan adanya kation Cu yang terdeposisi di katoda sehingga membentuk endapan CuAl₂. Senyawa CuAl₂ dapat terbentuk di katoda dengan munculnya warna kelabu kehitam-hitaman (Eva, 2012). Menurut penelitian Kim *et al.* (2019), reaksi pembentukan CuAl₂ yang dapat terjadi adalah sebagai berikut:



Berdasarkan hasil uji logam dengan alat ICP-OES juga diketahui bahwa konsentrasi Cu pada endapan di katoda setelah elektrolisis dengan pH 3 lebih tinggi daripada pH 4. Perbandingan persentase kadar Cu pada endapan di katoda tiap variasi elektrolisis dapat dilihat dalam Gambar 4. 29.



Gambar 4. 29 Persentase Cu pada Endapan di Katoda

Selama proses elektrolisis dengan pH 3 juga terjadi fluktuasi konsentrasi COD. Konsentrasi COD pada filtrat pH 3 selama proses elektrolisis tiap jamnya dapat dilihat dalam Tabel 4. 7.

Tabel 4. 7 Hasil Pengukuran [COD] Selama Proses Elektrolisis pH 3

Waktu/t (jam)	Konsentrasi COD (mg/L)		
	Filtrat Tanpa Oksidasi	Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂	Filtrat dengan Oksidasi H ₂ O ₂ + UV
0	1690	180	110
1	1800	480	180
2	1810	350	220
3	2060	190	120
4	1860	140	60
5	1890	60	60
6	1940	190	60
7	2030	290	40
8	1430	40	20
Persentase Penurunan Maksimum	31%	92%	91%

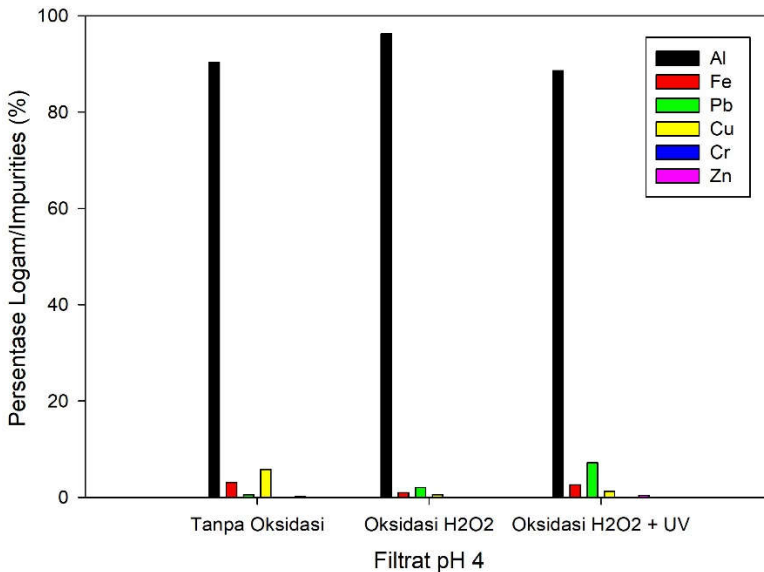
Persentase penurunan konsentrasi COD paling tinggi adalah pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH 3, yakni mencapai 92%. Konsentrasi COD pada tiap jamnya selama proses elektrolisis mengalami fluktuasi. Pada filtrat tanpa oksidasi pH 3 konsentrasi COD tertinggi (2060 mg/L) adalah pada t₃ dan konsentrasi COD terendah (1430 mg/L) adalah pada t₈. Konsentrasi COD filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH 3 paling tinggi (480 mg/L) adalah pada t₂ dan paling rendah (40 mg/L) pada t₈. Sementara pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV konsentrasi COD tertinggi (220 mg/L) adalah pada t₂ dan terendah (20 mg/L) pada t₈. Menurut penelitian Boyles (1997), beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil analisis COD adalah pengoksidasian oleh K₂Cr₂O₇ yang kurang sempurna dan adanya gangguan polutan inorganik seperti ion klorida.

4.4. Persentase Komposisi Logam

Elektrolisis adalah sebuah proses yang diharapkan dapat mendeposisi ion-ion aluminium yang terlarut dalam filtrat sehingga terbentuk endapan atau padatan berupa alumina di katoda.

Berdasarkan penelitian Saidin *et al.* (2011), semua jenis kation dapat terdeposisi pada katoda dengan adanya kuat arus yang mengalir serta proses difusi yang menyebabkan kation terhidrasi dan membentuk senyawa netral di katoda. Kation-kation selain Al yang mengendap di katoda disebut ion pengotor.

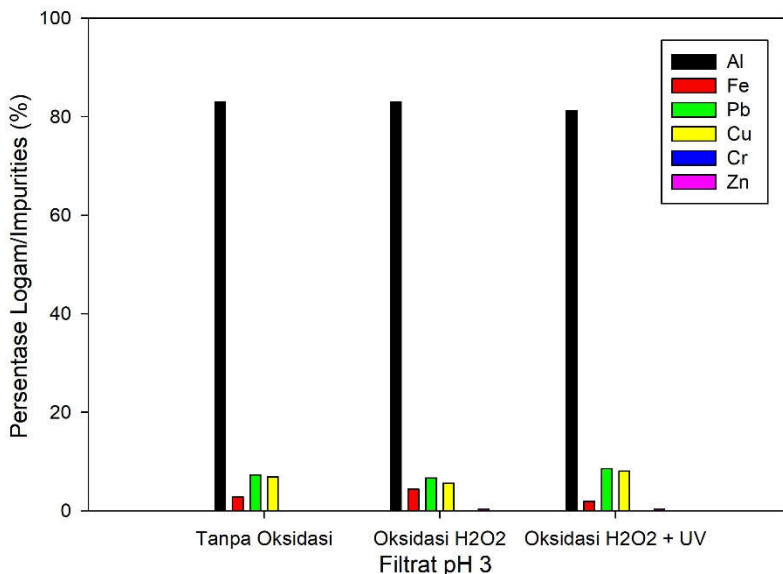
Pada penelitian ini, katoda Pt yang telah menangkap ion-ion hasil proses oksidasi selama elektrolisis dikeringkan pada suhu 105°C. Setelah kering endapan tersebut dilarutkan dalam HNO₃ pH 2 sebanyak 50 mL untuk diuji kadar Al, Fe, Pb, Cu, Cr, dan Zn dengan alat ICP-OES. Keberhasilan proses *recovery* alumina dengan elektrolisis diperhitungkan dengan persentase Al yang didapatkan. Persentase kadar Al dan logam pengotor lainnya yang terkandung pada endapan di katoda saat akhir proses elektrolisis dapat dilihat pada Gambar 4. 30 dan Gambar 4. 31.



Gambar 4. 30 Kandungan Logam pada Endapan di Katoda Elektrolisis pH 4

Pada Gambar 4. 30, massa endapan di katoda yang diperoleh setelah elektrolisis dengan pH 4 pada filtrat tanpa

oksidasi adalah 0,1971 g. Persentase perbandingan kadar logam Al, Zn, Cu, Fe, Cr, dan Pb pada endapan tersebut masing-masing adalah 90,38%; 3,11%; 0,51%; 5,78%; 0,0074%; dan 0,18%. Pada filtrat dengan oksidasi H₂O₂ diperoleh 0,0756 g endapan di katoda dengan persentase perbandingan kadar logam Al, Zn, Cu, Fe, Cr, dan Pb masing-masing adalah 96,24%; 0,99%; 2,05%; 0,56%; 0,02%; dan 0,14%. Sementara pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ serta pemaparan sinar UV 254 nm diperoleh massa endapan di katoda sebesar 0,0318 g. Persentase perbandingan kadar logam Al, Zn, Cu, Fe, Cr, dan Pb pada endapan tersebut masing-masing adalah 88,6%; 2,59%; 7,17%; 1,22%; 0,011%; dan 0,40%. Rasio Al dibanding logam pengotor lainnya (*impurities*) tertinggi ada pada elektrolisis dengan filtrat tanpa oksidasi dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂. Variasi lain yang dilakukan adalah elektrolisis dengan pH 3. Rasio Al dibanding *impurities* pada elektrolisis dengan pH 3 dapat dilihat pada Gambar 4. 31.



Gambar 4. 31 Kandungan Logam pada Endapan di Katoda Elektrolisis pH 3

Pada Gambar 4. 31, massa endapan di katoda yang diperoleh setelah elektrolisis dengan pH 3 pada filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H_2O_2 , dan filtrat dengan oksidasi H_2O_2 serta pemaparan sinar UV 254 nm masing-masing adalah 0,3493; 0,1538; dan 0,1281 g. Hasil pengukuran kadar logam dengan ICP diketahui dalam satuan mg/L kemudian dikonversi menjadi satuan g dan dibandingkan dengan seluruh massa logam di endapan yang menempel pada katoda.

Diperoleh persentase perbandingan kadar logam Al, Zn, Cu, Fe, Cr, dan Pb pada endapan di katoda saat filtrat tanpa oksidasi pH 3 masing-masing adalah 83%; 2,78%; 7,24%; 6,87%; 0,05%; dan 0,05%. Kemudian pada filtrat dengan oksidasi H_2O_2 persentase perbandingan kadar logam Al, Zn, Cu, Fe, Cr, dan Pb pada endapan yang menempel di katoda masing-masing adalah 83%; 4,39%; 6,66%; 5,60%; 0,02%; dan 0,35%. Sementara pada filtrat dengan oksidasi H_2O_2 + UV 254 nm persentase perbandingan kadar logam Al, Zn, Cu, Fe, Cr, dan Pb pada endapan yang menempel di katoda masing-masing adalah 81,19%; 1,87%; 8,57%; 8,02%; 0,03%; dan 0,33%. Persentase logam Al dibanding *impurities* paling tinggi adalah pada endapan di katoda yang diperoleh dari elektrolisis filtrat tanpa oksidasi dan filtrat dengan oksidasi H_2O_2 .

Adanya kandungan logam pengotor selain Al yang terbentuk sebagai endapan di katoda menunjukkan bahwa proses elektrolisis tidak dapat menyeleksi jenis kation yang terdeposisi di katoda. Gambar 4. 30 dan Gambar 4. 31 menunjukkan bahwa persentase Al tertinggi terdapat pada endapan di katoda setelah elektrolisis filtrat dengan oksidasi H_2O_2 pH 3, yakni sebesar 96,24%.

Pada elektrolisis dengan pH 4 juga diketahui bahwa persentase logam pengotor tertinggi adalah 5,80% logam Fe yang terbentuk pada endapan di katoda setelah elektrolisis filtrat tanpa oksidasi. Sementara pada elektrolisis dengan pH 3 diketahui jenis konsentrasi logam pengotor dengan persentase tertinggi adalah logam Cu. Persentase logam Cu pada endapan di katoda setelah elektrolisis dengan pH 3 tertinggi adalah pada filtrat dengan oksidasi H_2O_2 + UV yakni sebesar 8,57%. Hal ini juga terlihat dari warna endapan di katoda yang kehitaman setelah elektrolisis

dengan pH 3. Warna kehitaman ini mengindikasikan adanya Cu yang terbentuk sebagai endapan $CuAl_2$.

4.5. Perhitungan Kesetimbangan Massa

Keberhasilan proses elektrolisis untuk *recovery* alumina ditentukan dari massa Al yang terdeposisi di katoda dalam bentuk endapan. Analisa kesetimbangan massa aluminium dalam penelitian ini ditinjau dari massa Al yang terhitung (g). Massa Al terdiri dari massa Al di filtrat sebelum elektrolisis (t_0), endapan di katoda, endapan di *feed tank*, dan filtrat setelah elektrolisis (t_8). Perhitungan massa Al berdasarkan persamaan 4.22.

$$Al_0 = Al_8 + Al_k + Al_{ft} + Al_{lo} \dots \dots \dots (4.22)$$

Al_0 = konsentrasi Al awal (mg/L) x volume elektrolit (L)

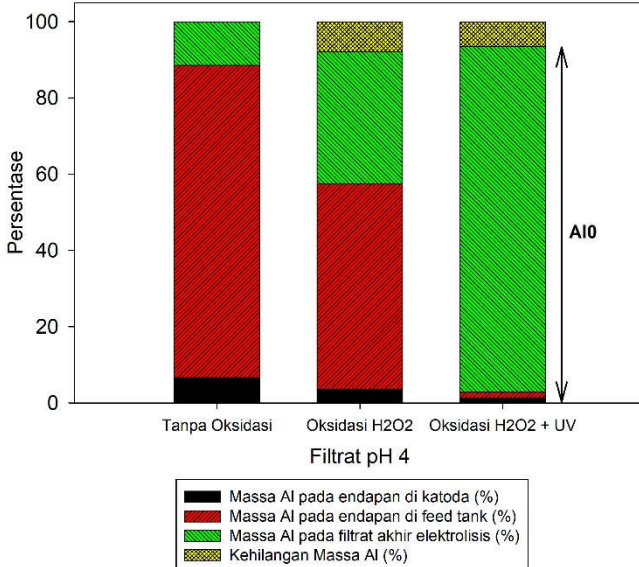
Al_8 = konsentrasi Al akhir (mg/L) x volume elektrolit (L)

Al_k = %Al x berat endapan di katoda (g)

Al_{ft} = %Al x berat endapan di *feed tank* x (Ar Al/Mr $Al(OH)_3$) (g)

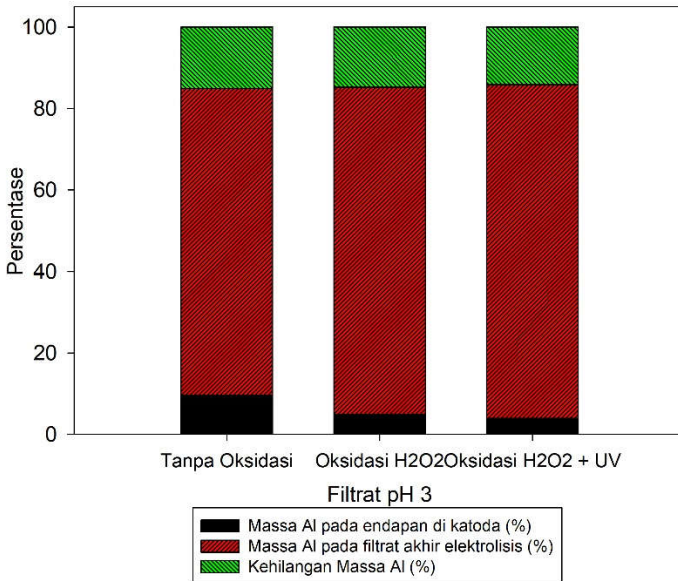
Al_{lo} = kehilangan massa Al ($Al_{lo} = Al_0 - (Al_8 + Al_k + Al_{ft})$) (g)

Persentase Al pada proses elektrolisis pH 4 dan pH 3 dapat dilihat pada Gambar 4. 32 dan Gambar 4. 33.



Gambar 4. 32 Kesetimbangan Massa Al pada Elektrolisis pH 4

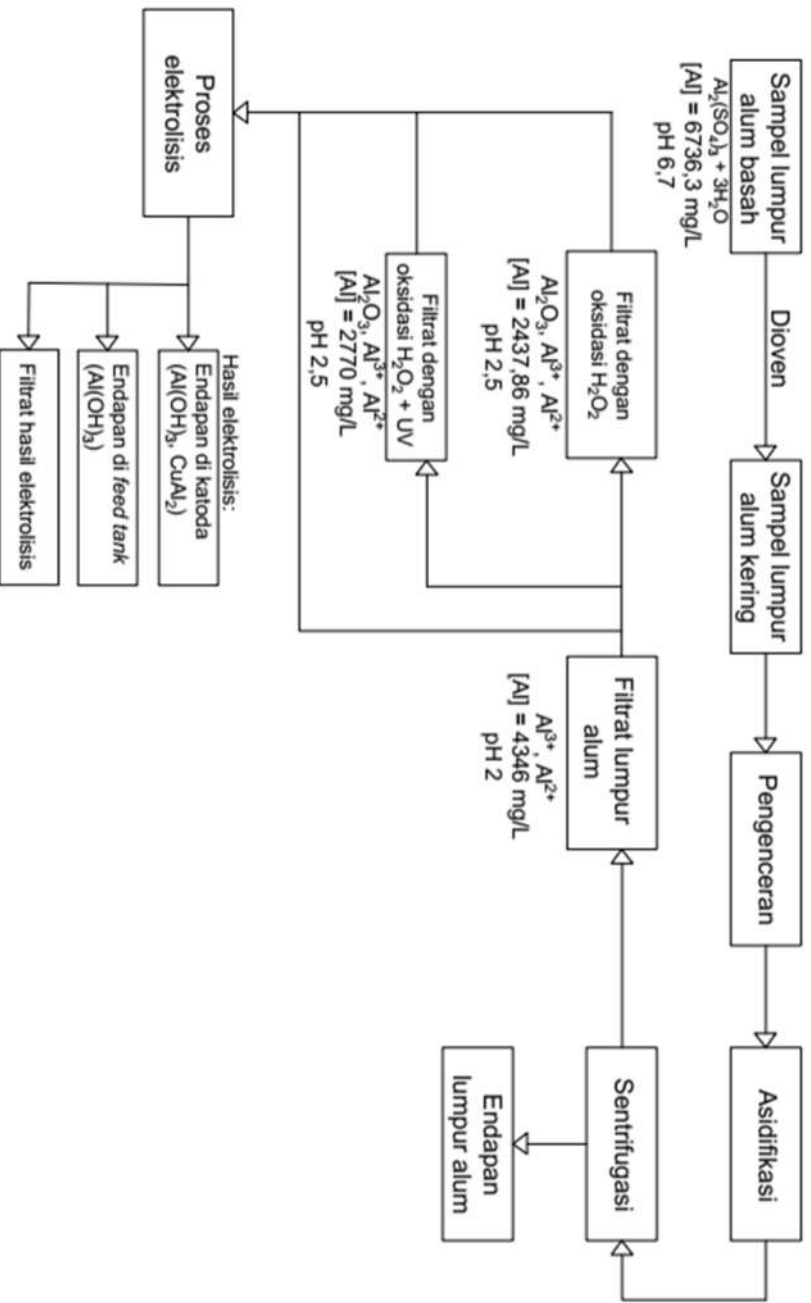
Gambar 4. 32 menunjukkan bahwa *recovery* Al tertinggi setelah elektrolisis dengan pH 4 adalah pada filtrat tanpa oksidasi. Massa Al pada endapan di katoda pada elektrolisis pH 4 filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H₂O₂, dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV masing-masing adalah 6,6%; 3,5%; dan 1,3%. Setelah proses elektrolisis ketiga variasi filtrat juga terbentuk endapan di *feed tank* berupa persipitat/koloid. Persipitat ini merupakan Al dalam bentuk Al(OH)₃ yang dapat terbentuk pada filtrat/larutan dengan pH 4 – 5,5 (Balintova dan Petrilakova, 2011). Massa Al dalam endapan di *feed tank* yang terbentuk sebagai persipitat (Al(OH)₃) setelah elektrolisis pH 4 filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H₂O₂, dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV masing-masing adalah 82%; 54%; dan 1,5%. Pada elektrolisis di ketiga variasi filtrat juga terjadi kehilangan massa Al. Pada elektrolisis pH 4 filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H₂O₂, dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV massa Al yang hilang selama proses masing-masing adalah 0,11%; 7,9%; dan 6,5%.



Gambar 4. 33 Keseimbangan Massa Al pada Elektrolisis pH 3

Gambar 4. 33 menunjukkan bahwa *recovery* Al tertinggi setelah elektrolisis dengan pH 3 adalah pada filtrat tanpa oksidasi. Massa Al pada endapan di katoda pada elektrolisis pH 3 filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H₂O₂, dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV masing-masing adalah 9,6%; 4,9%; dan 3,3%. Pada elektrolisis ketiga variasi filtrat dengan pH 3 tidak terbentuk endapan/persipit di *feed tank* seperti pada elektrolisis dengan pH 4, sehingga massa Al hanya diukur pada filtrat awal (t₀), endapan di katoda, dan filtrat setelah elektrolisis (t₈). Persentase Al pada akhir proses elektrolisis untuk filtrat pH 3 tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H₂O₂, dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV masing-masing adalah 75,2%; 80,3%; dan 81,9%. Pada filtrat dengan pH 3 juga terjadi kehilangan massa Al. Massa Al yang hilang selama elektrolisis pH 3 pada filtrat tanpa oksidasi, filtrat dengan oksidasi H₂O₂, dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ + UV masing-masing adalah 15,2%; 14,8%; dan 14,1%.

Terjadi perubahan bentuk molekul/spesifikasi aluminium (Al) dari karakteristik awal lumpur alum yang diambil dari unit *clearator* hingga akhir elektrolisis. Diagram alir spesifikasi Al dapat dilihat pada Gambar 4. 34.



Gambar 4. 34 Diagram Alir Spesifikasi Al

4.6. Konsumsi Energi Spesifik Proses Elektrolisis

Menurut penelitian Guven *et al.* (2012), proses elektrokimia (elektrolisis) merupakan salah satu teknologi pengolahan air limbah yang memerlukan energi dan biaya yang relatif tinggi apabila diterapkan dalam skala yang besar. Biaya operasional ini biasanya diperhitungkan dari listrik yang digunakan yang dapat dihitung melalui konsumsi energi spesifik proses. Konsumsi energi spesifik didefinisikan sebagai jumlah energi yang dikonsumsi per unit massa beban organik (misalnya COD).

Menurut penelitian Panizza *et al.* (2001), konsumsi energi spesifik untuk oksidasi dan reduksi selama elektrolisis pada tiap variasi filtrat dapat dibandingkan dengan nilai *Instantaneous Current Efficiency (ICE)*. Konsumsi energi spesifik untuk proses oksidasi aluminium dapat dilakukan pendekatan dengan persamaan sebagai berikut:

$$ICE = \frac{3 \times F \times V \times [(Al_t) - (Al_{(t+\Delta t)})]}{I \times \Delta t} \dots\dots\dots(4.23)$$

Keterangan:

- F = Nilai Faraday, 96.500 C/mol
- V = Volume elektrolit yang diolah (L)
- I = Kuat Arus Listrik (A)
- Δt = Selisih waktu operasional (jam)

Menurut penelitian Syukri (1999), reaksi reduksi yang terjadi pada katoda sehingga dapat mendeposisi ion-ion Al adalah sebagai berikut:



Dari persamaan reaksi (4.24) diketahui bahwa nilai ekuivalen elektron per mol Al adalah 3. Nilai ICE pada proses reduksi untuk masing-masing variasi filtrat elektrolisis dapat dilihat pada Tabel 4.8.

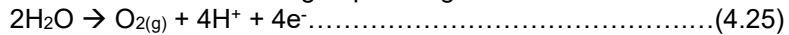
Tabel 4. 8 Konsumsi Energi Spesifik Proses Reduksi Elektrolisis

Variasi Filtrat Elektrolisis	Al t0 (g)	Al t8 (g)	mol/L t0	mol/L t8	ICE	%
Tanpa Oksidasi (pH 4, I = 0,7 A)	2,70	0,31	0,10	0,011	1,02	102%
Oksidasi H ₂ O ₂ (pH 4, I = 0,2 A)	2,07	0,72	0,08	0,027	2,52	252%

Variasi Filtrat Elektrolisis	Al t0 (g)	Al t8 (g)	mol/L t0	mol/L t8	ICE	%
Oksidasi H ₂ O ₂ + UV (pH 4, I = 0,2 A)	2,37	2,15	0,09	0,080	0,41	41%
Tanpa Oksidasi (pH 3, I = 0,7 A)	3,01	2,26	0,11	0,084	0,32	32%
Oksidasi H ₂ O ₂ (pH 3, I = 0,2 A)	2,58	2,07	0,10	0,077	0,95	95%
Oksidasi H ₂ O ₂ + UV (pH 3, I = 0,2 A)	2,65	2,17	0,10	0,080	0,89	89%

Berdasarkan Tabel 4. 8 diketahui konsumsi energi spesifik tertinggi adalah pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH 4 dan kuat arus 0,2 A dimana konsumsi energi spesifik (ICE) mencapai 2,96 atau 296%. Menurut penelitian Panizza *et al.* (2001), nilai ICE paling maksimum adalah 1 atau 100%. Nilai ICE reduksi yang melebihi 100% pada elektrolisis filtrat tanpa oksidasi dan filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH 4 kemungkinan dapat terjadi karena banyaknya endapan aluminium hidroksida Al(OH)₃ yang terbentuk sebagai koloid/persipit di *feed tank* sebelum dilakukan proses elektrolisis.

Sementara untuk perhitungan konsumsi energi spesifik saat proses reduksi didasarkan pada penurunan zat organik (COD) selama proses elektrolisis. Pengukuran COD menggunakan bantuan oksigen yang terukur untuk mengoksidasi zat organik yang ada pada sampel, kemudian *Pottasium Dichromate* (K₂Cr₂O₇) sebagai reagen mengukur O₂ yang dibutuhkan. Karena oksigen yang berpengaruh dalam mekanisme ini, maka untuk mengetahui nilai ekuivalen untuk oksigen pada digunakan reaksi berikut:



Dari persamaan reaksi (4.25) diketahui bahwa 4 adalah nilai ekuivalen elektron per mol O₂, sehingga persamaan yang digunakan untuk menghitung konsumsi energi spesifik pada proses oksidasi selama elektrolisis adalah sebagai berikut:

$$ICE = \frac{4 \times F \times V \times [(COD_t) - (COD_{(t+\Delta t)})]}{I \times \Delta t} \dots\dots\dots(4.26)$$

Keterangan:

F = Nilai Faraday, 96.500 C/mol

V = Volume elektrolit yang diolah (L)

I = Kuat Arus Listrik (A)

Δt = Selisih waktu operasional (jam)

Nilai ICE pada proses oksidasi untuk masing-masing variasi filtrat elektrolisis dapat dilihat pada Tabel 4. 9.

Tabel 4. 9 Konsumsi Energi Spesifik Proses Oksidasi Elektrolisis

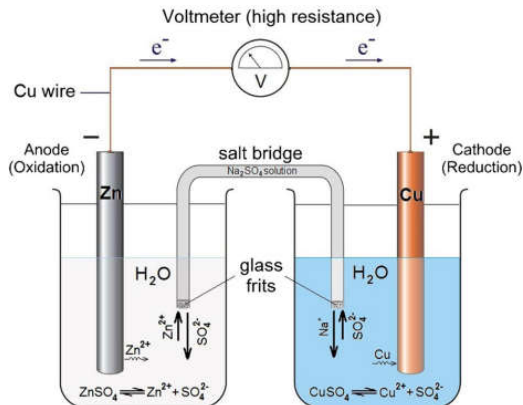
Variasi Filtrat Elektrolisis	COD t0 (g)	COD t8 (g)	mol/L t0	mol/L t8	ICE	%
Tanpa Oksidasi (pH 4, I = 0,7 A)	1,4	1,1	0,05	0,033	0,18	18%
Oksidasi H ₂ O ₂ (pH 4, I = 0,2 A)	0,8	0,2	0,03	0,008	1,17	117%
Oksidasi H ₂ O ₂ + UV (pH 4, I = 0,2 A)	0,4	0,2	0,01	0,005	0,59	59%
Tanpa Oksidasi (pH 3, I = 0,7 A)	1,7	1,4	0,05	0,045	0,12	12%
Oksidasi H ₂ O ₂ (pH 3, I = 0,2 A)	0,2	0,04	0,01	0,001	0,29	29%
Oksidasi H ₂ O ₂ + UV (pH 3, I = 0,2 A)	0,1	0,02	0,003	0,001	0,19	19%

Berdasarkan Tabel 4. 9 diketahui konsumsi energi spesifik tertinggi adalah pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH 3 dan kuat arus 0,2 A dimana konsumsi energi spesifik (ICE) mencapai 1,17 atau 117%. Nilai ICE yang melebihi 100% pada elektrolisis filtrat dengan oksidasi H₂O₂ pH 3 diprediksi dapat terjadi karena adanya organologam yang teranalisis sebagai COD. Menurut penelitian Hernandez *et al.* (1998), organologam adalah senyawa kimia yang mengandung ikatan antara karbon/zat organik dan logam. Adanya kandungan organometal dalam sampel menyebabkan kandungan organik pada sampel tidak dapat terbaca secara teliti. Karena kemungkinan adanya organologam dalam filtrat yang diuji, sehingga perlu dilakukan pengukuran *total organic carbon* (TOC) untuk mengetahui kadar senyawa organik/karbon pada filtrat.

4.7. Aplikasi Elektrolisis untuk *Recovery* Alumina

Dalam penelitian ini, persentase *recovery* Al paling tinggi yang diperoleh adalah 9,6% pada elektrolisis dengan filtrat tanpa oksidasi pH 3. Diketahui pula bahwa penurunan konsentrasi kontaminan organik pada filtrat lumpur alum dengan metode oksidasi (penambahan H_2O_2 dan pemaparan sinar UV 254 nm) tidak dapat meningkatkan persentase *recovery* Al yang diperoleh. Sehingga aplikasi elektrolisis dengan elektroda platina untuk *recovery* alumina dari lumpur PDAM perlu dikembangkan lagi.

Persentase *recovery* Al yang relatif rendah di setiap variasi filtrat yang digunakan untuk elektrolisis ini dapat disebabkan karena penggunaan kuat arus (mA) yang berbeda-beda di tiap variasinya. Perbedaan kuat arus yang digunakan dapat berpengaruh pada perbedaan voltase/tegangan listrik selama proses elektrolisis (Sun *et al.*, 2012). Menurut penelitian Inzelt (2014), nilai voltase optimum untuk reaksi oksidasi/reduksi di elektroda dapat diperoleh dari pengukuran potensial standar. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensial standar sehingga dapat diketahui nilai tegangan listrik/voltase yang optimum untuk *recovery* alumina melalui proses elektrolisis dengan elektroda platina. Pengukuran potensial standar dapat dilakukan menggunakan alat voltmeter seperti skema pada Gambar 4. 35.



Gambar 4. 35 Skema Mekanisme Pengukuran Potensial Standar
Sumber: Inzelt (2014)

Gambar 4. 35 merupakan salah satu contoh skema pengukuran potensial standar dengan metode Daniel Cell. Proses pengukuran potensial standar dilakukan ketika voltase diukur dengan voltmeter berresistansi tinggi atau kedua elektroda dihubungkan dengan jembatan garam dan kawat logam.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah:

- (1.) Karakteristik utama lumpur alum PDAM adalah: pH $6,7 \pm 0,25$; TDS 222 mg/L; kadar Al 6736,3 mg/L; kadar Fe 1077,09 mg/L; COD $2166,67 \pm 115,47$ mg/L; dan konduktivitas $825 \pm 10,15$ μ S/cm.
- (2.) *Pre-treatment* penurunan kontaminan organik dengan metode oksidasi (penambahan H₂O₂ dan penambahan H₂O₂ serta pemaparan sinar UV 254 nm) tidak dapat meningkatkan persentase *recovery* alumina. *Recovery* alumina tertinggi adalah 9,6% yang diperoleh dari elektrolisis pH 3 filtrat tanpa oksidasi.
- (3.) Nilai pH optimum untuk *recovery* alumina dengan elektrolisis adalah 3 yang ditandai dengan tidak terbentuknya lapisan di anoda dan menghasilkan persentase *recovery* alumina tertinggi, yaitu mencapai 9,6%.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah:

- (1.) Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai tegangan listrik (voltase) optimum yang digunakan pada elektrolisis untuk *recovery* alumina. Voltase optimum ini dapat diperoleh dengan pengukuran potensial standar.
- (2.) Pengukuran kadar *Total Organic Carbon (TOC)* diperlukan untuk mengetahui konsentrasi senyawa organik yang bebas dari organologam yang ikut terukur. Konsentrasi TOC dapat digunakan untuk menghitung nilai konsumsi energi spesifik selama elektrolisis sesuai dengan reaksi oksidasi pada elektrolisis.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abdallah, S., Yousef, E., Abdullah, I., dan Tamime, A. 2013. *The Effect of TDS on the Hydrogen and Oxygen Production Using Photovoltaic Power Generation System*. Journal of Sustainable Water and Environmental Systems Vol. 5 No. 1.
- Abdullah, C. Y. dan Bagastyo, A. Y. 2015. *Proses Pengolahan Lindi dengan Metode Elektrolisis*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Lingkungan XII – ITS.
- Abhilash, T. N. dan Ahammed, M. M. 2014. *Coagulant Recovery from Water Treatment Plant Sludge and Reuse in Post-Treatment of UASB Reactor Effluent Treating Municipal Wastewater*. Journal of Environmental Science Pollution Research Civil Engineering Department Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology.
- Abhilash, T. N. dan Ahammed, M. M. 2015. *The Reuse of Water Treatment Sludge as a Coagulant for Posttreatment of UASB Reactor Treating Urban Wastewater*. Journal of Cleaner Production.
- Adam, A., Habiburrohman, H., dan Hakim, M. N. 2017. *Analisis Performa Sentrifugasi pada Produksi Purified Biobutanol melalui Fermentasi Molasses dengan Agen Biokonversi Escherichia coli*. Jurnal Program Studi Rekayasa Hayati Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati ITB.
- Ali, M. R., Nishikata, A., dan Tsuru, T. 1999. *Electrodeposition Mechanism of Aluminum from Aluminum Chloride-N-(n-butyl) Pyridinium Chloride Room Temperature Molten Salt*. Journal of Chemical Technology Vol. 6 Department of Metallurgical Engineering Tokyo Institute of Technology.
- APHA, AWWA, WPCF. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition*. Washington DC: APHA, AWWA, WPCF.
- APHA, AWWA, WPCF. 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC: APHA, AWWA, WPCF.
- Arnoldsson, E., Bergman, M., Matsinhe, N., Persson, K. M. 2008. *Assessment of Drinking Water Treatment Using Moringa Oleifera Natural Coagulant*. Journal of VATTEN 64:137–150.

- Asgharyan, F., Nikou, M. K., Anvaripour, B., dan Danaee, I. 2018. *The Effect of Different Electrodes on Humic Acid Removal by Electrocoagulation*. Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, Vol. 7 No. 2.
- Asmawati, R. 2011. *Studi Kemampuan Lumpur Alum untuk Menurunkan Konsentrasi Fosfat pada Limbah Industri Pupuk*. Jurnal Pengendalian Pencemaran Udara Departemen Teknik Lingkungan ITS.
- Ayu, A. P. 2018. *Komparasi Recovery Aluminium Lumpur PDAM X Menggunakan Metode Elektrolisis dengan Membran Penukar Kation dan Membran Penukar Anion*. Tugas Akhir Departemen Teknik Lingkungan ITS.
- Az-Zahra, S., Rahmawati, dan Wardhani, E. 2014. *Karakteristik Kualitas Air Baku dan Lumpur sebagai Dasar Perencanaan Instalasi Pengolahan Lumpur IPA Badak Singa PDAM Tirtawening Kota Bandung*. Jurnal Rekayasa Lingkungan Vol. 2 No. 2 Institut Teknologi Nasional.
- Bahena, J. L. R., Cabrera, A. R., Valdivieso, A. L., Urbina, R. H. 2002. *Fluoride Adsorption onto α -Al₂O₃ and Its Effect on the Zeta Potential at The Alumina-Aqueous Electrolyte Interface*. Journal of Science Technology Vol. 37.
- Balintova, M. dan Petrilkova, A. 2011. *Study of pH Influence on Selective Precipitation of Heavy Metals from Acid Mine Drainage*. Journal of Chemical Transactions Vol. 25.
- Basuki, K. T., Muhadi, A. W., dan Sudiby. 2009. *Pengaruh pH dan Tegangan pada Pembuatan Serbuk Itrium dari Konsentrat Itrium Hasil Proses Pasir Senotim dengan Elektrolisis*. Jurnal Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta.
- Batmanghelich, F., Hariri, M. B., Sharifi-Asl, S., Yaghoubinezhad, Y., Mortazavi, G., dan Seo, Y. 2016. *Corrosion and Time Dependent Passivation of Al 5052 in the Presence of H₂O₂*. Journal of Met. Mater. Int. Vol. 22 No. 4.
- Boaventura, R. A. R., Almeida M. F., dan Duarto, A. A. S. 2000. *Aluminium Recovery from Water Treatment Sludges*. Journal of Water Supply and Water Quality Krakow.
- Boyd, C. E., Tucker, C. S., dan Somridhivej, B. 2016. *Alkalinity and Hardness: Critical but Elusive Concepts in Aquaculture*. Journal of the World Aquaculture Society Vol. 47 No. 1.

- Boyles, W. 1997. *The Science of Chemical Oxygen Demand*. USA: Hach Company.
- Candraditya, W. S. 2018. *Laporan Kerja Praktik Perusahaan Daerah Air Minum Surya Sembada Surabaya 17 Januari – 15 Maret 2018*. Laporan Kerja Praktik Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala.
- Chen, D., Hu, B., Ding, K., Yan, C., dan Lu, L. 2018. *The Geometry Effect of Cathode/Anode Areas Ratio on Electrochemical Performance of Button Fuel Cell Using Mixed Conducting Materials*. Journal of Energies Vol. 11 No. 1875 Jiangsu University of Science and Technology Zhenjiang.
- Chen, G., 2004. *Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment*. Journal of Separation and Purification Technology Vol. 38 No. 11 Department of Chemical Engineering Hong Kong University of Science & Technology.
- Cheng, W. P., Fu, C. H., Chen, P. H. dan Yu, R. Y. 2014. *Factors Affecting Aluminum Dissolve from Acidified Water Purification Sludge*. International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering Vol. 8 No. 8, World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Cherifi, Boutemine, M. N., Laefer, D. F., dan Hazourli, S. 2016. *Effect of Sludge pH and Treatment Time on the Electrokinetic Removal of Aluminum from Water Potabilization Treatment Sludge*. Journal of Chemistry Vol. 19 No. 4.
- Cheung, R. C. K., Chan, M. C. M., Ho, C. S., Lam, C. W. K., dan Lau, E. L. K. 2001. *Heavy Metal Poisoning Clinical Significance and Laboratory Investigation*. Journal of B. D Indispensable to Human Health. Vol. 7 No. 1. Asia Pasific Analyte Notes.
- Choi, J. H., Lee, H. J., dan Moon, S. H. 2001. *Effects of Electrolytes on the Transport Phenomena in a Cation-Exchange Membrane*. Journal of Colloid and Interface Science Department of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology.
- Chuang, L., Chairuddin, dan Sembiring, T. 2013. *Penggunaan Sinar UV dan Hidrogen Peroksida untuk Menurunkan COD*,

- TSS dan TDS Air Buangan Pabrik Oleokimia*. Jurnal Sainia Kimia Vol. 1 No. 2 Departemen Kimia FMIPA Universitas Sumatera Utara.
- Ciblak, A., Mao, X., Padilla, I., Vesper, D., Alshawabkeh, I., dan Alshawabkeh, I. A. 2012. *Electrode Effects on Temporal Changes in Electrolyte pH and Redox Potential for Water Treatment*. Journal of Environmental Science and Health Vol. 47 No. 5 Department of Civil and Environmental Engineering Northeastern University.
- Collivignarelli, M. C., Pedrazzani, R., Sorlini, S., Abba, A., dan Bertanza, G. 2017. *H₂O₂ Based Oxidation Processes for the Treatment of Real High Strength Aqueous Wastes*. Journal of Sustainability Vol. 9 No. 244.
- Coniwanti, P., Anka, M. N. P., Sanders, C. 2015. *Pengaruh Konsentrasi, Waktu dan Temperatur terhadap Kandungan Lignin pada Proses Pemutihan Bubur Kertas Bekas*. Jurnal Teknik Kimia Vol. 21 No. 3 Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
- Cundari, L., Supriyatna, E., dan Samhudi, H. 2016. *Pengaruh Waktu Kontak dan Kecepatan Pengadukan terhadap Recovery Aluminium pada Asidifikasi Sludge Keluaran Water Treatment*. Jurnal Teknik Kimia Vol. 2 No. 22 Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
- Day, R. A. dan Underwood, A. L. 1993. *Analisis Kimia Kuantitatif Edisi V*. Jakarta: Erlangga.
- Dogra, S. 1990. *Kimia Fisik dan Soal-Soal*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Elfiana. 2010. *Penurunan Konsentrasi Besi dalam Air secara Oksidasi Kimia Lanjut (Fotokimia Sinar UV Dan UV-Peroksidasi)*. Journal of Science and Technology Vol. 8 No. 17.
- Elicker, C., Filho, P. J. S., dan Castagno, K. R. L. 2014. *Electroremediation of Heavy Metals in Sewage Sludge*. Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 31 No. 2 Department of Management and Environmental Sanitation IFSul.
- Eva, A. N. 2012. *Analisis Sifat Fisis dan Mekanis Alumunium Paduan Al-Si-Cu dengan Menggunakan Cetakan Pasir*.

- Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah, Surakarta.
- Evuti, A. M. and Lawal, M. 2011. *Recovery of Coagulants from Water Works Sludge: A Review*. Journal of Chemical Engineering Pelagia Research Library.
- Fitri, H. 2013. *Dampak Pembuangan Lumpur Perusahaan Daerah Air Minum Kota Pontianak Terhadap Kualitas Air Sungai Kapuas*. Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah Vol. 1 No. 1. Universitas Tanjungpura.
- Ghimire, U., Jang, M., Jung, S. P., Park, D., Park, S. J., Yu, H., Oh, S. 2019. *Electrochemical Removal of Ammonium Nitrogen and COD of Domestic Wastewater using Platinum Coated Titanium as an Anode Electrode*. Journal of Energies, MDPI.
- Graham-Jones, A. 2014. *Evaluating Reuse of Sludge from Water Treatment for Wastewater Treatment*. Thesis of Civil and Environmental Engineering, University of Aberdeen.
- Güven, G., Perendeci, A., Özdemir, K., dan Tanyolac, A. 2012. Specific Energy Consumption in Electrochemical Treatment of Food Industry Wastewaters. Journal of Chem Technol Biotechnol.
- Guyton, A. C. dan Hall, J. E. 1996. *Textbook of Medical Physiology*. Philadelphia: W.B. Saunders Company.
- Hernandez, F. E., Marcano, A. O., Alvarado, Y., Biondi, A., dan Mailotte, H. 1998. *Measurement of Nonlinear Refraction Index and Two-Photon Absorption in a Novel Organometallic Compound*. Journal of Optics Communications Vol. 152.
- Hadi, A. 2005. *Prinsip Pengelolaan Pengambilan Sampel Lingkungan*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Hamid, R. A., Purwono, dan Oktawan, W. 2017. *Penggunaan Metode Elektrolisis Menggunakan Elektroda Karbon dengan Variasi Tegangan Listrik dan Waktu Elektrolisis dalam Penurunan Konsentrasi TSS dan COD pada Pengolahan Air Limbah Domestik*. Jurnal Teknik Lingkungan Vol. 6 No. 1 Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- Hamilton, D. dan Zhang, H. 2015. *Solids Content of Wastewater and Manure*. Journal of Oklahoma Cooperative Extension Fact Sheets.

- Haris, A., Riyanti, A. D., dan Gunawan. 2005. *Pengendapan Logam Tembaga dengan Metoda Elektrolisis Internal*. Jurnal Sains dan Aplikasi Kimia Vol. 3 No. 2 Laboratorium Kimia Analitik Jurusan Kimia FMIPA Universitas Diponegoro.
- Hayashi, Masaki. 2003. *Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion*. Journal of Environmental Monitoring and Assessment.
- Hovsepyan, A., Jean-Claude, and Bonzongo, J. 2009. *Aluminum Drinking Water Treatment Residuals (Al-WTRs) as Sorbent for Mercury: Implications for Soil Remediation*. Journal of Hazardous Materials Department of Environmental Engineering Sciences University of Florida.
- Huang, C., Xu, G., Zhang Y., Xue Y., and Chen G. 2006. *Application of Electrodialysis to the Production of Organic Acids: State-of-the-Art and Recent Developments*. Journal of Membrane Science 288.
- Hudha, M. I., Jimmy, dan Muyassaroh. 2014. *Studi Penurunan COD Dan TSS Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Proses Elektrokimia*. Jurnal Prosiding Seminar Nasional Kimia, Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Surabaya.
- Huitle, C. A. M., Rodrigo, M. A. dan Scialdone, O. 2018. *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. Cambridge: Elsevier.
- Inzelt, G. 2014. Crossing the Bridge Between Thermodynamics and Electrochemistry from the Potential of the Cell Reaction to the Electrode Potential. Journal of ChemTexts Springer Vol. 1 No. 2.
- Iken, H., Basseguy, R., Guenbour, A. dan Bachir, A. B. 2007. *Classic and Local Analysis of Corrosion Behaviour of Graphite and Stainless Steels in Polluted Phosphoric Acid*. Journal of Electrochimica Acta.
- Isana, S. Y. L. 2010. *Perilaku Sel Elektrolisis Air dengan Elektroda Stainless Steel*. Jurnal Pendidikan Kimia FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta.
- Johari, J. M. C. 2004. *Kimia untuk SMA Kelas X*. Jakarta: Erlangga.
- Joshi, S. dan Shrivastava. 2011. *Recovery of Alum Coagulant from Water Treatment Plant Sludge: A Greener Approach for Water Purification*. International Journal of Advanced

- Computer Research Vol. 1 No. 2 Chemistry Department, Sarojini Naidu Govt. Girls P.G. College.
- Keeley, J., Jarvisa, P., dan Judd, S. J. 2014. *Coagulant Recovery from Water Treatment Residuals: A Review of Applicable Technologies*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology Vol. 44 No. 24.
- Keenan, C. W. 1986. *Ilmu Kimia untuk Universitas*. Erlangga: Jakarta
- Khandegar, V. dan Saroh, A. K. 2014. *Treatment of Distillery Spentwash by Electrocoagulation*. Journal of Clean Energy Technologies Vol. 2 No. 3. Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology.
- Kim, K., Kim, D., Park, K., Cho, M., Cho, S., dan Kwon, H. 2019. *Effect of Intermetallic Compounds on the Thermal and Mechanical Properties of Al-Cu Composite Materials Fabricated by Spark Plasma Sintering*. Journal of Materials Vol. 12.
- Kurniawan, T. W. 2009. *Efektivitas Campuran Aluminium Hasil Perolehan Kembali dari Lumpur Padat Pengoalahan Air dengan Besi (III) Klorida sebagai Koagulan*. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Tanjungpura.
- Kurt, U., Gonullu, M. T., Ilhan, F., dan Varinca, K. 2008. *Treatment of Domestic Wastewater by Electrocoagulation in a Cell with Fe-Fe Electrodes*. Journal of Environmental Engineering Science Vol. 25 No. 2 Yildiz Technical University.
- Liani, P. H., Sembiring, S., dan Simanjuntak, W. 2014. *Preparasi Alumina Dengan Metode Elektrokimia Sebagai Bahan Baku Pembuatan Zeolit Sintetik dan Karakterisasinya Dengan Transmission Electron Microscopy (TEM)*. Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika Vol. 2 No. 2.
- Lewis, T. E. 1990. *Environmental Chemistry and Toxicity of Aluminium*. Michigan: Lewis Publishers. Inc.
- Lukasiewicz, E. 2016. *Post-Coagulation Sludge Management for Water and Wastewater Treatment with Focus on Limiting Its Impact on the Environment*. Journal of Economic and Environmental Studies Vol. 16 No. 4 Opole University of Technology.
- Marwati, S., Padmaningrum, R. T., dan Marfuatun. 2009. *Pemanfaatan Ion Logam Berat Tembaga(II), Kromium(III),*

- Timbal(II), dan Seng(II) dalam Limbah Cair Industri *Electroplating* Untuk Pelapisan Logam Besi
- Maxwell, J. C. 2011. *An Elementary Treatise on Electricity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mbaeze, M. C., Abgazue, V. E., and Orijoke, N. M. 2017. *Comparative Assessment of Performance of Aluminium Sulphate (Alum) and Ferrous Sulphate as Coagulants in Water Treatment*. Journal of Modern Chemistry Appliance Vol. 5 No. 4, University of Nigeria.
- Miyazaki, A. dan Balint, I. 2011. *Purification of Waste Water Using Alumina as Catalysts Support and as an Adsorbent*. Journal of Waste Water Treatment and Reutilization.
- Moerdiyanti, M., Zahara, T. A., dan Jati, D. R. 2014. *Penggunaan Tawas Cair Recovery dari Limbah Padat Lumpur PDAM Kota Pontianak sebagai Koagulan untuk Pengolahan Air Bersih*. Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Tanjungpura.
- Mokudai, T., Nakamura, K., Kanno, T., dan Niwano, Y. 2012. *Presence of Hydrogen Peroxide, a Source of Hydroxyl Radicals, in Acid Electrolyzed Water*. Journal of PLOS ONE, Japan.
- Mulyono. 2006. *Kamus Kimia Cetakan Pertama*. Jakarta: Gramedia.
- Murthy, U. N., Rekha, H. B., dan Bhavya, J. G. 2011. *Performance of Electrochemical Oxidation in Treating Textile Dye Wastewater by Stainless Steel Anode*. International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 2, No. 6,
- Notianingsih, F. dan Wiyatmo, Y. 2013. *Pengaruh Jenis Elektroda, Luas Penampang Elektroda dan Jarak Antar Elektroda Pada Larutan Elektrolit Asam Malat ($\text{HO}_2\text{CCH}_2\text{CHOHCO}_2\text{H}$) Ekstrak Buah Apel (*Malus domestica*) terhadap Tegangan yang Dihasilkan oleh Sel Volta (Voltaic Cell)*. Jurnal Fisika Vol. 2 No. 2 Universitas Negeri Yogyakarta.
- Notodarmojo, S. dan Devina, A. 2004. *Penurunan Zat Organik dan Kekeruhan Menggunakan Teknologi Membran Ultrafiltrasi dengan Sistem Aliran Dead-End (Studi Kasus: Waduk Saguling, Padalarang)*. Proceeding Sains & Teknologi Vol. 36 A No. 1 ITB.

- Nurchahyo, W., Sumantri, I. dan Kurniasari, L. 2014. *Pembuatan Aluminium Sulfat dari Clay*. Jurnal Teknik Kimia Vol. 10 No. 1, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim.
- Opu, M. S. 2015. *Effect of Operating Parameters on Performance of Alkaline Water Electrolysis*. Journal of Thermal and Environmental Engineering Vol. 9 No. 2.
- Panizza, M., Michaud P. A., Cerisola, G., dan Comninellis, C. 2001. *Electrochemical Treatment of Wastewaters Containing Organic Pollutants on Boron-Doped Diamond Electrodes: Prediction of Specific Energy Consumption and Required Electrode Area*. Journal of Chemistry Communications.
- Panswad, T. dan Chanman, P. 1992. *Aluminum Recovery from Industrial Aluminium Sludge*. Journal of Water Supply Vol. 10 No. 4.
- Pascal, G., Frederique, G., Romain, G., Julian, T., Jeremy, O., Jean, V. 2013. *Dryness Limit: A Useful Parameter to Assess Sludge Dewatering*. Journal of Cake Filtration-Desaturation.
- Pradhan, D. dan Reddy, R. 2012. *Dendrite-Free Aluminum Electrodeposition from $AlCl_3$ -1-Ethyl-3-Methyl-Imidazolium Chloride Ionic Liquid Electrolytes*. Journal of Metallurgical and Materials Transactions.
- Prakash, P. dan Sengupta, A. K. 2003. *Selective Coagulant Recovery from Water Treatment Plant Residuals Using Donnan Membrane Process*. Journal of Environmental Science and Technology Vol. 37 No. 13.
- Prastanto, H., Falaah, A. F., dan Maspanger, D. R. 2014. *Pemekatan Lateks Kebun Secara Cepat dengan Proses Sentrifugasi Putaran Rendah*. Jurnal Penelitian Karet Pusat Penelitian Karet.
- Prastika, W., Hastuti, R., dan Haris, A. 2009. *Pengaruh Ligan KCN pada Proses Elektrolisis untuk Pengambilan Logam Perak dari Limbah Cair Fotografi*. Jurnal Kimia FMIPA Universitas Diponegoro.
- Primadipta, I. W. dan Titah, H. S.. 2017. *Bioremediasi Lumpur Alum menggunakan *Aspergillus niger* dengan Penambahan Serbuk Gergaji sebagai Bulking Agent*. Jurnal Teknik ITS Vol. 6 No. 1.

- Reddy, R. G. dan Zhang, M. 2016. *US9267214B2: Aluminum Recovery Process*. United States Patent Application Publication.
- Roesky, H. W. dan Kumar, S. S. 2005. *Chemistry of Aluminium (I)*. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications.
- Rudrashetti, A. P., Dwivedi, K., Sharma, A., Durvuri, B., Juwarkar, A. A., dan Pandey, R. A. 2017. *Degradation of Sulfamethoxazole by UV-Assisted Advanced Oxidation Processes in Aqueous Matrices: a Comparative Kinetic Study*. Journal of Indian Water Works Association CSIR-National Environmental Engineering Research Institute (NEERI).
- Rusydi, A. F. 2018. *Correlation between Conductivity and Total Dissolved Solids in Various Type of Water: A Review*. Journal of IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.
- Saidin, N. U., Ying, K. K., dan Khuan, N. I. 2011. *Electrodeposition: Principles, Applications and Methods*. Journal of Nuclear Technical Convention, Malaysia.
- Samaranayake, C. P. dan Sastry, S. K. 2004. *Electrode and pH Effects on Electrochemical Reactions during Ohmic Heating*. Journal of Electroanalytical Chemistry
- Sari, R. F., Mirwan, A. dan Prasetyo, W. A. 2017. *Pengambilan Kembali Alumina dari Limbah Padat Lumpur (LPL) PDAM Intan Banjar*. Jurnal Konversi Vol. 6 No. 2 Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat.
- Sari, R. F. dan Prasetyo, W. A. 2010. *Studi Pengambilan Kembali Alumina dari Limbah Padat Lumpur Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Intan Banjar*. Proposal Penelitian Program Studi S1 Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat.
- Sarwono, J. 2006. *Metode Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Selvakumar, K. V., Badarinarayanan, N. S., Umesh, A., Ezhilkumar, P., dan Yuvanashree, E. 2016. *Acid Dye Degradation using Electrochemical Batch Recirculation Flow Reactor*. Journal of Chemical and Pharmaceutical

- Sciences Department of Chemical Engineering, Adhiyaaman College of Engineering India.
- Sengupta, A. K. dan Prakash, P. 2002. *US6495047B1: Process for Selective Coagulant Recovery from Water Treatment Plant Sludge*. United States Patent Application Publication.
- Sequeira, C. A. C., Santos, D. M. F., Sljukic, B., Amaral, L. 2013. *Physics of Electrolytic Gas Evolution*. Journal of Chemical Engineering Department, Technical University of Lisbon, Portugal.
- Seri, O. dan Itoh, Y. 2016. *Differentiating Polarization Curve Technique for Determining the Exchange Current Density of Hydrogen Electrode Reaction*. Journal of Electrochimica Acta.
- Soemargono, E. I. dan Lazuardi. 2006. *Pengolahan Limbah Rumah Tangga dengan Proses Elektrolisis Secara "Batch"*. Jurnal Rekayasa Perencanaan Vol. 3 No.1 Jurusan Teknik Kimia, UPN "Veteran" Jatim.
- Stefanescu, M., Cosma, C., Cristea, I., Nitoi, I., Bumbac, C. dan Badescu, V. 2015. Drinking Water Treatment with Recovered Flocculant from Alumina Fabrication Process. Journal of Environmental Protection and Ecology Vol. 16 No. 4.
- Sun, M., Reible, D. D., Lowrey, G. V., dan Gregory, K. B. 2012. *Effect of Applied Voltage, Initial Concentration, and Natural Organic Matter on Sequential Reduction/Oxidation of Nitrobenzene by Graphite Electrodes*. Journal of Environmental Science and Technology Vol. 46.
- Sundaram, D. S. dan Yang, V. 2014. *Combustion of Micron-Sized Aluminum Particle, Liquid Water, and Hydrogen Peroxide Mixtures*. Journal of Combustion and Flame Vol. 161.
- Supratno. 2011. *Pemisahan Perak dari Limbah Fixer dengan Cara Elektrolisis*. Tesis Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- Syukri, S. 1999. *Kimia Dasar*. Bandung: Institut Teknologi Bandung Press.
- Taghizadeh, V., Imanpoor, M. R., Hosseinzadeh, M., dan Azarin, H. 2013. *Effects of Acidic Water in Combination with Aluminum on Swimming Behavior and Survival of Yolk-Sac*

- larval in Goldfish (Carassius auratus gibelio)*. Journal of Department Fisheries, Gorgan University, Iran.
- Topayung, D. 2011. *Pengaruh Arus Listrik dan Waktu Proses terhadap Ketebalan dan Massa Lapisan yang Terbentuk Pada Proses Electroplating Pelat Baja*. Jurnal Ilmiah Sains Vol. 11 No. 1 Program Studi Teknik Mesin Politeknik Negeri Manado.
- Vance, J. C., Nguyen, T., Fresnel, J. M., Beer, H. B., dan Ernst, S. 1984. *US4459189: Electrode Coated with Lead or a Lead Alloy and Method of Use*. United States Patent Application Publication.
- Verhaverbeke, S., Gouk, R., Papanu, J., dan Chen, H. 2008. *Mechanism and Principles of Post Etch Al Cleaning With Inorganic Acids*. Journal of Solids State Phenomena Vol. 134.
- Verlicchi, P. dan Masotti, L. 2011. *Reuse of Drinking Water Treatment Plants Sludges in Agriculture: Problems, Perspectives and Limitations*. Journal of Department of Engineering, University of Ferrara, Italy.
- Verma, S. K., Khandegar, V. dan Saroha, A. S. 2013. *Removal of Chromium from Electroplating Industry Effluent Using Electrocoagulation*. Journal Of Hazardous, Toxic, And Radioactive Waste ASCE.
- Vogel, A. I. 1990. *Vogel: Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro*. London: Longman Group Limited.
- Wahyono, Y., Sutanto, H., dan Hidayanto, E. 2017. *Produksi Gas Hydrogen Menggunakan Metode Elektrolisis dari Elektrolit Air dan Air Laut dengan Penambahan Katalis NaOH*. Jurnal Departemen Fisika Vol. 6 No. 4 Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro.
- Widowati, W., Sastiono, A., dan Rumampuk, R. J. 2008. *Efek Toksik Logam*. Yogyakarta: Andi.
- Wiratini, N. M. dan Kartawisono, N. 2016. *Dampak Rangkaian Sel Elektroda Al-C dalam Elektrokimia untuk Mendegradasi Limbah Tekstil*. Jurnal Pendidikan Kimia Vol. 16 No. 2 Universitas Pendidikan Ganesha.
- World Health Organization. 2010. *Aluminium in Drinking Water*. Geneva: WHO Press.

- Wulandari, W. A. dan Soedjono, E. S. 2017. *Penurunan COD dan Deterjen pada Saluran Kalidami Kota Surabaya dengan Oksidator H₂O₂ dan KMnO₄*. Jurnal Teknik ITS Vol. 6 No. 2 Departemen Teknik Lingkungan ITS.
- Wulansari, R., Nuryanto, R. dan Suyati, L. 2013. *Pengaruh Elektroda Grafit-Grafit, Aluminium-Grafit, dan Seng-Grafit pada Elektrolisis Kobalt (Co²⁺) dengan Pengotor Ion Seng (Zn²⁺)*. Jurnal Laboratorium Kimia Fisik Jurusan Kimia Universitas Diponegoro.
- Yong, C. 2017. *New Technology for Wastewater Treatment*. Thesis Centria University of Applied Sciences.
- Yousuf, I. 2013. *Methods for Estimation and Comparison of Activated Sludge Settleability*. Journal of 38th Annual WIOA Qld Water Industry Operations Conference Parklands, Gold Coast.
- Yuningrat, N. W., Gunamantha, I. M., dan Wiratini, N. M. 2012. *Degradasi Pencemar Organik dalam Lindi dengan Proses Oksidasi Lanjut*. Jurnal Sains dan Teknologi Vol. 1 No. 2 Jurusan Analis Kimia FMIPA Universitas Pendidikan Ganesha.
- Yuvaraj, A. L. dan Santhanaraj, D. 2014. *A Systematic Study on Electrolytic Production of Hydrogen Gas by Using Graphite as Electrode*. Journal of Materials Research Vol. 17 No. 1.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM

Lampiran A. 1 Analisis Kadar Air

Alat dan Bahan:

1. Sampel lumpur alum PDAM
2. Cawan porselen
3. Oven
4. Desikator

Prosedur Analisis:

1. Memasukkan cawan porselen kosong ke oven 105°C selama 1 jam dan desikator selama 15 menit.
2. Memasukkan sampel lumpur alum dalam cawan porselen dan menimbang dengan neraca analitik (A).
3. Mengoven sampel lumpur alum dalam cawan porselen selama 1 jam dalam suhu 105°C dan memasukkan cawan dalam desikator selama 15 menit.
4. Menimbang lumpur alum dan cawan dengan neraca analitik (B).
5. Dihitung kadar air sampel dengan rumus:

$$\frac{A - B}{A} \times 100\%$$

6. Lumpur alum disimpan.

Lampiran A. 2 Analisis *Chemical Oxygen Demand (COD)* dengan Metode *Close Reflux* dan *Titimetric*

Alat dan Bahan:

1. *Vial* atau tabung COD
2. *Close reflux digeste*
3. Labu Erlenmeyer
4. *Beaker glass*
5. *Burret* 25 mL
6. *Digestion solution*
7. *Sulfuric acid reagent*
8. Larutan standar *Ferro Ammonium Sulphate (FAS)*

Prinsip Kerja:

Pemanasan sampel dengan menggunakan digester menyebabkan perubahan Cr (VI) menjadi Cr (III) karena ion dikromat mengoksidasi COD pada sampel.

Prosedur Kerja Pembuatan Reagent:

- *Digestion Solution*
Meringkakan serbuk $K_2Cr_2O_7$ sebanyak 10,216 g ke dalam oven pada suhu $105^\circ C$ selama 2 jam. Kemudian melarutkan 10,216 g $K_2Cr_2O_7$ ke dalam 500 mL aquades, menambahkan H_2SO_4 pekat sebanyak 167 mL dan menambahkan 33,3 g $HgSO_4$. Menunggu hingga dingin lalu mengencerkan hingga volume 1000 mL.
- *Sulfuric Acid Reagent*
Menambahkan Ag_2SO_4 ke dalam H_2SO_4 pekat dengan komposisi 5,5 gr Ag_2SO_4 / Kg H_2SO_4 . Mendinginkan selama 1-2 hari hingga larut sempurna.
- Larutan Standar *Ferro Ammonium Sulphate (FAS)*
Melarutkan 4,9 g FAS ke dalam 500 mL aquades. Menambahkan 1 mL H_2SO_4 pekat. Menambahkan 500 mL aquades.

Analisis:

1. Menyiapkan *vial* dalam keadaan bersih. Cara membersihkan *vial* adalah membilas dan kocok dengan air kran 1 kali, aquades 2 kali lalu dikeringkan.
2. Menambahkan 1,5 mL *digestion solution* (larutan dikromat) ke dalam *vial*.
3. Menambahkan 3,5 mL *sulphuric acid reagent* (larutan Ag_2SO_4 + H_2SO_4) ke dalam *vial*.
4. Menambahkan 1 mL sampel yang telah diencerkan 5 kali, tutup dengan rapat lalu dikocok hingga homogen. Setelah dikocok, pastikan tutup *vial* tetap dalam keadaan rapat.
5. Menghidupkan *digester*, kemudian atur suhunya hingga $150^\circ C$.
6. Memasukkan *vial* ke dalam *digester*, lalu tekan tombol *run/enter*.
7. Setelah 2 jam, turunkan suhu *digester* dan tunggu hingga 15-20 menit. Lalu angkat *vial* dari *digester*, kemudian dikocok hingga homogen, lalu diamkan hingga suhunya turun seperti suhu ruang, dan seluruh suspensi dalam larutan telah mengendap.
8. Menuangkan larutan dalam *vial* ke dalam erlenmeyer dan menambahkan 3 tetes indikator ferroin.

- Memasukkan larutan FAS ke dalam *burret*. Menitrasi larutan dalam erlenmeyer menggunakan *burret* hingga larutan berubah warna menjadi merah bata.

- Menghitung konsentrasi COD dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{COD (mg/L)} = \frac{(A \times B) \times N \times 8000 \times P}{\text{volume sampel}}$$

A = mL FAS titrasi blanko

B = mL FAS titrasi sampel

N = normalitas larutan FAS

P = nilai pengenceran

Lampiran A. 3 Analisis *Total Solids (TS)*

Alat dan Bahan:

- Sampel lumpur alum unit *clearator* PDAM
- Cawan porselen

Prosedur Analisis:

- Memasukkan cawan porselen ke dalam furnace 550°C selama 1 jam, setelah itu memasukkan ke oven 105°C selama 15 menit.
- Mendinginkan cawan porselen dalam desikator selama 15 menit.
- Menimbang cawan porselen kosong dengan neraca analitis (a mg).
- Memasukkan lumpur alum basah sebanyak 25 mL ke dalam cawan yang telah ditimbang (c mL).
- Mengeringkan lumpur alum dalam oven 105°C selama 24 jam.
- Mendinginkan dalam desikator selama 15 menit.
- Menimbang dengan neraca analitis selama (b mg).
- Menghitung jumlah zat padat total dengan rumus:

$$\text{Zat padat total (mg/L)} = \frac{(b-a) \times 1000 \times 1000}{c}$$

a = cawan kosong setelah difurnace 550°C dan dioven 105°C

b = cawan hasil residu setelah dioven 105°C

c = volume sampel (mL)

Lampiran A. 4 Analisis *Total Volatile Solids (TVS)* dan *Total Fixed Solids (TFS)*

Alat dan Bahan:

- Sampel lumpur alum unit *clearator* PDAM

2. Cawan porselen

Prosedur Analisis:

1. Membakar cawan hasil residu dari analisis zat padat total/*Total Solids (TS)* dalam furnace 550°C selama 1 jam.
2. Memasukkan cawan ke dalam oven 105°C selama 15 menit.
3. Mendinginkan cawan dalam desikator selama 15 menit.
4. Menimbang cawan dengan neraca analitik (d mg).
5. Menghitung jumlah zat padat total organik dan inorganik dengan rumus:

$$\text{Zat padat organik (mg/L)} = \frac{(b-d) \times 1000 \times 1000}{c}$$

$$\text{Zat padat inorganik (mg/L)} = \frac{(d-a) \times 1000 \times 1000}{c}$$

c = berat cawan dan residu setelah pembakaran 550°C

Lampiran A. 5 Analisis *Total Suspended Solids (TSS)*

Alat dan Bahan:

1. Sampel lumpur alum unit *clearator* PDAM
2. Cawan porselen

Prosedur Analisis:

1. Membakar cawan porselain dalam furnace 550°C selama 1 jam,
2. Memasukkan cawan porselen ke dalam oven 105°C selama 15 menit.
3. Mengeringkan kertas saring dalam oven 105°C dan mendinginkan dalam desikator selama 15 menit.
4. Cawan dan kertas saring ditimbang dengan neraca analitis (e mg).
5. Meletakkan kertas saring yang telah ditimbang pada vacuum filter.
6. Menuangkan 25 mL sampel lumpur alum unit *clearator* pada kertas saring yang dipasang pada vacuum filter.
7. Mengukur volume filtrat yang melewati kertas saring (g mL).
8. Menyaring sampel lumpur alum hingga kering atau airnya habis.
9. Mengeringkan kertas saring dan cawan porselen dalam oven 105°C selama 1 jam.
10. Mendinginkan dalam desikator selama 15 menit.
11. Menimbang dengan neraca analitis (f mg).
12. Menghitung jumlah zat padat tersuspensi dengan rumus:

$$\text{Zat padat total tersuspensi (mg/L)} = \frac{(f-e) \times 1000 \times 1000}{g}$$

e = cawan dan kertas saring ditimbang dengan neraca analitis

f = cawan dan residu setelah dioven 105°C

g = volume sampel (mL)

Lampiran A. 6 Analisis *Sludge Volume Index (SVI)*

Alat dan Bahan:

1. Sampel lumpur alum unit *clearator*
2. *Imhoff cone*

Prosedur Analisis:

1. Menuangkan lumpur alum hasil sampling unit *clearator* ke dalam *imhoff cone* 1 L.
2. Mendinginkan lumpur selama 30 menit.
3. Mengukur nilai TSS lumpur.
4. Menghitung nilai SVI dengan rumus:

$$\text{SVI} = \frac{\text{volume sludge selama 30 menit } \left(\frac{\text{mL}}{\text{L}}\right)}{\text{TSS } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} \times 1000$$

Lampiran A. 7 Analisis Konduktivitas (DHL)

Alat dan Bahan:

1. Lumpur alum kering
2. Aquades
3. Conductivity meter
4. Larutan KCl

Prosedur Analisis:

1. Lumpur alum kering dicampur dengan aquades secukupnya.
2. Diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 5 menit.
3. Kalibrasi antara *conductivity meter* dengan larutan KCl
4. *Probe conductivity meter* dicelupkan kedalam sampel
5. pembacaan nilai konduktivitas secara digital

Lampiran A. 8 Analisis TDS

Alat dan Bahan:

1. *Beaker glass* 100 mL dan pH ion lab
2. Sampel dan aquades

Prinsip Kerja:

Potensiometri merupakan cara analisis TDS berdasarkan pengukuran beda potensial.

Prosedur Analisis:

1. Menyiapkan sampel sebanyak 10 mL di dalam botol *centrifuge*.
2. Membilas batang silinder pH ion lab dengan aquades kemudian mengeringkan dengan tisu.
3. Menyalakan pH ion lab lalu mengatur mode pengukuran dari salinitas menjadi TDS. Kemudian mencelupkan silinder pH ion lab ke dalam sampel.
4. Menekan tombol read dan menunggu angka pembacaan TDS hingga stabil dengan munculnya tulisan \sqrt{AUTO} .
5. Mencatat angka TDS yang muncul pada layar pH ion lab.

Lampiran A. 9 Analisis pH**Alat dan Bahan:**

1. pH meter, *beaker glass*, *magnetic stirrer*, erlenmeyer 100 mL, gelas ukur 50 mL
2. Sampel dan aquades

Prinsip Kerja:

Potensiometri merupakan cara analisis pH berdasarkan pengukuran pada beda potensial.

Prosedur Analisis:

1. Menyiapkan sampel sebanyak 10 mL.
2. Membilas batang silinder pH meter dengan larutan aquades dan mengeringkannya menggunakan tisu.
3. Menyalakan pH meter lalu mencelupkan pH meter ke dalam sampel.
4. Menunggu angka pembacaan pH hingga stabil dan muncul tulisan *ready*, kemudian mencatat pH yang muncul pada layar pH meter.

Lampiran A. 10 Analisis *Biochemical Oxygen Demand (BOD)***Alat dan Bahan:**

1. Larutan buffer fosfat
2. Larutan magnesium sulfat
3. Larutan kalium klorida
4. Larutan feri klorida
5. Bubuk inhibitor nitrifikasi
6. Larutan mangan sulfat
7. Larutan pereaksi oksigen

8. Indikator amilum
9. Asam sulfat
10. Larutan standar Natrium Tiosulfat
11. Benih
12. Aerator
13. Botol winkler 300 mL
14. Botol winkler 150 mL
15. Labu Pengencer 500 mL
16. Pipet ukur
17. Erlenmeyer 250 mL
18. Buret 25 mL
19. Lumpur alum hasil sampling unit clearator

Prinsip Kerja:

Metode ini digunakan untuk mengetahui tingkat biodegradabilitas pada lumpur alum dengan metode *winkler*.

Prosedur Kerja Pembuatan Reagent:

- Larutan *Buffer* Fosfat
Mencampur dan melarutkan KH_2PO_4 0,85 g, K_2HPO_4 0,2175 g, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,334 g dan NH_4Cl 0,17 g ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.
- Larutan Pereaksi Oksigen
Mencampur dan melarutkan 40 g NaOH, 15 g KI dan 2 g NaN_3 ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

Prosedur Analisis:

A. Pembuatan air pengencer

Air pengencer ini tergantung banyaknya sampel yang akan dianalisis dan pengencerannya, prosedurnya:

1. Menambahkan 1 mL larutan *Buffer* Fosfat per liter air.
2. Menambahkan 1 mL larutan Magnesium Sulfat per liter air.
3. Menambahkan 1 mL larutan Kalium Klorida per liter air.
4. Menambahkan 1 mL larutan Feri Klorida per liter air.
5. Menambahkan 10 mg bubuk inhibitor.
6. Melakukan aerasi minimal selama 2 jam.
7. Menambahkan 1 mL larutan benih per liter air

B. Prosedur Analisis BOD:

1. Menyiapkan 1 buah labu takar 500 ml dan tuangkan sampel sesuai dengan perhitungan pengenceran, tambahkan air pengencer sampai batas labu.
2. Menyiapkan 2 botol winkler 300 ml dan 2 buah botol winkler 150 ml.
3. Menuangkan air dalam labu takar tadi ke dalam botol winkler 300 ml dan 150 ml sampai tumpah.
4. Menuangkan air pengencer ke botol winkler 300 ml dan 150 ml sebagai blanko hingga tumpah.
5. Memasukkan kedua botol winkler 300 ml ke dalam inkubator 20°C selama 5 hari
6. Kedua botol winkler 150 ml yang berisi air dianalisis oksigen terlarutnya dengan prosedur sebagai berikut:
 - a. Menambahkan 1 ml larutan Mangan Sulfat.
 - b. Menambahkan 1 ml larutan Pereaksi Oksigen.
 - c. Menutup botol dengan hati-hati agar tidak ada gelembung udara lalu bolak-balikkan beberapa kali.
 - d. Membiarkan gumpalan mengendap selama 5-10 menit.
 - e. Menambahkan 1 ml Asam Sulfat pekat, tutup dan bolak-balikkan.
 - f. Menuangkan 100 ml larutan ke dalam erlenmeyer 250 ml.
 - g. Menambahkan 3-4 tetes indikator amilum dan titrasi dengan Natrium Tiosulfat. hingga warna biru hilang
7. Setelah 5 hari, analisis kedua larutan dalam botol winkler 300 ml dengan analisis oksigen terlarut
8. Hitung Oksigen terlarut dan BOD dengan rumus berikut:

$$OT (mgO_2/L) = \frac{a \times N \times 8000}{1000 \text{ mL}}$$

$$BOD_{5^{20}} \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)] \times (1 - P)}{P}$$

$$P = \frac{ml \text{ sampel}}{volume \text{ hasil pengenceran (500 mL)}}$$

Keterangan:

X_0 = Oksigen terlarut sampel pada $t = 0$ hari

- X₆ = Oksigen terlarut sampel pada t = 5 hari
- B₀ = Oksigen terlarut blanko pada t = 0 hari
- B₅ = Oksigen terlarut blanko pada t = 5 hari
- P = Derajat pengenceran

Lampiran A. 11 Analisis Kadar Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn

Alat dan Bahan:

1. Lumpur kering
2. Aquades

Prosedur Analisis:

1. Lumpur kering ditambahkan dengan aquades 15 mL.
2. Diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 15 menit.
3. Pembacaan logam aluminium dan Al, Fe, Pb, Cr, Cu, dan Zn dengan alat *Inductively Coupled Plasma* (ICP).

Lampiran A. 12 Analisis Alkalinitas

Alat dan Bahan:

1. Lumpur alum yang telah dikeringkan
2. Lumpur alum hasil sampling unit clearator
3. Aquades
4. pH meter
5. HCl 0,1 N

Prosedur Analisis:

1. Melarutkan lumpur kering dengan aquades sesuai dengan kadar air lumpur segar dari unit clearator.
2. Mengukur nilai pH awal dengan pH meter.
3. Menambahkan HCl hingga nilai pH 5,1.
4. Menghitung nilai alkalinitas dengan rumus:

$$\text{Alkalinitas} = \frac{A \times N}{\text{mL sampel}} \times 50000$$

A = mL asam yang digunakan

N = normalitas standar HCl yang digunakan

Lampiran A. 13 Asidifikasi

Alat dan Bahan:

1. Lumpur alum kering yang telah dikeringkan
2. Aquades
3. Asam sulfat
4. *Magnetic stirrer*

5. Beaker glass 1 L84
6. Pipet ukur
7. Propipet
8. pH meter

Prosedur Analisis:

1. Melarutkan lumpur alum kering sebanyak 200 g dengan aquades hingga 1 L.
2. Mengukur pH awal dengan pH meter.
3. Menghitung volume asam sulfat untuk pH 2 dengan persamaan: $V_1 \times N_1 = V_2 \times N_2$
4. Menghomogenkan dengan *magnetic stirrer* selama 2 jam kecepatan 700 rpm.
5. Mensentrifugasi selama 20 menit kecepatan 4000 rpm.
6. Menyaring supernatan dengan menggunakan kertas saring 10 μm .

LAMPIRAN B HASIL ANALISIS DAN PERHITUNGAN

Lampiran B. 1 Karakterisasi Lumpur Alum

Pengukuran parameter untuk karakterisasi lumpur alum dilakukan secara triplo. Perhitungan hasil pengukuran parameter-parameter untuk karakterisasi lumpur alum adalah sebagai berikut:

a. pH

$$\begin{aligned} \text{Simplo} &= 6,54 \mid \text{Duplo} = 6,57 \mid \text{Triplo} = 6,99 \\ \text{Rata-rata} &= 6,70 \mid \text{St. Deviasi} = 0,25 \\ \text{pH} &= 6,70 \pm 0,25 \end{aligned}$$

b. Total Dissolved Solids (TDS)

$$\begin{aligned} \text{Simplo} &= 222 \mid \text{Duplo} = 222 \mid \text{Triplo} = 222 \\ \text{Rata-rata} &= 222 \mid \text{St. Deviasi} = 0 \\ \text{TDS} &= 222 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

c. Kadar air

$$\begin{aligned} \text{Kadar air} &= \frac{A-B}{A} \times 100\% \\ \text{Simplo} &= \frac{(56,7505-32,4315)-(32,9827-32,4315)}{56,7505-32,4315} \times 100\% = 97,73\% \\ \text{Duplo} &= \frac{(53,926-29,4484)-(30,0029-29,4484)}{53,926-29,4484} \times 100\% = 97,73\% \\ \text{Triplo} &= \frac{(55,0711-30,6511)-(31,2038-30,6511)}{55,0711-30,6511} \times 100\% = 97,73\% \\ \text{Rata-rata} &= 97,73 \mid \text{St. Deviasi} = 0 \\ \text{Kadar air} &= 97,73\% \end{aligned}$$

d. Kadar Total Solids (TS)

$$\text{TS} = \frac{(b-a) \times 1000 \times 1000}{c}$$

a = cawan kosong setelah difurnace 550°C dan dioven 105°C
b = cawan hasil residu setelah dioven 105°C
c = volume sampel (mL)

$$\begin{aligned} \text{Simplo} &= \frac{(32,9827-32,4315)}{25} = 2,22 \text{ mg/L} \\ \text{Duplo} &= \frac{(30,0029-29,4484)}{25} = 2,21 \text{ mg/L} \\ \text{Triplo} &= \frac{(31-2038-30,6511)}{25} = 2,21 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

Rata-rata = 2,206 | St. Deviasi = 0,01

Kadar TS = 2,206 ± 0,01 mg/L

e. Total Volatile Solids (TVS)

$$\text{TVS (mg/L)} = \frac{(b-d) \times 1000 \times 1000}{c}$$

c = berat cawan dan residu setelah pembakaran 550°C

$$\text{Simplo} = \frac{(32,9827 - 32,946) \times 10^6}{25} = 1468 \text{ mg/L}$$

$$\text{Duplo} = \frac{(30,0029 - 29,9671) \times 10^6}{25} = 1432 \text{ mg/L}$$

$$\text{Triplo} = \frac{(31 - 2038 - 31,1684) \times 10^6}{25} = 1416 \text{ mg/L}$$

Rata-rata = 1438,67 | St. Deviasi = 26,63

Kadar TVS = 1438,67 ± 026,63 mg/L

f. Kadar Total Fixed Solids (TFS)

$$\text{TFS (mg/L)} = \frac{(d-a) \times 1000 \times 1000}{c}$$

$$\text{Simplo} = \frac{(32,946 - 32,4315) \times 10^6}{25} = 20,580 \text{ mg/L}$$

$$\text{Duplo} = \frac{(29,9671 - 29,4484) \times 10^6}{25} = 20,748 \text{ mg/L}$$

$$\text{Triplo} = \frac{(31,1684 - 30,6511) \times 10^6}{25} = 20,692 \text{ mg/L}$$

Rata-rata = 20,67 | St. Deviasi = 0,09

Kadar TFS = 20,67 ± 0,09 mg/L

g. Kadar Total Suspended Solids (TSS)

$$\text{TSS (mg/L)} = \frac{(f-e) \times 1000 \times 1000}{g}$$

e = cawan dan kertas saring ditimbang dengan neraca analitis

f = cawan dan residu setelah dioven 105°C

g = volume sampel (mL)

$$\text{Simplo} = \frac{(32,97 - 32,4799) \times 10^6}{23,4} = 20944,44 \text{ mg/L}$$

$$\text{Duplo} = \frac{(30,2496 - 29,7035) \times 10^6}{22} = 24868,18 \text{ mg/L}$$

$$\text{Triplo} = \frac{(30,8866 - 30,3752) \times 10^6}{22} = 23245,45 \text{ mg/L}$$

Rata-rata = 24056,82 | St. Deviasi = 1147,44

Kadar TSS = 24056,82 ± 1147,44 mg/L

h. **Chemical Oxygen Demand (COD)**

$$\text{COD (mg/L)} = \frac{(A \times B) \times N \times 8000 \times P}{\text{volume sampel}}$$

A = mL FAS titrasi blanko

B = mL FAS titrasi sampel

N = normalitas larutan FAS

P = nilai pengenceran

$$\text{Simplo} = \frac{(8,1-7,05) \times 0,05 \times 8000 \times 5}{1} = 2100 \text{ mg/L}$$

$$\text{Duplo} = \frac{(8,1-7,05) \times 0,05 \times 8000 \times 5}{1} = 2100 \text{ mg/L}$$

$$\text{Triplo} = \frac{(7,95-69) \times 0,05 \times 8000 \times 5}{1} = 2100 \text{ mg/L}$$

$$\text{Rata-rata} = 2166,67 \mid \text{St. Deviasi} = 115,47$$

$$[\text{COD}] = 2166,67 \pm 115,47 \text{ mg/L}$$

i. **Biological Oxygen Demand (BOD₅)**

$$\text{BOD}_{5^{20}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)] \times (1 - P)}{P}$$

X₀ = Oksigen terlarut sampel pada t = 0 hari

X₆ = Oksigen terlarut sampel pada t = 5 hari

B₀ = Oksigen terlarut blanko pada t = 0 hari

B₅ = Oksigen terlarut blanko pada t = 5 hari

P = Derajat pengenceran

$$\text{Simplo} = \frac{[(5,75-2,5)-(5,2-3,4)] \times (1 - \frac{1,25}{500})}{(\frac{1,25}{500})} = 578,55 \text{ mg/L}$$

$$\text{Duplo} = \frac{[(6,1-2,7)-(5,2-3,4)] \times (1 - \frac{1,25}{500})}{(\frac{1,25}{500})} = 638,4 \text{ mg/L}$$

$$\text{Triplo} = \frac{[(5,77-2,7)-(5,2-3,4)] \times (1 - \frac{1,25}{500})}{(\frac{1,25}{500})} = 578,55 \text{ mg/L}$$

$$\text{Rata-rata} = 598,5 \mid \text{St. Deviasi} = 34,55$$

$$[\text{BOD}_5] = 598,5 \pm 34,55 \text{ mg/L}$$

j. **Sludge Volume Index (SVI)**

$$\text{SVI} = \frac{\text{volume sludge selama 30 menit} \left(\frac{\text{mL}}{\text{L}} \right)}{\text{TSS} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)} \times 1000$$

$$\text{Simplo} = \frac{\frac{900}{1000} \times 1000}{20944,44} = 45,35$$

$$\text{Duplo} = \frac{\frac{900}{1000} \times 1000}{24868,18} = 36,19$$

$$\begin{aligned} \text{Triplo} &= \frac{\frac{900}{1000} \times 1000}{23245,45} = 38,71 \\ \text{Rata-rata} &= 40,08 \mid \text{St. Deviasi} = 4,73 \\ \text{SVI} &= 40,08 \pm 4,73 \end{aligned}$$

k. Alkalinitas

$$\text{Alkalinitas} = \frac{A \times N}{\text{mL sampel}} \times 50000$$

A = mL asam yang digunakan

N = normalitas standar HCl yang digunakan

$$\text{Simplo} = \frac{3,75 \times 0,1}{50} \times 50000 = 375 \text{ mg/L HCO}_3$$

$$\text{Duplo} = \frac{3,6 \times 0,1}{50} \times 50000 = 360 \text{ mg/L HCO}_3$$

$$\text{Triplo} = \frac{3,25 \times 0,1}{50} \times 50000 = 325 \text{ mg/L HCO}_3$$

$$\text{Rata-rata} = 353,33 \mid \text{St. Deviasi} = 25,66$$

$$[\text{BOD}_5] = 353,33 \pm 25,66 \text{ mg/L HCO}_3$$

l. Konduktivitas (DHL)

$$\text{Simplo} = 817 \mid \text{Duplo} = 824 \mid \text{Triplo} = 837$$

$$\text{Rata-rata} = 826 \mid \text{St. Deviasi} = 10,15$$

$$\text{DHL} = 826 \pm 10,15 \mu\text{S/cm}$$

Lampiran B. 2 Perhitungan Penambahan H₂O₂ untuk *Pre-Treatment* Penurunan Kontaminan Organik

Pre-treatment dengan metode oksidasi dilakukan untuk menurunkan kadar kontaminan organik. Oksidasi dilakukan dengan penambahan H₂O₂ dengan rasio [H₂O₂]/[COD] = 1/2 dan pemaparan sinar UV 254 nm 15 watt. Berdasarkan pengujian kadar COD pada filtrat maka perhitungan penambahan H₂O₂ adalah sebagai berikut:

- **Penambahan H₂O₂ pada filtrat untuk proses oksidasi**

$$[\text{COD}] = 1733,333 \text{ mg/L}$$

$$[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{COD}] = 1/2$$

$$[\text{H}_2\text{O}_2] = 866,665 \text{ mg/L}$$

H₂O₂ 30%

Penambahan H₂O₂:

$$V_1 \times M_1 = V_2 \times M_2$$

$$\begin{aligned}
 V_1 \times M_{H_2O_2} &= \text{Volume Filtrat} \times \frac{\frac{[COD]}{2}}{Mr H_2O_2} \times \text{Volume larutan total} \\
 V_1 \times 0,3 &= 800 \text{ mL} \times \frac{866,665 \text{ mg/L}}{34,01} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \\
 V_1 &= 67,95 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

Sehingga **penambahan H₂O₂** adalah **67,95 mL** H₂O₂ 30% yang diencerkan hingga 200 mL dengan aquades.

Lampiran B. 3 Hasil Uji Polarisasi

Uji polarisasi dilakukan sebanyak empat kali dengan pengaturan tegangan listrik (voltase) sebesar 0,2 volt setiap 3 menit. Tabel hasil uji polarisasi dapat dilihat pada Tabel LB. 1 – LB. 4.

Tabel LB. 1 Hasil Uji Polarisasi Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
3	0,2	0	0,00	7,66
6	0,4	0	0,00	
9	0,6	0	0,00	7,63
12	0,8	0	0,00	
15	1	0	0,00	7,64
18	1,2	0	0,00	
21	1,4	0	0,00	
24	1,6	0	0,00	7,86
27	1,8	0	0,00	
30	2	0	0,00	7,69
33	2,2	0	0,00	
36	2,4	0	0,00	
39	2,6	0	0,00	7,66
42	2,8	0	0,00	
45	3	0	0,00	7,71
48	3,2	0	0,00	
51	3,4	0	0,00	
54	3,6	0	0,00	7,57

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
57	3,8	0	0,00	
60	4	0	0,00	7,66
63	4,2	8	0,33	
66	4,4	10	0,42	
69	4,6	11	0,46	7,6
72	4,8	12	0,50	
75	5	15	0,63	7,52
78	5,2	16	0,67	
81	5,4	21	0,88	
84	5,6	27	1,13	7,61
87	5,8	38	1,58	
90	6	49	2,04	7,58
93	6,2	124	5,17	
96	6,4	685	28,54	
99	6,6	716	29,83	7,74
102	6,8	837	34,88	
105	7	983	40,96	7,71

Tabel LB. 2 Hasil Uji Polarisasi Filtrat Tanpa Oksidasi pH 3,5

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
3	0,2	0	0,00	9,24
6	0,4	0	0,00	
9	0,6	0	0,00	9,3
12	0,8	0	0,00	
15	1	0	0,00	9,04
18	1,2	0	0,00	
21	1,4	0	0,00	8,95
24	1,6	0	0,00	
27	1,8	8	0,33	8,9

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
30	2	22	0,92	
33	2,2	46	1,92	9,11
36	2,4	63	2,63	
39	2,6	100	4,17	9,12
42	2,8	122	5,08	
45	3	166	6,92	9,02
48	3,2	195	8,13	
51	3,4	242	10,08	9,22
54	3,6	295	12,29	
57	3,8	337	14,04	9,18
60	4	401	16,71	
63	4,2	430	17,92	9,22
66	4,4	510	21,25	
69	4,6	583	24,29	9,18
72	4,8	660	27,50	
75	5	750	31,25	9,13
78	5,2	812	33,83	
81	5,4	920	38,33	9,06
84	5,6	996	41,50	9,14

Tabel LB. 3 Hasil Uji Polarisasi Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
0	0	0	0,00	10,15
3	0,2	0	0,00	
6	0,4	0	0,00	9,62
9	0,6	0	0,00	
12	0,8	0	0,00	
15	1	0	0,00	9,62
18	1,2	0	0,00	

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
21	1,4	0	0,00	9,63
24	1,6	0	0,00	
27	1,8	8	0,33	
30	2	11	0,46	9,48
33	2,2	14	0,58	
36	2,4	26	1,08	9,74
39	2,6	56	2,33	
42	2,8	90	3,75	
45	3	145	6,04	9,69
48	3,2	210	8,75	
51	3,4	300	12,50	9,52
54	3,6	403	16,79	
57	3,8	475	19,79	
60	4	606	25,25	9,26
63	4,2	688	28,67	
66	4,4	827	34,46	9,7
69	4,6	940	39,17	
72	4,7	990	41,25	9,64

Tabel LB. 4 Hasil Uji Polarisasi Filtrat dengan Oksidasi pH 4

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
0	0	0,00	0,00	6,3
3	0,2	0,01	0,00	6,2
6	0,4	0,02	0,00	
9	0,6	0,03	0,00	6,32
12	0,8	0,03	0,00	
15	1	0,04	0,00	6,07
18	1,2	0,05	0,00	
21	1,4	0,06	0,00	6,09

Menit ke-	Voltase	Kuat Arus (mA)	Densitas Arus (mA/cm ²)	TDS (g/L)
24	1,6	0,07	0,00	
27	1,8	8,00	0,33	6,25
30	2	12,00	0,50	
33	2,2	16,00	0,67	6,16
36	2,4	23,00	0,96	
39	2,6	30,00	1,25	6,15
42	2,8	35,00	1,46	
45	3	42,00	1,75	6,09
48	3,2	59,00	2,46	
51	3,4	63,00	2,63	5,93
54	3,6	68,00	2,83	
57	3,8	80,00	3,33	6,46
60	4	93,00	3,88	
63	4,2	158,00	6,58	6,33
66	4,4	176,00	7,33	
69	4,6	204,00	8,50	5,81
72	4,8	247,00	10,29	
73	5	259,00	10,79	6,15
74	5,2	320,00	13,33	
75	5,4	345,00	14,38	6,28

Lampiran B. 4 Hasil Analisis pH

Analisis pH dilakukan secara triplo pada setiap jam selama proses elektrolisis dengan menggunakan alat pH meter. Hasil analisis pada setiap jam operasi dapat dilihat pada Tabel LB. 5 – LB. 10.

Tabel LB. 5 Nilai pH pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 4; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase	pH				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	3,99	3,99	3,99	3,990	0,000
1	5,6	3,94	3,93	3,93	3,933	0,006
2	5,7	3,97	3,95	3,97	3,963	0,012
3	5,8	3,94	3,94	3,94	3,940	0,000
4	5,9	3,89	3,89	3,89	3,890	0,000
5	5,6	3,86	3,86	3,87	3,863	0,006
6	5,7	3,90	3,90	3,90	3,900	0,000
7	5,7	3,99	3,96	3,96	3,970	0,017
8	5,8	3,88	3,88	3,88	3,880	0,000

Tabel LB. 6 Nilai pH pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase	pH				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	4,00	4,00	4,00	4,000	0,000
1	3,9	3,99	3,99	3,99	3,990	0,000
2	4	3,99	3,96	3,99	3,980	0,017
3	4,1	3,99	3,97	3,97	3,977	0,012
4	4,2	3,99	3,99	3,99	3,990	0,000
5	4,2	4,00	4,00	4,00	4,000	0,000
6	4,2	3,98	3,99	3,99	3,987	0,006
7	4,2	4,01	4,00	4,00	4,003	0,006
8	4,2	4,02	4,02	4,02	4,020	0,000

Tabel LB. 7 Nilai pH pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase	pH				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	4,00	4,00	4,00	4,000	0,000
1	3,5	3,83	3,82	3,82	3,823	0,006
2	3,6	3,84	3,84	3,85	3,843	0,006
3	3,6	3,85	3,85	3,84	3,847	0,006
4	3,6	3,86	3,86	3,86	3,860	0,000
5	3,6	3,99	3,98	3,99	3,987	0,006
6	3,6	3,95	3,96	3,95	3,953	0,006
7	3,6	3,99	3,99	3,99	3,990	0,000
8	3,6	3,94	3,94	3,94	3,940	0,000

Tabel LB. 8 Nilai pH pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 3; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	pH				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5	3,00	3,00	3,00	3,000	0,000
1	5,2	3,04	3,04	3,04	3,040	0,000
2	5,2	3,06	3,06	3,06	3,060	0,000
3	5,1	3,04	3,04	3,04	3,040	0,000
4	5,3	3,03	3,03	3,03	3,030	0,000
5	5,2	3,05	3,05	3,05	3,050	0,000
6	5,2	3,02	3,02	3,02	3,020	0,000
7	5,2	3,00	3,00	3,00	3,000	0,000
8	5,2	3,00	3,00	3,00	3,000	0,000

Tabel LB. 9 Nilai pH pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	pH				
		Simple	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3	3,00	3,00	3,00	3,000	0,000
1	3,2	2,94	2,94	2,94	2,940	0,000
2	3,2	2,94	2,94	2,94	2,940	0,000
3	3,2	2,92	2,92	2,92	2,920	0,000
4	3,2	2,97	2,97	2,97	2,970	0,000
5	3,2	2,91	2,91	2,91	2,910	0,000
6	3,2	2,94	2,94	2,94	2,940	0,000
7	3,2	2,90	2,90	2,90	2,900	0,000
8	3,3	2,91	2,91	2,91	2,910	0,000

Tabel LB. 10 Nilai pH pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	pH				
		Simple	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3	3,00	3,00	3,00	3,000	0,000
1	3,2	3,00	3,00	3,00	3,000	0,000
2	3,2	2,98	2,98	2,98	2,980	0,000
3	3,2	2,97	2,97	2,97	2,970	0,000
4	3,2	2,97	2,97	2,97	2,970	0,000
5	3,2	2,96	2,96	2,96	2,960	0,000
6	3,2	2,96	2,96	2,96	2,960	0,000
7	3,2	2,94	2,94	2,94	2,940	0,000
8	3,3	2,94	2,94	2,94	2,940	0,000

Lampiran B. 5 Hasil Analisis TDS

Analisis TDS dilakukan secara triplo pada setiap jam selama proses elektrolisis dengan menggunakan alat *conductivity meter*.

Hasil analisis pada setiap jam operasi dapat dilihat pada Tabel LB. 11 – LB. 16.

Tabel LB. 11 Nilai TDS pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 4; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase	TDS (g/L)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	10,90	12,02	11,85	11,590	0,604
1	5,6	10,73	10,26	10,30	10,430	0,261
2	5,7	11,30	11,00	10,86	11,053	0,225
3	5,8	11,28	10,96	10,95	11,063	0,188
4	5,9	11,17	10,93	10,91	11,003	0,145
5	5,6	10,95	10,86	10,73	10,847	0,111
6	5,7	11,00	10,81	10,67	10,827	0,166
7	5,7	11,14	10,94	10,90	10,993	0,129
8	5,8	11,15	10,91	11,03	11,030	0,120

Tabel LB. 12 Nilai TDS pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase	TDS (g/L)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	7,11	7,15	7,20	7,153	0,045
1	3,9	7,29	7,02	7,06	7,123	0,146
2	4	6,86	6,98	6,89	6,910	0,062
3	4,1	6,79	6,99	6,97	6,917	0,110
4	4,2	6,85	6,98	6,92	6,917	0,065
5	4,2	7,29	7,02	6,99	7,100	0,165
6	4,2	6,87	6,89	6,87	6,877	0,012
7	4,2	6,96	6,98	7,00	6,980	0,020
8	4,2	7,14	7,03	6,96	7,043	0,091

Tabel LB. 13 Nilai TDS pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase	TDS (g/L)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	6,64	6,52	6,56	6,573	0,061
1	3,5	6,53	6,55	6,40	6,493	0,081
2	3,6	6,57	6,29	6,31	6,390	0,156
3	3,6	6,61	6,34	6,33	6,427	0,159
4	3,6	6,53	6,41	6,37	6,437	0,083
5	3,6	6,55	6,37	6,37	6,430	0,104
6	3,6	6,44	6,40	6,44	6,427	0,023
7	3,6	6,41	6,33	6,34	6,360	0,044
8	3,6	6,41	6,33	6,30	6,347	0,057

Tabel LB. 14 Nilai TDS pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 3; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	TDS (g/L)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5	13,10	13,18	13,16	13,147	0,042
1	5,2	12,01	11,71	11,79	11,837	0,155
2	5,2	11,91	11,76	11,56	11,743	0,176
3	5,1	12,09	11,82	11,73	11,880	0,187
4	5,3	11,91	11,65	11,67	11,743	0,145
5	5,2	12,08	11,82	11,58	11,827	0,250
6	5,2	11,95	11,65	11,54	11,713	0,212
7	5,2	12,20	11,77	11,60	11,857	0,309
8	5,2	12,04	11,79	11,58	11,803	0,230

Tabel LB. 15 Nilai TDS pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltage (V)	TDS (g/L)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3	6,63	6,66	6,63	6,640	0,017
1	3,2	6,55	6,46	6,40	6,470	0,075
2	3,2	6,34	6,32	6,12	6,260	0,122
3	3,2	6,48	6,34	6,37	6,397	0,074
4	3,2	6,55	6,43	6,35	6,443	0,101
5	3,2	6,61	6,29	6,45	6,450	0,160
6	3,2	6,56	6,43	6,40	6,463	0,085
7	3,2	6,59	6,50	6,45	6,513	0,071
8	3,3	6,58	6,53	6,48	6,530	0,050

Tabel LB. 16 Nilai TDS pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltage (V)	TDS (g/L)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	6,96	6,85	6,92	6,910	0,056
1	3,3	6,96	6,75	6,75	6,820	0,121
2	3,3	6,83	6,85	6,82	6,833	0,015
3	3,3	6,78	6,80	6,78	6,787	0,012
4	3,3	6,95	6,81	6,78	6,847	0,091
5	3,3	6,65	6,67	6,60	6,640	0,036
6	3,3	7,01	6,79	6,81	6,870	0,122
7	3,3	7,01	6,81	6,82	6,880	0,113
8	3,3	6,76	6,72	6,69	6,723	0,035

Lampiran B. 6 Hasil Analisis Konduktivitas (DHL)

Analisis DHL dilakukan secara triplo pada setiap jam selama proses elektrolisis menggunakan alat *conductivity meter*. Hasil

analisis pada setiap jam operasi dapat dilihat pada Tabel LB. 17 – LB. 22.

Tabel LB. 17 Nilai DHL pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 4; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	DHL (mS/cm)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	21,80	24,10	23,70	23,20	1,23
1	5,6	21,50	20,50	20,60	20,87	0,55
2	5,7	21,50	20,50	20,60	20,87	0,55
3	5,8	22,50	21,90	21,90	22,10	0,35
4	5,9	22,40	21,90	21,80	22,03	0,32
5	5,6	21,90	21,70	21,50	21,70	0,20
6	5,7	22,00	21,60	21,30	21,63	0,35
7	5,7	22,30	21,90	21,80	22,00	0,26
8	5,8	22,30	21,80	22,10	22,07	0,25

Tabel LB. 18 Nilai DHL pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	DHL (mS/cm)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	14,22	14,24	14,30	14,25	0,04
1	3,9	14,60	14,03	14,13	14,25	0,30
2	4	13,71	13,95	13,98	13,88	0,15
3	4,1	13,59	13,97	13,93	13,83	0,21
4	4,2	13,71	13,96	13,85	13,84	0,13
5	4,2	14,61	14,04	13,98	14,21	0,35
6	4,2	13,75	13,79	13,74	13,76	0,03
7	4,2	13,91	13,95	13,99	13,95	0,04
8	4,2	14,27	14,05	13,92	14,08	0,18

Tabel LB. 19 Nilai DHL pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	DHL (mS/cm)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	13,27	13,03	13,12	13,14	0,12
1	3,5	13,06	13,08	12,82	12,99	0,14
2	3,6	13,14	12,52	12,61	12,76	0,34
3	3,6	13,23	12,68	12,65	12,85	0,33
4	3,6	13,05	12,82	12,74	12,87	0,16
5	3,6	13,08	12,74	12,73	12,85	0,20
6	3,6	12,90	12,79	12,87	12,85	0,06
7	3,6	12,82	12,67	12,68	12,72	0,08
8	3,6	12,83	12,66	12,61	12,70	0,12

Tabel LB. 20 Nilai DHL pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 3; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	DHL (mS/cm)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5	26,20	26,40	26,30	26,30	0,10
1	5,2	24,00	23,40	23,60	23,67	0,31
2	5,2	23,80	23,50	23,10	23,47	0,35
3	5,1	24,20	23,60	23,50	23,77	0,38
4	5,3	23,80	23,30	23,30	23,47	0,29
5	5,2	24,20	23,60	23,20	23,67	0,50
6	5,2	23,90	23,30	23,10	23,43	0,42
7	5,2	24,30	23,50	23,20	23,67	0,57
8	5,2	24,10	23,60	23,10	23,60	0,50

Tabel LB. 21 Nilai DHL pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	DHL (mS/cm)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3	13,25	13,31	13,26	13,27	0,03
1	3,2	13,11	12,93	12,80	12,95	0,16
2	3,2	12,66	12,63	12,25	12,51	0,23
3	3,2	12,97	12,68	12,74	12,80	0,15
4	3,2	13,09	12,86	12,70	12,88	0,20
5	3,2	13,23	12,58	12,91	12,91	0,33
6	3,2	13,11	12,86	12,80	12,92	0,16
7	3,2	13,17	13,01	12,90	13,03	0,14
8	3,3	13,16	13,06	12,97	13,06	0,10

Tabel LB. 22 Nilai DHL pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	DHL (mS/cm)				
		Simplo	Duplo	Triplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	3,2	13,93	13,70	13,84	13,82	0,12
1	3,3	13,92	13,49	13,51	13,64	0,24
2	3,3	13,65	13,70	13,65	13,67	0,03
3	3,3	13,56	13,59	13,56	13,57	0,02
4	3,3	13,91	13,63	13,56	13,70	0,19
5	3,3	13,38	13,33	13,21	13,31	0,09
6	3,3	14,01	13,57	13,61	13,73	0,24
7	3,3	14,02	13,62	13,64	13,76	0,23
8	3,3	13,51	13,51	13,44	13,37	0,04

Lampiran B. 7 Hasil Analisis COD

Analisis COD dilakukan secara duplo pada setiap jam selama proses elektrolisis dengan metode pengukuran *close reflux* dan

titimetric. Hasil analisis pada setiap jam operasi dapat dilihat pada Tabel LB. 23 – 28.

Tabel LB. 23 [COD] pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 4; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	COD (mg/L)			
		Simplo	Duplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	1440,00	1440,00	1440,00	0,00
1	5,6	1540,00	1540,00	1540,00	0,00
2	5,7	2300,00	1600,00	1950,00	494,97
3	5,8	1960,00	2360,00	2160,00	282,84
4	5,9	1320,00	1320,00	1320,00	0,00
5	5,6	1880,00	1880,00	1880,00	0,00
6	5,7	1660,00	1480,00	1570,00	127,28
7	5,7	1800,00	1280,00	1540,00	367,70
8	5,8	1060,00	1060,00	1060,00	0,00

Tabel LB. 24 [COD] pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	COD (mg/L)			
		Simplo	Duplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	600,00	1000,00	800,00	282,84
1	5,6	800,00	880,00	840,00	56,57
2	5,7	1200,00	1200,00	1200,00	0,00
3	5,8	300,00	60,00	180,00	169,71
4	5,9	280,00	280,00	280,00	0,00
5	5,6	360,00	140,00	250,00	155,56
6	5,7	340,00	200,00	270,00	98,99
7	5,7	260,00	60,00	160,00	141,42
8	5,8	240,00	240,00	240,00	0,00

Tabel LB. 25 [COD] pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 4; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	COD (mg/L)			
		Simplo	Duplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	480,00	400,00	440,00	56,57
1	5,6	520,00	300,00	410,00	155,56
2	5,7	360,00	300,00	330,00	42,43
3	5,8	500,00	720,00	610,00	155,56
4	5,9	440,00	440,00	440,00	0,00
5	5,6	360,00	360,00	360,00	0,00
6	5,7	320,00	320,00	320,00	0,00
7	5,7	360,00	360,00	360,00	0,00
8	5,8	160,00	160,00	160,00	0,00

Tabel LB. 26 [COD] pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 3; I = 700 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	COD (mg/L)			
		Simplo	Duplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	1720,00	1660,00	1690,00	42,43
1	5,6	1800,00	1800,00	1800,00	0,00
2	5,7	1820,00	1800,00	1810,00	14,14
3	5,8	2080,00	2040,00	2060,00	28,28
4	5,9	2020,00	1700,00	1860,00	226,27
5	5,6	1900,00	1880,00	1890,00	14,14
6	5,7	1680,00	2200,00	1940,00	367,70
7	5,7	2080,00	1980,00	2030,00	70,71
8	5,8	1660,00	1200,00	1430,00	325,27

Tabel LB. 27 [COD] pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	COD (mg/L)			
		Simplo	Duplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	200,00	160,00	180,00	28,28

Jam ke-	Voltase (V)	COD (mg/L)			
		Simplo	Duplo	Rata-rata	St. Deviasi
1	5,6	500,00	460,00	480,00	28,28
2	5,7	340,00	360,00	350,00	14,14
3	5,8	60,00	320,00	190,00	183,85
4	5,9	160,00	120,00	140,00	28,28
5	5,6	80,00	40,00	60,00	28,28
6	5,7	180,00	200,00	190,00	14,14
7	5,7	280,00	300,00	290,00	14,14
8	5,8	40,00	40,00	40,00	0,00

Tabel LB. 28 [COD] pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 3; I = 200 mA)

Jam ke-	Voltase (V)	COD (mg/L)			
		Simplo	Duplo	Rata-rata	St. Deviasi
0	5,0	100,00	120,00	110,00	14,14
1	5,6	180,00	180,00	180,00	0,00
2	5,7	200,00	240,00	220,00	28,28
3	5,8	160,00	80,00	120,00	56,57
4	5,9	60,00	60,00	60,00	0,00
5	5,6	60,00	60,00	60,00	0,00
6	5,7	60,00	60,00	60,00	0,00
7	5,7	40,00	40,00	40,00	0,00
8	5,8	20,00	20,00	20,00	0,00

Lampiran B. 8 Perhitungan Berat Endapan di Katoda

Di akhir proses elektrolisis katoda platina dikeringkan pada suhu 105°C dan ditimbang dengan neraca analitik. Berat yang diperoleh kemudian dikurangi dengan berat awal katoda platina sehingga diperoleh berat endapan di katoda. perhitungan berat endapan di katoda adalah sebagai berikut

Filtrat pH 4; Tanpa Oksidasi; I = 700 mA

Δ berat katoda platina

= (berat kering elektroda akhir – berat kering elektroda awal)

= 23,0768 g – 23,2739 g

= 0,1971 g

Filtrat pH 4; Oksidasi H₂O₂; I = 200 mA

Δ berat katoda platina

= (berat kering elektroda akhir – berat kering elektroda awal)

= 23,1149 g – 23,1905 g

= 0,0756 g

Filtrat pH 4; Oksidasi H₂O₂ + UV 254 nm; I = 200 mA

Δ berat katoda platina

= (berat kering elektroda akhir – berat kering elektroda awal)

= 23,1201 g – 23,1519 g

= 0,0318 g

Filtrat pH 3; Tanpa Oksidasi; I = 700 mA

Δ berat katoda platina

= (berat kering elektroda akhir – berat kering elektroda awal)

= 23,1402 g – 23,4895 g

= 0,3493 g

Filtrat pH 3; Oksidasi H₂O₂; I = 200 mA

Δ berat katoda platina

= (berat kering elektroda akhir – berat kering elektroda awal)

= 23,1247 g – 23,2785 g

= 0,1538 g

Filtrat pH 3; Oksidasi H₂O₂ + UV 254 nm; I = 200 mA

Δ berat katoda platina

= (berat kering elektroda akhir – berat kering elektroda awal)

= 23,1279 g – 23,2560 g

= 0,1281 g

Lampiran B. 9 Hasil Analisis Kadar Logam

Pengukuran kadar logam dilakukan pada filtrat di awal dan akhir elektrolisis serta pada endapan di katoda dan endapan di *feed tank*

(persipitat/koloid). Pengukuran kadar logam menggunakan alat ICP-OES. Hasil analisis pada kadar logam pada tiap variasi elektrolisis dapat dilihat pada Tabel LB. 29 – 35.

Tabel LB. 29 Kadar Logam pada Lumpur Alum dan Filtrat Lumpur Alum

Kadar (mg/L)	Karakteristik Lumpur	Filtrat Setelah Asidifikasi	Filtrat Setelah Oksidasi H ₂ O ₂	Filtrat Setelah Oksidasi H ₂ O ₂ + UV
Zn	0,01	2,90	2,43	2,58
Al	3,47	4346,00	2437,86	2770,00
Cu	0,01	2,59	0,95	1,04
Fe	0,10	156,10	283,80	294,70
Cr	0,002	0,22	0,23	0,35
Pb	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabel LB. 30 Kadar Logam pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 4; I = 700 mA)

Kadar (mg/L)	t ₀	t ₈	Endapan di Katoda	Endapan di Feed Tank
Zn	3,12	2,45	0,31	2,33
Al	3377,00	500,28	9,11	2775,00
Cu	1,72	1,61	0,05	1,50
Fe	135,40	89,66	0,58	156,20
Cr	0,25	0,27	0,0007	0,25
Pb	0,01	0,01	0,02	0,01

Tabel LB. 31 Kadar Logam pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 4; I = 200 mA)

Kadar (mg/L)	t ₀	t ₈	Endapan di Katoda	Endapan di Feed Tank
Zn	2,86	2,40	1,11	2,35
Al	2073,00	887,10	107,00	1214,00
Cu	0,90	0,75	2,28	0,73

Kadar (mg/L)	t0	t8	Endapan di Katoda	Endapan di Feed Tank
Fe	51,81	33,36	0,62	26,64
Cr	0,12	0,19	0,0223	0,19
Pb	0,01	0,01	0,16	0,01

Tabel LB. 32 Kadar Logam pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 4; I = 200 mA)

Kadar (mg/L)	t0	t8	Endapan di Katoda	Endapan di Feed Tank
Zn	2,91	2,40	3,15	2,40
Al	2368,00	2650,00	107,90	1168,00
Cu	0,92	0,05	8,73	0,05
Fe	80,76	78,24	1,49	34,07
Cr	0,16	0,20	0,0134	0,20
Pb	0,01	0,01	0,49	0,01

Tabel LB. 33 Kadar Logam pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi (pH 3; I = 700 mA)

Kadar (mg/L)	t0	t8	Endapan di Katoda
Zn	2,81	2,77	3,21
Al	3762,00	3711,00	95,91
Cu	1,54	1,59	8,37
Fe	215,70	211,80	7,94
Cr	0,31	4,71	0,0630
Pb	0,00	0,00	0,06

Tabel LB. 34 Kadar Logam pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ (pH 3; I = 200 mA)

Kadar (mg/L)	t0	t8	Endapan di Katoda
Zn	2,64	2,88	3,25

Kadar (mg/L)	t0	t8	Endapan di Katoda
Al	2583,00	2560,00	61,53
Cu	0,83	0,41	4,94
Fe	112,50	130,80	4,15
Cr	0,22	0,73	0,0136
Pb	0,01	0,01	0,26

Tabel LB. 35 Kadar Logam pada Elektrolisis Filtrat Oksidasi H₂O₂ + UV (pH 3; I = 200 mA)

Kadar (mg/L)	t0	t8	Endapan di Katoda
Zn	2,79	2,66	3,48
Al	2648,00	2679,00	150,80
Cu	0,97	0,57	15,91
Fe	134,10	149,00	14,90
Cr	0,20	0,58	0,0508
Pb	0,01	0,01	0,60

Lampiran B. 10 Perhitungan *Mass Balance* Al

Perhitungan *mass balance* Al digunakan untuk mengetahui persentase *recovery* Al yang dapat diketahui dari banyaknya Al yang terdeposisi di katoda. Kadar logam (g) pada tiap variasi elektrolisis dapat dilihat pada Tabel LB. 36 dan persentase *recovery* Al di tiap variasi elektrolisis dapat dilihat pada Tabel LB. 37.

Tabel LB. 36 Kadar Logam pada Tiap Variasi Elektrolisis

Variasi	Logam	t0		Endapan di Katoda		Endapan di Feed Tank		t8
		Massa (g)	% logam	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)	Berat Al(OH)3 (g)	
Tanpa Oksidasi, pH 4	Zn	0,002499	0,09%		0,0061		0,0054	0,001
	Al	2,701600	96,01%		0,1781		2,2152	0,305
	Cu	0,001375	0,05%	0,1971	0,0010	6,7692	0,0035	0,001
	Fe	0,108320	3,85%		0,0114		0,3602	0,055
	Cr	0,000196	0,01%		0,0000		0,0006	0,000
	Pb	0,000005	0,0002%		0,0004		0,00001	0,000
Oksidasi H2O2, pH 4	Zn	0,002856	0,13%		0,0008		0,0062	0,002
	Al	2,073000	97,38%		0,0728		1,1175	0,719
	Cu	0,000902	0,04%	0,0756	0,0015	3,3079	0,0019	0,001
	Fe	0,051810	2,43%		0,0004		0,0708	0,027
	Cr	0,000118	0,006%		0,0000		0,0005	0,0002
	Pb	0,000006	0,0003%		0,0001		0,00002	0,000005
Oksidasi H2O2 + UV, pH 4	Zn	0,002910	0,12%		0,00004		0,00022	0,002
	Al	2,368000	96,54%		0,0307		0,03638	2,147
	Cu	0,000923	0,04%	0,0318	0,00001	1,7995	0,00000	0,00004
	Fe	0,080760	3,29%		0,0010		0,00307	0,063
	Cr	0,000161	0,007%		0,000002		0,00002	0,0002
	Pb	0,000006	0,0002%		0,0000001		0,000001	0,000005

Variasi	Logam	t0		Endapan di Katoda		Endapan di Feed Tank		t8
		Massa (g)	% logam	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)	Berat Al(OH)3 (g)	
Tanpa Oksidasi, pH 3	Zn	0,002248	0,07%		0,0097			0,002
	Al	3,009600	94,47%		0,2899			2,264
	Cu	0,001230	0,04%	0,3493	0,0253			0,001
	Fe	0,172560	5,42%		0,0240			0,129
	Cr	0,000246	0,01%		0,0002			0,003
	Pb	0,000003	0,0001%		0,0002			0,000002
Oksidasi H2O2, pH 3	Zn	0,000706	0,10%		0,0067			0,0023
	Al	2,583000	95,70%		0,1276			2,0736
	Cu	0,000831	0,03%	0,1538	0,0102			0,0003
	Fe	0,112500	4,17%		0,0086			0,1059
	Cr	0,000220	0,01%		0,00003			0,0006
	Pb	0,000006	0,0002%		0,0005			0,000005
Oksidasi H2O2 + UV, pH 3	Zn	0,002791	0,10%		0,00240			0,0022
	Al	2,648000	95,04%		0,10400			2,1700
	Cu	0,000972	0,03%	0,1281	0,01097			0,0005
	Fe	0,134100	4,81%		0,01028			0,1207
	Cr	0,000203	0,01%		0,00004			0,0005
	Pb	0,000006	0,0002%		0,00042			0,000005

Contoh Perhitungan Massa Al pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4

- **Massa Al pada awal proses elektrolisis (t0)**

$$\begin{aligned} \text{Hasil ICP } t_0 &= 3377 \text{ mg/L} \\ \text{Volume awal filtrat} &= 0,8 \text{ L} \\ \text{Massa Al } t_0 &= \text{hasil ICP } t_0 \times \text{volume awal filtrat} \\ &= 3377 \text{ mg/L} \times 0,8 \text{ L} \\ &= 2,7 \text{ g} \\ \text{Massa logam total} &= 2,814 \text{ g} \\ \text{Persen Al } t_0 &= \frac{\text{massa Al } t_0}{\text{massa logam total}} \times 100\% \\ &= \frac{2,7 \text{ g}}{2,814 \text{ g}} \\ &= 96,01\% \end{aligned}$$

- **Massa Al pada endapan di katoda**

$$\begin{aligned} \text{Hasil ICP} &= 9,11 \text{ mg/L} \\ \text{Volume HNO}_3 &= 0,05 \text{ L} \\ \text{Massa Al ICP} &= \text{hasil ICP} \times \text{volume HNO}_3 \\ &= 9,11 \text{ mg/L} \times 0,05 \text{ L} \\ &= 0,000456 \text{ g} \\ \text{Massa logam total} &= 0,000504 \text{ g} \\ \text{Persen Al} &= \frac{\text{massa Al}}{\text{massa logam total}} \times 100\% \\ &= \frac{0,000456 \text{ g}}{0,000504 \text{ g}} \\ &= 90,39\% \\ \text{Berat endapan} &= 0,1971 \text{ g} \\ \text{Massa Al katoda} &= \text{berat endapan} \times \text{persen Al} \\ &= 0,1971 \text{ g} \times 90,39\% \\ &= 0,1781 \text{ g} \end{aligned}$$

- **Massa Al pada endapan/persipit di feed tank**

$$\begin{aligned} \text{Hasil ICP} &= 2775 \text{ mg/L} \\ \text{Volume HNO}_3 &= 0,05 \text{ L} \\ \text{Massa Al ICP} &= \text{hasil ICP} \times \text{volume HNO}_3 \\ &= 2775 \text{ mg/L} \times 0,05 \text{ L} \\ &= 0,14 \text{ g} \\ \text{Massa logam total} &= 0,15 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persen Al} &= \frac{\text{massa Al}}{\text{massa logam total}} \times 100\% \\ &= \frac{0,14 \text{ g}}{0,15 \text{ g}} \\ &= 94,54\% \\ \text{Berat endapan} &= 6,77 \text{ g} \\ \text{Massa Al persipitat} &= \text{berat endapan} \times \text{persen Al} \times \frac{\text{Ar Al}}{\text{Mr Al(OH)}_3} \\ &= 6,77 \text{ g} \times 90,39\% \times \frac{27}{78} \\ &= 2,215 \text{ g} \end{aligned}$$

- **Massa Al pada akhir proses elektrolisis (t8)**

$$\begin{aligned} \text{Hasil ICP t8} &= 500,28 \text{ mg/L} \\ \text{Volume awal filtrat} &= 0,61 \text{ L} \\ \text{Massa Al t8} &= \text{hasil ICP t8} \times \text{volume filtrat} \\ &= 500,28 \text{ mg/L} \times 0,61 \text{ L} \\ &= 0,305 \text{ g} \\ \text{Massa logam total} &= 0,36 \text{ g} \\ \text{Persen Al t8} &= \frac{\text{massa Al t8}}{\text{massa logam total}} \times 100\% \\ &= \frac{0,305 \text{ g}}{0,36 \text{ g}} \\ &= 84,1\% \end{aligned}$$

Tabel LB. 37 Persentase Recovery Al pada Tiap Variasi Elektrolisis

Variasi Filtrat Elektrolisis	Satuan	Keseimbangan Massa Al				
		Al0	Endapan di Katoda	Endapan di Feed Tank	Al8	Kehilangan Massa
		A	B	C	D	E = A - (B + C + D)
Tanpa Oksidasi, pH 4	g	2,70	0,18	2,22	0,31	0,003
	%	100,00	6,59	82,00	11,30	0,11
Oksidasi H ₂ O ₂ , pH 4	g	2,07	0,07	1,12	0,72	0,16
	%	100,00	3,51	53,91	34,66	7,92
Oksidasi H ₂ O ₂ + UV, pH 4	g	2,37	0,03	0,04	2,15	0,15
	%	100,00	1,30	1,54	90,65	6,52

Variasi Filtrat Elektrolisis	Satuan	Keseimbangan Massa Al				
		Al0	Endapan di Katoda	Endapan di Feed Tank	Al8	Kehilangan Massa
		A	B	C	D	E = A - (B + C + D)
Tanpa Oksidasi, pH 3	g	3,01	0,29		2,26	0,46
	%	100,00	9,63		75,22	16,88
Oksidasi H ₂ O ₂ , pH 3	g	2,58	0,13		2,07	0,38
	%	100,00	4,94		80,28	18,42
Oksidasi H ₂ O ₂ + UV, pH 3	g	2,65	0,10		2,17	0,37
	%	100,00	3,93		81,95	15,79

Contoh Perhitungan Persentase Recovery Al pada Elektrolisis Filtrat Tanpa Oksidasi pH 4

- **Massa Al total**
 = Massa Al t0
 = 2,7 g
 = 100%
- **Persentase Al pada endapan di katoda**
 = % *recovery*
 = $\frac{\text{massa Al pada endapan di katoda}}{\text{massa Al total}} \times 100\%$
 = $\frac{0,18 \text{ g}}{2,7 \text{ g}} \times 100\%$
 = 6,59%
- **Persentase Al pada endapan di feed tank**
 = $\frac{\text{massa Al pada endapan di feed tank}}{\text{massa Al total}} \times 100\%$
 = $\frac{2,22 \text{ g}}{2,7 \text{ g}} \times 100\%$
 = 82%

- **Massa Al setelah elektrolisis (t8)**

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{massa Al pada t8}}{\text{massa Al total}} \times 100\% \\
 &= \frac{0,31 \text{ g}}{2,7 \text{ g}} \times 100\% \\
 &= 11,3\%
 \end{aligned}$$

- **Kehilangan massa Al**

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{massa Al total} - (\text{massa Al di katoda} + \text{massa Al di feed tank} + \text{massa Al t8})}{\text{massa Al total}} \times 100\% \\
 &= \frac{2,7 \text{ g} - (0,18 \text{ g} + 2,22 \text{ g} + 0,31 \text{ g})}{2,7 \text{ g}} \times 100\% \\
 &= 0,11\%
 \end{aligned}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN



(a)

(b)

(c)

Gambar LC. 1 Kondisi Eksisting Pengelolaan Lumpur Alum PDAM
(a) Unit *Clearator* (b) Saluran *Drain* Unit *Clearator* (c) Lumpur di *Sludge Lagoon*



(a)

(b)

(c)

Gambar LC. 2 Persiapan Lumpur Kering
(a) Pengambilan Sampel Lumpur Alum pada Saluran *Drain* Unit *Clearator* (b) Sampel Lumpur Alum Kering (c) Penumbukan Lumpur Alum



(a)

(b)



(c)



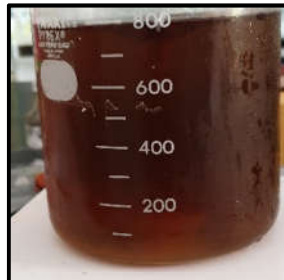
(d)

Gambar LC. 3 Karakterisasi Lumpur Alum

(a) Analisis TDS (b) Analisis pH (c) Analisis COD (d) Analisis SVI



(a)



(b)

Gambar LC. 4 Proses Asidifikasi dan Sentrifugasi

(a) Lumpur Alum saat Asidifikasi (b) Filtrat Lumpur Alum Setelah Sentrifugasi



(a)



(b)



(c)

Gambar LC. 5 Proses Oksidasi dengan H₂O₂ dan Sinar UV 254 nm

(a) Reaktor Oksidasi H₂O₂ + UV (b) Filtrat Setelah Oksidasi H₂O₂
(c) Filtrat setelah Oksidasi H₂O₂ + UV



Gambar LC. 6 Reaktor Elektrolisis



(a)

(b)

Gambar LC. 7 Hasil Proses Elektrolisis
(a) Penimbangan Elektroda Setelah Elektrolisis (b) Endapan di Feed Tank Setelah Kering

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Atika Rizqi Syavira dilahirkan di Mojokerto, 25 November 1997. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Kebraon II 437 Surabaya pada Tahun 2003 – 2009. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMPN 16 Surabaya pada Tahun 2009 – 2012. Sedangkan pendidikan tingkat atas ditempuh di SMAN 15 Surabaya pada Tahun 2012 – 2015. Di tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan (FTSLK) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan terdaftar dengan NRP.03211540000101.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif sebagai staff Divisi Komunikasi dan Informasi (Kominfo) Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) FTSLK ITS dan wakil deputi Bidang Hubungan Masyarakat (Humas) Badan Kinerja Majelis Wali Amanat Wakil Mahasiswa (BK-MWAWM). Penulis juga pernah berkontribusi pada beberapa kegiatan kampus dengan menjadi panitia dan mengikuti beberapa pelatihan. Pada Tahun 2018, penulis telah melaksanakan kerja praktik dengan topik pengelolaan limbah B3 di Production Unit Jakarta PT Pertamina Lubricants. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* dengan alamat: syavira1997@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN-ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

KTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2018/2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR KTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Seminar Kemajuan Tugas Akhir

Hari, tanggal : Selasa, 7 Mei 2019
Pukul : 10.00 - 11.00
Lokasi : TL 101
Judul : Aplikasi Elektrolisis dengan Elektroda Platina untuk Recovery Alumina dari Lumpur PDAM
Nama : Atika Rizqi Syavira
NRP. : 0321154000101
Topik : Penelitian

Nilai TOEFL : 493

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Kemajuan Tugas Akhir
-	Pada pH 4 timbul kekeruhan → Apa sumber kekeruhan tsb.
-	Apakah Aluminium mengendap sbg $Al(OH)_3$?
-	Mengapa endapan hitam tidak dijelaskan? % kemurnaan endapan diukur.
-	Berapa desersi sbg proses elektrolisis dgn oksidasi & target oksidasi
	AL → klorida gns Ag. O ₂ gas ↓ kompleks
	Jempis 28/5

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir
2. Tidak dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Yulimah Trihardiningrum, M.App.Sc



DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Atika Rizqi Syavira
NRP : 03211540000101
Judul : Aplikasi Elektrolisis dengan Elektroda Platina untuk Recovery Alumina dari Lumpur PDAM.

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	8 April 2019	- Data hasil uji polarisasi - Uji polarisasi diulang pada pH 3,5.	
2.	16 April 2019	- Hasil running pH 4 tanpa oksidasi - Lanjutkan running pH 4 dengan oksidasi.	
3.	25 April 2019	- Hasil running pH 4 dengan oksidasi H ₂ O ₂ dan UV. - Lanjutkan running pH 3.	
4.	2 Mei 2019	- Pembahasan terkait parameter yang diuji saat elektrolisis. - Kesimpulan sementara dan saran.	
5.	28 Mei 2019	- Mass balance logam pada proses elektrolisis - Pembahasan uji polarisasi → pengukuran energi potensial	
6.	24 Juni 2019	- mass balance dan persentase recovery Al - Efisiensi energi proses (IE)	
7.	27 Juni 2019	- Abstrak	
8.	28 Juni 2019	- Aplikasi Elektrolisis - Kesimpulan	

Surabaya, 28 Juni 2019
Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M. App. Sc.



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Nilai TOEFL 493

Hari, tanggal : Selasa, 16 Juli 2019
Pukul : 07.30 - 09.30
Lokasi : TL 102
Judul : Aplikasi Elektrolisis dengan Elektroda Platina untuk Recovery Alumina dari Lumpur PDAM

Nama : Atika Rizqi Syavira
NRP. : 03211540000101
Topik : Penelitian

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
-	Pada dijelaskan apa hasil dan analisis → mengapa Al apa yg. berbentuk? Alkah di oksidasi, mengapa Al apa yg. berbentuk?
=	Jelaskan pengaruh atau oksidasi terhadap bentuk molekul Al ₂ O ₃ .

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc.

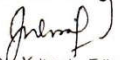


FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR

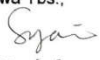
Nama : Atika Rizqi Syavira
NRP : 0321154000101
Judul Tugas Akhir : Aplikasi Elektrolisis dengan Elektroda Platina untuk Recovery Alumina dari Lumpur PDAM

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1.	Tata cara bahasa dan Perbaikan penulisan istilah pada abstrak.	penulisan abstrak telah diperbaiki (halaman i - iv).
2.	penambahan pembahasan mengenai bentuk molekul Al setelah proses asidifikasi.	pembahasan telah ditambahkan (halaman 56).
3.	Penambahan pembahasan mengenai pengaruh oksidasi terhadap bentuk molekul Al.	pembahasan telah ditambahkan (halaman 57 - 58).

Dosen Pembimbing


Prof. Dr. Yuliana Trihadiningrum, M.App.Sc

Mahasiswa Ybs.,


Atika Rizqi Syavira