



TUGAS AKHIR - RE 184804

PROSES ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ANODA PLATINA (Pt) DAN ALUMINIUM (Al) UNTUK PENGOLAHAN AWAL LINDI

FAHRUDIN SIDIK
0321154000036

DOSEN PEMBIMBING
Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RE 184804

**PROSES ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN
ANODA PLATINA (Pt) DAN ALUMINIUM (Al)
UNTUK PENGOLAHAN AWAL LINDI**

FAHRUDIN SIDIK
0321154000036

DOSEN PEMBIMBING
Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - RE 184804

**ELECTROCHEMICAL PROCESS USING
PLATINUM (Pt) AND ALUMINUM (Al) ANODE
FOR PRETREATMENT OF LEACHATE**

FAHRUDIN SIDIK
0321154000036

SUPERVISOR
Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil Environmental and Geo Engineering
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

LEMBAR PENGESAHAN

**PROSES ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ANODA PLATINA
(Pt) DAN ALUMINIUM (Al) UNTUK PENGOLAHAN AWAL
LINDI**

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
Surabaya

Oleh:

FAHRUDIN SIDIK
NRP. 0321154000036

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.
NIP. 19820804 200501 1 001



PROSES ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ANODA PLATINA (Pt) DAN ALUMINIUM (Al) UNTUK PENGOLAHAN AWAL LINDI

Nama Mahasiswa : Fahrudin Sidik
NRP : 03211540000036
Departemen : Teknik Lingkungan ITS
Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T.,
M.Phil., Ph.D.

ABSTRAK

Keberadaan amonium dan senyawa organik yang tinggi pada pengolahan lindi secara biologis akan mempengaruhi efisiensi pengolahan. Pengolahan secara elektrokimia merupakan pengolahan fisik-kimia yang dapat menurunkan amonium dan polutan organik pada lindi. Beberapa faktor yang mempengaruhi pengolahan adalah jenis anoda yang digunakan, pH operasi, dan kuat arus. Anoda Platina (Pt) dapat mengoksidasi zat organik dengan proses oksidasi langsung dan oksidasi tidak langsung. Anoda Aluminium (Al) memiliki kemampuan untuk menghasilkan oksida logam sebagai koagulan dan dapat mendestabilisasi polutan pada lindi melalui mekanisme elektrokoagulasi. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh pH operasi, penggunaan anoda Pt dan Al, serta kuat arus terhadap efisiensi penurunan amonium dan polutan organik menggunakan proses elektrokimia. Efisiensi pengolahan dapat dinilai berdasarkan tingkat penyisihan amonium, COD, BOD, dan konsumsi energi spesifik (kWh.g^{-1}).

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan reaktor elektrokimia tiga kompartemen dengan volume efektif 576 mL. Kompartemen tengah merupakan kompartemen *recovery* yang berisi akuades dengan larutan buffer fosfat. Menggunakan membran tipe *Catode Exchange Membrane* (CEM) dan *Anode Exchange Membrane* (AEM). Elektroda yang digunakan adalah Pt dan Al sebagai anoda dengan ukuran 3 cm x 8 cm serta katoda *Stainless Steel* (SS) berukuran 3 cm x 8 cm. Volume lindi yang diolah adalah 5 Liter dengan sistem *batch recirculation*

selama 6 jam operasi pada debit 5 mL.detik⁻¹. Variasi pH operasi dijaga pada pH 4, pH 6, dan pH 8, serta menggunakan kuat arus 500 mA dan 700 mA. Parameter yang dianalisis adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Amonium*, Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), pH, dan *Total Dissolved Solid* (TDS) dan nitrat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses penyisihan polutan organik dan amonium tertinggi untuk anoda aluminium adalah pada variasi pH 6 arus 700 mA dengan penyisihan COD sebesar 75% (5,01 g; 0,52 kWh.g⁻¹), penyisihan amonium yaitu 69% (0,604 g; 0,182 kWh.g⁻¹). Dengan anoda platina dicapai pada variasi pH 4 arus 500 mA dengan penyisihan COD sebesar 29% (1,89 g; 0,008 kWh.g⁻¹). Penyisihan amonium sebesar 36% (0,306 g; 0,073 kWh.g⁻¹)

Kata kunci : Aluminium (Al), kuat arus, lindi, pH operasi, platina (Pt)

ELECTROCHEMICAL PROCESS USING PLATINUM (Pt) AND ALUMINUM (Al) ANODE FOR PRETREATMENT OF LEACHATE

Name : Fahrudin Sidik
Register Number : 0321154000036
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T.,
M.Phil., Ph.D.

ABSTRACT

The presence of high ammonium and organics in leachate will affect the treatment efficiency. Electrochemical treatment is a physico-chemical treatment potentially effective for removal of these substances. The treatment efficiency depends on several factors, such as anodes material, operational pH, and current. Platinum (Pt) anode can oxidize organic substance by direct and indirect oxidation, while aluminum (Al) anode can remove pollutants by electrocoagulation. This experiment aimed to investigate the effect of operational pH, anode materials (Pt for electrooxidation, Al for electrocoagulation), and electrical current on the removal of ammonium and organics substance using electrochemical process. The treatment efficiency was evaluated based on the removal of ammonium, COD, and BOD as well as the specific energy consumption.

This study was conducted on a laboratory scale using a 576 mL. Electrochemical reactor consist of three compartments. The middle compartment served as recovery compartment, which was filled with the phosphate buffer solution. Each compartment was seperated by anion exchange membrane (AEM) and cation exchange membrane (CEM). The anode (Pt or Al with the area of 24 cm²) and cathode (SS with the same area) were separated 2 cm away. Each experiment treated a 5 L leachate sample, recirculated at a flow rate of 5 mL.s⁻¹ for 6 hours. The operational pH was kept constant at 4, 6, and 8. The current applied were 500 mA and 700 mA. Periodically drawn samples were analyzed for chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand

(BOD), ammonium, total Kjeldahl nitrogen (TKN), pH, nitrate, and total dissolved solids (TDS).

The results showed that when using Al anode, i.e. electrocoagulation process, under the operational pH of 6 and current applied of 700 mA, the highest COD and NH₄-N removal efficiencies of 5,01 g (0,052 kWh.g⁻¹) and 0,604 g (0,182 kWh.g⁻¹), respectively, were achieved. Using Pt anode, i.e. electrooxidation process, the highest COD and NH₄-N removal were 1,89 g (0,008 kWh.g⁻¹) and 0,306 g (0,073 kWh.g⁻¹), respectively, and was achieved when operational pH was 4 and current applied was 500 mA.

Keywords : Al Anode, Current, Leachate, pH Operation, Pt anode

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan ilmu, perlindungan, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Proses Elektrokimia Menggunakan Anoda Platina (Pt) dan Aluminium (Al) untuk Pengolahan Awal Lindi". Atas arahan dan bimbingan yang telah diberikan hingga terselesaikannya tugas akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas arahan, bimbingan, ilmu, kesabaran, dan motivasi yang telah diberikan selama ini.
2. Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, M.T., Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei S.T., M.EPM., dan Bapak Adhi Yuniarto, S.T., M.T., P.hD. selaku dosen pengarah, terima kasih atas arahan, kritik yang membangun dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Hadi Sutrisno, Bapak Ashari dan Ibu lin selaku laboran yang senantiasa membantu selama di Laboratorium.
4. Ibu, Ayah, dan saudara penulis atas segala dukungan do'a dan semangat yang telah diberikan.
5. Teman-teman Teknik Lingkungan 2015 yang telah memberikan semangat dan bantuan moril dan materil dalam melaksanakan penelitian.

Penulis menyadari masih jauh dari kata sempurna dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat di kemudian hari.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Ruang Lingkup	3
1.5. Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pengertian Lindi.....	5
2.2.1 Karakteristik Lindi	5
2.2.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia	6
2.2.3 Karakteristik Lindi di Indonesia.....	6
2.2.4 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik.....	7
2.2.5 Dampak Lindi Terhadap Lingkungan.....	8
2.2 Alternatif Pengolahan Lindi.....	8
2.2.1. Pengolahan Biologis	8
2.2.2. Pengolahan Fisik-Kimia.....	9
2.3 Proses Elektrokimia.....	9
2.3.1. Elektrokoagulasi	11
2.3.2. Elektrooksidasi.....	13
2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrokimia	15
2.4.1. pH	16
2.4.2. Kerapatan Arus.....	17
2.4.3. Konfigurasi Reaktor	17
2.4.4. Debit Aliran	17
2.4.5. Jenis Elektroda	18
2.5 Membran Penukar Ion	19
2.6 Perhitungan efisiensi proses	21
2.7 Penelitian Terdahulu.....	22
BAB 3 METODE PENELITIAN	23

3.1	Deskripsi Umum	23
3.2	Kerangka Penelitian.....	23
3.3	Penentuan Variabel	25
3.4	Penentuan Parameter Penelitian.....	26
3.5	Persiapan Penelitian	28
3.6	Penelitian Pendahuluan.....	33
3.7	Penelitian Utama	34
3.8	Analisis data	34
3.9	Kesimpulan dan Saran	34
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		37
4.1	Penelitian Pendahuluan.....	37
4.1.1	Karakteristik awal lindi	37
4.1.2	Penentuan Waktu Operasi	38
4.2	Penelitian Utama.....	40
4.2.1	Pengaruh pH operasi dan kuat arus terhadap proses elektrokimia pada lindi menggunakan anoda aluminium.....	40
4.2.1.1	Perubahan nilai TDS pada Lindi dan Buffer fosfat ..	40
4.2.1.2	Penurunan massa COD	43
4.2.1.3	Massa amonium nitrat Organik-N.....	45
4.2.1.4	perubahan rasio BOD ₅ /COD.....	48
4.2.2	Pengaruh pH operasi dan kuat arus terhadap proses elektrokimia pada lindi menggunakan anoda platina	50
4.2.2.1	Perubahan nilai TDS pada Lindi dan Buffer fosfat ..	50
4.2.2.2	Penurunan massa COD	52
4.2.2.3	Massa amonium nitrat Organik-N.....	54
4.2.2.4	perubahan rasio BOD ₅ /COD.....	58
4.2.3	Mekanisme penurunan COD dan Amonium.....	60
4.2.4	Kebutuhan energi dalam proses elektrokimia	64
4.2.5	aplikasi pengolahan elektrokimia sebagai pretreatment	66
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA		71
LAMPIRAN A PROSEDUR PERCOBAAN.....		79
LAMPIRAN B DATA HASIL ANALISIS.....		87
LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN.....		97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi Lindi Berdasarkan Umur Landfill	5
Tabel 2.2	Baku Mutu Lindi Di Indonesia.....	6
Tabel 2.3	Karakteristik Lindi Di Indonesia	6
Tabel 2.4	Karakteristik TPA Ngipik, Gresik	7
Tabel 2.6	Kelebihan dan Kekurangan Elektrokoagulasi dan Elektrooksidasi	10
Tabel 2.6	Perbandingan berbagai jenis membran CEM dan AEM	20
Tabel 3.1	Metode Analisis Pada Setiap Parameter	26
Tabel 3.3	Variasi Bahan Uji Penelitian	34
Tabel 4.1	Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik	37
Tabel 4.2	Perbandingan Energi Spesifik terhadap penyisihan amonium	64
Tabel 4.3	Perbandingan Energi Spesifik terhadap penyisihan COD, kebutuhan material dan bahan serta volume yang hilang pada anoda Aluminium (Al).....	65
Tabel 4.4	Perbandingan Energi Spesifik terhadap penyisihan COD, bahan kimia pada anoda Platina (Pt)	65

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Mekanisme Reaksi Langsung Dan Tidak Langsung	14
Gambar 2. 2 Kurva kelarutan aluminium terhadap variasi pH	16
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	25
Gambar 3.3 Konfigurasi Reaktor Elektrokimi	30
Gambar 4.1 Perbandingan massa COD _t /COD ₀ , Volt, dan TDS terhadap waktu dengan anoda Aluminium.....	38
Gambar 4.2 Perbandingan massa COD _t /COD ₀ , Volt, dan TDS terhadap waktu dengan anoda Platina.....	39
Gambar 4.3 Perubahan Nilai TDS pada lindi dengan jenis anoda aluminium	41
Gambar 4.5 Penurunan COD [COD/COD ₀] selama proses elektrokimia dengan anoda Al	43
Gambar 4.7 Massa NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ ,	45
Gambar 4.8 Massa terukur NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ pada buffer di variasi arus 700 mA dengan jenis anoda Aluminium	46
Gambar 4.9 Peningkatan massa NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ pada buffer di variasi arus 500 mA dengan jenis anoda Aluminium	46
Gambar 4.10 Perbandingan Rasio BOD ₅ /COD dengan arus 700 mA jenis anoda Aluminium	48
Gambar 4.12 Perubahan Nilai TDS pada lindi dengan jenis anoda Pt	51
Gambar 4.13 Perubahan Nilai TDS pada buffer dengan jenis anoda Pt	52
Gambar 4.14 Penurunan COD [COD/COD ₀] selama proses elektrokimia dengan anoda Pt.....	53
Gambar 4.15 Massa terukur NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , Organik-N pada variasi arus 700 mA dengan jenis anoda Pt.....	55
Gambar 4.17 Massa terukur NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ pada buffer di variasi arus 700 mA dengan jenis anoda Pt.....	56
Gambar 4.18 Massa terukur NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ pada buffer di variasi arus 500 mA dengan jenis anoda Pt	56
Gambar 4.19 Perbandingan Rasio BOD ₅ /COD dengan kuat arus 700 mA di jenis anoda Platina	58
Gambar 4.20 Perbandingan Rasio BOD ₅ /COD dengan kuat arus 500 mA di jenis anoda Platina	59

Gambar 4.21 Normalisasi COD dan amonium pada kuat arus berbeda.....	60
Gambar 4.23 Perbandingan rasio C/N untuk anoda Platina	63
Gambar 4.23 diagram alir pengolahan lindi.....	68

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Lindi mengandung senyawa organik *biodegradable*, *nonbiodegradable (recalcitrant)*, dan amonium (Neczaj *et al.*, 2007; Bilgili *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2010). Di Indonesia pengolahan lindi umumnya menggunakan proses biologis. Beberapa di antaranya adalah *Sequencing Batch Reactor (SBR)* dan *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)* (Said *et al.*, 2015). Proses biologis mampu mengolah lindi dengan rasio BOD dan COD yang tinggi ($BOD_5/COD > 0,5$) (Quan *et al.*, 2003). Rasio BOD_5/COD yang tinggi diukur pada lindi dengan umur 1-2 tahun (Deng *et al.*, 2007). TPA Ngipik, Gresik menggunakan *Aerobik Baffled Reaktor (ABR)* yang telah berusia >10 tahun (Ni'am, 2013; Afdal and Sari, 2017). Rasio BOD_5/COD adalah 0,171, konsentrasi BOD 350 mg/L, COD 2040 mg/L, dan konsentrasi amonium 535 mg/L (Agustina, 2018). Keberadaan amonium dan polutan yang tinggi pada lindi akan menjadi penghambat dalam pengolahan biologis (Tatsi *et al.*, 2003). Rasio C/N lindi di TPA ngipik adalah 3,8 – 11,5, nilai ini belum memenuhi rasio C/N pada proses biologis secara aerobik, yaitu C:N:P adalah 100:5:1 atau C/N adalah 20. Sehingga, diperlukan pengolahan awal untuk menurunkan amonium dan polutan organik dalam lindi.

Pengolahan fisik-kimia telah dibuktikan dapat menurunkan senyawa *recalcitrant* pada lindi yang stabil (Kurniawan *et al.*, 2006). Beberapa pengolahan fisik-kimia yang dapat diterapkan adalah: elektrokimia dengan elektrokoagulasi, elektrooksidasi, presipitasi kimia, *amonium stripping*, teknologi membran, adsorpsi, *ion exchange*. Dari beberapa metode fisik-kimia yang telah diterapkan, proses elektrokimia dengan prinsip elektrokoagulasi dan elektrooksidasi dapat menjadi pilihan sebagai pengolahan awal, karena memiliki kelebihan waktu pengolahan yang singkat, lebih sedikit dalam penggunaan bahan kimia, dan pengoperasian yang mudah (Diaz *et al.*, 2018).

Proses elektrooksidasi merupakan bagian dari elektrokimia yang dapat mengoksidasi polutan organik dan organik secara langsung

maupun tidak langsung dengan bantuan aktif spesies serta pembentukan radikal hidroksil. Penggunaan anoda Pt/SS dalam penurunan amonium dan COD selama 7 jam waktu operasi dengan voltase sebesar 3 Volt dapat menurunkan amonium sebesar 68% dan COD sebesar 80,5% (Ghimire *et al.*, 2019). Elektrokoagulasi merupakan proses elektrokimia yang dapat membentuk koagulan melalui peluruhan anoda. Metode ini dapat menghasilkan berbagai spesies koagulan dan oksida logam, sehingga terjadi destabilisasi muatan dari polutan yang terlarut (Diaz *et al.*, 2014). Elektrokoagulasi dapat menurunkan amonium dari 600 mg/L menjadi 50 mg/L (Ugurlu *et al.*, 2004). Dengan cara ini dapat menghemat kebutuhan bahan kimia hingga 1/12 kali dari metode kimia biasa (Emamjomeh and Sivakumar, 2009). Beberapa faktor yang mempengaruhi proses elektrokimia adalah pH, kuat arus, jenis elektroda. Faktor-faktor lainnya adalah elektrolit, temperatur, ukuran elektroda, debit operasi, jarak antar elektroda, dan karakteristik awal lindi (Mandal *et al.*, 2017).

pH menjadi syarat penting dalam peluruhan anoda, pembentukan presipitat. Berdasarkan kurva kelarutan Aluminium, Menurut Khandegar and Saroha (2013) bahwa pada pH 7 merupakan nilai optimum dalam penurunan polutan dari percobaan yang dilakukan pada pH 3, pH 4, pH 5, dan pH 7. Li *et al.* (2011) Melakukan pengujian pH dengan menggunakan range pH 3,9 sampai pH 7,5 untuk menurunkan Amonium dan COD didapatkan removal tertinggi pada pH 6,7 dan pH 7,5 hingga 35,3%. Menggunakan variasi pH antara pH 6 sampai pH 9 dapat menurunkan amonium dan senyawa volatil lain hampir sempurna (Vlyssides *et al.*, 2010).

Elektroda yang umum digunakan adalah aluminium, platina, besi, zink, magnesium, dan SS. Penggunaan aluminium dapat menurunkan organik kompleks seperti asam humat dan senyawa anorganik 47 – 80% pada densitas arus 10 – 30 mA.cm⁻² (Sarkka *et al.*, 2015). Penggunaan anoda Pt dalam pengolahan lindi pada kondisi pH 6,4 dan kerapatan arus 2,98 mA.cm⁻² selama 10 jam dapat menurunkan Amonium dan COD sebesar 44% dan 45% (Li *et al.*, 2011)

Dalam penelitian ini akan ditentukan efisiensi pengolahan, pengaruh pH operasi dan kuat arus dengan proses elektrokimia, menggunakan anoda platina (Pt) dan aluminium (Al) untuk menurunkan polutan organik dan amonium yang terkandung dalam lindi. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat menjadi rekomendasi alternatif pengolahan lindi sebelum pengolahan biologis.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh kuat arus dan pengondisian pH operasi pada proses elektrokimia dalam penurunan polutan organik dan amonium?
2. Bagaimana efisiensi pengolahan menggunakan anoda Pt dan Al dalam penurunan polutan organik dan penurunan amonium sebagai pengolahan awal proses biologis?

1.3. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh kuat arus dan pengondisian pH operasi pada proses elektrokimia dalam penurunan polutan organik dan penurunan amonium.
2. Menentukan efisiensi pengolahan menggunakan anoda Pt dan Al dalam penurunan polutan organik dan penurunan amonium sebagai pengolahan awal proses biologis

1.4. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

1. Lindi yang digunakan adalah lindi dari TPA Ngipik, Gresik.
2. Penelitian ini menggunakan anoda platina (Pt) dan aluminium (Al) serta katoda *stainless steel* (SS).
3. Reaktor yang digunakan adalah *divided cell* dengan sistem *batch recirculation* pada skala laboratorium.
4. Variabel yang digunakan adalah jenis anoda, pH operasi, dan kuat arus.
5. Parameter Utama yang dianalisis adalah COD, BOD₅, amonium, nitrat, pH, TDS, dan TKN.

1.5. Manfaat

Manfaat Penelitian ini antara lain:

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai efisiensi pengolahan lindi dengan elektrokimia menggunakan prinsip elektrokoagulasi dan elektrooksidasi.
2. Sebagai informasi mengenai alternatif pengolahan lindi di TPA Ngipik maupun TPA di Indonesia.
3. Memberikan informasi ilmiah mengenai pengaruh pengondisian pH operasi dan debit resirkulasi terhadap penurunan amonium dan penurunan polutan organik pada lindi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Lindi

Menurut Hadiwidodo (2012), lindi adalah cairan yang meresap melalui sampah yang mengandung unsur-unsur terlarut dan tersuspensi atau cairan yang melewati tempat penimbunan (*landfill*). Youcai (2018) juga menjelaskan bahwa lindi berasal dari limbah cair yang dihasilkan dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) akibat infiltrasi air eksternal, kandungan air sampah, dan dekomposisi zat organik.

2.2.1 Karakteristik Lindi

Faktor-faktor yang mempengaruhi lindi diantaranya adalah komposisi sampah, tingkat degradasi sampah, kondisi iklim, kelembaban, serta umur *landfill* (Fernandes *et al.*, 2015). Lindi mengandung polutan yang sangat kompleks yang dapat dibedakan menjadi senyawa organik terlarut, senyawa anorganik, logam berat dan senyawa *xenobiotic*. Pada umumnya lindi muda memiliki karakteristik BOD yang tinggi (4000-13.000 mg/L) dan COD (30.000-60.000) dengan jumlah *volatile fatty acids* (VFAs) mudah terurai yang tinggi (Aziz *et al.*, 2007). pH pada lindi yang stabil akan cenderung memiliki nilai yang konstan pada pH netral. Karakteristik lindi berdasarkan umur dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Klasifikasi Lindi Berdasarkan Umur Landfill

Tipe lindi	Muda	Intermediet	Stabil
Umur (Tahun)	<5	5 – 10	>10
pH	<6,5	6,5 - 7,5	>7,5
Biodegradabilitas	Tinggi	Medium	Rendah
Kjeldahl Nitrogen (g/L)	0,1 - 0,2	-	-
Amonia Nitrogen (mg/L)	<400	-	>400
TOC/COD	<0,3	0,3 - 0,5	>0,5
Logam Berat (mg/L)	Rendah-Medium	Rendah	Rendah
BOD ₅ /COD	0,5 – 1	0,1 - 0,5	<0,1
COD (mg/L)	>10.000	4000 - 10.000	<4000

Sumber : Chian and DeWalle, 1976; Alvarez-Vazquez *et al.*, 2004

2.2.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia

Dalam mengolah lindi harus memperhatikan peraturan-peraturan dan standar yang telah ditetapkan. Standar baku mutu lindi di Indonesia telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK /SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Baku mutu lindi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Baku Mutu Lindi Di Indonesia

Komponen	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6-9	-
BOD	150	mg L ⁻¹
COD	300	mg L ⁻¹
TSS	100	mg L ⁻¹
Total Nitrogen	60	mg L ⁻¹
Merkuri	0,005	mg L ⁻¹
Kadmium	0,1	mg L ⁻¹

Sumber: PERMENLHK Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi usaha dan/atau kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

2.2.3 Karakteristik Lindi di Indonesia

Karakteristik lindi di beberapa TPA Sampah di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Karakteristik Lindi Di Indonesia

Parameter	TPA Sari mukti ^[1]	TPA Air Dingin ^[2]	TPA Suko harjo ^[3]	TPA Jatibarang ^[4]	TPA Ngipik ^[5]	TPA Bantar Gebang ^[6]
pH	8,7	7,4	8,45	8,5	8,36	-
BOD ₅ (mg O ₂ /L)	42,9	-	235	1600	601	323
COD (mg O ₂ /L)	213,4	-	502	4000	7062	2947
Amonia (mg/L)	6906,72	-	-	-	602,9	621
TDS (mg/L)	-	1893,3	-	-	-	-

Parameter	TPA Sari mukti ^[1]	TPA Air Dingin ^[2]	TPA Suko harjo ^[3]	TPA Jatibarang ^[4]	TPA Ngipik ^[5]	TPA Bantar Gebang ^[6]
TSS (mg/L)	-	-	-	522	-	250
Alkalinitas (mg CaCO ₃ /L)	13000	-	-	-	-	-
TDS μ s/cm	51,2	159,5	-	-	-	-
TOC (mg/L)	855,8	-	-	-	-	-
Suhu ($^{\circ}$ C)	23	30,2	-	28,7	-	-

Sumber: [1] Karakteristik lindi hasil pengenceran 10x (Sururi *et al.*, 2014); [2] (Afdal and Sari, 2017); [3] (Wasis Wildan *et al.*, 2017); [4] (Rezagama *et al.*, 2016); [5] (Huda , 2017); [6] (Lindu *et al.*, 2017)

2.2.4 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik

TPA Ngipik adalah TPA dengan sistem *open dumping* yang terletak di area industri dan telah beroperasi sejak tahun 2002 (Ummy *et al.*, 2012). Lindi yang dihasilkan dari TPA Ngipik termasuk ke dalam jenis lindi tua karena dihasilkan sel timbunan sampah yang berusia > 10 tahun (Afdal and Sari, 2017). Lindi di TPA ini memiliki debit sebesar 1,93 L/detik. Karakteristik lindi TPA Ngipik dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Karakteristik TPA Ngipik, Gresik

Parameter	Satuan	Nilai ^[1]	Nilai ^[2]
COD	mg L ⁻¹	2040	2011
NH ₄ ⁺ N	mg L ⁻¹	535	173,776
Cl ⁻	mg L ⁻¹	1400	5198
BOD	mg L ⁻¹	350	133,33
TDS	mS cm ⁻¹	10,74	7,93
TSS	mg L ⁻¹	322	265
pH	-	8,5	8,58

Sumber:

[1] Karakteristik lindi TPA ngipik (Agustina, 2018)

[2] Karakteristik lindi TPA ngipik (Hartati, 2018)

Berdasarkan Tabel 2.4 dapat dilihat bahwa lindi di TPA Ngipik Gresik merupakan lindi bersalinitas tinggi. Angka salinitas lindi TPA Ngipik Gresik ini dipengaruhi oleh intrusi air laut (Abdullah, 2017).

2.2.5 Dampak Lindi Terhadap Lingkungan

Variasi kontaminan yang terkandung di dalam lindi bersifat toksik dan kronis (Deng and Englehardt, 2007; Kjeldsen *et al.*, 2002). Senyawa toksik yang terkandung dalam lindi diantaranya amonia, senyawa organik halogen, XOCs, *humic acid*, klorida, tembaga. Amonia nitrogen diindikasikan sebagai penyebab utama sifat toksik pada lindi (Zhou *et al.*, 2016). Tingginya konsentrasi amonia yang tidak terolah dapat menyebabkan eutrofikasi, mengurangi kandungan oksigen terlarut di dalam air, dan memiliki efek toksik. Recovery amonium berpotensi sebagai produk yang lebih bermanfaat seperti fertilizer (Ye *et al.*, 2018).

2.2 Alternatif Pengolahan Lindi

Pengolahan lindi dapat dilakukan dengan proses biologis, proses fisik-kimia, ataupun kombinasi dari keduanya. Alternatif-alternatif pengolahan lindi adalah sebagai berikut.

2.2.1. Pengolahan Biologis

Proses biologis merupakan pengolahan yang efektif dalam penurunan organik dan nitrogen dari lindi yang berumur muda dengan rasio BOD₅/COD diatas 0,5. Dalam periode tertentu, keberadaan senyawa *refractory* yang umumnya adalah asam humat dan asam fulvat, dapat mengakibatkan penurunan efektifitas proses (Kargi and Pamukoglu, 2003; Vilar *et al.*, 2018). Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan *et al.* (2006) menjelaskan bahwa tidak ada satu pun unit pengolahan biologis yang efektif dalam menurunkan senyawa *recalcitrant* secara individu. Unit biologis yang sering diterapkan dalam pengolahan lindi adalah *Activated Sludge* (AS), *Sequencing Batch Reactor* (SBR), *Aerated Lagoon* (AL), dan *Anaerobic Sludge Blankets* (UASB). Keuntungan dan kerugian dalam pengolahan biologis yang telah diterapkan tersaji pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Efisiensi Penurunan Proses Biologis

No	Pengolahan	Keuntungan	Kelebihan
1	Activated Sludge ^[1]	lumpur dapat dijadikan pupuk, dapat meremoval TSS, BOD ₅ , COD, dapat	waktu retensi lama, biaya O&M tinggi, bergantung pada OLR, hasil lumpur besar,

No	Pengolahan	Keuntungan	Kelebihan
2	SBR ^[2]	dikombinasikan dengan nitrifikasi tidak membutuhkan unit klarifier	sensitif pada HLR menghasilkan lumpur dan bau. Konsumsi energi tinggi
3	Nitrifikasi ^[3]	sedikit lumpur, sedikit biaya O&M	terjadi hambatan jika NH ₃ -N tinggi, konsumsi energi tinggi
4	Aerated Lagoon ^[4]	sedikit biaya O&M, fluktuasi konsentrasi organik	lamanya waktu retensi, tumbuh alga, menimbulkan bau, konsumsi energi tinggi
5	UASB ^[5]	produksi gas metana (energi); endapan lumpur baik.	membutuhkan waktu untuk memulai, range pH sempit, toksisitas dari amonia, hambatan dari logam berat

Sumber: [1]Dollerer and Wilderer (1996); [2] Klimiuk and Kulikowska (2006); [3] Kabdash *et al.* (2000); [4] Frascari *et al.* (2004); [5] Gulsen and Turan (2004).

2.2.2. Pengolahan Fisik-Kimia

Pengolahan fisik-kimia dapat menurunkan *refractory* dari lindi stabil dan dapat dikombinasikan dengan proses biologis. Pengolahan fisik-kimia yang dapat digunakan untuk mengolah lindi antara lain: koagulasi-flokulasi, presipitasi kimia, *ammonium stripping*, adsorpsi dan proses elektrokimia.

2.3 Proses Elektrokimia

Elektrokimia fokus pada reaksi kimia yang melibatkan transfer listrik pada area bermuatan listrik atau konduktor elektronik dan ionik (Strasser and Ogasawara, 2008). Proses yang terjadi akan selalu melibatkan reaksi fisik dan kimia yang ada pada reaktor elektrokimia. Berdasarkan sifatnya metode elektrokimia dibagi kedalam 3 kelompok utama, yaitu: Metode konversi, metode pemisahan, dan metode kombinasi (Sillanpää and Shestakova, 2017).

a. Metode konversi

memberikan perubahan fisik-kimia dan karakteristiknya dari polutan terdispersi melalui proses netralisasi, pengubahan zat, dan removal polutan tersebut. Beberapa metode konversi diantaranya adalah elektooksidasi, elektoreduksi, dan elektrodestruksi.

b. Metode pemisahan

Merupakan pemisahan polutan yang terjadi dalam keadaan yang tidak berubah secara signifikan, seperti terbentuknya gas pada elektroflokasi dan transfer elektron pada elektrodialisis.

c. Metode kombinasi

Merupakan gabungan satu atau lebih metode pemisahan dan metode konversi. Salah satu contoh metode kombinasi adalah elektrokoagulasi, didasari pada proses elektrolisis dengan anoda aluminium atau besi menjadi elektrolit terlarut.

Dalam pengoperasiannya proses elektrokoagulasi dan elektooksidasi memiliki beberapa keunggulan dan kekurangan, seperti pada Tabel 2.6 berikut:

Tabel 2.6 Kelebihan dan Kekurangan Elektrokoagulasi dan Elektooksidasi

Proses	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
Elektrokoagulasi	Penggunaan bahan kimia lebih sedikit (1/10) dari proses koagulasi biasa	Menghasilkan lumpur sisa presipitasi	Emamjomeh <i>et al.</i> , 2009
	Operasional dan perawatan lebih mudah dan biaya pengadaan lebih murah	Harus dilakukan penggantian anoda secara berkala	
	Dapat dilakukan pada kerapatan arus rendah	Diperlukan unit pengendapan setelah proses elektrokoagulasi	

Proses	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
Elektrooksidasi	Tidak menghasilkan lumpur olahan	Umumnya bekerja pada kondisi asam	Sillanpää, and Shestakova, 2017
	Dapat membentuk spesies aktif dan radikal dalam penurunan polutan organik	Proses penurunan polutan bergantung pada jenis anoda	
	Anoda bersifat inert dan tidak mudah meluruh	Biaya pengadaan anoda yang tinggi	

2.3.1. Elektrokoagulasi

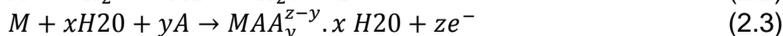
Pada prinsipnya elektrokoagulasi merupakan proses pembentukan kation terlarut dari elektroda yang digunakan dan kemudian terhidrolisis menjadi koagulan. Umumnya elektroda yang digunakan adalah besi dan aluminium. Koagulan dari hasil peluruhan logam akan men-destabilisasi polutan, sehingga akan terjadi kolisi dan terbentuk ukuran agregat yang lebih besar (Sillanpää and Shestakova, 2017). Pembentukan agregat ini dijelaskan melalui teori Derjaguin Landau Verwey Overbeek (DLVO) yang mengasumsikan bahwa akan terjadi interaksi antara gaya Van der Waals dan *Double layer force* (Matilainen *et al.*, 2010). Dalam teori DLVO dua gaya yang berkerja pada partikel halus dalam suatu sistem koloidal yaitu gaya tolak menolak Coulomb (V_c) dan gaya tarik menarik London-Van der Waals (V_{vdw}). Wang *et al.* (1994) Berhasil membuktikan bahwa ada gaya ketiga (V_m) yang menyebabkan gaya tarik menarik antar partikel dengan sifat yang lemah pada sistem koloid adalah sebagai berikut:

$$V_m = \frac{8\pi a^6 X^2 B^2}{9\mu_0(H_0 + 2a)^3} \quad (2.1)$$

Dimana:

V_m	= Gaya tarik menarik antar partikel = <i>Subsebtibility magnetic volum</i>	X
a	= Radius partikel = Jarak antar permukaan partikel	H_o
B	= Induksi Medan Magnet = Permeabilitas ruang hampa	μ_o

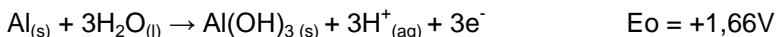
Ukuran partikel akan sangat menentukan interaksi antar partikel, semakin besar ukuran partikel, akan semakin signifikan pengaruh gaya tarik pada proses koagulasi. elektrokoagulasi telah banyak disebutkan dapat diterapkan untuk mengolah bermacam air limbah, baik limbah industri maupun limbah domestik. penurunan parameter yang luas seperti senyawa organik, zat warna, logam berat, dan senyawa nonbiodegradable (Zodi *et al.*, 2013). Secara umum, reaksi elektrokoagulasi yang terdiri dari reaksi terhidrat sederhana dan reaksi pembentukan oksida logam adalah sebagai berikut:



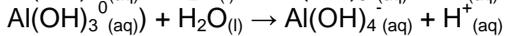
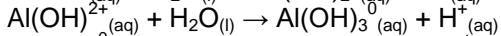
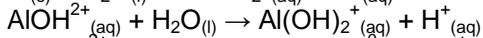
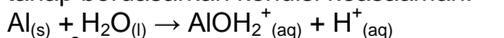
Metode elektrooksidasi dipengaruhi oleh bahan anoda, jarak antara anoda, debit operasi, suhu, pH, kerapatan arus, dan komposisi ionik. Berikut reaksi yang terjadi di anoda dan katoda

a. Reaksi di Anoda

Pada anode akan terjadi reaksi-reaksi oksidasi terhadap anion, anode aluminium akan teroksidasi sebagai berikut:



Anode aluminium yang teroksidasi tidak langsung membentuk koagulan aluminium hidroksil ($Al(OH)_3$), tetapi melalui beberapa tahap berdasarkan kondisi keasamaan.



pH meningkat,
Semakin Basa

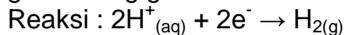
Kation bermuatan tinggi mendestabilisasi beberapa partikel koloid dengan membentuk polivalen polihidroksi kompleks. Senyawa kompleks ini mempunyai sisi yang mudah diadsorpsi, membentuk gumpalan (*aggregates*) dengan polutan. Pelepasan gas hidrogen

akan membantu pencampuran dan pembentukan flok (Mukimin, 2006).

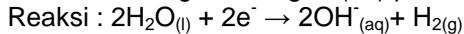
b. Reaksi di Katoda

Pada katode akan terjadi reaksi reduksi terhadap kation (ion H^+ dan ion-ion logam).

- Ion H^+ dari suatu asam dalam larutan akan direduksi menjadi gas hidrogen yang akan bebas sebagai gelembung-gelembung gas.



- Jika larutan mengandung ion-ion logam alkali dan alkali tanah, maka ion ini tidak dapat direduksi dari larutan. Oleh karena itu, yang akan mengalami reduksi adalah pelarut (air) dan terbentuk gas hidrogen (H_2) pada katoda.

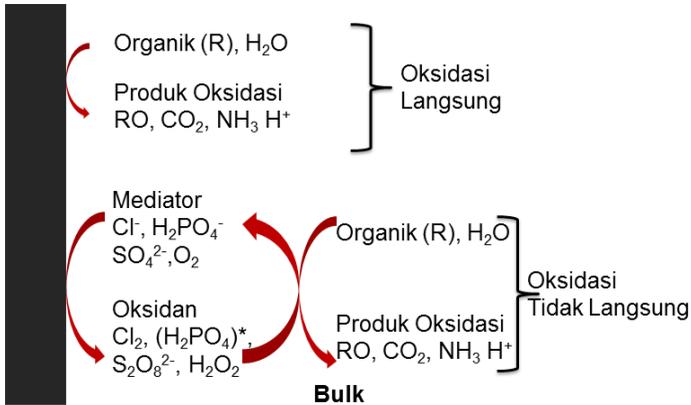


- Ion-ion logam dalam larutan akan direduksi menjadi logamnya dan terdapat pada batang katoda.

(Siringo-ringó *et al.*, 2013).

2.3.2. Elektrooksidasi

Elektrooksidasi adalah salah satu metode elektrokimia dimana prosesnya menggunakan jenis anoda aktif atau non aktif serta *non-sacrificial anode* yang terhubung dengan aliran listrik (Deng and Englehardt, 2007). Proses ini dapat mengoksidasi polutan organik dan efektif dalam penurunan parameter COD, amonium, dan zat warna pada lindi. Disisi lain proses elektrooksidasi menghasilkan sedikit lumpur (mandal *et al.*, 2017). Dengan metode elektrooksidasi penggunaan bahan kimia dan peralatan lebih sedikit dan mudah ditemukan serta dioperasikan (Anglada *et al.*, 2009). Untuk melakukan proses destruksi polutan organik dan penurunan senyawa amonium dapat terjadi secara oksidasi langsung dan oksidasi tidak langsung. Oksidasi langsung terjadi pada permukaan anoda dengan adanya transfer elektron. Sedangkan oksidasi tidak langsung adalah oksidasi dengan pembentukan senyawa aktif sebagai agen pengoksidasi (Anglada *et al.*, 2009) proses oksidasi langsung dan tidak langsung dapat dilihat pada gambar 2.1 (gambar dihalaman berikutnya)



Gambar 2. 1 Mekanisme Reaksi Langsung Dan Tidak Langsung
 Sumber : Sillanpää and Shestakova, (2017), dengan modifikasi

a. Oksidasi Langsung

Oksidasi langsung berlangsung secara dua tahapan. Pertama, proses absorpsi polutan organik dari *bulk solution* menuju permukaan anoda. Kedua, proses oksidasi dipermukaan anoda karena transfer elektron seperti persamaan 2.4



Dimana;

R = Polutan organik, RO = polutan teroksidasi

Oksidasi langsung terjadi pada kondisi potensial rendah yang terjadi dibawah evolusi oksigen (1,2 Volt). Namun, laju oksidasi langsung akan bergantung dengan aktivitas elektrokimia dan jenis anoda yang digunakan (Mandal *et al.*, 2017). Beberapa anoda telah diamati hubungan antara potensial evolusi oksigen H₂SO₄ dan SHE (*Standard Hydrogen Electrode*) sesuai pada Tabel 2.7 (Tabel dihalaman berikutnya).

Tabel 2.7 Potensi Reaksi Evolusi Oksigen pada Berbagai Anoda dalam H₂SO₄

Anoda	Nilai vs. SHE	Kondisi operasi
RuO ₂	1,47	0,5 M H ₂ SO ₄
IrO ₂	1,52	0,5 M H ₂ SO ₄
Pt	1,6	0,5 M H ₂ SO ₄
Oriented Pirolytic Graphite	1,7	0,5 M H ₂ SO ₄
SnO ₂	1,9	0,05 M H ₂ SO ₄
PbO ₂	1,9	1 M H ₂ SO ₄
BDD	2,3	0,5 M H ₂ SO ₄

Sumber : Panizza and Cerisola (2009)

Berdasarkan Tabel 2.7 dapat dilihat bahwa anoda Pt memiliki overpotensial untuk evolusi oksigen tidak terlalu tinggi (1,6 Volt). Oleh karena itu, dalam mineralisasi polutan organik dimungkinkan terjadi pada arus rendah, seperti halnya dengan rutenium dan iridium.

b. Oksidasi tidak langsung

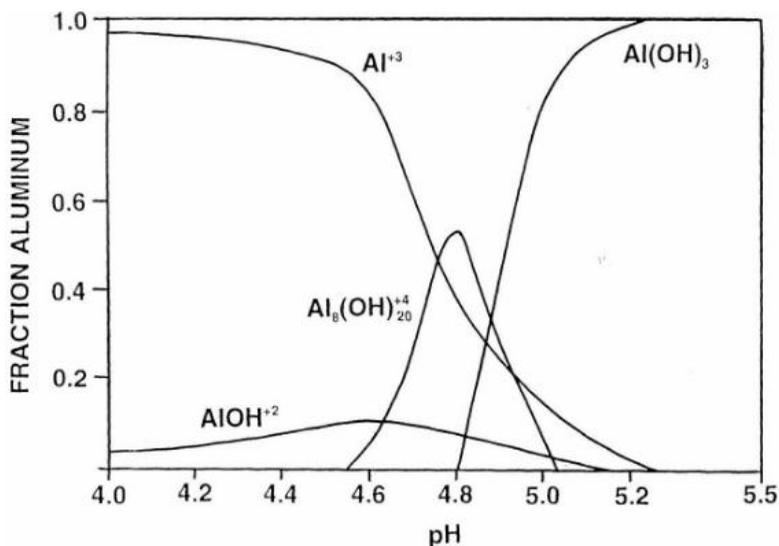
Oksidasi tidak langsung merupakan reaksi elektrokimia melalui pembentukan spesies aktif dari proses aktivasi air pada permukaan anoda. Spesies tersebut adalah *physisorbed* "active oxygen" (*physisorbed* radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$)) atau *chemisorbed* "active oxygen" (anoda logam oksida (MO)). Berdasarkan perbedaan dari spesies yang dihasilkan pula, oksidasi tidak langsung dibagi menjadi dua, yaitu konversi elektrokimia dan pembakaran elektrokimia. Pada konversi elektrokimia senyawa *refractory* akan diubah oleh *chemisorbed* "active oxygen" menjadi senyawa yang dapat didegradasi (seperti asam karboksilat). Pada pembakaran elektrokimia, senyawa organik dioksidasi menjadi CO₂. Dan ion anorganik lainnya.

2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrokimia

Proses elektrokimia dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah kerapatan arus, pH dan konsentrasi *active species*. Selain itu, jenis elektroda, jarak antar elektroda, konfigurasi reaktor elektrokimia, volume reaktor, jenis dan konsentrasi elektrolit yang digunakan juga mempengaruhi kinerja proses elektrooksidasi. Faktor tersebut mempengaruhi efektivitas pengolahan.

2.4.1.pH

pH dengan range pH 3 sampai pH 11 dalam proses elektrokoagulasi dapat menghasilkan oksida logam aluminium (Emamjomeh and Sivakumar *et al.*, 2009). Menurut Malakootian *et al.* (2011), pH adalah salah satu faktor yang menentukan efektifitas penurunan nitrat, dari pengamatan di pH 5, pH 7, dan pH 9 terjadi peningkatan persen removal 50-90%. Berikut ini adalah kurva kelarutan dari aluminium tersaji pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Kurva kelarutan aluminium terhadap variasi pH
Sumber : Emamjomeh *et al.* (2011)

Berdasarkan gambar 2.2 kelarutan amonium terjadi beberapa fraksi. Pada umumnya oksida terlarut seperti Al^{3+} , $Al(OH)^{+2}$, akan terbentuk pada pH dibawah 5. pH diatas lima oksida Al yang terbentuk adalah $Al(OH)_3$. Dengan menggunakan anoda platina (Pt) dari beberapa penelitian yaitu pada pH 4 (Nordin *et al.*, 2013), pH 7 (Li *et al.*, 2010), pH 5 (Li *et al.*, 2005), pH 8 (Alaoui *et al.*, 2015). Dari penelitian tersebut penyisihan COD berkisar 20% sampai 78%.

2.4.2. Kerapatan Arus

Kerapatan arus merupakan perbandingan antara kuat arus dengan luasan elektroda pada proses elektrokimia. Kerapatan arus dipengaruhi oleh jenis elektroda yang digunakan dan menurut Cossu *et al.* (1998), bahwa kerapatan arus minimal untuk proses elektrokimia dalam penurunan polutan organik adalah $5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Menurut Emamjomeh and Sivakumar (2009), kerapatan arus optimum pada proses elektrokoagulasi adalah $18,7 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ sampai $50 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Peningkatan kerapatan arus dari $5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ sampai $20 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Akan meningkatkan efisiensi removal COD dan amonium. Pada degradasi oksidasi secara umum 3 jam pertama akan menurunkan polutan organik secara signifikan kemudian jam-jam berikutnya penurunan kurang efisien dan cenderung konstan (Qiu *et al.*, 2016).

2.4.3. Konfigurasi Reaktor

Berdasarkan Bagastyo *et al.* (2014) Konsumsi energi listrik pada *membrane-devided cell* lebih tinggi dibandingkan dengan *undivided cell*, namun penyisihan COD dan DOC menunjukkan hasil yang sama untuk kedua konfigurasi reaktor tersebut. Pada penelitian tersebut, penyisihan COD sebesar 100% didapatkan pada muatan listrik 5 Ah/L, dimana pada *membrane-devided cell* konsumsi energi spesifik yang dibutuhkan adalah $0,34 \text{ kWh}\cdot\text{g}^{-1}$ COD dan pada *undivided cell* konsumsi energi spesifik yang dibutuhkan adalah $0,24 \text{ kWh}\cdot\text{g}^{-1}$ COD. Dalam penelitiannya Scialdone *et al.* (2016) menjelaskan bahwa penggunaan *divided cell* memungkinkan stabilitas oksidasi dan reduksi pada masing masing elektroda. Sehingga, akan berpengaruh terhadap penyisihan amonium dan fluktuasi pH operasi.

2.4.4. Debit Aliran

Secara teoritis, meningkatkan debit aliran pada proses oksidasi elektrokimia dapat meningkatkan transfer massa dan mengurangi difusi ke permukaan anoda (Zhou *et al.*, 2017). Tingginya debit aliran juga dapat meningkatkan laju perpindahan klorida dari larutan *bulk* ke permukaan anoda sehingga menghasilkan perubahan klorin yang lebih besar. Debit aliran yang rendah dapat meningkatkan temperatur dan meningkatkan arus pada proses elektrokimia. Wang *et al.* (2001) melakukan penelitian

pada debit 1 mL.detik⁻¹, 5 mL.detik⁻¹ dan 10 mL.detik⁻¹. didapatkan hasil bahwa pengaturan debit dapat mempengaruhi pada pembentukan gas ketika ditingkatkan.

Debit yang rendah akan meningkatkan temperatur air limbah yang terolah dan meningkatkan densitas arus (Yavuz and Shahbazi, 2012). Penggunaan debit yang rendah dapat menghambat pembentukan gas (Zhou *et al.*, 2016). Penyisihan polutan pada proses elektrokoagulasi akan meningkat dari 0,2-33,3 mL.detik⁻¹. Debit yang tinggi akan mengakibatkan pola aliran turbulen, sehingga akan terbentuk kolisi antara aktif spesies dan polutan (Kongjao *et al.*, 2008).

2.4.5. Jenis Elektroda

Salah satu hal penting yang mempengaruhi degradasi senyawa organik pada proses oksidasi elektrokimia adalah jenis elektroda. Pemilihan jenis elektroda merupakan pertimbangan yang penting karena dapat mempengaruhi selektivitas dan efektivitas proses elektooksidasi. Sifat-sifat yang harus dimiliki material elektroda adalah sebagai berikut:

1. Memiliki stabilitas fisik dan kimia yang tinggi: tahan terhadap korosi dan pembentukan lapisan pasif
2. Memiliki konduktivitas listrik yang tinggi
3. Selektivitas dan aktivitas katalis
4. Biayanya murah dan memiliki *life time* yang panjang.

Selektifitas dari material anoda dapat dinilai berdasarkan kompetisi antara oksidasi senyawa organik pada anoda dan reaksi sampingnya berupa evolusi oksigen. Evolusi oksigen merupakan proses oksidasi air menjadi oksigen selama proses elektrolisis. Berikut ini adalah Kelebihan dan kekurangan penggunaan berbagai jenis anoda dapat dilihat pada Tabel 2.7

Tabel 2.7 Kelebihan dan Kekurangan jenis anoda

Jenis Anoda	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
Platina (Pt) sebagai anoda	Jenis elektroda inert sehingga tidak mudah bereaksi dengan larutan elektrolit dan	Biaya pengadaan untuk anoda Pt sangat mahal Rendahnya	Chen (2003) Sillanpaa and Sestakova (2017)

Jenis Anoda	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
	lebih tahan lama	efisiensi untuk proses mineralisasi	
	Penggunaan anoda Pt dapat menyisihkan polutan organik hingga 30%	Potensial yang rendah terhadap evolusi oksigen	
Aluminium sebagai anoda	Dapat digunakan sebagai <i>sacrifice anode</i> dalam proses elektrokoagulasi	Menghasilkan produk sampingan berupa lumpur	Sillanpaa and Sestakova (2017)
	Biaya pengadaan murah	Diperlukan pergantian secara berkala	
	Dapat menurunkan COD dan warna hingga 80%		
Stainless Steel sebagai katoda	Tidak mudah terjadi korosi pada range pH luas (pH 2 – pH 11)	Mudah terbentuk lapisan pengotor pada katoda SS	Krishna <i>et al.</i> , (2015)
	Biaya pengadaan murah	Sulit dilakukan penyambungan dengan cara pengelasan	Sillanpaa and Sestakova (2017)

2.5 Membran Penukar Ion

Terdapat berbagai macam jenis membran yang dapat digunakan dalam pemisahan salah satunya adalah *ion exchange membrane*. Membran tersebut terdiri dari *Cation Exchange Membrane* (CEM) dan *Anion Exchange Membrane* (AEM). CEM dapat melewatkan ion- ion bermuatan positif dan AEM dapat berfungsi melewatkan

ion-ion bermuatan negatif. Beberapa contoh membran yang umum digunakan adalah Nafion-117 (*Dupont Co., USA*), CMI-7000 (*Membrane Inc., USA*), SPEEK, AMI-7001 (*Membrane International Inc., NJ*), AM1 (*Tokuyama Co., Japan*), AFN (*Tokuyama Co., Japan*). Hal yang mempengaruhi kinerja membran, seperti; ketebalan, resistensi, transfer oksigen, dan kapasitas penukar ion dapat dilihat perbandingannya pada Tabel 2.6

Tabel 2.6 Perbandingan berbagai jenis membran CEM dan AEM

Membran	Cation Exchange Membrane (CEM)		
	Nafion 117	CMI 7000	SPEEK
Ketebalan (μm)	183	450	180
Resisten Ohm ($\Omega \text{ cm}^2$)	15	45,1	-
Transfer Oksigen ko (cm s^{-1})	$4,3 \times 10^{-4}$	$0,1 \times 10^{-4}$	-
Difusi Oksigen Do ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)	$1,4 \times 10^{-6}$	$0,9 \times 10^{-6}$	4×10^{-6}
Kapasitas penukar ion (meq g^{-1})	0,95	1,6	1,4

Membran	Anion Exchange Membrane (AEM)		
	AMI 7001	AM1	AFN
Ketebalan (μm)	460	160	180
Resisten Ohm ($\Omega \text{ cm}^2$)	<40	1	2
Transfer Oksigen ko (cm s^{-1})	$0,1 \times 10^{-5}$	$0,9 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-4}$
Difusi Oksigen Do ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)	3×10^{-7}	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-6}$
Kapasitas penukar ion (meq g^{-1})	1,3	1,2	0,8

Sumber : Oliot *et al.* (2016)

Berdasarkan Tabel 2.6 penggunaan menggunakan membran CMI-7000 dan AMI-7001 memiliki kelebihan pada kapasitas penukar ion yang besar dan transfer oksigen yang relatif kecil. Membran CMI 7000 dan AMI 7001 adalah jenis CEM yang paling sering digunakan karena memiliki struktur yang lebih kuat dari Nafion 117 dan yang lainnya (Kim *et al.*, 2007). Keduanya, terdiri

atas polimer asam kuat polistirena yang berikatan silang dengan divinilbenzena (DVB). Membran CMI-7000 terbentuk dari Gugus fungsi Sulfonat (SO_3^-) yang berikatan dengan florokarbon ($-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$) (Li *et al.*, 2011). Membran AMI-7001 terbentuk dari gugus fungsi amonium kuartet (NH_4^+).

2.6 Perhitungan efisiensi proses

Proses elektrokimia dapat ditentukan kelayakannya dengan mempertimbangkan konsumsi energi spesifik yang diperlukan dalam pengolahan. Menurut Anglada *et al.* (2009) adalah sebagai berikut:

Penurunan konsentrasi polutan selama proses elektrokimia dapat dinyatakan dengan fungsi dari muatan listrik spesifik.

$$Q = \frac{j x A x t}{v} \quad (2.5)$$

Sedangkan kerapatan arus (J) adalah kuat arus listrik yang mengalir di area elektroda.

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.6)$$

Oleh karena itu, muatan listrik spesifik dapat dicari melalui persamaan:

$$Q = \frac{I x t}{v} \quad (2.7)$$

Konsumsi energi spesifik (W) secara langsung berkaitan dengan muatan listrik spesifik (Q) dan tegangan listrik tertentu (V). Berikut ini merupakan persamaan konsumsi energi selama elektrolisis:

$$W = Q x v \quad (2.8)$$

Keterangan:

W = Konsumsi energi spesifik (kWh/m^3)

Q = Muatan listrik spesifik (kAh/m^3)

I = Kuat arus listrik (A)

J = Kerapatan arus (A/m^2)

V = Tegangan listrik (V)

A = Luas elektroda (m^2)

T = Waktu operasi (s)

V = Volume elektrolit (L)

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu berfungsi sebagai referensi dalam pelaksanaan dan pembahasan pada penelitian. Berikut adalah penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai acuan berkaitan dengan proses elektrokimia.

1. Dalam penelitiannya, Ilhan *et al.* (2008) menjelaskan bahwa penggunaan elektroda aluminium (Al) memiliki efisiensi lebih baik dari besi (Fe). Efisiensi penurunan COD menggunakan Fe pada kerapatan arus 348 A.m^{-2} adalah 32%, sedangkan menggunakan elektroda Al dapat menurunkan sampai 45%. Lindi awal memiliki karakteristik COD 12.860 mg/L .
2. Vlyssides *et al.* (2010) menjelaskan bahwa menggunakan anoda Pt dengan variasi pH 6 sampai pH 9 dan dengan waktu 350 menit untuk menurunkan senyawa amonium, COD dan VSS masing masing memiliki nilai awal 930 mg.L^{-1} , 5300 mg.L^{-1} , dan 572 mg.L^{-1} memiliki persen removal untuk COD sebesar 84% dan Amonium serta VSS hampir 100%.
3. Dalam penelitiannya dengan proses elektrokoagulasi Mahmad *et al.* (2015) menjelaskan bahwa penggunaan pH 3 sampai pH 7 adalah pH yang dapat digunakan pada proses elektrokoagulasi. Dengan variasi voltase yaitu 1,5 V, 2 V, 2,5 V.
4. Jika dibandingkan elektrokoagulasi dengan metode koagulasi kimiawi didapatkan nilai lebih besar yaitu 95% removal untuk elektrokoagulasi dan 79 % untuk koagulasi kimiawi pada pH 8. Hal ini dikarenakan pada prosesnya terbentuk senyawa Aluminium dengan jenis *bayerite* dan *doyleite* (Danis and Huang, 2015).
5. Ukundimana *et al.* (2018) menjelaskan bahwa menggunakan anoda Pt dalam mengolah lindi dapat menyisihkan COD dengan angka $5,58 \text{ g.Ah}^{-1}.\text{m}^{-2}$. Selama 360 menit pada kerapatan arus 60 Am^{-2} , 120 Am^{-2} , dan 360 A.m^{-2} .
6. Fernandes *et al.* (2014) menjelaskan bahwa penggunaan anoda Pt dalam pengolahan lindi dapat menurunkan COD dari konsentrasi awal 6200 mg.L^{-1} sebesar 40% dengan kuat arus 0,3 A dan waktu operasi selama 6 jam.

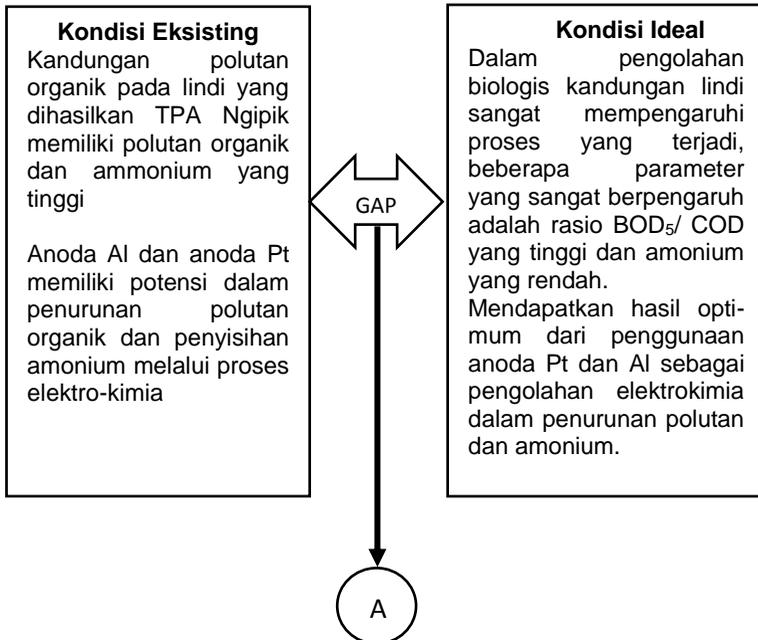
BAB 3 METODE PENELITIAN

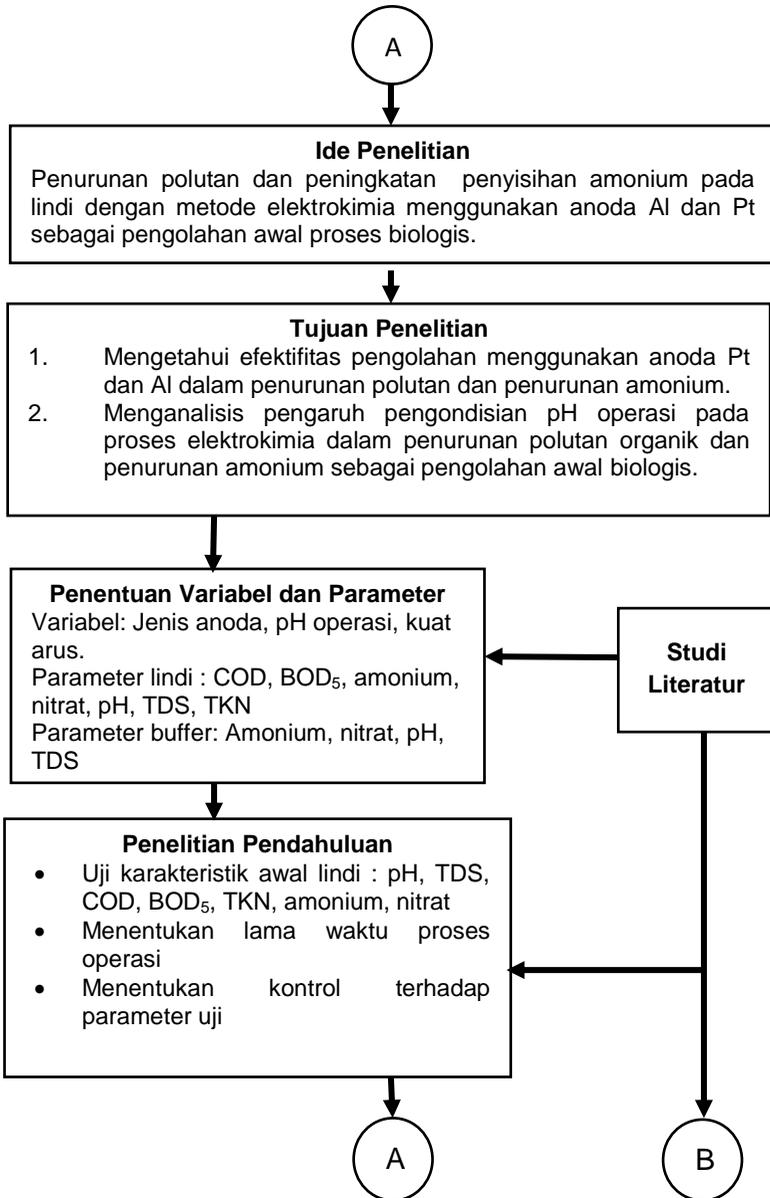
3.1 Deskripsi Umum

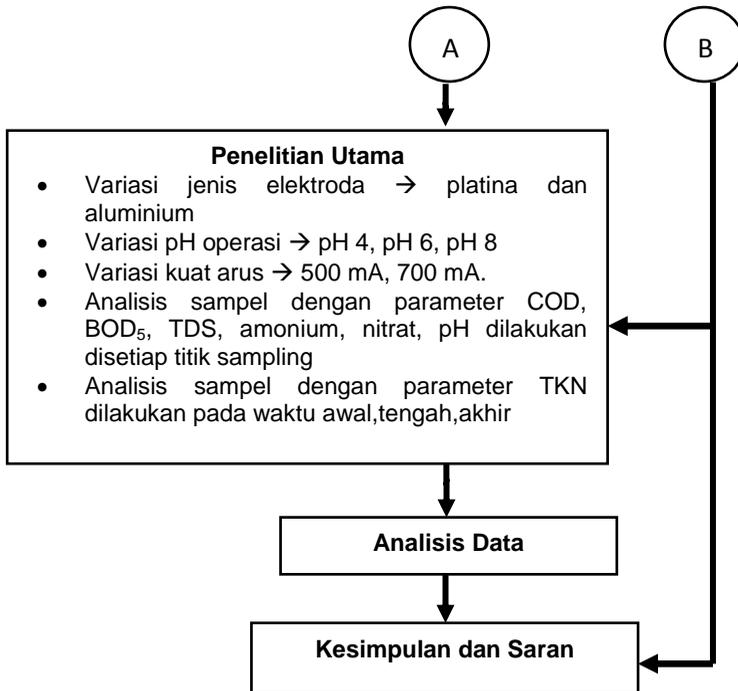
Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui efisiensi pengolahan elektrokimia melalui metode elektrokoagulasi dan elektrooksidasi dengan pengondisian pH operasi dan kuat arus untuk menurunkan polutan yang terkandung dalam lindi sebagai *pre-treatment*. Efisiensi elektrokimia dilihat berdasarkan tingkat penyisihan polutan organik dan amonium. Bahan uji yang digunakan pada penelitian ini berasal dari lindi pada TPA Ngipik, Gresik. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Pemulihan Air Departemen Teknik Lingkungan ITS selama bulan Januari hingga Juni 2019.

3.2 Kerangka Penelitian

Berikut ini merupakan tahapan pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1







Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.3 Penentuan Variabel

Dalam penelitian ini menggunakan variabel, sebagai berikut:

1. Penentuan variasi pH Operasi

Dalam penelitian akan ditentukan variasi pH operasi yang akan digunakan. Proses elektrokoagulasi dengan anoda aluminium memiliki range pH yang luas (pH 3 – pH 8) (Mahmad *et al.*, 2016). Penggunaan anoda platina (Pt) dapat dilakukan di range pH asam sampai basa. Dari beberapa penelitian, telah dilakukan eksperimen pada pH 4 (Nordin *et al.*, 2013), pH 7 (Li *et al.*, 2010), pH 5 (Li *et al.*, 2005), pH 8 (Alaoui *et al.*, 2015). Dari penelitian tersebut penyisihan COD berkisar 20% sampai 78%. Berdasarkan pertimbangan diatas, pH operasi yang digunakan adalah pH 4, pH 6, dan pH 8.

2. Penentuan anoda Al dan Pt

Dalam penelitian ini akan digunakan anoda Al dan Pt. Aluminium dalam proses elektrokoagulasi memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi (Yadav *et al.*, 2017). Anoda Pt merupakan anoda yang memiliki daya tahan terhadap korosi dan merupakan elektroda aktif (Chen, 2003). Dimana Anoda aktif merupakan anoda yang memiliki adsorpsi tinggi pada permukaan anoda, sehingga pembentukan radikal hidroksida akan terserap pada permukaan anoda.

3. Penentuan Kuat Arus

Dalam penelitian ini akan digunakan variasi kuat arus yang disesuaikan dengan kemampuan dari masing masing anoda. Karena anoda Al dan Pt memiliki karakteristik yang berbeda Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh De Souza *et al.* (2007) anoda platina memiliki kerapatan arus maksimum adalah 30 mA/cm^2 . Kemudian untuk anoda aluminium memiliki kerapatan arus hingga 70 mA.cm^{-2} . Kemudian untuk lebih jelasnya didapatkan variasi arus pada penelitian pendahuluan.

3.4 Penentuan Parameter Penelitian

Dalam penelitian ini pengujian dilakukan pada sampel lindi dan larutan elektrolit pada kompartemen *recovery*. Parameter lindi yang akan diuji pada penelitian ini antara lain BOD_5 , COD, Amonium, pH, TDS diukur pada setiap titik waktu sampling. Analisis parameter Nitrat, TOC diuji pada t awal, t tengah, dan t akhir. Sedangkan untuk larutan elektrolit pada kompartemen *recovery* dilakukan pengujian pH dan TDS di setiap titik waktu sampling, serta analisis amonium pada t awal, t tengah, dan t akhir. Berikut merupakan metode analisis pada setiap parameter yang disajikan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Metode Analisis Pada Setiap Parameter

No	Parameter	Tujuan	Instrumen	Metode	Sumber
1.	BOD_5	Mengetahui tingkat biodegradabilitas pada lindi	Titrasi	Metode Winkler	5210-BOD, APHA, SNI 6989.72:2009

No	Parameter	Tujuan	Instrumen	Metode	Sumber
2.	COD	Mengetahui tingkat penurunan polutan organik pada lindi	<i>Spektrokuant</i>	<i>Closed Reflux and colorimetric</i>	5520-COD, APHA, SNI 6989.2:2009
3.	pH	Menganalisis tingkat keasaman pada larutan yang diuji	pH meter	Potensiometri	4500-H ⁺ , APHA, SNI 06-6989.112004
4.	NO ₃ ⁻ -N	Mengetahui kandungan nitrat pada lindi dan digunakan dalam mencari N-Organik+nitrit	Spektrofotometer	Nessler	4500-NO ₃ ⁻ , APHA, SNI 6989.79:2011
5.	Amonium	Mengetahui kandungan ammonium pada lindi	Spektrofotometer	Konduktimeter	SNI 06-6989.1-2004
6.	TDS	Menganalisis daya hantar listrik yang dihasilkan pada bahan uji	Konduktiviti meter	Daya Hantar Listrik	SNI 06-6989.30-2005
7.	TKN	Mengetahui total organik dalam sampel lindi	TKN Digester	Destruksi Organik	SNI 06-6989.28-2005

Untuk lebih jelasnya metode analisis setiap parameter pada Tabel 3.1 akan dijelaskan melalui **lampiran A**.

Pengambilan sampel untuk dianalisis sesuai parameter pada Tabel 3.2 (Tabel tersaji pada halaman berikutnya)

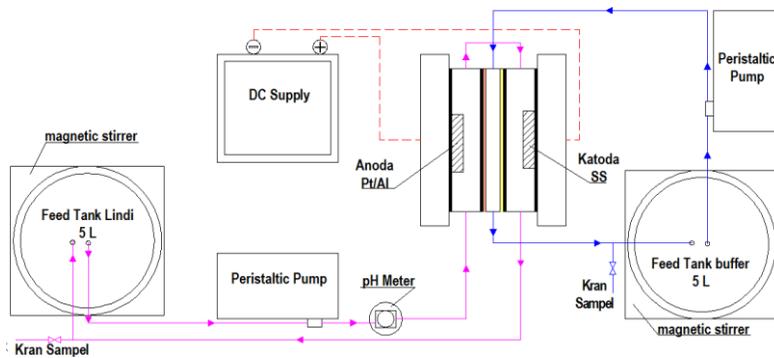
Tabel 3.2 Kebutuhan, Titik, dan Waktu Pengambilan Sampel

No.	Parameter	Kebutuhan Sampel (mL)	Titik Sampel	Waktu pengambilan
A Sampel Lindi				
1.	BOD ₅	5	Outlet reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
2.	COD	5	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
3.	pH	10	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
4.	Amonium	12,5	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
5.	TDS	10	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
6.	NO ₃ ⁻ -N	4	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
7.	TKN	10	Outlet Reaktor	Jam ke-0,3,6
B Sampel Elektrolit pada kompartemen <i>recovery</i>				
1.	pH	10	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
2.	Amonium	12,5	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
3.	TDS	10	Outlet Reaktor	Jam ke-0,1,2,3,4,5,6
Total		94 mL		

Waktu operasional yang digunakan pada penelitian ini selama 6 jam. Dalam beberapa literatur menyatakan bahwa sisa volume efektif yang diperbolehkan adalah sebesar 10%. Dalam penelitian ini mengolah lindi sebanyak 5000 mL, sehingga volume lindi yang diperbolehkan untuk diambil sebagai uji parameter adalah 500 mL. Nilai tersebut memenuhi aturan pada sisa volume efektif yaitu sebesar 10%.

3.5 Persiapan Penelitian

Persiapan awal yang dilakukan sebelum penelitian yaitu membuat reaktor skala laboratorium serta menyiapkan alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian. Rangkaian reaktor elektrokimia tersaji pada Gambar 3.2 (gambar dihalaman berikutnya)

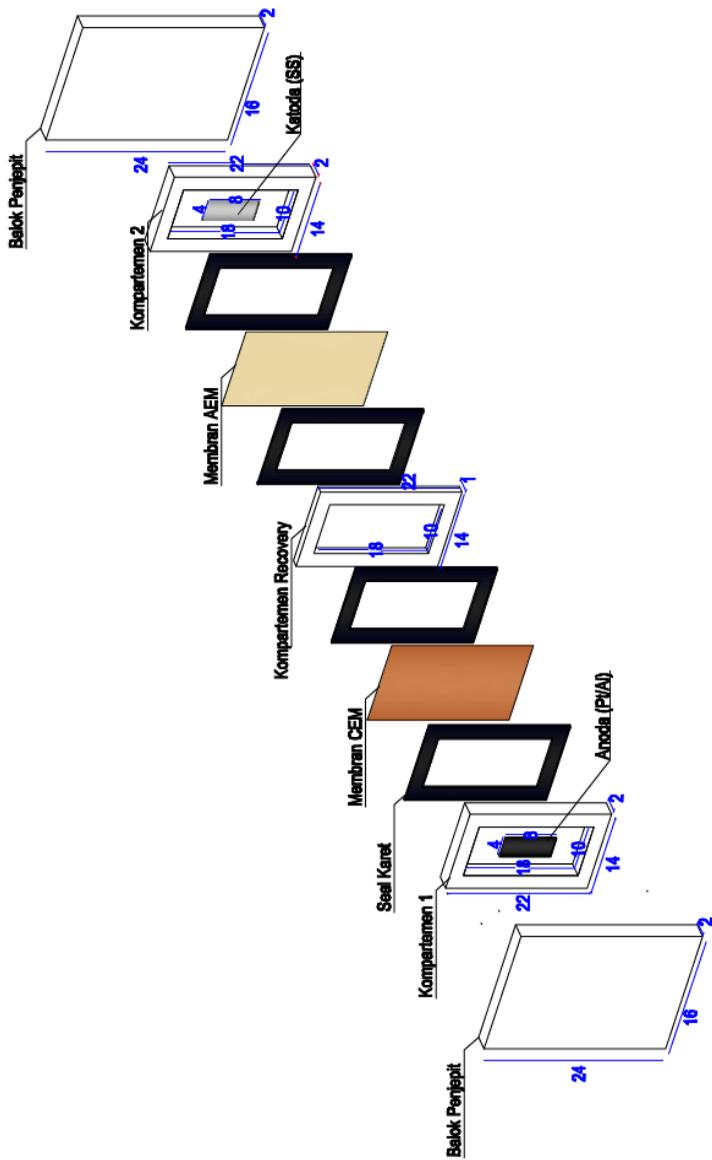


Gambar 3.2 Rangkaian alat elektrokimia

A. Alat yang digunakan dalam penelitian ini, sebagai berikut:

1. Reaktor

Reaktor dalam penelitian ini terbuat dari akrilik dan menggunakan sistem *batch recirculation* dan terdiri dari 3 kompartemen dan 2 membran CEM dan AEM. Dimensi reaktor yang digunakan terbagi menjadi dua yaitu reaktor yang terletak pada anoda dan katoda berdimensi 18 cm x 8 cm x 2 cm. Diantara kompartemen anoda dan katoda terdapat kompartemen *recovery* dengan dimensi 18 cm x 8 cm x 1 cm. Dimensi tersebut merupakan dimensi dalam reaktor. Kompartemen *recovery* memiliki dimensi lebih tipis dibandingkan pada anoda dan katoda, karena selain menampung ion hasil *recovery* pada kompartemen anoda dan katoda juga sebagai perantara arus listrik yang berasal dari anoda ke katoda. Konfigurasi Reaktor dapat dilihat pada Gambar 3.3 (Gambar dihalaman berikutnya)



Gambar 3.3 Konfigurasi Reaktor Elektrokimia

2. Elektroda

Anoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah anoda Pt dan Al dengan katoda adalah *stainless steel*. Platina dan aluminium digunakan karena bersifat inert dan dapat menghasilkan oksida logam yang dapat berfungsi sebagai koagulan. Dimensi elektroda yang digunakan berdimensi 3 cm x 8 cm dengan jarak antara kedua elektroda sebesar 2 cm. Bentuk elektroda persegi panjang. Permukaan reaktor yang digunakan persegi panjang (memakai sistem *upflow*) sehingga aliran menjadi lebih laminar dan pengadukan sempurna. Elektroda harus dipolarisasi terlebih dahulu dalam larutan H_2SO_4 0,05 M sebelum elektroda digunakan untuk proses pengolahan lindi. Hal tersebut bertujuan untuk mengkutubkan anoda dan katoda.

3. Pompa Peristaltik

Pompa peristaltik digunakan untuk mengalirkan air lindi dari *feed tank* menuju inlet reaktor elektrokimia. Pompa peristaltik digunakan karena dapat mengatur debit sesuai dengan kebutuhan penelitian.

4. Membran

Pada penelitian ini menggunakan membran *Cation Exchange Membrane* (CEM) jenis CEM-7000 dan *Anion Exchange Membrane* (AEM) jenis AMI-7001. Yang berfungsi untuk memindahkan ion-ion pengotor yang terkandung dalam lindi seperti NH_4^+ , Ag^+ , Cl^- yang kemudian akan diakumulasikan ke kompartemen *recovery*. Sehingga, operasi elektrokimia menjadi lebih efisien dikarenakan energi yang dialokasikan dalam proses elektrokimia dapat secara langsung digunakan untuk penurunan polutan pada lindi. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Afdal and Sari, 2017) masa pakai membran AEM dan CEM saat mengolah lindi secara elektrokimia selama 12 jam adalah 3 kali operasi.

5. Kabel

Kabel memiliki fungsi sebagai aliran arus listrik ke masing-masing elektroda dari DC *power supply*.

6. DC Power Supply

Kuat arus listrik memiliki fungsi sebagai sumber listrik pada proses elektrok oksidasi lindi. Spesifikasi kuat arus yang digunakan berkisar antara 0-6 A sedangkan tegangan yang digunakan berkisar antara 0-30 V. Dalam penelitian ini, kuat arus yang digunakan adalah 0,5 A. Selama masa operasi reaktor dibuat konstan, sehingga yang berubah adalah tegangan.

7. Selang

Selang yang digunakan dengan diameter 0,5 cm. Fungsi selang pada penelitian ini untuk mengalirkan lindi dari *feed tank* menuju reaktor dan kembali ke *feed tank*.

8. *Magnetic stirrer* dan *feed tank*

Magnetic stirrer memiliki fungsi untuk menghomogenkan lindi dalam *feed tank*. *Feed tank* memiliki fungsi untuk menampung lindi dengan menggunakan botol dari duran. Ukuran *feed tank* yang digunakan pada penelitian adalah 5 L.

B. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini, adalah sebagai berikut:

1. Lindi yang digunakan dalam penelitian ini adalah lindi dari TPA Ngipik, Gresik. Volume lindi yang digunakan pada setiap pengamatan sebesar 5 L untuk proses elektrokimia dengan sistem *batch recirculation*. Sebelum di reaktor lindi terlebih dahulu disaring untuk menghindari adanya kotoran yang berukuran makro dengan saringan kain.
2. *Aquadest* sebagai elektrolit
Aquadest yang dibutuhkan dalam sekali percobaan sebesar 5 L. *Aquadest* memiliki fungsi sebagai pelarut ion yang tersisihkan saat proses elektrok oksidasi. Dalam penelitian ini *aquadest* akan ditambahkan buffer fosfat (PO_4^{3-}) sebagai penyeimbang ion yang ada di kompartemen anoda dan katoda. Hal tersebut digunakan karena arus dapat bergerak apabila terdapat elektron. Larutan buffer fosfat dibuat dari kalium dihidrogen fosfat (KH_2PO_4) dan dikalium hidrogen fosfat (K_2HPO_4) dengan pH larutan 7,2

3. Larutan NaCl 5%

Larutan NaCl 5% memiliki fungsi sebagai *pre-conditioning* membran. Berfungsi untuk merenggangkan pori-pori pada membran.

4. Reagen

Reagen yang digunakan untuk analisis parameter meliputi pH, TDS, COD, BOD₅, total nitrogen, nitrat dan amonium.

3.6 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan merupakan kegiatan yang akan dilaksanakan pada awal sebelum penelitian utama. Dalam penelitian pendahuluan akan dilakukan beberapa kegiatan, diantaranya adalah:

1. Uji karakteristik awal lindi

Sebagai pendukung penelitian utama, diperlukan pengujian lindi TPA Ngipik yang akan digunakan. Parameter yang diuji antara lain pH, TDS, COD, BOD₅, amonium, nitrat, dan TKN. Tujuan uji karakteristik ini adalah sebagai dasar penentuan awal penelitian dan karakterisasi dari lindi yang akan digunakan.

2. Penentuan lama waktu operasional

Waktu proses yang akan digunakan dalam penelitian utama ditentukan dengan melihat penurunan parameter COD, TDS, Voltase selama maksimum 12 jam. Parameter COD diuji untuk melakukan kontrol pada zat organik. Parameter TDS diuji untuk melakukan kontrol terhadap keseimbangan elektrolit pada lindi dan buffer fosfat selama operasi. Voltase digunakan untuk melakukan kontrol terhadap energi pengolahan. Waktu pengambilan sampel dilakukan pada menit ke-30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, ..., 720.

3. Menentukan kuat arus

Untuk menentukan kuat arus digunakan pH asli lindi. Kemudian mencari kuat arus yang berada pada range voltase 10V -15V pada anoda Pt dan Al. Kuat arus pada voltase 10V akan dicatat sebagai kuat arus minimum dan pada voltase 15V akan dicatat sebagai kuat arus maksimum. Jenis anoda Al memiliki range

kerapatan arus lebih luas dibandingkan dengan Pt sehingga untuk kuat arus minimum dan maksimum ditentukan berdasarkan kuat arus anoda Pt.

3.7 Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan terhadap variasi pH operasi, jenis anoda, dan kuat arus. Tujuan variasi pH operasi adalah untuk mengetahui pengaruh pH terhadap peningkatan degradasi senyawa organik dan amonium. Tujuan penggunaan jenis anoda adalah menentukan metode yang efektif untuk menurunkan polutan organik dan amonium dengan elektooksidasi dan elektrokoagulasi. Tujuan variasi kuat arus adalah untuk menentukan kebutuhan energi listrik dan kondisi yang optimum dalam pengolahan. Variasi dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Variasi Bahan Uji Penelitian

Variasi pH operasi	anoda Pt		Anoda Al	
	500 mA	700 mA	500 mA	700 mA
pH 4	Pt.4.500	Pt.4.700	Al.4.500	Al.4.700
pH 6	Pt.6.500	Pt.6.700	Al.6.500	Al.6.700
pH 8	Pr.8.500	Pt.8.700	Al.8.500	Al.8.700

3.8 Analisis data

Menentukan efisiensi pengolahan dengan menghitung penurunan polutan organik dan amonium melalui parameter BOD₅, COD, TDS, pH, amonium, nitrat, TKN. Dari data tersebut akan dibandingkan dengan konsumsi energi spesifik yang dibutuhkan. Menentukan juga pengaruh pH operasi, penggunaan jenis anoda, dan kuat arus terhadap penyisihan amonium dan polutan pada lindi. Data hasil penelitian akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

3.9 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran merupakan tahapan paling akhir dalam penelitian. Tahap akhir yang dilakukan pada penelitian adalah menyimpulkan hasil analisis data dan pembahasan serangkaian penelitian yang dilakukan. Kesimpulan dari hasil penelitian ditulis

sesuai dengan kondisi eksisting saat meneliti dan dapat menjawab tujuan. Kesimpulan disajikan dalam bentuk poin-poin secara singkat dan jelas. Saran merupakan rekomendasi yang diberikan untuk penelitian selanjutnya. Tujuan dari saran adalah memperbaiki dan menyempurnakan penelitian sebelumnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik awal lindi yang akan diolah dan menentukan lama waktu operasi pada proses elektrokimia yang digunakan dalam penelitian utama.

4.1.1 Karakteristik awal lindi

Dalam penelitian lindi yang digunakan berasal dari TPA Ngipik, Gresik. Diambil pada inlet ABR pada musim hujan. Karakteristik lindi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik

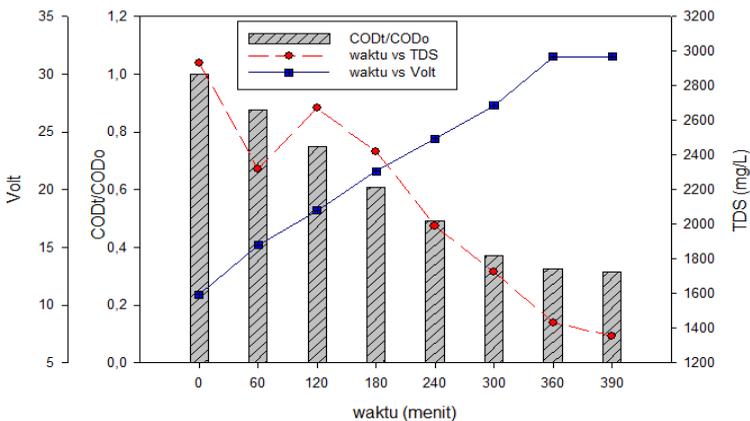
Parameter	Unit	Konsentrasi
pH		8,42
TDS	mg.L ⁻¹	3126,7
COD _{Total}	mg O ₂ L ⁻¹	1552
TSS	mg.L ⁻¹	650
Amonium	mg.L ⁻¹	279,17
NO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	6,36
Total-N	mg.L ⁻¹	321,4
BOD ₅	mg O ₂ L ⁻¹	165,55
BOD ₅ /COD		0,106

Berdasarkan data karakteristik lindi pada Tabel 4.1 bahwa lindi TPA Ngipik memiliki nilai COD dan Total-N yang tinggi yaitu 1552 mg.L⁻¹ dan 321,4 mg.L⁻¹. Jika dibandingkan dengan baku mutu lindi di Indonesia untuk COD adalah 300 mg.L⁻¹ dan total-N adalah 60 mg.L⁻¹. Nilai rasio BOD₅/COD juga dikategorikan rendah yaitu 0,106. Chian and Dewalle (1976) menyampaikan bahwa rasio BOD/COD akan menurun secara cepat dari 0,7-0,04 seiring dengan penambahan umur TPA. Tingkat stabilitas lindi mempengaruhi rasio BOD₅/COD dan konsentrasi amonium yang tinggi. Ketika rasio BOD₅/COD memiliki nilai <0,1 maka lindi tersebut tergolong stabil (Amokrane *et al.*, 1997). Lindi stabil memiliki kandungan asam humat dan fulfat yang bersifat *recalcitrant* (Kulikowska and Klimiuk, 2008). Asam Humat terdiri dari senyawa organik yang berbeda dan jumlahnya akan

meningkat seiring usia lindi, dalam lingkungan senyawa ini dapat mengganggu degradasi alami (Kang *et al.*, 2002). Selain keberadaan senyawa *non-biodegradable* pada lindi, terdapat lebih dari 200 senyawa organik telah teridentifikasi, beberapa senyawa anorganik dan logam berat (Kjeldsen *et al.*, 2002). Keadaan ini tidak efektif pada pengolahan biologis. Sehingga, diperlukan pengolahan pendahuluan sebelum masuk ke pengolahan biologis.

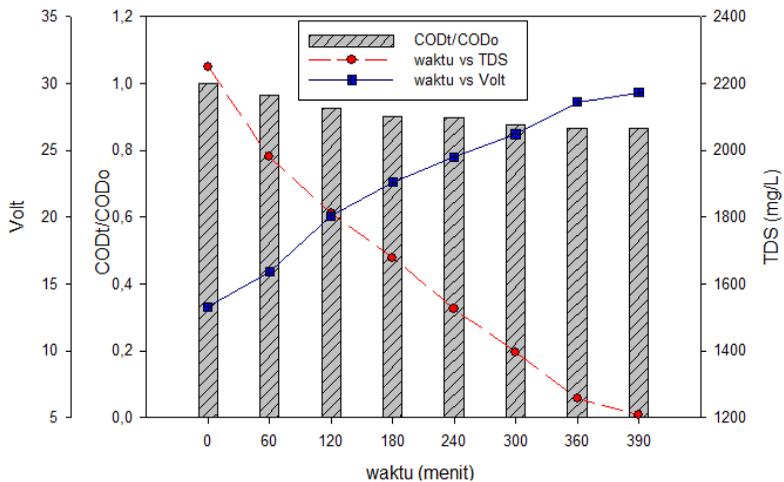
4.1.2 Penentuan Waktu Operasi

Waktu operasi ditentukan berdasarkan penyisihan COD optimum, TDS, dan Voltase pada saat beroperasi. Waktu operasi pada penelitian pendahuluan adalah selama 12 jam dengan titik pengambilan sampel setiap interval satu jam pada jam ke- t_0 (awal), t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 , t_6 , t_7 , t_8 , t_9 , t_{10} , t_{11} , t_{12} . Debit yang digunakan adalah sebesar $5 \text{ mL} \cdot \text{detik}^{-1}$. Kuat arus yang digunakan adalah 700 mA. Dengan elektroda Pt-SS dan Al-SS berjarak antar elektroda 2 cm. Hasil analisis COD, TDS, dan pengamatan Voltase yang dilakukan terdapat pada Lampiran B Tabel LB 1 hingga Tabel LB 2. Untuk perbandingan massa $\text{COD}_t/\text{COD}_0$ terhadap waktu, TDS dan Voltase tersaji pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Perbandingan massa $\text{COD}_t/\text{COD}_0$, Volt, dan TDS terhadap waktu dengan anoda Aluminium

Berdasarkan Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa proses elektrokoagulasi dengan menggunakan anoda aluminium dapat menurunkan massa COD hingga mencapai 58,3% dari konsentrasi awal 1344 mg.L^{-1} hingga 560 mg.L^{-1} . Penurunan COD mengalami penurunan efisiensi pada jam ke-6. Jumlah TDS pada lindi mengalami penurunan dari 2930 mg.L^{-1} menjadi 1355 mg.L^{-1} . Voltase operasi juga menunjukkan peningkatan hingga batas maksimum alat yakni sebesar 31,5 Volt dan terjadi penurunan arus. Peningkatan voltase operasi mengindikasikan bahwa proses elektrokimia yang berlangsung akan mengkonsumsi energi yang lebih besar. Hal ini serupa dengan proses elektrooksidasi menggunakan jenis anoda Pt yang hasilnya seperti pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Perbandingan massa COD_t/COD₀, Volt, dan TDS terhadap waktu dengan anoda Platina

Berdasarkan Gambar 4.2 Penurunan massa COD dengan menggunakan anoda Pt mengalami penurunan hingga dari awal sebesar $1373,6 \text{ mg.L}^{-1}$ hingga akhir sebesar 1108 mg.L^{-1} atau sebesar 19,3%. Jika dilihat dari nilai TDS juga mengalami penurunan hingga akhir proses dari 2250 mg.L^{-1} hingga 1208

mg.L⁻¹. Lalu untuk voltase mengalami peningkatan hingga 29,3 Volt pada jam ke-6.

Berdasarkan hasil penelitian pendahuluan, dapat diambil kesimpulan bahwa tingkat penyisihan COD terjadi secara efektif pada jam ke-6. Dengan mempertimbangkan energi yang dibutuhkan untuk operasional dan efisiensi dari proses elektrokimia yang berlangsung. Maka dalam penelitian utama akan digunakan waktu operasi selama 6 jam.

4.2 Penelitian Utama

Penelitian utama bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengondisian pH operasi dan kuat arus terhadap penurunan amonium dan polutan organik serta mengetahui efektifitas penggunaan jenis anoda aluminium dan platina dalam pengolahan lindi. Variasi pH operasi adalah pada pH 4, pH 6, dan pH 8. Variasi kuat arus diatur pada 500 mA dan 700 mA serta variasi dua jenis anoda yaitu platina dan aluminium.

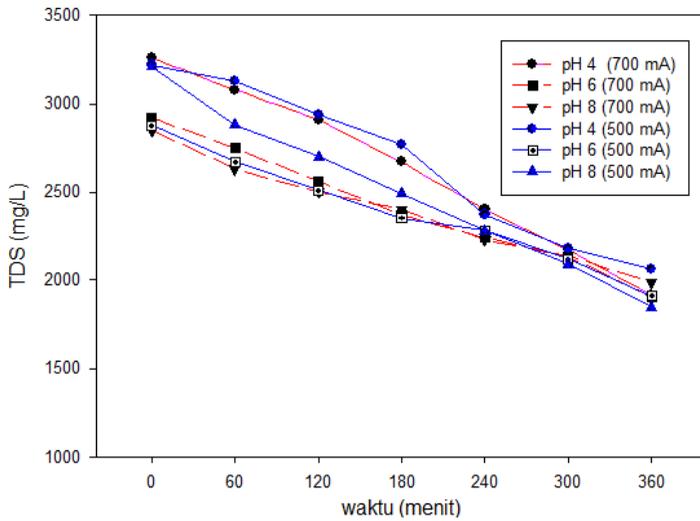
4.2.1 Pengaruh pH operasi dan kuat arus terhadap proses elektrokimia pada lindi menggunakan anoda aluminium

Penggunaan anoda aluminium bertujuan untuk menganalisis apakah penggunaan jenis anoda aluminium dapat meningkatkan penyisihan amonium dan polutan organik pada lindi sebelum pengolahan awal lindi biologis.

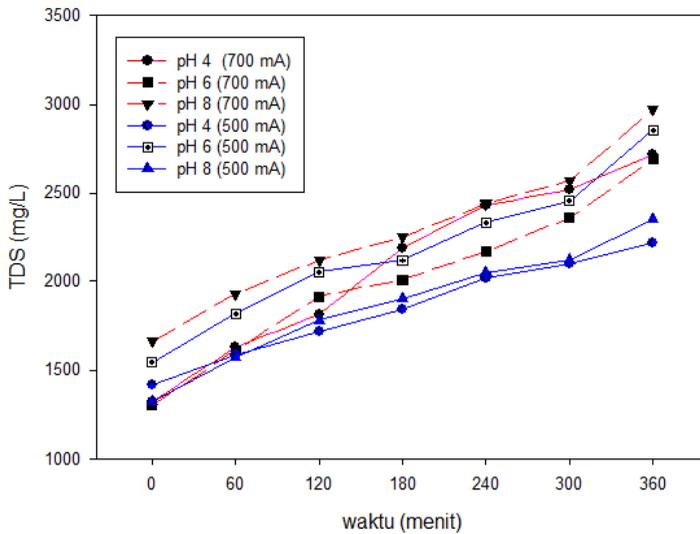
Dalam penelitian ini, proses elektrokimia dengan aluminium akan dianalisis berdasarkan penurunan massa COD, TDS, amonium, nitrat, Organik-N, dan parameter pendukung berupa rasio BOD₅/COD, C/N, serta kebutuhan energi

4.2.1.1 Perubahan nilai TDS pada Lindi dan Buffer fosfat

Proses elektrokimia akan mengakibatkan penurunan nilai TDS pada lindi dan peningkatan nilai TDS pada buffer fosfat. Perubahan massa TDS pada lindi dan buffer fosfat pada variasi pH 4, pH 6, pH 8 dengan kuat arus 500 mA dan 700 mA menggunakan anoda aluminium dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 yang secara rinci dapat dilihat pada lampiran B Tabel LB.3 dan Tabel LB 4. (Gambar dihalaman berikutnya)



Gambar 4.3 Perubahan Nilai TDS pada lindi dengan jenis anoda aluminium



Gambar 4.4 Perubahan Nilai TDS pada buffer dengan jenis anoda aluminium

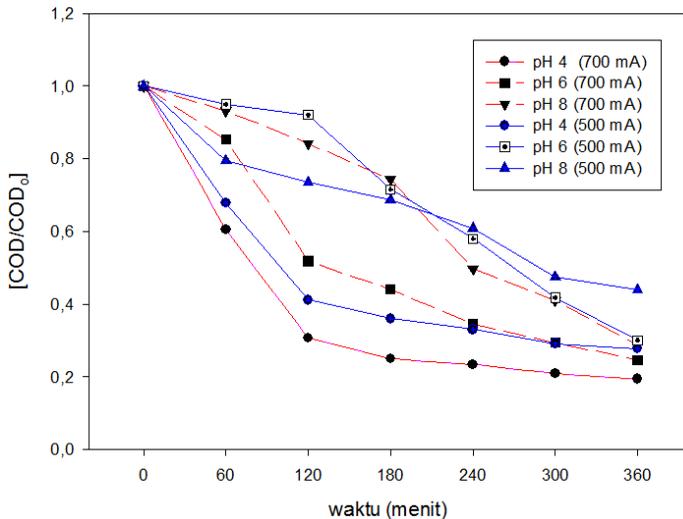
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.3 nilai TDS lindi pada semua jenis pH menggunakan anoda aluminium mengalami penurunan. Pada pH 4 arus 700 mA, nilai awal TDS Lindi adalah 3260 mg.L^{-1} kemudian mengalami penurunan hingga 1912 mg.L^{-1} . Pada pH 6 arus 700 mA nilai TDS lindi turun dari nilai awal 2920 mg.L^{-1} menjadi 1908 mg.L^{-1} . pH 8 arus 700 mA penurunan TDS juga terjadi dari konsentrasi awal 2850 mg.L^{-1} hingga 1978 mg.L^{-1} . pH 4 arus 500 mA nilai TDS awal adalah 3220 mg.L^{-1} kemudian turun hingga 2060 mg.L^{-1} . Pada pH 6 dan pH 8 arus 500 mA berturut-turut sebagai berikut 2878 mg.L^{-1} ke 1911 mg.L^{-1} dan 3210 mg.L^{-1} ke 1846 mg.L^{-1} .

Arus 700 mA memiliki kecepatan penurunan massa TDS lebih stabil dengan jumlah massa yang turun lebih tinggi pada pH 4 dan pH 6 yaitu sebesar 7,91 g dan 6,24 g. Pada pH 8 penurunan nilai TDS yang signifikan yaitu pada arus 500 mA 7,81 g. Sedangkan, pada arus 700 mA penurunan TDS sebesar 5,52 g. Jika dilihat dari nilai awal TDS pada arus 500 mA memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dari pada arus 700 mA. Hal ini merepresentasikan elektrolit yang terkandung pada lindi yang bekerja lebih efektif terjadi pada pH 500 mA. Dalam proses elektrokimia TDS yang rendah mengakibatkan meningkatnya energi dalam proses yang sedang terjadi, hal ini dapat dilihat dari energi yang dibutuhkan selama proses untuk arus 500 mA 0,053 Kwh sementara arus 700 mA adalah 0,132 kWh.

Jika ditinjau dari Gambar 4.4 nilai TDS pada buffer fosfat mengalami peningkatan pada semua variasi pH dan kuat arus. Hal ini mengindikasikan bahwa ion-ion yang berada pada lindi mengalami perpindahan menuju kompartemen tengah yang berisi buffer fosfat melalui membran penukar ion. Secara umum ion selain OH^- dan H^+ akan berpindah melalui membran. Untuk ion negatif seperti Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- akan berpindah melalui AEM dan ion positif (K^+ , Na^+ , NH_4^+) melalui CEM. Perpindahan akan terjadi secara cepat pada elektrolit dengan tingkat TDS tinggi, sehingga pemindahan ion dominan melalui membran (Pandit *et al.*, 2012). Peningkatan kuat arus akan mengakibatkan peningkatan transfer massa melalui membran, hal ini dapat terjadi karena membran penukar ion berpindah dengan adanya beda potensial listrik (Wenten, 2012).

4.2.1.2 Penurunan massa COD

COD adalah salah satu parameter yang dapat digunakan untuk melihat penurunan polutan organik dan anorganik pada proses elektrokimia menggunakan anoda aluminium. Penurunan COD dengan variasi pH operasi pH 4, pH 6, dan pH 8 serta kuat arus 500 mA dan 700 mA dengan anoda aluminium dapat dilihat pada Gambar 4.5 yang secara rinci dapat dilihat pada Lampiran B Tabel LB.5



Gambar 4.5 Penurunan COD $[COD/COD_0]$ selama proses elektrokimia dengan anoda Al

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.5 pH 4 arus 700 mA rasio COD/COD₀ mengalami penurunan hingga 0,194 dengan penyisihan sebesar 5,92 g. Perubahan massa COD yang signifikan terjadi pada jam ke-0 sampai jam ke-3 dengan COD/COD₀ sampai 0,249. Selanjutnya mengalami penurunan COD dengan rasio rata-rata 0,2. Hal yang sama terjadi pada pH 4 arus 500 mA dan pH 6 arus 700 mA dengan penurunan COD berturut-turut sebesar 4,69 g dan 5,01 g. pada pH 6 kuat arus 500 mA penurunan massa COD dari jam ke-0 hingga jam ke-2 tidak terlalu signifikan yaitu 0,92. Kemudian mulai turun hingga

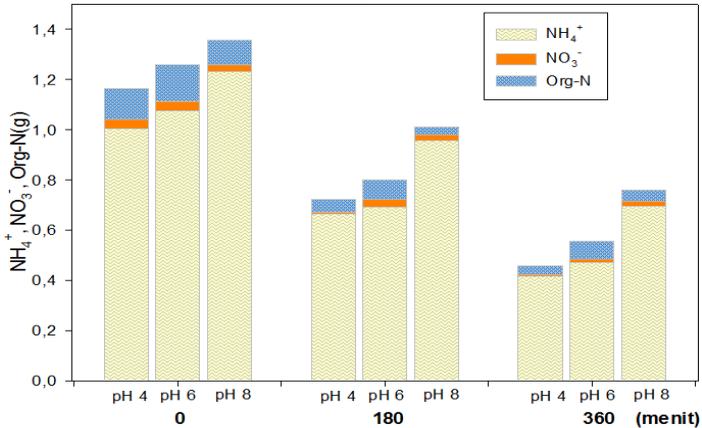
COD/COD₀ adalah 0,26. Pada pH 8 kuat arus 700 mA dan 500 mA massa COD turun cukup stabil dengan hasil penurunan berturut-turut sebesar 4,57 g dan 3,79 g. penurunan COD pada keseluruhan anoda Aluminium mengikuti orde 2 hal ini mengindikasikan jumlah penurunan massa COD yang besar.

Penurunan COD dipengaruhi oleh kelarutan Al. Ketika proses terjadi pada pH <5 akan terbentuk Al³⁺ yang merupakan ion dominan dibandingkan ion Al lainnya yaitu Al(OH)²⁺ dan Al(OH)₂⁺ seperti terlihat pada gambar 2.2. Pada kondisi pH netral aluminium akan menjadi bentuk tidak larut yaitu Al(OH)₃, kemudian ketika berada pada kondisi alkali atau pH > 7 akan berubah menjadi Al(OH)₄ (Snowden, 1994). Al yang menjadi koagulan dapat mendestabilisasi polutan organik dan amonium serta ion pengotor lain. Dengan mekanisme tersebut, proses penurunan COD dan amonium akan memiliki efisiensi lebih tinggi dari proses oksidasi kimia dikarenakan polutan organik pada lindi akan mengendap secara keseluruhan akibat molekul mikro dan makro terdestabilisasi membentuk produk samping (Lumpur hasil olahan). Penurunan COD juga dapat diamati dari berkurangnya konsentrasi ion pengotor yang terdeteksi sebagai TDS pada lindi. Menurut Kavitha *et al.* (2013) menjelaskan bahwa penurunan TDS selama proses elektrokimia dapat meningkatkan energi yang diperlukan dalam penurunan polutan organik yang terukur sebagai COD, sehingga proses akan menjadi tidak efektif.

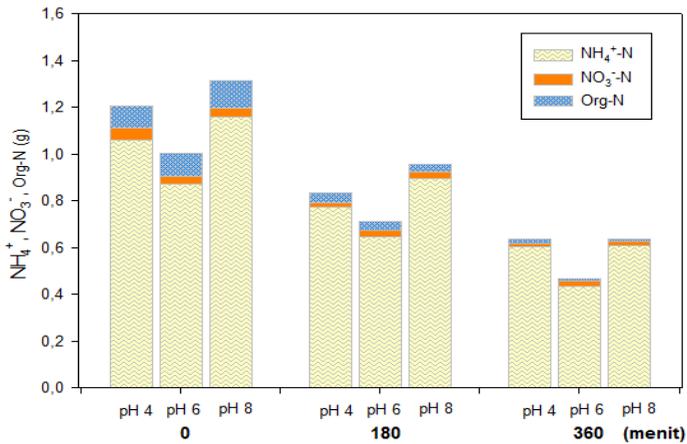
Jika ditinjau dari penggunaan kuat arus, dengan kuat arus 700 mA lebih banyak menurunkan massa organik dari kuat arus 500 mA. Jika dilihat dari energi yang dibutuhkan untuk menyisihkan 1 gram COD, maka pada arus 500 mA memberikan nilai yang ekonomis. Dari segi kuantitas, variasi kuat arus 700 mA dengan pH 4 memberikan tingkat removal yang tertinggi yaitu 81% dengan jumlah COD tersisihkan 5,92 g (0,062 kWh.g⁻¹). Akan tetapi, variasi ini bukan variasi yang optimum jika dilihat dari kebutuhan energinya, karena membutuhkan energi yang cukup besar untuk menurunkan setiap 1 g COD. Variasi optimum dalam penurunan COD didapatkan pada arus 500 mA pH 6 dengan removal 74% dan massa COD tersisihkan adalah 5,24 g (0,019 kWh.g⁻¹)

4.2.1.3 Massa amonium nitrat Organik-N

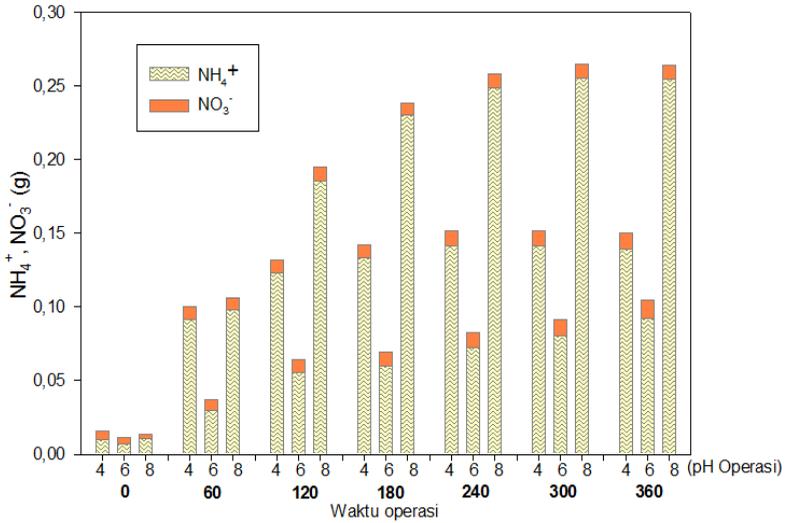
Berikut ini adalah massa terukur dengan variasi pH 4, pH 6, dan pH 8 dan kuat arus terhadap anoda aluminium dapat dilihat pada Gambar 4.6 hingga Gambar 4.9 yang secara rinci dapat dilihat pada lampiran B Tabel. LB.7 sampai LB.8.



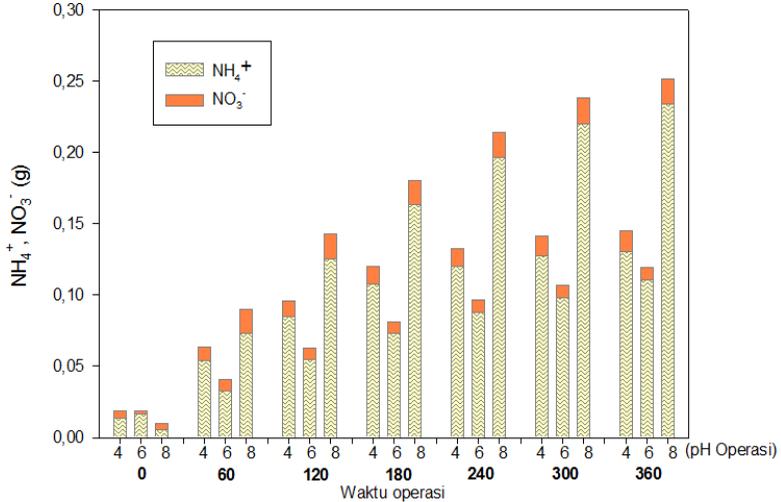
Gambar 4.6 Massa NH_4^+ , NO_3^- , Organik-N pada lindi arus 700 mA



Gambar 4.7 Massa NH_4^+ , NO_3^- , Organik-N pada Lindi arus 500 mA



Gambar 4.8 Massa terukur NH_4^+ , NO_3^- pada buffer di variasi arus 700 mA dengan jenis anoda Aluminium



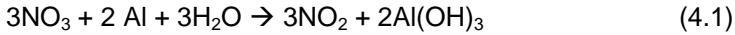
Gambar 4.9 Peningkatan massa NH_4^+ , NO_3^- pada buffer di variasi arus 500 mA dengan jenis anoda Aluminium

Penyisihan amonium pada pH 4 arus 700 mA turun dari 1,005 g menjadi 0,416 g atau sebesar 55,2%. pH 6 arus 700 mA sebesar 59% dan pH 8 arus 700 mA turun sebesar 43,4%. Pada kuat arus 500 mA penyisihan amonium dari pH 4, pH 6, pH 8 berturut-turut adalah 43,1%, 50,4%, dan 47,6%. Penyisihan Nitrat pada kuat arus 700 mA pada pH 4, pH 6, dan pH 8 berturut-turut adalah 0,026 g, 0,025 g, dan 0,01 g. Kemudian pada kuat arus 500 mA berturut-turut dari pH 4, pH 6, pH 8 adalah 0,036 g, 0,01 g, dan 0,018 g. Penyisihan untuk organik-N pada arus 700 mA adalah sebagai berikut untuk pH 4 adalah 0,089 g, pH 6 sebesar 0,072 g, pH 8 sebesar 0,052 g kemudian pada arus 500 mA untuk pH 4, pH 6 dan pH 8 berturut-turut adalah 0,077 g, 0,088 dan 0,109 g.

Pada kuat arus 700 mA jika dilihat dari kecepatan penurunan amonium, maka setiap per 3 jam kecepatannya untuk pH 4 adalah 0,00189 g.menit⁻¹ dan 0,00137 g.menit⁻¹. pH 6 adalah 0,0020 g.menit⁻¹ dan 0,0012 g.menit⁻¹ dan pH 8 adalah 0,0015 g.menit⁻¹ dan 0,0014 g.menit⁻¹. pH 8 memiliki kecepatan penurunan amonium lebih stabil dari yang lainnya. Jika dilihat dari kebutuhan energi yang diperlukan untuk menurunkan 1 mol zat adalah untuk pH 4,6,8 berturut-turut adalah 0,215 kWh.g⁻¹, 0,182 kWh.g⁻¹, dan 0,189 kWh.g⁻¹. Sehingga, untuk penurunan amonium di arus 700 mA adalah optimum pada pH 6.

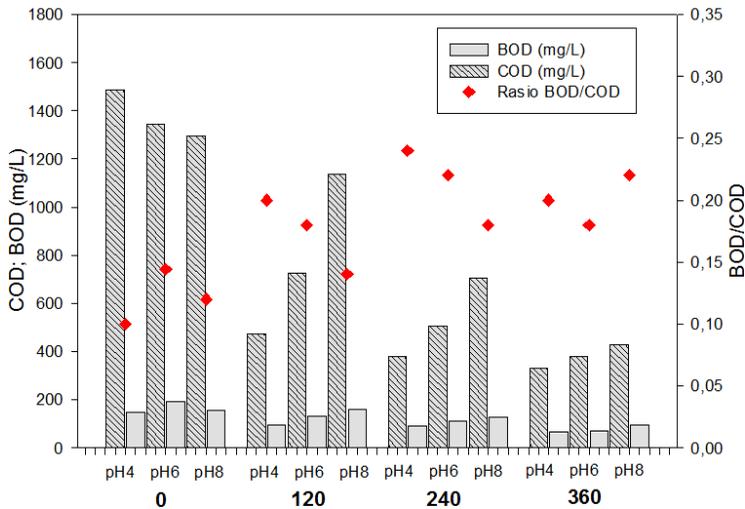
Pada kuat arus 500 mA penyisihan amonium terbesar berada pada pH 8, yaitu 0,55 g (0,087 kWh.g⁻¹). Dari kecepatan penurunan amonium pada pH 8 mengalami peningkatan per 3 jam pengamatan yaitu 0,0014 g.menit⁻¹, 0,0016 g.menit⁻¹. Hal ini dikarenakan proses elektrokoagulasi pada pH basa akan terjadi evolusi hidrogen yang dapat membawa polutan terflotasi. Menurut Li *et al.* (2017), ketika pH di atur dari pH 3.9 ke 10.1 memiliki penurunan amonium terbaik pada rentang pH 6.7 – pH 7.5. Ketika kuat arus ditingkatkan menjadi 700 mA, pengaruh pH tidak terlihat signifikan. Hal ini dapat terjadi karena konfigurasi reaktor yang digunakan menggunakan dua jenis membran yaitu CEM dan AEM. Menurut Sano *et al.* (2018) kuat arus yang tinggi akan membantu transfer massa melalui membran. Sehingga amonium pada variasi arus 700 mA akan berpindah lebih banyak meskipun tidak berada pada pH yang stabil penurunannya.

Menurut Sillanpa and Shestakova (2017), mekanisme penurunan nitrat pada lindi terjadi ketika senyawa nitrat bereaksi dengan anoda yang kemudian akan tereduksi menjadi nitrit, nitrit akan menjadi amonia, dan amonia menjadi gas nitrogen. Sesuai dengan persamaan 4.1 -4.3.

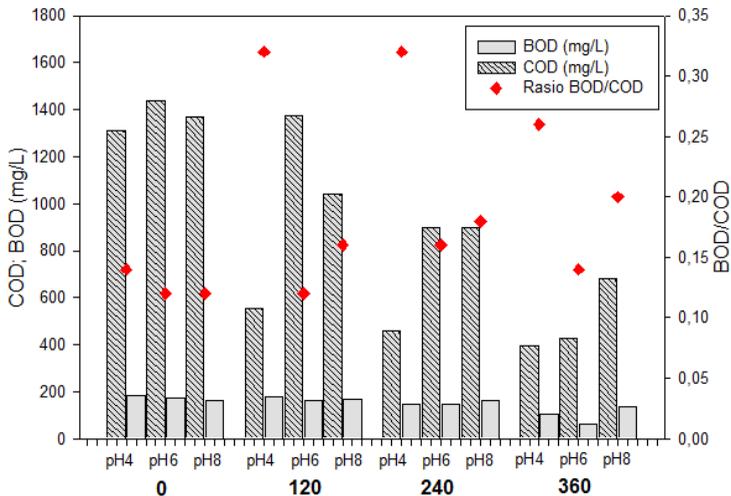


4.2.1.4 perubahan rasio BOD₅/COD

Hasil analisis rasio BOD₅/COD tertera pada lampiran B Tabel LB. 6. Perubahan rasio BOD₅/COD dengan variasi pH 4, pH 6, dan pH 8 dan kuat arus terhadap anoda aluminium dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11



Gambar 4.10 Perbandingan Rasio BOD₅/COD dengan arus 700 mA jenis anoda Aluminium



Gambar 4.11 Perbandingan Rasio BOD₅/COD dengan arus 500 mA jenis anoda Aluminium

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 terlihat bahwa rasio BOD₅/COD mengalami fluktuasi dan kecenderungan meningkat. Pada pH 4 arus 700 mA terjadi peningkatan rasio BOD/COD secara signifikan dari jam ke-0 sebesar 0,1 hingga sebesar 0,20 pada jam ke-6 dan energi yang diperlukan sebesar 0,313 kWh.g⁻¹. Pada pH 4 arus 500 mA peningkatan rasio BOD₅/COD terjadi mulai jam ke-0 adalah 0,14 hingga sebesar 0,26 pada jam ke-6 dan energi yang dibutuhkan adalah 0,1 kWh.g⁻¹. Kemudian peningkatan rasio mulai tidak stabil dengan tren tetap meningkat. pH 8 arus 700 mA dan 500 mA peningkatan rasio BOD/COD tidak terjadi secara signifikan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan kuat arus 700 mA rasio BOD₅/COD jam ke-0 adalah 0,12 dan jam ke-6 adalah 0,22 dengan energi yang dibutuhkan sebesar 0,326 kWh.g⁻¹. Kemudian untuk kuat arus 500 mA mengalami peningkatan dari 0,12 hingga 0,2 dengan energi yang dibutuhkan sebesar 0,089 kWh.g⁻¹.

Jika dilihat dari variasi kuat arus, maka menggunakan kuat arus 700 mA kurang efektif karena peningkatan rasio BOD₅/COD tidak lebih tinggi dari arus 500 mA. Tingginya kuat arus meningkatkan

efektifitas pembentukan koagulan dari anoda aluminium, yang berdampak pada turunnya angka BOD yang tinggi bersamaan dengan menurunnya nilai COD. Jika dilihat dari variasi pH tidak terlalu mempengaruhi proses secara signifikan. Dari sisi energi yang dibutuhkan, maka energi terendah didapatkan pada variasi pH 6 kuat arus 500 mA dengan kebutuhan energi sebesar $0,08 \text{ kWh}\cdot\text{g}^{-1}$, sedangkan energi terbesar pada pH 8 kuat arus 700 mA sebesar $0,326 \text{ kWh}\cdot\text{g}^{-1}$.

Jika dilihat dari orde reaksi perubahan nilai BOD maka untuk nilai BOD_5/COD tertinggi mengikuti orde 1 dan penurunan COD mengikuti orde 2. Selama operasi berlangsung jumlah massa COD yang berkurang adalah sebanding dengan kuadrat massa awal COD. Namun nilai BOD yang mengikuti orde 1 memiliki penurunan massa yang sebanding dengan massa awal COD. Sehingga, peningkatan BOD_5/COD tidak terlalu tinggi.

Waktu operasi sangat mempengaruhi rasio BOD_5/COD . Dimana pada jam ke-4 pada pH 4 dan pH 6 baik pada kuat arus 700 mA atau 500 mA merupakan peningkatan yang terbaik dari keseluruhan waktu operasi, dengan nilai tertinggi dicapai pada pH 4 kuat arus 500 mA yaitu memiliki rasio BOD_5/COD 0,32. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Imania (2018) menjelaskan bahwa pengolahan biologis masih dapat dilakukan dengan MBBR karena mampu mengolah lindi dengan rasio BOD_5/COD 0,2 meskipun efisiensi yang diperoleh akan lebih rendah dibandingkan sampel dengan rasio BOD_5/COD di atas 0,5

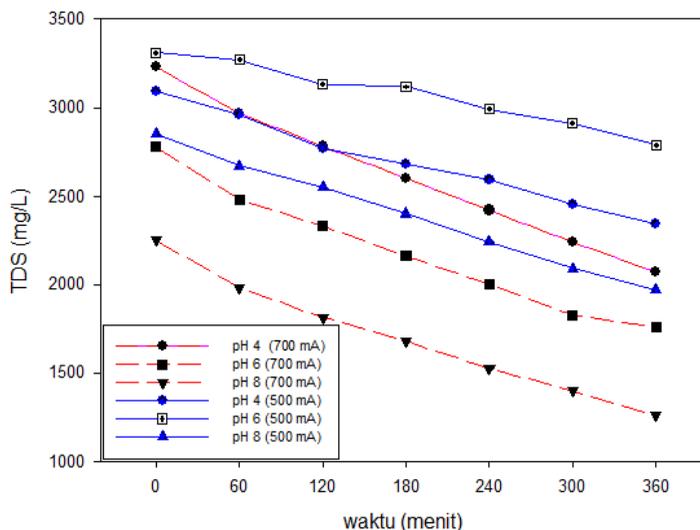
4.2.2 Pengaruh pH operasi dan kuat arus terhadap proses elektrokimia pada lindi menggunakan anoda platina

Penggunaan anoda platina bertujuan untuk menganalisis apakah dapat meningkatkan penyisihan amonium dan polutan organik pada lindi sebelum pengolahan biologis. Dalam penelitian ini, proses elektrokimia dengan platina akan dianalisis berdasarkan massa COD, TDS, amonium, nitrat, Organik-N, dan rasio BOD_5/COD .

4.2.2.1 Perubahan nilai TDS pada Lindi dan Buffer fosfat

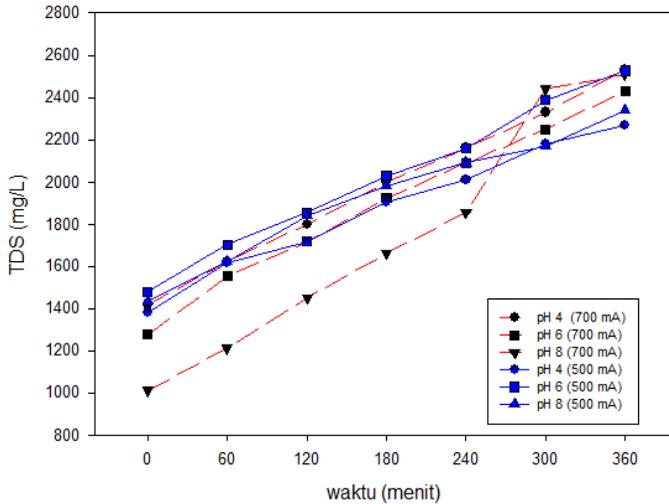
Proses elektrokimia akan mengakibatkan penurunan nilai TDS pada lindi dan peningkatan nilai TDS pada buffer fosfat. Data hasil analisis massa TDS lindi dan buffer fosfat tertera pada

lampiran B Tabel LB.9 dan Tabel LC.10. Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan perubahan massa TDS pada lindi dan buffer fosfat pada variasi pH 4, pH 6, pH 8 dengan kuat arus 500 mA dan 700 mA menggunakan anoda platina



Gambar 4.12 Perubahan Nilai TDS pada lindi dengan jenis anoda Pt

Pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa penurunan TDS lindi pada anoda Pt mengalami penurunan yang seragam. Dimana pada kuat arus 700 mA dengan pH 4, pH 6, pH 8 berturut turut pada jam ke-0 adalah 3230 mg.L^{-1} , 2780 mg.L^{-1} , 2250 mg.L^{-1} turun pada jam ke-6 menjadi 2070 mg.L^{-1} (35,9%), 1755 mg.L^{-1} (36,8%), 1257 mg.L^{-1} (44,1%). Pada kuat arus 500 mA mulai dari pH 4, pH 6 dan pH 8 berturut-turut di jam ke-0 3090 mg.L^{-1} , 3310 mg.L^{-1} , 2850 mg.L^{-1} turun di jam ke-6 menjadi 2340 mg.L^{-1} (24,2%), 2790 mg.L^{-1} (15,7%), dan 1970 mg.L^{-1} (30,8%).

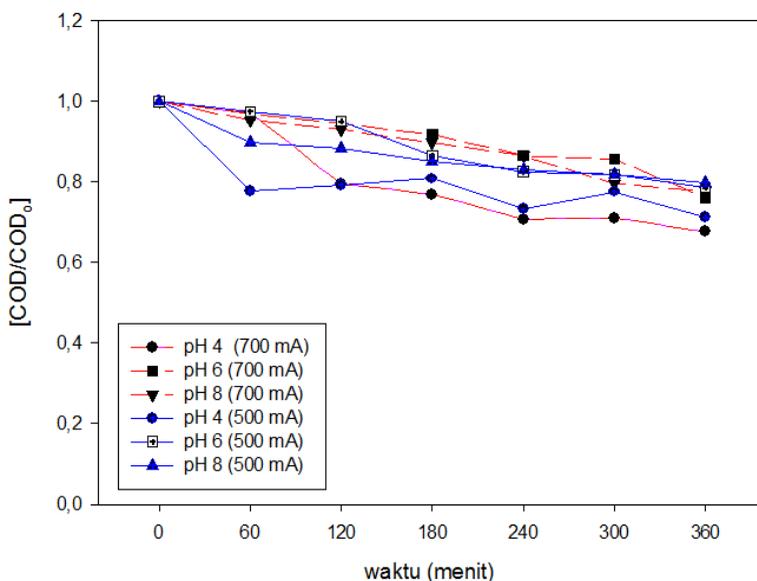


Gambar 4.13 Perubahan Nilai TDS pada buffer dengan jenis anoda Pt

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.13 nilai TDS pada buffer fosfat mengalami peningkatan pada semua variasi pH dan kuat arus. Hal ini mengindikasikan bahwa ion-ion yang berada pada lindi mengalami perpindahan menuju kompartemen tengah yang berisi buffer fosfat melalui membran penukar ion. Secara umum ion selain OH^- dan H^+ juga akan berpindah melalui CEM dan AEM membran. Peningkatan kuat arus akan mengakibatkan peningkatan transfer massa melalui membran, perpindahan yang terjadi pada membran penukar ion dipengaruhi oleh beda potensial listrik (Wenten, 2012)

4.2.2.2 Penurunan massa COD

COD adalah salah satu parameter yang dapat digunakan untuk melihat penurunan polutan organik dan anorganik pada proses elektrokimia menggunakan anoda platina. Hasil analisis COD tertera pada Lampiran B Tabel L.B.11 Penurunan COD dengan variasi pH operasi pH 4, pH 6, dan pH 8 serta kuat arus 500 mA dan 700 mA dengan anoda platina dapat dilihat pada Gambar 4.14. (Gambar tersaji pada halaman berikutnya)

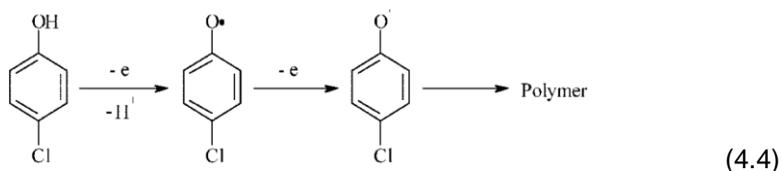


Gambar 4.14 Penurunan COD $[\text{COD}/\text{COD}_0]$ selama proses elektrokimia dengan anoda Pt

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.14 penurunan massa COD pada setiap variasi arus dan pH mengalami penurunan. Pada pH 4 arus 700 mA rasio COD/COD_0 mengalami penurunan sebesar 2,68 g. pH 4 dengan arus 500 mA mengalami penurunan dari $1327,6 \text{ mg.L}^{-1}$ ke $1003,6 \text{ mg.L}^{-1}$ atau sebesar 1,89 g. pada pH 6 arus 700 mA dan 500 mA berturut-turut dapat menurunkan massa COD 1,603 g dan 1,334 g. pada pH 8 arus 700 mA dapat menurunkan COD sebesar 1,39 g, kemudian pada arus 500 mA sebesar 1,35 g.

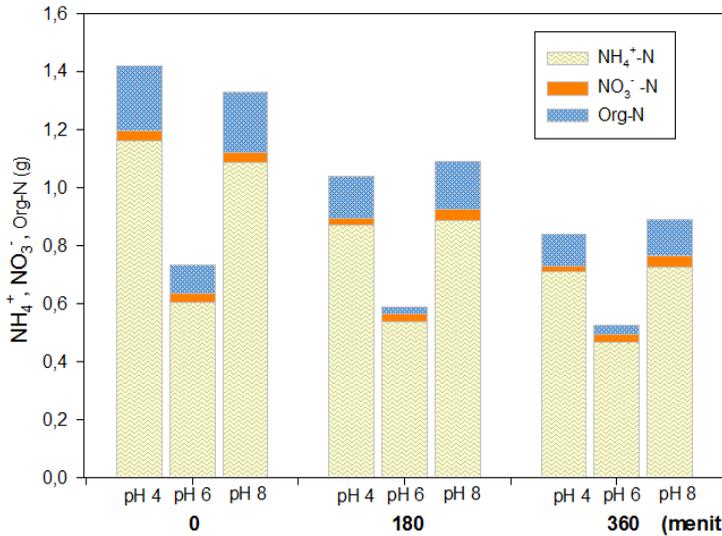
Proses penurunan organik yang terukur sebagai COD merupakan oksidasi langsung yang terjadi pada anoda Pt. Proses oksidasi langsung secara teori berlangsung pada potensial rendah, sebelum evolusi oksigen. Biasanya kinetika reaksinya sangat rendah dan bergantung pada aktivitas anoda elektrokatalitik. Namun, elektrooksidasi yang terjadi sebelum evolusi oksigen akan menimbulkan penurunan aktivitas katalitik, yang umumnya disebut *poisoning effect* (Panizza and Cerisola, 2009).

Dampaknya pada proses adalah penurunan efisiensi dan terbentuk lapisan polimer pada permukaan elektroda. Polimer pada lindi umumnya adalah asam humat atau bisa disebut polimer organik adalah makromolekul yang kompleks yang terdiri dari campuran senyawa organik alifatik dan aromatik, diantaranya ditunjukkan dengan adanya gugus aktif asam karboksilat dan quinoid. Beberapa polimer selain asam humat terdiri dari senyawa aromatik seperti fenol, klorofenol, anilin, senyawa yang mengandung gugus sulfonat. Pembentukan polimer dapat dilihat pada 4-klorofenol. Dimana akan terjadi pemutusan rantai hingga pada siklus ke-5 akan hilang sempurna dengan *anodic peak* pada 1,7 V vs. SHE (*Standard Hydrogen Electrode*). Dan pada saat oksidasi pertama akan terbentuk polimer dari kation klorofenol (Panizza and Cerisola, 2009). Seperti pada persamaan rumus kimia 4.4

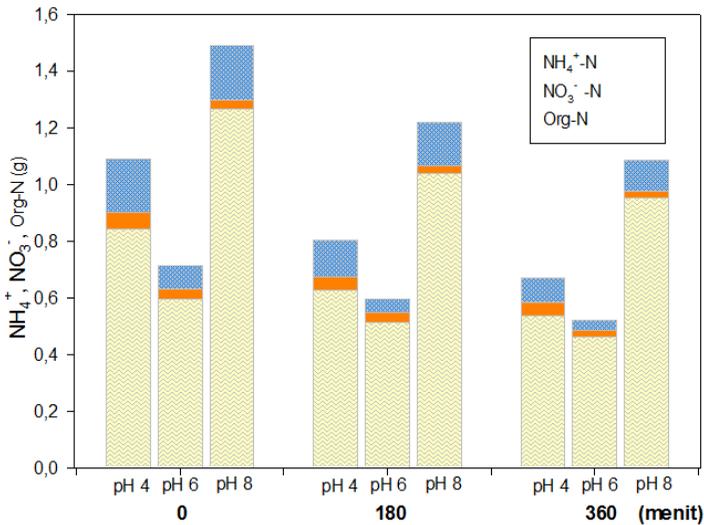


4.2.2.3 Massa amonium nitrat Organik-N

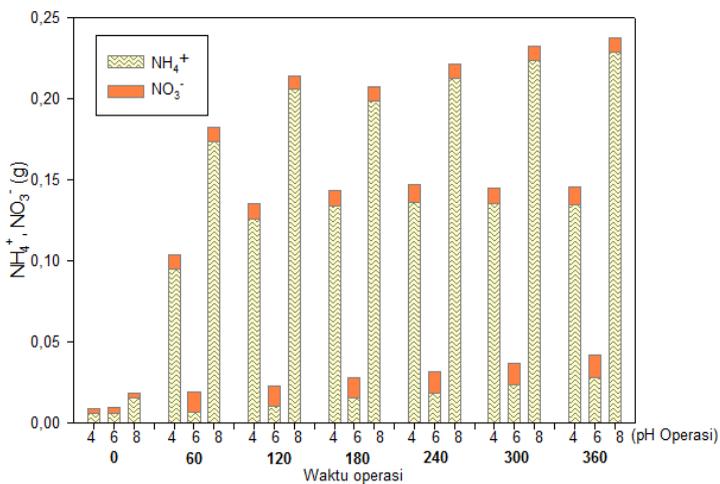
Hasil analisis amonium, nitrat, dan Org-N tertera pada lampiran B Tabel. LB.13 sampai LB.14. Massa terukur dengan variasi pH 4, pH 6, dan pH 8 dan kuat arus terhadap anoda platina dapat dilihat pada Gambar 4.15 hingga Gambar 4.18 (Gambar di halaman berikutnya)



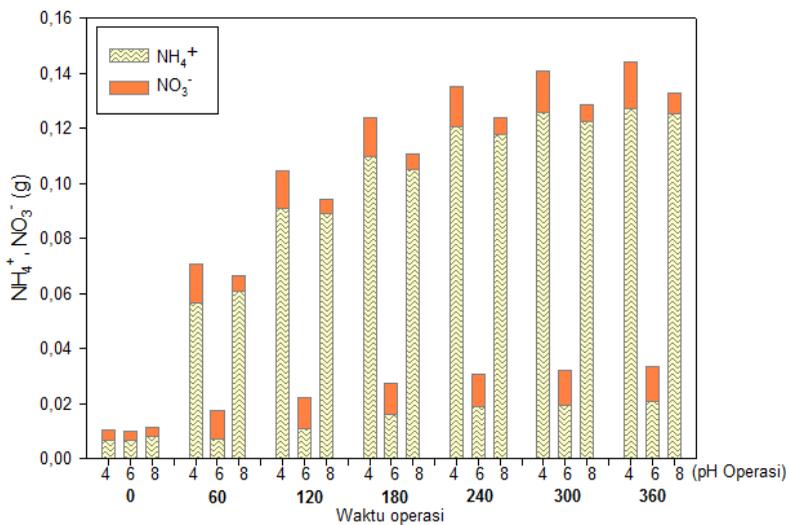
Gambar 4.15 Massa terukur NH₄⁺, NO₃⁻, Organik-N pada variasi arus 700 mA dengan jenis anoda Pt



Gambar 4.16 Massa terukur NH₄⁺, NO₃⁻, organik-N pada variasi arus 500 mA dengan jenis anoda Pt



Gambar 4.17 Massa terukur NH₄⁺, NO₃⁻ pada buffer di variasi arus 700 mA dengan jenis anoda Pt



Gambar 4.18 Massa terukur NH₄⁺, NO₃⁻ pada buffer di variasi arus 500 mA dengan jenis anoda Pt

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.15 massa amonium pada setiap variasi pH pada kuat arus 700 mA mengalami perubahan, pada pH 4, pH 6, pH 8 dapat menyisihkan amonium berturut-turut sebesar 0,45 g, 0,135 g, dan 0,361 g. Massa nitrat di pH 4, pH 6 berkurang berturut-turut 0,017 g, 0,008 g, di pH 8 mengalami peningkatan sebesar 0,005 g. hasil perhitungan organik-N mengalami penurunan dari pH 4, pH 6, pH 8 berturut-turut adalah 0,11 g, 0,068 g, 0,08 g. Jika ditinjau dari kecepatan removal dan konsumsi energi terhadap penyisihan amonium dari pH 4, pH 6, pH 8 berturut-turut adalah $0,0012 \text{ g.menit}^{-1}$ ($0,130 \text{ kWh.g}^{-1}$), $0,0008 \text{ g.menit}^{-1}$ ($0,073 \text{ kWh.g}^{-1}$), $0,0003 \text{ g.menit}^{-1}$ ($0,1919 \text{ kWh.g}^{-1}$). Untuk lebih lanjutnya pada pH 4 dan pH 6 kecepatan removal massa amonium jika dilihat per 3 jam didapatkan bahwa pH 4 mengalami penurunan lebih besar dari pada pH 6, namun dari konsumsi energi yang dibutuhkan pH 6 menunjukkan hasil yang lebih menguntungkan. Sehingga untuk penyisihan massa amonium pH 6 arus 700 mA lebih optimal dari pH 4 dan pH 8.

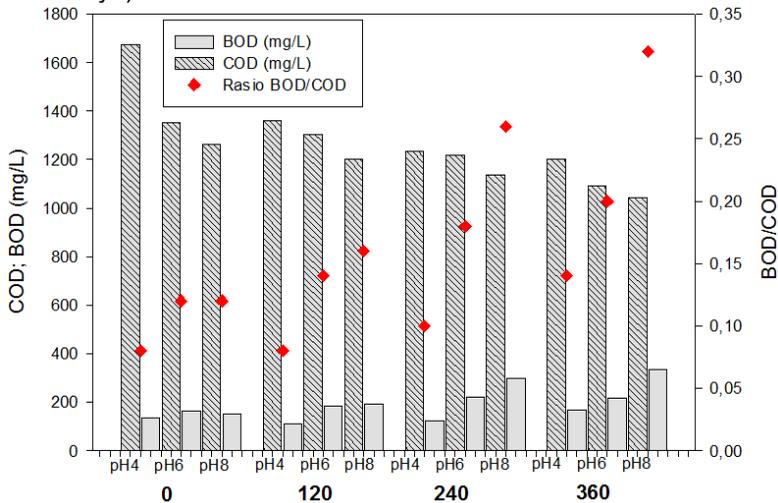
Gambar 4.16 adalah penyisihan amonium dengan kuat arus 500 mA. Penyisihan amonium terbesar berada pada pH 8, yaitu 0,312 g ($0,024 \text{ kWh.g}^{-1}$). Kecepatan penurunan amonium pada pH 8 adalah yang terbesar yaitu $0,00086 \text{ g.menit}^{-1}$. Untuk nitrat dan organik-N penyisihan sebesar 0,012 g dan 0,101 g.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.17 sampai 4.18 amonium, nitrat terukur, dan Organik-N yang terhitung pada buffer fosfat mengalami peningkatan karena proses elektooksidasi dan proses elektrodialisis melalui membran CEM dan AEM. Selama proses elektrodialisis berlangsung, ion positif (H^+ , Na^+ , K^+ , NH_4^+) akan berpindah melalui CEM dan ion negatif (NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , OH^-) berpindah melewati AEM. Menurut Vlyssides *et al.* (2001) bahwa keseimbangan nitrogen dipengaruhi oleh pH operasional. Pada pH asam akan terjadi oksidasi senyawa amonium menjadi nitrat, nitrat menjadi nitrit sedangkan pada pH basa nilai *recovery* senyawa nitrat menurun jumlah massanya, yaitu pada pH 4 arus 700 mA total nitrat yang terkonsentrat adalah 0,062 g, pH 6 sebesar 0,082 g dan pada pH 8 adalah 0,054 g. Kemudian pada arus 500 mA pada pH 4, pH 6, dan pH 8 berturut-turut adalah 0,092 g, 0,073 g, 0,040 g.

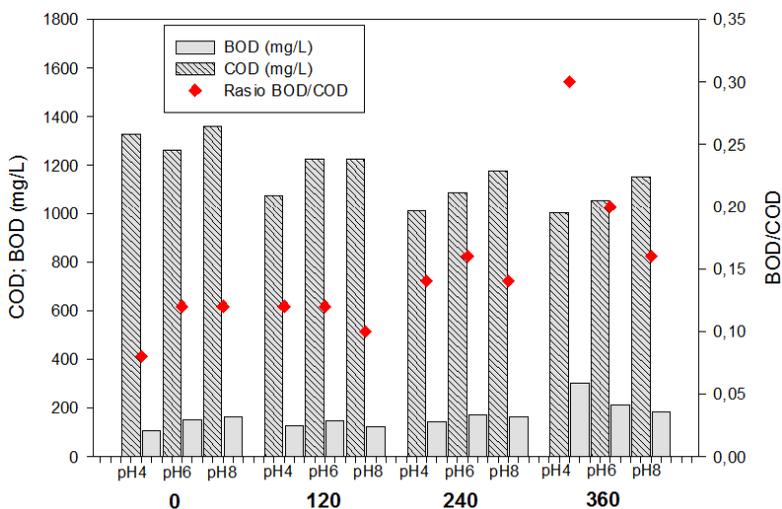
Dalam proses elektrooksidasi proses penyisihan senyawa amonium, nitrat, dan organik-N dimungkinkan terjadi akibat proses oksidasi langsung pada permukaan platina dan oksidasi tidak langsung melalui keberadaan Cl^- , OCl^- , HOCl , SO_4^{2-} .

4.2.2.4 perubahan rasio BOD₅/COD

Hasil analisis rasio BOD₅/COD tertera pada lampiran B Tabel. LB. 12. Perubahan rasio BOD₅/COD dengan variasi pH 4, pH 6, dan pH 8 dan kuat arus terhadap anoda aluminium dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 (Gambar tersaji pada halaman berikutnya).



Gambar 4.19 Perbandingan Rasio BOD₅/COD dengan kuat arus 700 mA di jenis anoda Platina



Gambar 4.20 Perbandingan Rasio BOD₅/COD dengan kuat arus 500 mA di jenis anoda Platina

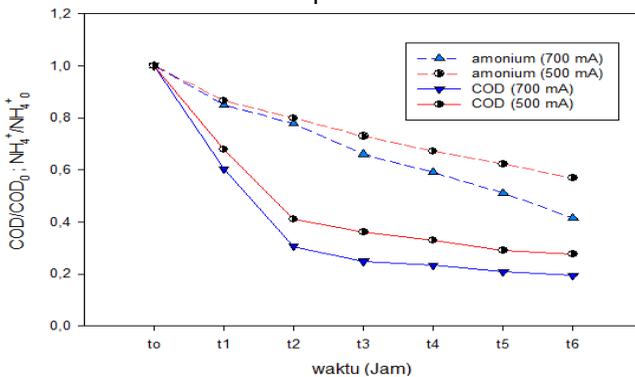
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 terlihat bahwa rasio BOD₅/COD mengalami fluktuasi dan kecenderungan meningkat. Pada pH 4 arus 700 mA terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD dari 0,08 menjadi 0,14 dengan energi sebesar 0,117 kWh.g⁻¹. Pada pH 4 arus 500 mA meningkatkan rasio dari 0,08 menjadi 0,3 dengan energi sebesar 0,027 kWh.g⁻¹. Pada pH 6 arus 700 mA dan 500 mA berturut-turut rasio BOD/COD meningkat dari 0,12 ke 0,2 dengan energi 0,087 kWh.g⁻¹ dan 0,12 ke 0,2 dengan energi sebesar 0,041 kWh.g⁻¹. Pada pH 8 700 mA menurun dari 0,12 ke 0,32 dengan energi sebesar 0,077 kWh.g⁻¹. pH 8 arus 500 mA peningkatan rasio BOD₅/COD awal 0,12 menjadi 0,16 dengan energi sebesar 0,0275 kWh.g⁻¹. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Imania (2018) menjelaskan bahwa pengolahan biologis masih dapat dilakukan dengan MBBR karena mampu mengolah lindi dengan rasio BOD₅/COD 0,2 meskipun efisiensi yang diperoleh akan lebih rendah dibandingkan sampel dengan rasio BOD₅/COD di atas 0,5

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan kuat arus 500 mA pH 4 merupakan hasil yang terbesar dan energi yang dibutuhkan tidak terlalu tinggi yaitu sebesar $0,027 \text{ kWh.g}^{-1}$. Peningkatan ini disebabkan karena proses oksidasi langsung yang terjadi di potensial rendah. Sehingga, pada kuat arus minimum proses akan meningkat.

Jika dilihat dari orde reaksi perubahan nilai BOD maka untuk nilai BOD_5/COD tertinggi mengikuti orde 0 dan penurunan COD mengikuti orde 1. Selama operasi berlangsung jumlah massa COD yang berkurang adalah sebanding dengan massa awal COD. Namun nilai BOD yang mengikuti orde 0 memiliki penurunan massa yang tidak terpengaruh dengan massa awal COD. Sehingga, peningkatan BOD_5/COD dapat mencapai nilai yang tinggi.

4.2.3 Mekanisme penurunan COD dan Amonium

Penyisihan COD dominan terjadi pada oksidasi langsung sementara amonium dominan terjadi pada oksidasi tidak langsung. Oksidasi langsung pada elektrokimia menghasilkan OH radikal dari aktivasi air yang selanjutnya dapat mendegradasi polutan organik yang dianalisis sebagai COD. Oksidasi tidak langsung dari pembentukan spesies aktif seperti kelompok senyawa klorin akan bertindak sebagai agen pengoksidasi amonium *di bulk solution*. Mekanisme ini dapat terlihat melalui normalisasi COD dan amonium pada Gambar 4.21



Gambar 4.21 Normalisasi COD dan amonium pada kuat arus berbeda

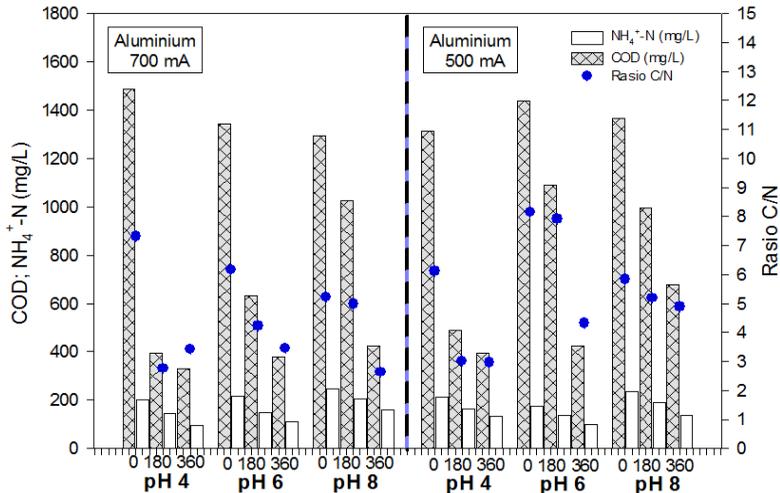
Berdasarkan Gambar 4.21 grafik normalisasi pada COD terjadi secara eksponensial dengan penyisihan terbesar terjadi pada jam ke-0 hingga jam ke-2. Pada kondisi ini penyisihan COD terjadi secara langsung dari pembentukan radikal hidroksil di permukaan anoda. akan tetapi, pada amonium penurunan pada jam ke-0 hingga jam ke-2 tidak terjadi secara signifikan. Penurunan amonium mulai terjadi secara signifikan ketika penurunan COD mulai stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa oksidasi tidak langsung terjadi. Pembentukan senyawa spesies aktif membantu penurunan amonium.

Kuat arus dan pH mempengaruhi proses oksidasi, terlihat bahwa peningkatan kuat arus berpengaruh terhadap penyisihan COD, dimana pada kuat arus 700 mA penyisihan terjadi lebih banyak dari pada kuat arus 500 mA. Pada penyisihan amonium kuat arus berpengaruh terhadap pembentukan spesies aktif yang dimulai pada jam ke-3. Pada awal proses (jam ke-0 sampai jam ke-3) kuat arus tidak terlihat secara langsung mempengaruhi, namun pada jam ke-3 penurunan dengan kuat arus 700 mA terlihat lebih besar dari kuat arus 500 mA. pH juga berpengaruh terhadap penyisihan senyawa amonium dan polutan organik. Pada pH asam (pH <3.3) klorin terlarut dominan terbentuk ($E^0=1.36$ V), pada pH lebih asam asam hipoklorit terbentuk (HOCl, pada pH < 7.5, $E^0=1.63$ V) dan ion hipoklorit (OCl⁻, pada pH > 7.5, $E^0=1.9$ V). Secara teori bahwa pada pH yang asam akan cenderung mengurangi terbentuknya oksigen evolusi yang tidak diinginkan. Dimana reaksinya adalah sebagai berikut:



4.2.4 Pengaruh rasio C/N dari terhadap pengolahan biologis

Hasil analisis rasio C/N tertera pada lampiran B Tabel. LB. 15. Perubahan rasio C/N dengan variasi pH 4, pH 6, dan pH 8 dan kuat arus terhadap anoda aluminium dapat dilihat pada Gambar 4.22 (Gambar berada pada halaman berikutnya)



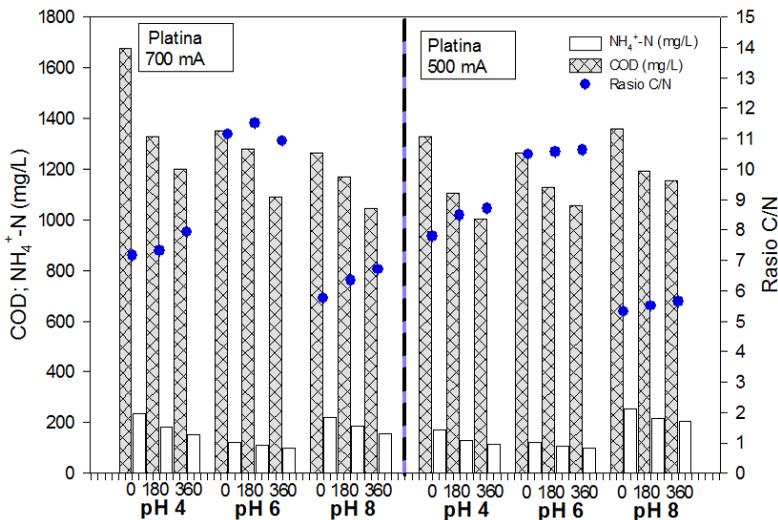
Gambar 4.22 Perbandingan rasio C/N untuk anoda Aluminium

Berdasarkan grafik pada gambar 4.22 Dimana rasio C/N merupakan rasio konsentrasi COD dan amonium. Rasio C/N pada anoda aluminium keseluruhan mengalami penurunan. Pada kuat arus 700 mA di pH 4, pH 6, dan pH 8 masing-masing adalah 7,31 ke 3,43; 6,17 ke 3,45; dan 5,21 ke 2,64. Sedangkan pada kuat arus 500 mA nilainya dari pH 4, pH 6, pH 8 berturut-turut juga mengalami penurunan yaitu 6,11 ke 2,97; 8,14 ke 4,32; dan 5,84 ke 4,89. Penurunan ini terjadi karena COD sebagai sumber karbon memiliki nilai removal yang tinggi. Sehingga rasio C/N pada lindi mengalami penurunan. Jika dilihat dari laju penurunannya maka COD rata-rata memiliki $0,013 \text{ g. menit}^{-1}$ dan nitrogen sebesar $0,0014 \text{ g. menit}^{-1}$.

Nilai rasio C/N pada anoda aluminium sekitar 2,64 sampai 8,14, merupakan nilai yang sesuai untuk pengolahan biologis dengan

metode nitrifikasi dan denitrifikasi. Dalam penelitiannya, Yadu *et al.* (2018) menjelaskan bahwa dalam penurunan $\text{NH}_4\text{-N}$ dalam proses nitrifikasi didapatkan hasil yang tertinggi dengan rasio C/N adalah 2 dari penelitian yang dilakukan (2–10). Dengan rendahnya rasio C/N pada lindi akan meminimalisir pembentukan zat inhibitor dalam proses nitrifikasi dan meningkatkan dominasi bakteri nitrifikasi. Maksimum kecepatan nitrifikasi terjadi pada pH 7,8 – 8,9.

Rasio C/N dengan variasi pH 4, pH 6, dan pH 8 dan kuat arus 500 mA, 700 mA terhadap anoda platina tersaji pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Perbandingan rasio C/N untuk anoda Platina

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.23. Dengan menggunakan kuat arus 700 mA pada pH 4, rasio C/N mengalami peningkatan 7,15 ke 7,94. Pada pH 6 dari 11,14 ke 10,93 dan pada pH 8 dari 5,76 ke 6,70. Peningkatan rasio C/N juga terjadi pada kuat arus 500 mA. Pada pH 4, pH 6, pH 8 berturut-turut adalah 7,78 ke 8,70; 10,48 ke 10,62, dan 5,31 ke 5,64. Peningkatan terjadi akibat penyisihan polutan organik yang terukur sebagai COD tidak signifikan yang berdampak pada perbandingan nilai C

dan N awal dan akhir proses meningkat. Dimana nilai tersebut masih dapat terjadi proses nitrifikasi, namun memiliki efisiensi removal amonium yang rendah.

4.2.4 Kebutuhan energi dalam proses elektrokimia

Untuk menentukan efisiensi pengolahan dilakukan perhitungan konsumsi energi spesifik. Perhitungan konsumsi energi spesifik proses yang dilakukan untuk parameter COD dan amonium dengan membandingkan antara massa yang tersisihkan dengan muatan listrik spesifik. Konsumsi energi spesifik pada parameter COD dan jumlah massa nitrogen sebagai amonium dengan membandingkan antara massa yang tersisihkan dengan muatan listrik spesifik. Perbandingan Energi Spesifik terhadap penyisihan amonium dan COD dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan tabel 4.4

Tabel 4.2 Perbandingan Energi Spesifik terhadap penyisihan amonium

Variasi	Wh.L ⁻¹	Massa NH ₄ ⁺ (g)	NH ₄ (kWh.g ⁻¹)
Aluminium			
Al.4.700	19,131	0,589	0,215
Al.4.700	10,171	0,458	0,077
Al.6.700	17,996	0,604	0,182
Al.6.700	7,877	0,440	0,084
Al.8.700	29,400	0,533	0,189
Al.8.700	12,418	0,551	0,087
Platina			
Pt.4.700	19,785	0,452	0,130
Pt.4.700	8,425	0,306	0,073
Pt.6.700	19,146	0,135	0,191
Pt.6.700	8,607	0,133	0,087
Pt.8.700	25,758	0,361	0,165
Pt.8.700	5,086	0,312	0,024

Tabel 4.3 Perbandingan Energi Spesifik terhadap penyisihan COD, kebutuhan material dan bahan serta volume yang hilang pada anoda Aluminium (Al)

Variasi	Wh	Massa COD tersisihkan(g)	COD (kWh.g ⁻¹)	Al terlarut (g)	Penambahan Kimia (mL)		Volume Hilang (mL)
					NaOH	H ₂ SO ₄	
Al.4.700	89,46	5,92	0,062	1,538	-	26	376
Al.4.700	47,10	4,69	0,026	1,426	-	39,5	139,5
Al.6.700	86,10	5,01	0,052	1,323	5	11,5	366
Al.6.700	36,75	5,24	0,019	1,103	3	11	278,5
Al.8.700	132,3	4,57	0,071	1,209	4	18	352
Al.8.700	53,4	3,79	0,017	1,004	4,5	16	295

Tabel 4.4 Perbandingan Energi Spesifik terhadap penyisihan COD, bahan kimia pada anoda Platina (Pt)

Variasi	Wh	Massa COD tersisihkan(g)	COD (kWh.g ⁻¹)	Penambahan Kimia (mL)	
				NaOH	H ₂ SO ₄
Pt.4.700	92,40	2,683	0,016	17,5	-
Pt.4.700	39,30	1,890	0,008	14,5	-
Pt.6.700	89,46	1,603	0,017	10	0,5
Pt.6.700	40,50	1,334	0,008	8,5	3
Pt.8.700	120,12	1,394	0,024	12	4
Pt.8.700	23,70	1,352	0,004	8	1

Berdasarkan Tabel 4.2 Dalam penyisihan amonium maka variasi yang efektif adalah pada pH 6 arus 700 mA untuk aluminium sebesar 0,604 g (0,182 kWh.g⁻¹). Penggunaan anoda platina didapatkan nilai optimum pada pH 8 kuat arus 500 mA karena dapat menurunkan amonium sebesar 0,312 g (0,024 kWh.g⁻¹).

Berdasarkan Tabel 4.3 konsumsi energi spesifik (kWh.g⁻¹) pada anoda aluminium dengan berbagai variasi pH dan kuat arus, maka removal COD terbesar adalah pada pH 4 arus 700 mA dengan konsumsi energi sebesar 0,062 kWh.g⁻¹. Namun untuk variasi yang menguntungkan adalah pada pH 6 arus 500 mA yaitu dengan konsumsi energi sebesar 0,019 Kwh.g⁻¹, dengan removal COD sebesar 5,24 g dan kebutuhan logam Al sedikit yaitu 1,103 g.

Jika ditinjau dari Tabel 4.4 maka kebutuhan energi yang paling sesuai untuk anoda platina adalah pada pH 4 arus 500 mA yaitu sebesar 1,89 g (0,008 kWh.g⁻¹). Namun, untuk removal COD terbesar adalah pada pH 400 arus 700 mA sebesar 2,68 g (0,016 kWh.g⁻¹)

4.2.5 aplikasi pengolahan elektrokimia sebagai pretreatment

Kriteria lindi pengolahan yang diterima untuk pengolahan biologis dapat dilihat dari rasio BOD₅/COD, rasio C/N, pH operasi dan komponen lain yang berpengaruh terhadap efisiensi pengolahan. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.5 sebagai berikut.

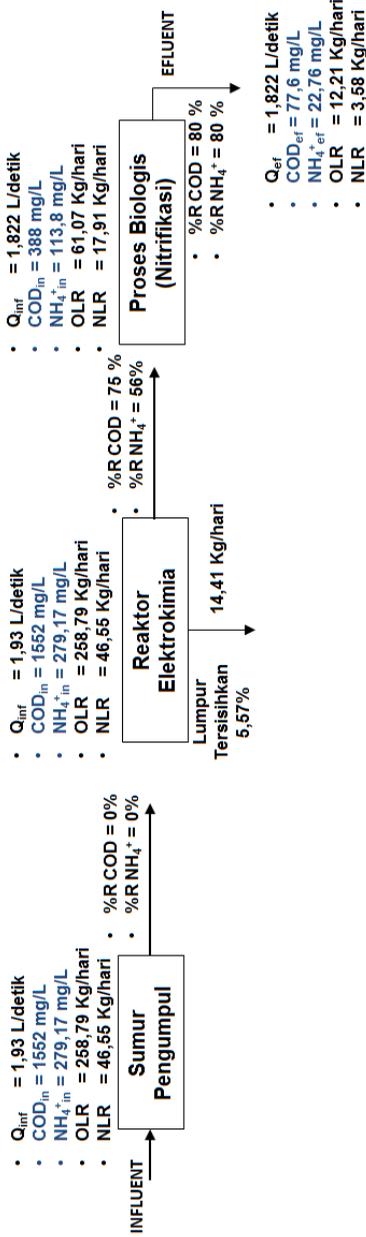
Tabel 4.5 Faktor yang mempengaruhi proses biologis

Variasi (pH/mA)	COD tersisih (g)	COD (kWh.g ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N Tersisih (g)	NH ₄ ⁺ (kWh.g ⁻¹)	Rasio BOD/ COD	Rasio C/N
Aluminium						
Al.4.700	5,92	0,062	0,589	0,215	0,20	3,43
Al.4.700	4,69	0,026	0,458	0,077	0,26	3,45
Al.6.700	5,01	0,052	0,604	0,182	0,22	2,64
Al.6.700	5,24	0,019	0,440	0,084	0,14	2,97
Al.8.700	4,57	0,071	0,533	0,189	0,22	4,32
Al.8.700	3,79	0,017	0,551	0,087	0,20	4,89

Variasi (pH/mA)	COD tersisih (g)	COD (kWh.g ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N Tersisih (g)	NH ₄ ⁺ kWh.g ⁻¹	Rasio BOD ₅ /COD	Rasio C/N
Platina						
Pt.4.700	2,683	0,016	0,452	0,130	0,14	7,94
Pt.4.700	1,890	0,008	0,306	0,073	0,30	10,93
Pt.6.700	1,603	0,017	0,135	0,191	0,20	6,70
Pt.6.700	1,334	0,008	0,133	0,087	0,20	8,70
Pt.8.700	1,394	0,024	0,361	0,165	0,32	10,62
Pt.8.700	1,352	0,004	0,312	0,024	0,16	5,64

Berdasarkan hasil pengamatan terhadap parameter yang telah diukur dan dihitung, hasil menunjukkan pengolahan dengan metode elektrokoagulasi dengan anoda aluminium memiliki tingkat penyisihan yang cukup tinggi terhadap polutan organik dan amonium yaitu sampai 5,92 g (0,062 kWh.g⁻¹) untuk COD dan 0,604 g (0,182 kWh.g⁻¹) untuk amonium. Berdasarkan rasio C/N dengan elektrokoagulasi dapat tercapai rasio C/N antara 1,99 – 3,34 dimana rasio ini adalah nilai yang sesuai untuk pengolahan biologis dengan metode nitrifikasi. Dari rasio BOD/COD mengalami peningkatan yang tidak signifikan dengan peningkatan tertinggi adalah 0,26 dari rasio awal 0,14. Hasil dengan elektrooksidasi memiliki penyisihan polutan organik dan amonium tidak terlalu signifikan yaitu berturut-turut penurunan tertinggi adalah 2,68 g untuk COD dan 0,45 g untuk amonium. Jika ditinjau dari C/N metode elektrooksidasi masih diterima dengan hasil antara 5,64 sampai 10,93 untuk proses biologis dengan nitrifikasi. Peningkatan rasio BOD₅/COD pada jenis ini cukup baik yaitu 0,32.

Mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi proses biologis dapat disimpulkan bahwa variasi yang optimum adalah pada pH 6 Kuat arus 700 mA dengan anoda Aluminium. Karena dari segi penyisihan COD dan amonium masih tinggi sekitar 75% (0,052 kWh.g⁻¹) dan 56% (0,182 kWh.g⁻¹). Rasio BOD₅/COD 0,22 dan rasio C/N yang memenuhi untuk proses nitrifikasi. diagram alir pengolahan dapat dilihat pada Gambar 4.23



*) OLR = Organik Loading Rate (COD)(Kg/hari) ; NLR = Nitrogen Loading Rate (NH4⁺)(Kg/hari)

Gambar 4.23 diagram alir pengolahan lindi variasi Al.6.700

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan adalah;

1. Kuat arus dan pH operasi berpengaruh terhadap penurunan amonium dan polutan organik pada lindi. Kuat arus 700 mA pada kondisi pH yang sama dapat menyisihkan lebih tinggi dibandingkan kuat arus 500 mA. Dimana penyisihan polutan organik tertinggi pada anoda Al dan Pt terjadi di pH 4 berturut-turut adalah sebesar 81% (5,92 g) dan 33% (2,68 g). Penyisihan amonium tertinggi pada anoda Al dan Pt, masing-masing terjadi di pH 6 sebesar 0,60 g dan pH 4 sebesar 0,45 g.
2. Efisiensi penurunan polutan organik dan amonium dicapai dengan menggunakan anoda Al pada variasi pH 6 Kuat arus 700 mA, dengan penyisihan COD sebesar 75% (5,01 g; 0,052 kWh.g⁻¹) dan amonium 56% (0,604 g; 0,182 kWh.g⁻¹). Rasio BOD₅/COD 0,22 dan rasio C/N sebesar 2,64.

5.2 Saran

Berikut adalah saran dari penelitian yang telah dilakukan;

1. Untuk mengetahui keseluruhan kesetimbangan nitrogen dalam lindi dan larutan buffer fosfat diperlukan analisis nitrit.
2. Melakukan analisis lebih lanjut tentang perubahan dan pola degradasi polutan organik *nonbiodegradable* menjadi senyawa yang lebih *degradable* melalui perhitungan total karbon, dan struktur kimia polutan organik.
3. Melakukan operasi dengan anoda Pt pada kuat arus yang lebih rendah untuk mengetahui peningkatan penelitian rasio BOD₅/COD.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, C. Y. 2015. Pengaruh tegangan listrik dan penambahan konsentrasi NaCl terhadap proses elektrolisis lindi. *Tugas Akhir Teknik Lingkungan FTSP ITS*.
- Afdal, A., dan Sari, R. N. 2017. Karakteristik lindi dari Tempat Pembuangan Sampah Akhir (TPA) Air Dingin, Kota Padang, Sumatera Barat. *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya); Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya)*
- Agustina, F. 2017. Proses Oksidasi Elektrokimia pada Lindi dengan Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) dengan Penambahan Ion Klorida dan Sulfat. *Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS*.
- Alvarez-Vazquez, H., Jefferson, B., dan Judd, S. 2004. Membrane bioreactors vs conventional biological treatment of landfill leachate: *A brief review*. (Vol. 79).
- Anglada, Á., Urtiaga, A., Ortiz, I., Mantzavinos, D., Diamadopoulou E. 2011. Boron-doped diamond anodic treatment of landfill leachate: Evaluation of operating variables and formation of oxidation by-products. *Water Research*, 45(2), 828–838.
- Aziz, H. A., Adlan, M. N., Mohamed Zahari, M. S., dan Alias, S. 2004. Removal of ammoniacal nitrogen (N-NH₃) from municipal solid waste leachate by using activated carbon and limestone (Vol. 22).
- Bagastyo, A. Y., Batstone, D. J., Kristiana, I., Escher, B. I., dan Joll, C., Radjenovic, J. 2014. Electrochemical treatment of reverse osmosis concentrate on boron-doped electrodes in undivided and divided cell configurations. *Journal of Hazardous Materials*, 279 (Supplement C), 111–116.
- Barrera-Díaz, C. E., Balderas-Hernández, P., dan Bilyeu, B. 2018. Chapter 3 - Electrocoagulation: Fundamentals and Prospectives. In C. A. Martínez-Huitle, M. A. Rodrigo, & O. Scialdone (Eds.), *Electrochemical Water and Wastewater Treatment* (pp. 61–76).
- Bilgili, M. S., Demir, A., Akkaya, E., dan Ozkaya, B. 2008. COD fractions of leachate from aerobic and anaerobic pilot

- scale landfill reactors. *Journal of Hazardous Materials*, 158(1), 157–163.
- Cabeza, A., Urtiaga, A. M., dan Ortiz, I. 2007. Electrochemical treatment of landfill leachates using a Boron-Doped Diamond Anode. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(5), 1439–1446.
- Cañizares, P., Lobato, J., Paz, R., Rodrigo, M. A., dan Sáez, C. 2005. Electrochemical oxidation of phenolic wastes with boron-doped diamond anodes. *Water Research*, 39(12), 2687–2703.
- Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in water treatment. *Separation Purification Technology*. 38. 11-41
- Chian, E.S.K., dan DeWalle, F.B., 1976. Sanitary landfill leachates and their treatment. *J. Environ. Eng. Div.* 102, 411–431.
- Cossu, R., Polcaro, A.M., Lavagnolo, N.C., dan Palmas, S. 1998. Treatment of MSW landfill leachate by electrochemical oxidation. *Proceedings of the Sixth International Landfill Symposium: Sardinia*, 97, 463-474
- Costa, A. M., Alfaia, R. G. de S. M., dan Campos, J. C. 2019. Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, 232, 110–116.
- Deng, Y., dan Englehardt, J. D. 2007. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste Management*, 27(3), 380–388.
- Dollerer, J., dan Wilderer, P. A. 1996. Biological treatment of leachates from hazardous waste landfills using SBBR technology. *Water Quality International '96 Part 4*, 34(7), 437–444.
- Emamjomeh, M. M., dan Sivakumar, M. 2009. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation / flotation processes. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1663–1679.
- Fernandes, A., Spranger, P., Fonseca, A. D., Pacheco, M. J., Ciriaco, L., dan Lopes, A. 2014. Effect of electrochemical treatments on the biodegradability of sanitary landfill leachates. *Applied Catalysis B: Environmental*, 144 (Supplement C), 514–520.

- Frascari, D., Bronzini, F., Giordano, G., Tedioli, G., dan Nocentini, M. 2004. Long-term characterization, lagoon treatment and migration potential of landfill leachate: a case study in an active Italian landfill. *Chemosphere*, 54(3), 335–343.
- Gulsen, H., dan Turan, M. 2004. Anaerobic Treatability of sanitary landfill leachate in fluidized bed reactor. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 28. 297-305.
- Ghimire, U., Jang, M., Jung, S., Park, D., Park, S., dan Yu, H. 2019. Electrochemical Removal of Ammonium Nitrogen and COD of Domestic Wastewater using Platinum Coated Titanium as an Anode Electrode. *Energies*, 12(5), 883.
- Hadiwidodo, M., Oktavian, W. Primadani, A.R., Parasmita, B.N., dan Gunawan, I. 2012. Pengolahan Air Lindi dengan proses kombinasi biofilter anaerob-aerob dan wetland. *Jurnal Presipitasi.* (9).84-95
- Huda, R. 2017. Pengolahan Lindi dengan Proses Aerobik-Anoksik Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor untuk Menurunkan Konsentrasi Organik dan Nitrogen. *Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.*
- I. Wenten, dan I. Widiassa. 2012. Bioreaktor Membran untuk Reaksi Enzimatis Penisilin G Reaktor, 3 (1). 1-7
- Kabdaslı, I., Tünay, O., Öztürk, İ., Yılmaz, S., dan Arıkan, O. 2000. Ammonia removal from young landfill leachate by magnesium ammonium phosphate precipitation and air stripping. *Water Science and Technology*, 41(1), 237–240.
- Kargı, F., dan Pamukoglu, M. Y. 2004. Adsorbent supplemented biological treatment of pre-treated landfill leachate by fed-batch operation. *Bioresource Technology*, 94(3), 285–291.
- Kavitha, K.S., Syed Baker, Rakshith, D., Kavitha, H.U., Yashwant ha Rao, H.C., Harini B., dan Satish, S. 2013. Plants as green source towards synthesis of nanoparticles. *Int. Res.J. Biol. Sci.*,2(6): 6676.
- Khandegar, V., dan Saroha, A. K. 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949–963.

- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., dan Christensen, T.H., 2002. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 32 (4), 297–336.
- Klimiuk, E., dan Kulikowska, D. 2006. Organics removal from landfill leachate and activated sludge production in SBR reactors. *Waste Management*, 26(10), 1140–1147.
- Kongjao, S., Damronglerd, S., dan Hunsom, M. 2008. Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants in tannery wastewater using electrocoagulation technique. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 703–709.
- Kurniawan, T. A., Lo, W., dan Chan, G. Y. 2006. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1), 80–100.
- Lindu, M., Iswanto, B., dan Senduk, N. 2017. Penentuan koagulan untuk mengolah air lindi bantar gebang menggunakan koagulan poly aluminium chloride, tawas dan polydiallyl dimethyl ammonium chloride. *Jurnal Sains Materi Indonesia*; Vol 17, No 1: Oktober 2015.
- Mahmad, M. K. N., Rozainy, M. A. Z. M. R., Abustan, I., dan Baharun, N. 2016. Electrocoagulation Process by Using Aluminium and Stainless Steel Electrodes to Treat Total Chromium, Colour and Turbidity. *5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP)*, 19, 681–686.
- Mandal, P., Dubey, B. K., dan Gupta, A. K. 2017. Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: Drawbacks, challenges and future scope. *Waste Management*, 69(Supplement C), 250–273.
- Malakootian, M., Yousefi, N., dan Fatehizadeh, A. (2010). Survey efficiency of electrocoagulation on nitrate removal from aqueous solution. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8(1), 107–114.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., dan Sillanpää, M. 2010. Natural organic matter removal by coagulation during drinking

- water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159(2), 189–197.
- Meng, J., Li, J., Li, J., Antwi, P., Deng, K., Wang, C., dan Buelna, G.. 2015. Nitrogen removal from low COD/TN ratio manure-free piggery wastewater within an upflow microaerobic sludge reactor, *Bioresource Technology*
- Neczaj, E., Kacprzak, M., Lach, J., dan Okoniewska, E. 2007. Effect of sonication on combined treatment of landfill leachate and domestic sewage in SBR reactor. *Desalination*, 204(1–3), 227–233.
- Ni'am, A. C. 2013. Effectivity of Eichhornia crassipes and Typha angustifolia in Leachate Effluen Treatment from TPA Ngipik, Gresik. *Tesis Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS*.
- Pandit, S., Ghosh, S., Ghangrekar, M. M., dan Das, D. 2012. Performance of an anion exchange membrane in association with cathodic parameters in a dual chamber microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(11), 9383–9392.
- Panizza, M dan Cerisola, G. 2009. Direct and Mediated Anodic Oxidation of Organic Pollutants. *Cem and Process*.109. 6541-6569.
- Panizza, M., Kapalka, A., dan Comninellis, C. 2008. Oxidation of organic pollutants on BDD anodes using modulated current electrolysis. *Electrochimica Acta*, 53(5), 2289–2295.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah
- Quan, X., Cheng, Z., Chen, B., dan Zhu, X. 2013. Electrochemical oxidation of recalcitrant organic compounds in biologically treated municipal solid waste leachate in a flow reactor. *Journal of Environmental Sciences*, 25(10), 2023–2030.
- Rezagama, A., Hadiwidodo, M., Purwono, P., Ramadhani, N. F., dan Yustika, M. 2016. Penyisihan limbah organik air lindi TPA jatibarang menggunakan koagulasi-flokulasi kimia.

- Said, N.I. dan Hartaja, D. R. K. 2015. Leachate treatment using anaerobic-aerobic biofilter and denitrification process. *Journal of water treatment and process*. 8. 1-20
- Sano, T., Horie, H., Matsunaga, A., dan Hirono, Y., 2018. Effect of shading intensity on morphological and color traits and on chemical components of new tea (*Camelliasinensis L.*) shoots under direct covering cultivation. *J. Sci. Food Agric*. 98.5666–5676.
- Scialdone, O., Galia, A., Nero, G. L., Proietto, F., Sabatino, S., dan Schiavo, B. (2016). Electrochemical reduction of carbon dioxide to formic acid at a tin cathode in divided and undivided cells: effect of carbon dioxide pressure and other operating parameters. *Electrochimica Acta*, 199, 332–341.
- Sillanpää, M., dan Shestakova, M. 2017. Equipment for Electrochemical Water Treatment. In *Electrochemical Water Treatment Methods* (pp. 227–263).
- Snowden, J., Griffiths, H., dan Neary, D. (1994). Molecular Physiology of Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants, 11(3), 265–288
- Strasser, P., dan Ogasawara, H. 2008. Surface Electrochemistry. In *Chemical Bonding at Surfaces and Interfaces* (pp. 397-55)
- Sururi, M., Ainun, S., dan Krisna, A. 2014. Pengolahan Lindi dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon. 15(1)
- Tatsi, A. A., Zouboulis, A. I., Matis, K. A., dan Samaras, P. 2003. Coagulation–flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, 53(7), 737–744.
- Umyy, A. A. dan Dewanthy, I. W. 2012. Pengaruh resirkulasi lindi terhadap laju degradasi sampah di tpa ngipik gresik. *Thesis Departemen Teknik Lingkungan FTSP ITS*.
- Vilar, D. S., Carvalho, G. O., Pupo, M. M. S., Aguiar, M. M., Torres, N. H., Américo, J. H. P., dan Ferreira, L. F. R. 2018. Vinasse degradation using *Pleurotus sajor-caju* in a combined biological – Electrochemical oxidation treatment. *Separation and Purification Technology*, 192, 287–296.
- Vlyssides, A., Karlis, P., Loizidou, M., Zorpas, A., dan Arapoglou, D., 2001. Treatment of leachate from a domestic solid

- waste sanitary landfill by an electrolysis system. *Environ. Technol.* 22 (12), 1467–1476.
- Wang, P., Lau, I. W. C., dan Fang, H. H. P. 2001. Electrochemical Oxidation of Leachate Pretreated in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. *Environmental Technology*, 22(4), 373–381.
- Wasis Wildan, M. H., Oktawan, W., dan Hadiwidodo, M. 2017. Perencanaan Detail Engineering Design (DED) Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) pengembangan tempat pemrosesan akhir (TPA) Sukoharjo Kabupaten Pati. *Jurnal Teknik Lingkungan*; Vol 6, No 3 (2017): Jurnal Teknik Lingkungan.
- Yadav, M. K., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., dan Mukherjee, A. 2017. pH mediated facile preparation of hydrotalcite based adsorbent for enhanced arsenite and arsenate removal: Insights on physicochemical properties and adsorption mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 240–252.
- Yadu, A., Sahariah, B.P., dan Anandkumar, J. 2018. Influence of COD/Amonia ratio on Simultaneous removal of NH₄⁺-N and COD in Surface water using Moving Bed Batch Reactor. *Journal of Water Process Engineering*. 22.66-72
- Yavuz, Y., dan Shahbazi, R. 2012. Anodic oxidation of Reactive Black 5 dye using boron doped diamond anodes in a bipolar trickle tower reactor. *Separation and Purification Technology*, 85(Supplement C), 130–136.
- Ye, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, Y., Chang, S. W., dan Nguyen, D. D., Wang, J. 2018. A critical review on ammonium recovery from wastewater for sustainable wastewater management. *Bioresource Technology*, 268, 749–758.
- Youcai, Z. 2018. Physical and Chemical Treatment Processes for Leachate. In *Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste* (pp. 31–183).
- Zhao, G., Pang, Y., Liu, L., Gao, J., dan Lv, B. 2010. Highly efficient and energy-saving sectional treatment of landfill leachate with a synergistic system of biochemical treatment and electrochemical oxidation on a boron-doped diamond electrode (Vol. 179).

Zhou, B., Yu, Z., Wei, Q., Long, H., Xie, Y., dan Wang, Y. 2016. Electrochemical oxidation of biological pretreated and membrane separated landfill leachate concentrates on boron doped diamond anode. *Applied Surface Science*, 377(Supplement C), 406–415.

LAMPIRAN A PROSEDUR PERCOBAAN

A. Analisis COD dengan Metode *Closed Reflux and Titrimetric*

1. Peralatan dan Bahan

- a. Alat : *Vial* atau tabung COD, *digester*, peralatan titrasi, *glassware*
- b. Bahan : Larutan $K_2Cr_2O_7$, Larutan Ferro Amonium Sulfat (FAS), Larutan campuran asam ($AgSO_4$), dan Larutan Indikator Ferroin.

2. Prinsip Kerja

Oksidasi zat organik dengan dikromat pada kondisi asam melalui pemanasan, kemudian sisa dikromat akan di titrasi dengan larutan FAS. Dikromat yang hilang akan ekuivalen dengan zat organik yang terukur sebagai COD.

3. Pembuatan Reagen

- a. Larutan $K_2Cr_2O_7$ 0,1 N
Timbang dengan teliti 4,9036 gram $K_2Cr_2O_7$ yang sudah dikeringkan di oven. Larutkan dengan aquades hingga 1 L menggunakan labu pengencer 1 L
- b. Larutan Ferro Amonium Sulfat (FAS) 0,1 N
Timbang dengan teliti 39,2 gram $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ kemudian tambahkan dengan 8 mL H_2SO_4 pekat. Encerkan dengan aquades hingga 1 L dengan labu pengencer.
- c. Larutan Campuran Asam ($AgSO_4$)
Larutkan 10 gram Ag_2SO_4 ke dalam 1 L H_2SO_4 hingga larut sempurna (gunakan *magnetic stirrer*)
- d. Larutan Indikator Ferroin
Larutkan 1,485 gram *Orthophenantroline* dan 0,695 gram $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ke dalam 100 mL aquadest dengan menggunakan labu pengencer 100 mL

4. Prosedur analisis

- a. Disiapkan sampel yang akan dianalisis kadar CODnya
- b. Diambil 1 mL sampel kemudian diencerkan 10 kali

- c. Disiapkan 2 buah *vial* COD, masukkan sampel yang telah diencerkan sebanyak 2,5 mL dan aquades sebanyak 2,5 mL sebagai blanko
- d. Tambahkan larutan dikromat ($K_2Cr_2O_7$) sebanyak 1,5 mL
- e. Tambahkan 2,5 mL larutan campuran asam ($AgSO_4$) dengan perlahan.
- f. Alat pemanas (*digester*) disiapkan dan sampel dimasukkan kedalam digester selama 2 jam.
- g. Setelah 2 jam, tunggu *vial* hingga berada pada suhu ruangan.
- h. Tambahkan larutan indikator ferroin sebanyak 1 tetes.
- i. Sampel ditirasi dengan FAS yang telah di encerkan dengan konsentrasi 0,01N secara perlahan. (blanko terlebih dahulu)
- j. Hentikan titrasi jika warna udah berubah menjadi merah bata yang tidak hilang selama 1 menit
- k. Perhitungan dilakukan dengan rumus berikut:

$$COD \left(mg \frac{O_2}{L} \right) = \frac{(FAS \text{ blanko} - FAS \text{ sampel}) \times N \text{ FAS} \times 8000}{Volume \text{ Sampel}} \times p$$

Keterangan: p = faktor pengenceran

B. Analisis Nitrat

1. Peralatan dan bahan

- a. Alat : Neraca analitik, *glass ware*, spektrofotometer
- b. Bahan : Serbuk Brucin Sulfat, KNO_3

2. Prinsip Kerja

Senyawa nitrat yang berikatan dengan brucin akan membentuk warna. Sehingga berdasarkan hukum lambert-beer akan dapat terukur dengan spektrofotometer transmisi gelombangnya.

3. Pembuatan Reagen

- a. Brucin Sulfat 0,5%
- b. Masukkan 2,5 gram serbuk Brucin sulfat kedalam 500 mL aquades. Pastikan teraduk dengan sempurna.

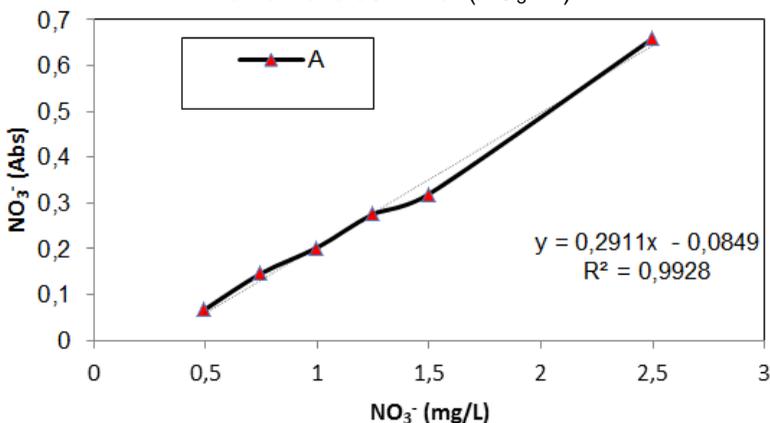
- c. Larutan standar Nitrat (100 ppm)
Larutkan KNO_3 sebanyak 721,8 mg kedalam 1 L aquades. Pastikan larut dengan sempurna.

4. Prosedur kerja analisis

- a. Mengambil sampel sebanyak 1 mL untuk dianalisis. Sampel merupakan hasil pengenceran.
- b. Menambahkan 1 mL brucin sulfat
- c. Menambahkan H_2SO_4 pekat sebanyak 2 mL kedalam reagen.
- d. Mengaduk dan mendinginkan selama 10 menit.
- e. Melakukan langkah sebelumnya pada aquadest sebagai blanko.
- f. Membaca spektrofotometer, dengan panjang gelombang optimum yang dicari dari kalibrasi yaitu 402 nm.
- g. Menghitung nilai nitrat dengan rumus dari kurva kalibrasi.

$$y = 0,2911x - 0,0849$$

Berikut ini adalah hasil pembuatan kurva kalibrasi.
Kurva Kalibrasi Nitrat ($\text{NO}_3^- \text{N}$)



NO_3^- (mg/L)	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2,5	0,5	0,75
NO_3^- Abs	0,069	0,147	0,203	0,276	0,32	0,659	0,069	0,147

C. Analisis Amonium-Nitrogen

1. Peralatan dan bahan

- a. Alat : Neraca analitik, *glass ware*, spektrofotometer
- b. Bahan: Hgl₂, KI, K.Na.tatrat, NH₄Cl

2. Prinsip Kerja

Senyawa amonium ketika diberi nessler akan membentuk warna. Sehingga akan terukur dengan spektrofotometer transmisi gelombangnya.

3. Pembuatan Reagen

a. Nessler

Campur dan haluskan 50 gram serbuk Hgl₂ dan 35 gram KI. Kemudian dilarutkan dengan 80 gram NaOH yang sudah dilarutkan dengan aquades hingga 500 mL. Biarkan mengendap dan diambil supernatannya.

b. Garam signet

Larutkan 50 gram K.Na.Tatrat ke dalam 500 mL aquades, kemudian ditambahkan 5 mL larutan nessler sebagai pengawet.

c. Larutan standart amonium (100 ppm atau 100 mg/L)

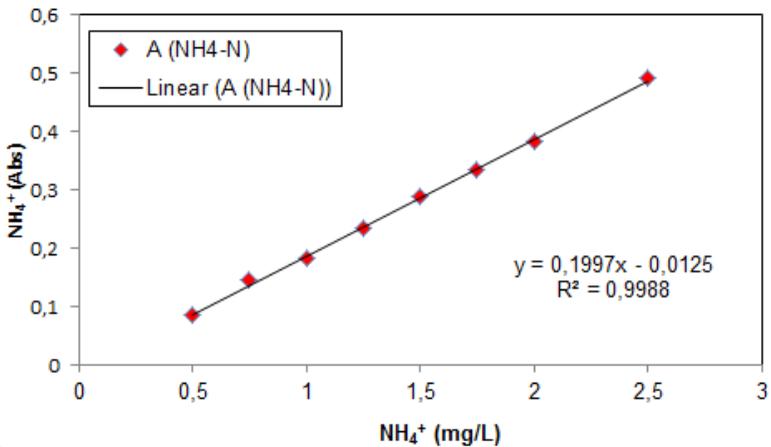
Timbang dengan teliti 382,14 mg NH₄Cl, kemudian melarutkan ke dalam *aqudest* sebanyak 1 L di dalam labu pengencer 1 L. Menambahkan 3 tetes toluen sebagai pengawet.

4. Prosedur kerja analisis

- a. Menuangkan 10 mL sampel pada erlenmeyer 100 mL
- b. Menambahkan 0,5 mL garam signet dan 0,4 mL nessler.
- c. Mengaduk dan mendinginkan selama 10 menit.
- d. Melakukan langkah sebelumnya pada *aqudest* sebagai blanko.
- e. Membaca spektrofotometer, dengan panjang gelombang optimum yang dicari dari kalibrasi yaitu 400 nm.
- f. Menghitung nilai ammonia nitrogen dengan rumus dari kurva kalibrasi.

$$y = 0,1997x - 0,01125$$

Berikut ini adalah hasil pembuatan kurva kalibrasi.



NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5
NH ₄ ⁺ Abs	0,086	0,145	0,184	0,234	0,289	0,334	0,382	0,492

D. Analisis BOD (dengan metode *DO analisis*)

1. Peralatan dan bahan

- a. Alat : Botol BOD, DO Meter, aerator
- b. Bahan: larutan Buffer Fosfat, MgSO₄, CaCl₂, FeCl₃, MnCl₂

2. Prinsip Kerja

DO pada sampel akan menunjukkan bahwa terdapat bakteri yang mampu tumbuh dan melakukan degradasi zat organik. Apabila selisih DO memiliki nilai yang besar ini menunjukkan bahwa nilai BOD meningkat.

3. Pembuatan Reagen

a. Larutan Buffer Fosfat

Campur dan larutkan kH₂PO₄ 0,85 gram, K₂HPO₄ 0,2175 gram, Na₂HPO₄.7H₂O 0,334 gram dan NH₄Cl 0,17 gram kedalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

b. Larutan MgSO₄

Larutkan 0,225 gram MgSO₄.7H₂O ke dalam 100 mL aquades

c. Larutan CaCl₂

Larutkan 0,275 gram CaCl₂ ke dalam 100 mL aquades.

d. Larutan FeCl₃

Larutkan 0,025 gram FeCl₃.6H₂O ke dalam 100 mL aquades.

e. Larutan MnCl₂ 20% (m/v)

Larutkan 20 gram MnCl₂ ke dalam 100 mL aquades

4. Prosedur kerja analisis

- a. Membuat larutan pengencer sesuai kebutuhan analisis, dimana untuk 1 sampel membutuhkan 500 mL. Larutan pengencer terdiri dari campuran buffer fosfat, MgSO₄, CaCl₂, FeCl₃, MnCl₂ yang masing-masing kebutuhannya adalah 1 mL untuk 1 L larutan pengencer. Dimasukkan kedalam air aquades (dapat digunakan air keran).
- b. Menambahkan suspensi biologis kedalam larutan pengencer sebanyak 1 spatula. Kemudian diaerotor selama 24 jam, lalu dapat digunakan.
- c. Mengambil sampel sesuai dengan perhitungan berikut:

$$\text{Sampel BOD (mL)} = \frac{500}{\frac{\text{COD } \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{5}}$$

- d. Kemudian mengencerkan hingga 500 mL dengan larutan pengencer, kemudian masukkan kedalam botol BOD
- e. Mengukur DO sampel dengan DO Meter. Untuk blanko dilakukan hal yang sama tanpa pengambilan sampel. Pengukuran ini sebagai DO₀
- f. Menyimpan botol sampel dan blanko di dalam lemari BOD selama 5 hari (+20°C)
- g. Melakukan pengukuran yang sama pada hari ke-5 seperti DO₀ sebagai DO₅.
- h. Menghitung BOD dengan rumus berikut:

$$\text{BOD } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{(\text{DO}_0 \text{ sampel} - \text{DO}_5 \text{ sampel}) - (\text{DO}_0 \text{ blanko} - \text{DO}_5 \text{ blanko})}{\frac{\text{volume sampel}}{\text{volume pengencer (500 mL)}}}$$

E. Analisis pH

1. Peralatan dan bahan

- a. Alat : pH meter, Glassware

- b. Bahan : Sampel dan aquades

2. Prinsip Kerja

Potensiometri merupakan cara analisis pH berdasarkan pengukuran pada beda potensial.

3. Prosedur kerja analisis

- a. Menyiapkan sampel sebanyak 10 mL.
- b. Membilas batang silinder pH meter dengan larutan *aquadest* dan mengeringkannya menggunakan *tissue*.
- c. Menyalakan pH meter lalu mencelupkan pH meter ke dalam sampel.
- d. Menunggu angka pembacaan pH hingga stabil dan muncul tulisan *ready*, kemudian mencatat pH yang muncul pada layar pH meter

F. Analisis TDS

1. Alat dan Bahan

- a. Alat : *Beaker glass* 100 mL dan pH ion lab
- b. Bahan: Sampel dan aquades

2. Prinsip Kerja

Potensiometri merupakan cara analisis TDS berdasarkan pengukuran beda potensial.

3. Prosedur Analisis

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

G. Analisis TKN

1. Peralatan dan bahan

- c. Alat : Neraca analitik, *glass ware*, spektrofotometer
- d. Bahan: CuSO_4 , H_2SO_4 , Nessler, Garam signet

2. Pembuatan Reagen

a. Nessler

Campur dan haluskan 50 gram serbuk HgI_2 dan 35 gram KI . Kemudian dilarutkan dengan 80 gram NaOH yang sudah dilarutkan dengan aquades hingga 500 mL. Biarkan mengendap dan diambil supernatnya.

b. Garam signet

Larutkan 50 gram K.Na.Tatrat ke dalam 500 mL aquades, kemudian ditambahkan 5 mL larutan nessler sebagai pengawet.

c. CuSO_4

Larutkan 134 g K_2SO_4 dan 7,3 g CuSO_4 kedalam 800 mL aquadest. Setelah larutan berada pada suhu kamar, tambahkan 134 mL H_2SO_4 pekat. Campur perlahan hingga terlarut. Tambahkan aquades hingga 1 L

3. Prosedur kerja analisis

- a. Siapkan sampel sebanyak 10 mL, masukkan ke dalam vials digester TKN. Tambahkan larutan CuSO_4 sebanyak 10 mL, kemudian encerkan hingga mencapai 100 mL
- b. Hidupkan digester, kemudian tempatkan vials pada rak dan panaskan hingga volume berkurang (3-4 jam).
- c. Angkat dan dinginkan, kemudian disiapkan sampel seperti analisis amonium.
- d. Menuangkan 10 mL sampel pada erlenmeyer 100 mL
- e. Menambahkan 0,5 mL garam signet dan 0,4 mL nessler. Mengaduk dan mendinginkan selama 10 menit.
- f. Melakukan langkah sebelumnya pada aquadest sebagai blanko.
- g. Membaca spektrofotometer, dengan panjang gelombang optimum yang dicari dari kalibrasi yaitu 400 nm. Dengan rumus kalibrasi berikut: $y = 0,1997x - 0,01125$

LAMPIRAN B DATA HASIL ANALISIS

Tabel LB.1 Penyisihan Massa COD, perubahan TDS, dan Voltase pada penelitian pendahuluan dengan anoda Aluminium (Al)

Waktu (jam)	COD (mg.L ⁻¹)	COD (g)	[COD/COD ₀]	TDS (mg.L ⁻¹)	Voltase (V)
0	1344	6,653	1,000	2930	10,9
1	1232	5,834	0,877	2320	15,2
2	1104	4,985	0,749	2670	18,2
3	944	4,054	0,609	2420	21,6
4	800	3,258	0,490	1989	24,4
5	640	2,464	0,370	1723	27,3
6	576	2,176	0,327	1432	31,5
7	560	2,084	0,313	1355	31,5

Tabel LB.2 Penyisihan Massa COD, perubahan TDS, dan Voltase pada penelitian pendahuluan dengan anoda Platina (Pt)

Waktu (jam)	COD (mg.L ⁻¹)	COD (g)	[COD/COD ₀]	TDS (mg.L ⁻¹)	Voltase (V)
0	1373,684	274,737	1,000	2250,000	13,300
1	1310,526	264,753	0,964	1980,000	15,900
2	1247,368	254,565	0,927	1812,000	20,100
3	1201,579	247,748	0,902	1678,000	22,600
4	1181,579	246,162	0,896	1524,000	24,500
5	1143,158	240,665	0,876	1396,000	26,200
6	1117,368	237,738	0,865	1257,000	28,600
7	1108,000	238,280	0,867	1208,000	29,300

Tabel LB.3 Perubahan nilai TDS Lindi pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda aluminium

waktu (jam)	TDS Lindi (mg.L ⁻¹)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	3260	2920	2850	3220	2878	3210
1	3080	2750	2630	3130	2670	2880
2	2910	2560	2500	2940	2510	2700
3	2670	2370	2400	2770	2350	2490
4	2400	2240	2230	2370	2280	2280
5	2170	2130	2140	2180	2120	2090
6	1912	1908	1987	2060	1911	1846

waktu (jam)	TDS Lindi (gram)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	16,137	14,454	14,108	15,939	14,246	15,890
1	14,922	13,327	12,752	15,296	12,982	13,991
2	13,795	12,128	11,863	14,181	11,967	12,863
3	12,362	10,970	11,137	13,185	10,979	11,621
4	10,849	10,128	10,112	11,061	10,434	10,419
5	9,571	9,399	9,473	10,029	9,500	9,446
6	8,222	8,207	8,585	9,373	8,383	8,073

Tabel LB.4 Perubahan nilai TDS buffer pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda aluminium

waktu (jam)	TDS Buffer (mg.L ⁻¹)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	1321	1302	1661	1413	1542	1320
1	1626	1611	1929	1585	1817	1570
2	1813	1915	2120	1719	2054	1780
3	2190	2010	2250	1842	2120	1902
4	2430	2170	2440	2020	2334	2050
5	2520	2360	2570	2100	2454	2120
6	2720	2690	2970	2220	2853	2350
waktu (jam)	TDS Buffer (gram)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	6,539	6,445	8,222	6,994	7,633	6,534
1	7,878	7,807	9,353	7,745	8,834	7,627
2	8,595	9,072	10,060	8,292	9,793	8,480
3	10,140	9,303	10,441	8,767	9,904	8,877
4	10,984	9,812	11,064	9,428	10,681	9,368
5	11,115	10,414	11,377	9,661	10,996	9,582
6	11,696	11,571	12,832	10,101	12,515	10,278

Tabel LB.5 Penurunan massa COD pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda aluminium

waktu (jam)	[COD/COD ₀]					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	0,604	0,852	0,932	0,678	0,950	0,794
2	0,306	0,518	0,842	0,411	0,921	0,734
3	0,249	0,440	0,743	0,359	0,716	0,687
4	0,233	0,344	0,497	0,329	0,579	0,608
5	0,209	0,294	0,409	0,291	0,497	0,475
6	0,194	0,245	0,287	0,277	0,458	0,439
waktu (jam)	COD (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	7,354	6,650	6,415	6,493	7,119	6,767
1	4,441	5,668	5,978	4,402	6,762	5,374
2	2,248	3,444	5,400	2,668	6,556	4,970
3	1,829	2,926	4,767	2,332	5,095	4,647
4	1,715	2,287	3,189	2,139	4,123	4,117
5	1,534	1,953	2,624	1,890	2,974	3,215
6	1,427	1,632	1,844	1,798	2,671	2,972

Tabel LB.6 Perubahan rasio BOD₅/COD pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda aluminium

waktu (jam)	BOD ₅ /COD					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,100	0,144	0,120	0,140	0,120	0,120
1	0,080	0,160	0,120	0,180	0,120	0,160
2	0,200	0,180	0,140	0,320	0,120	0,160
3	0,220	0,200	0,120	0,260	0,140	0,160
4	0,240	0,220	0,180	0,320	0,160	0,180
5	0,260	0,160	0,220	0,260	0,200	0,200
6	0,200	0,220	0,220	0,260	0,140	0,200

waktu (jam)	BOD (mg.L ⁻¹)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	148,565	193,451	155,519	183,652	172,588	164,054
1	73,334	187,129	147,933	162,157	166,899	177,014
2	94,829	130,864	159,312	177,014	165,002	166,899
3	86,926	126,438	123,277	127,387	152,674	159,312
4	91,036	111,266	126,596	146,669	144,140	162,157
5	90,403	70,806	130,390	106,840	158,048	142,243
6	66,380	68,277	93,881	102,731	103,996	135,921

Tabel LB.7 Perubahan massa NH₄⁺, NO₃⁻, Org-N pada lindi dengan anoda aluminium

waktu (jam)	NH ₄ ⁺ (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	1,005	1,077	1,231	1,062	0,874	1,159
3	0,663	0,693	0,957	0,775	0,644	0,895
6	0,416	0,472	0,697	0,604	0,433	0,607
waktu (jam)	NO ₃ ⁻ (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,035	0,037	0,029	0,047	0,033	0,039
3	0,009	0,029	0,024	0,017	0,029	0,027
6	0,008	0,011	0,018	0,012	0,022	0,022
waktu (jam)	Org-N (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,124	0,144	0,097	0,097	0,099	0,114
3	0,052	0,077	0,029	0,044	0,041	0,036
6	0,035	0,072	0,044	0,019	0,012	0,005

Tabel LB.8 Perubahan massa NH_4^+ , NO_3^- , pada buffer dengan anoda aluminium

waktu (jam)	NH_4^+ (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,0098	0,0070	0,0105	0,0138	0,0167	0,0056
1	0,0916	0,0300	0,0985	0,0542	0,0329	0,0733
2	0,1228	0,0555	0,1857	0,0851	0,0546	0,1254
3	0,1332	0,0599	0,2304	0,1074	0,0728	0,1637
4	0,1414	0,0726	0,2487	0,1200	0,0881	0,1967
5	0,1412	0,0804	0,2557	0,1273	0,0981	0,2199
6	0,1392	0,0924	0,2545	0,1304	0,1102	0,2344
waktu (jam)	NO_3^- (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,0059	0,0046	0,0033	0,0047	0,0022	0,0041
1	0,0087	0,0072	0,0077	0,0092	0,0076	0,0165
2	0,0090	0,0089	0,0091	0,0109	0,0081	0,0175
3	0,0093	0,0098	0,0082	0,0126	0,0085	0,0165
4	0,0104	0,0102	0,0097	0,0126	0,0088	0,0177
5	0,0106	0,0111	0,0093	0,0144	0,0089	0,0186
6	0,0112	0,0121	0,0093	0,0146	0,0089	0,0174

Tabel LB.9 Perubahan nilai TDS Lindi pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda platina

waktu (jam)	TDS Lindi (mg.L^{-1})					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	3230	2780	2250	3090	3310	2850
1	2970	2480	1980	2960	3270	2670
2	2780	2330	1812	2770	3130	2550
3	2600	2160	1678	2680	3120	2400
4	2420	2000	1524	2590	2990	2240
5	2240	1825	1396	2450	2910	2090
6	2070	1755	1257	2340	2790	1970

waktu (jam)	TDS Lindi (gram)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,646	0,556	0,450	0,618	0,662	0,570
1	0,600	0,501	0,400	0,598	0,661	0,539
2	0,567	0,476	0,370	0,565	0,639	0,520
3	0,536	0,445	0,346	0,553	0,643	0,495
4	0,504	0,417	0,318	0,540	0,623	0,467
5	0,472	0,384	0,294	0,516	0,613	0,440
6	0,440	0,373	0,267	0,498	0,594	0,419

Tabel LB.10 Perubahan nilai TDS buffer pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda platina

waktu (jam)	TDS Buffer (mg.L ⁻¹)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	1417	1275	1010	1379	0	1433
1	1622	1552	1210	1614	0	1622
2	1797	1716	1450	1714	0	1839
3	1998	1923	1660	1901	0	1981
4	2160	2090	1857	2010	0	2090
5	2330	2250	2440	2180	0	2170
6	2530	2430	2510	2270	0	2340
waktu (jam)	TDS Buffer (gram)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,283	0,255	0,202	0,276	0	0,286
1	0,328	0,313	0,244	0,326	0	0,327
2	0,367	0,350	0,296	0,350	0	0,375
3	0,412	0,396	0,342	0,392	0	0,408
4	0,450	0,435	0,387	0,418	0	0,435
5	0,491	0,474	0,513	0,459	0	0,456
6	0,538	0,517	0,534	0,483	0	0,497

Tabel LB.11 Penurunan massa COD pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda platina

waktu (jam)	[COD/COD ₀]					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	0,971	0,969	0,953	0,778	0,975	0,898
2	0,795	0,946	0,931	0,793	0,950	0,883
3	0,769	0,918	0,898	0,809	0,866	0,852
4	0,708	0,865	0,865	0,732	0,825	0,832
5	0,710	0,857	0,797	0,776	0,817	0,818
6	0,676	0,761	0,777	0,712	0,787	0,799
waktu (jam)	COD (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	8,2928	6,6968	6,2587	6,5716	6,2526	6,7281
1	8,0558	6,4904	5,9650	5,1123	6,0988	6,0418
2	6,5963	6,3322	5,8284	5,2146	5,9425	5,9419
3	6,3791	6,1507	5,6200	5,3148	5,4145	5,7300
4	5,8680	5,7934	5,4129	4,8117	5,1615	5,5965
5	5,8883	5,7398	4,9878	5,0986	5,1109	5,5039
6	5,6094	5,0933	4,8643	4,6813	4,9179	5,3753

Tabel LB.12 Rasio BOD pada variasi pH dan kuat arus dengan anoda platina

waktu (jam)	BOD ₅ /COD					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,080	0,120	0,120	0,080	0,120	0,120
1	0,120	0,140	0,120	0,100	0,180	0,100
2	0,080	0,140	0,160	0,120	0,120	0,100
3	0,100	0,160	0,280	0,100	0,180	0,120
4	0,100	0,180	0,260	0,140	0,160	0,140
5	0,120	0,180	0,320	0,200	0,180	0,140
6	0,140	0,200	0,320	0,300	0,200	0,160

waktu (jam)	BOD (mg.L ⁻¹)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	134,025	162,347	151,726	106,208	151,579	163,106
1	197,244	185,422	146,036	104,312	223,946	123,277
2	108,737	182,767	192,186	128,967	146,941	122,487
3	132,760	204,830	327,475	110,634	202,875	143,191
4	123,277	219,055	295,866	141,611	173,714	164,844
5	149,830	219,055	338,855	216,526	195,570	163,738
6	168,163	218,106	333,797	301,081	211,341	184,600

Tabel LB.13 Perubahan massa NH₄⁺, NO₃⁻, Org-N pada lindi dengan anoda platina

waktu (jam)	NH ₄ ⁺ (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	1,159	0,601	1,086	0,844	0,596	1,265
3	0,871	0,535	0,887	0,626	0,512	1,040
6	0,706	0,466	0,725	0,538	0,463	0,953
waktu (jam)	NO ₃ ⁻ (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,037	0,034	0,034	0,056	0,006	0,029
3	0,022	0,028	0,037	0,045	0,037	0,025
6	0,020	0,026	0,039	0,044	0,023	0,022
waktu (jam)	Org-N(g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,223	0,099	0,206	0,188	0,079	0,196
3	0,146	0,025	0,164	0,133	0,047	0,151
6	0,113	0,031	0,126	0,087	0,032	0,110

Tabel LB.14 Perubahan massa NH_4^+ , NO_3^- pada buffer dengan anoda platina

waktu (jam)	NH_4^+ (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,0061	0,0059	0,0155	0,0066	0,0065	0,0081
1	0,0949	0,0071	0,1739	0,0563	0,0071	0,0608
2	0,1260	0,0101	0,2057	0,0910	0,0111	0,0890
3	0,1339	0,0153	0,1989	0,1098	0,0163	0,1050
4	0,1360	0,0187	0,2128	0,1207	0,0187	0,1179
5	0,1354	0,0233	0,2237	0,1258	0,0195	0,1225
6	0,1346	0,0281	0,2287	0,1272	0,0209	0,1251
waktu (jam)	NO_3^- (g)					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	0,0030	0,0038	0,0034	0,0039	0,0036	0,0031
1	0,0086	0,0124	0,0083	0,0141	0,0105	0,0058
2	0,0096	0,0126	0,0085	0,0136	0,0110	0,0051
3	0,0093	0,0128	0,0085	0,0143	0,0112	0,0058
4	0,0113	0,0134	0,0083	0,0145	0,0120	0,0062
5	0,0095	0,0136	0,0086	0,0149	0,0124	0,0062
6	0,0111	0,0138	0,0091	0,0169	0,0125	0,0078

Tabel LB.15 Perubahan rasio C/N untuk anoda aluminium dan platina

waktu (jam)	Rasio C:N anoda aluminium					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	7,317	6,174	5,213	6,114	8,148	5,840
3	2,758	4,221	4,980	3,010	7,916	5,192
6	3,430	3,456	2,646	2,976	4,321	4,897
waktu (jam)	Rasio C:N anoda platina					
	pH 4 700 mA	pH 6 700 mA	pH 8 700 mA	pH 4 500 mA	pH 6 500 mA	pH 8 500 mA
0	7,156	11,141	5,762	7,786	10,484	5,317
3	7,324	11,506	6,338	8,493	10,567	5,510
6	7,940	10,931	6,709	8,707	10,626	5,640

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

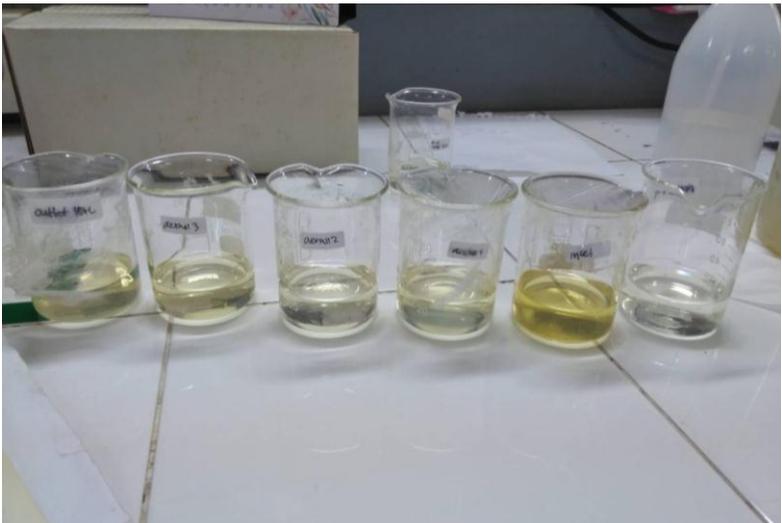
LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN



a. Analisis Total Solid



b. Analisis COD



c. Analisis Nitrat



d. Analisis BOD



e. Analisis PH



f. Analisis Amonium



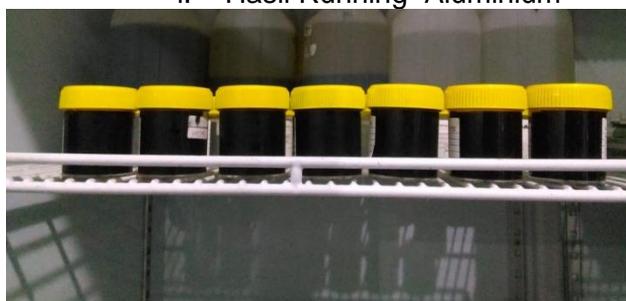
g. Running Alat



h. Menimbang anoda



i. Hasil Running Aluminium



j. Hasil Running Platina

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Fahrudin Sidik lahir di Lampung Utara pada tanggal 24 Desember 1996. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 01 Bandar Lampung (2003-2004), SDN 067 Tambusai (2005-2009), SMPN 03 Rumbio Jaya (2009-2012), SMAN Plus Riau (2012-2015). Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 03211540000036.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif sebagai anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) sebagai kepala bidang Pengembangan Tingkat Lanjut divisi PSDM pada tahun 2017-2018. Mengikuti kegiatan ITS EXPO 2016-2017. Dalam bidang keilmiahan penulis pernah mengikuti PIMNAS ke-31 di Yogyakarta. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Kimia Lingkungan I pada tahun 2017. Pada Tahun 2018, penulis mengikuti kerja praktik mengenai "Studi penanggulangan emisi SO_x , NO_x , CO_2 , dan Particulate Matter" di PT. Semen Indonesia pabrik tuban. Apabila ingin mengetahui lebih dalam mengenai penelitian ini, dapat menghubungi penulis via e-mail rudiplus15@gmail.com