



TUGAS AKHIR - RE 184804

**OKSIDASI ELEKTROKIMIA DENGAN MENGGUNAKAN
ANODA BDD, Ti/IrO₂, DAN Ti/Pt PADA LINDI TEROLAH
SECARA BIOLOGIS**

ARUM SOFIANA HIDAYATI
0321154000012

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

**OKSIDASI ELEKTROKIMIA DENGAN MENGGUNAKAN
ANODA BDD, Ti/IrO₂, DAN Ti/Pt PADA LINDI TEROLAH
SECARA BIOLOGIS**

ARUM SOFIANA HIDAYATI
0321154000012

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 OXIDATION OF BIOTREATED
LANDFILL LEACHATE USING BDD, Ti/IrO₂, AND Ti/Pt
ANODES**

ARUM SOFIANA HIDAYATI
NRP. 0321154000012

ADVISOR
ARSETO YEKTI BAGASTYO, S.T., M.T., M.Phill., Ph.D

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

LEMBAR PENGESAHAN

OKSIDASI ELEKTROKIMIA DENGAN MENGGUNAKAN ANODA BDD, Ti/IrO₂, DAN Ti/Pt PADA LINDI TEROLAH SECARA BIOLOGIS

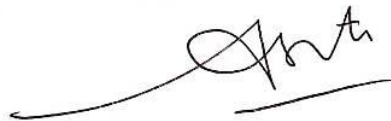
TUGAS AKHIR

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:

ARUM SOFIANA HIDAYATI
NRP. 0321154000012

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



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



OKSIDASI ELEKTROKIMIA DENGAN MENGGUNAKAN ANODA BDD, Ti/IrO₂, DAN Ti/Pt PADA LINDI TEROLAH SECARA BIOLOGIS

Nama Mahasiswa : Arum Sofiana Hidayati
NRP : 0321154000012
Departemen : Teknik Lingkungan ITS
Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo S.T., M.T.,
M.Phill., Ph.D

ABSTRAK

Komposisi lindi yang beragam seperti zat organik-inorganik yang beberapa diantaranya merupakan senyawa refraktori dan beracun, akan menimbulkan masalah bagi lingkungan. Oleh karena itu, penting untuk dilakukan pengolahan agar efluen yang dihasilkan mampu memenuhi baku mutu lindi. Alternatif pengolahan lindi yang terintegrasi meliputi proses biologis-fisik-kimia salah satunya yaitu, *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dikombinasikan dengan oksidasi elektrokimia. Pengolahan awal secara biologis bertujuan untuk menurunkan beban organik sehingga dapat mengurangi konsumsi energi pada pengolahan selanjutnya. Metode berbasis fisik-kimia berupa oksidasi elektrokimia merupakan alternatif yang tepat karena mampu mendegradasi polutan *non-biodegradable*, menghilangkan warna lindi, dan memiliki efisiensi penyisihan yang tinggi dalam waktu singkat.

Proses oksidasi elektrokimia tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya jenis anoda, kerapatan arus, debit, dan pH. Tujuan penelitian ini adalah menentukan kuat arus optimum pada pengolahan elektrokimia menggunakan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt untuk penyisihan polutan organik beserta amonium pada lindi yang telah terolah dengan MBBR. Kemudian, dihitung konsumsi energi untuk mengetahui efisiensi pengolahan.

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan reaktor elektrokimia yang terbuat dari akrilik berukuran 4 x 10 x 2 cm (80 mL). Anoda yang digunakan yaitu *Boron-Doped Diamond* (BDD), Titanium/Iridium-Oksida (Ti/IrO₂),

dan Titanium/Platina (Ti/Pt) dengan ukuran masing-masing 6 cm², sedangkan untuk katodanya adalah *stainless steel* dengan ukuran 4 x 1,5 cm. Jenis konfigurasi reaktor adalah *undivided cell* dengan sistem aliran *batch recirculation* yang dijalankan selama 10 jam pada debit 5 mL s⁻¹ untuk mengolah 2 L lindi. Pada penelitian utama dilakukan variasi kuat arus pada tiap jenis anoda. Parameter yang dianalisis meliputi pH, COD, BOD, TDS, klorida, klorin, nitrit, nitrat, amonium, dan TKN. Hasil menunjukkan bahwa kerapatan arus optimum pada anoda Ti/Pt adalah 400 mA dengan penyisihan COD sebesar 78% dan konsumsi energi 56,7 Wh g⁻¹. Sementara, untuk anoda Ti/IrO₂ dan BDD kuat arus 350 mA merupakan arus optimum dengan penyisihan COD masing-masing sebesar 76% (58,9 Wh g⁻¹) dan 85% (36,9 Wh g⁻¹).

Kata Kunci: *Boron-Doped Diamond (BDD)*, *Kuat Arus*, *Lindi*, *Oksidasi Elektrokimia*, *Titanium/Iridium-Oxides (Ti/IrO₂)*, *Titanium/Platinum (Ti/Pt)*

ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF BIOTREATED LANDFILL LEACHATE USING BDD, Ti/IrO₂, AND Ti/Pt ANODES

Name : Arum Sofiana Hidayati
Register Number : 03211540000012
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo S.T., M.T.,
M.Phill., Ph.D

ABSTRACT

Refractory and toxic compounds contained in the landfill leachate lead to environmental problems. Thus, it is essential to apply effective treatment and capable of deal with the effluent quality standard. Application of biological processes integrated with electrochemical oxidation (EO) is one of alternatives. Biological process is applied as pretreatment, decreasing the organic load and consequently lowering the energy consumption on EO that acted as post-treatment technology. The physica-chemical based method of electrochemical oxidation is the best alternative that can degrade non-biodegradable pollutant, eliminate color, and has a high removal efficiency within a short duration of process.

The electrochemical oxidation process is influenced by several factors, including the type of anode, current density, flowrate, and pH. The aims of this study was to determine the optimum current density in EO process using several anodes i.e BDD, Ti/IrO₂, and Ti/Pt to remove organic pollutants and amonium that has been treated with MBBR. Then, energy consumption is calculated to determine processing efficiency.

This research was conducted on a laboratory-scale using undivided electrochemical reactor made of acrylic with effective volume 80 mL (4 × 2 × 10 cm). The anodes used are BDD, Ti/IrO₂, and Ti/Pt while the cathode is stainless steel with each surface area 6 cm². A 2 L landfill leachate was treated in the electrochemical reactor operated in batch recirculation at 5 mL s⁻¹ for 10 hours, applying different current (350, 400 and 450 mA). The

parameters analyzed were including pH, COD, BOD, TDS, chloride, chlorine, nitrite, nitrate, ammonium, and TKN. The results showed that the optimum current on the Ti/Pt anode was 400 mA to reduce 78% COD need 56.7 Wh g⁻¹ of an energy consumption. While for anodes Ti/IrO₂ and BDD have 58.3 350 mA as the optimum current with COD removal of 76% (58.9 Wh g⁻¹) and 85% (36.9 Wh g⁻¹), respectively.

Keywords: Boron-Doped Diamond (BDD), Current, Leachate, Electrochemical Oxidation, Titanium/Iridium-Oxides (Ti/IrO₂), Titanium/Platinum (Ti/Pt)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt pada Lindi Terolah secara Biologis”. Atas arahan, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan pada pengerjaan laporan tugas akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, S.T., MT., M.Phill., Ph.D. selaku dosen pembimbing, terima kasih atas arahan, bimbingan, ilmu, kesabaran dan motivasi yang telah diberikan selama ini.
2. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningum, M.App.Sc., Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, S.T., dan Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, S.T., MEPM. selaku dosen pengarah, terimakasih atas arahan, kritik dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Hadi Sutrisno, Bapak Ashari, Ibu lin, dan Ibu Merry selaku laboran yang senantiasa membantu selama di laboratorium.
4. Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Gresik atas izin dan bantuan selama pengambilan sampel lindi di TPA Ngipik.
5. Orang tua, saudara dan keluarga besar penulis atas segala dukungan do'a dan materi yang telah diberikan hingga kini.
6. Teman-teman dengan tugas akhir topik penelitian atas bantuan dan kerja sama selama bekerja di laboratorium dan *workshop*.
7. Teman-teman angkatan 2014, 2015, 2016, 2017 Teknik Lingkungan ITS atas dukungan dan motivasi yang telah diberikan selama ini.

Penulis menyadari ada banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun sehingga penulis dapat menjadi lebih baik. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Gambaran Umum Lindi	7
2.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia	8
2.3 Karakteristik Lindi Terolah Secara Biologis	9
2.3.1 Activated Sludge	9
2.3.2 Membrane Bio Reactor (MBR)	10
2.3.3 Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)	11
2.3 Post-treatment Lindi dengan Elektrokimia	12
2.4 Mekanisme Degradasi Polutan Pada Proses Elektooksidasi	14
2.4.1 Oksidasi Langsung	14
2.4.2 Oksidasi Tidak Langsung	15
2.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Oksidasi Elektrokimia	16
2.5.1 Material Elektroda	17

2.5.2	Kerapatan Arus	18
2.5.3	Konfigurasi Reaktor	20
2.5.4	Nilai pH	21
2.5.5	Debit.....	21
2.5	Perhitungan Efisiensi Proses.....	22
2.5.1	Hukum Farady	22
2.5.2	Hukum Coulomb	22
2.5.3	Konsumsi Energi Spesifik	22
2.5	Penelitian Terdahulu	23
BAB 3 METODE PENELITIAN		27
3.1	Kerangka Penelitian.....	27
3.2	Ide Penelitian	29
3.3	Studi Literatur	30
3.4	Penentuan Variabel dan Parameter	31
3.5	Persiapan Penelitian	33
3.6	Penelitian Pendahuluan.....	37
3.7	Penelitian Utama	38
3.8	Analisis Data.....	38
3.9	Kesimpulan dan Saran	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Penelitian Pendahuluan.....	41
4.1.1	Karakteristik Awal Lindi.....	41
4.1.2	<i>Seeding</i> dan Aklimatisasi.....	42
4.1.3	Pengolahan Pendahuluan Secara Biologis	43
4.1.4	Penentuan Kuat Arus dan Waktu Operasi.....	46
4.2	Penelitian Utama	48
4.2.1	Pengaruh Kuat Arus Terhadap Penyisihan COD	48

4.2.2	Pengaruh Kuat Arus Terhadap Penyisihan BOD	53
4.2.3	Pengaruh Kuat Arus Terhadap Penyisihan Total Nitrogen	57
4.2.4	Baku Mutu	61
4.2.5	Konsumsi Energi Spesifik	69
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA		75
LAMPIRAN 1 PROSEDUR ANALISIS		84
LAMPIRAN 2 DATA HASIL ANALISIS		95
LAMPIRAN 3 DOKUMENTASI PENELITIAN		102

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kandungan Polutan pada Lindi.....	7
Tabel 2.2 Karakteristik Lindi Berdasarkan Umur TPA.....	8
Tabel 2.3 Karakteristik Lindi TPA Ngipik.....	8
Tabel 2.4 Baku Mutu Lindi Di Indonesia	9
Tabel 2.5 Karakteristik Lindi yang Diolah dengan <i>Activated Sludge</i>	10
Tabel 2.6 Karakteristik Lindi yang Diolah dengan <i>Membrane Bio Reactor</i>	11
Tabel 2.7 Karakteristik Lindi yang Diolah dengan <i>Moving Bed Biofilm Reactor</i>	12
Tabel 2.8 Kekuatan Oksidasi Beberapa Jenis Anoda pada Aplikasi Elektrokimia	18
Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu.....	24
Tabel 3.1 Metode Analisis pada Setiap Parameter	31
Tabel 3.3 Kebutuhan, Titik, dan Waktu Pengambilan Sampel	32
Tabel 3. 4 Matriks Variasi Bahan Uji Penelitian	38
Tabel 4.1 Karakteristik Lindi TPA Ngipik.....	41
Tabel 4.2 Karakteristik Lumpur Pasca Pembenihan-Aklimatisasi	43
Tabel 4.3 Karakteristik Lindi Efluen Pengolahan Biologis .45	
Tabel 4.4 Penentuan Kuat Arus Berdasarkan <i>Voltase</i>	46
Tabel 4.6 Perubahan Nilai BOD ₅ /COD pada Anoda Ti/Pt .64	
Tabel 4.7 Perubahan Nilai BOD ₅ /COD pada Anoda Ti/IrO ₂	65
Tabel 4.8 Perubahan Nilai BOD ₅ /COD pada Anoda BDD .66	

Tabel 4.15 Konsumsi Energi Spesifik Penyisihan COD....	69
Tabel 4.16 Konsumsi Energi Spesifik Penyisihan Amonium	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme Oksidasi Langsung dan Tidak Langsung	14
Gambar 2.1 Skema (a) Undivided Cell dan (b) Membrane-Devide Cell.....	20
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian	29
Gambar 3.2 Rangkaian Sistem Pengolahan Lindi	33
Gambar 3.3 Rangkaian Sistem Oksidasi Elektrokimia.....	34
Gambar 3.4 Reaktor Elektrokimia	35
Gambar 4.1 Settleability Solid Test	43
Gambar 4.2 Konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ Selama Proses Biologis MBBR.....	44
Gambar 4.3 Grafik Penurunan Konsentrasi COD Tiap Anoda pada Penelitian Pendahuluan.....	47
Gambar 4.4 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda Ti/Pt.....	50
Gambar 4.5 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda Ti/IrO ₂	51
Gambar 4.6 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda BDD.....	52
Gambar 4.7 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda Ti/Pt.....	54
Gambar 4.8 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda Ti/IrO ₂	55
Gambar 4.9 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda BDD.....	56
Gambar 4.10 Perubahan Massa Total N pada Anoda Ti/Pt untuk setiap Variasi Kuat Arus	57
Gambar 4.11 Perubahan Massa Total N pada Anoda Ti/IrO ₂ untuk setiap Variasi Kuat Arus	58
Gambar 4.12 Perubahan Massa Total N pada Anoda BDD untuk setiap Variasi Kuat Arus	59
Gambar 4.13 Penurunan Konsentrasi COD pada Anoda Ti/Pt untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	61
Gambar 4.14 Penurunan Konsentrasi COD pada Anoda Ti/IrO ₂ untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	62
Gambar 4.15 Penurunan Konsentrasi COD pada Anoda BDD untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	63

Gambar 4.16 Penurunan Konsentrasi BOD pada Anoda Ti/Pt untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	64
Gambar 4.17 Penurunan Konsentrasi BOD pada Anoda Ti/IrO ₂ untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	65
Gambar 4.18 Penurunan Konsentrasi BOD pada Anoda BDD untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	66
Gambar 4.19 Penurunan Konsentrasi Total N pada Anoda Ti/Pt untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	67
Gambar 4.20 Penurunan Konsentrasi Total N pada Anoda Ti/IrO ₂ untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	68
Gambar 4.21 Penurunan Konsentrasi Total N pada Anoda BDD untuk Setiap Variasi Kuat Arus.....	68

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengolahan lindi di Indonesia umumnya menggunakan proses biologis secara anaerobik maupun aerobik. Pada beberapa penelitian, pengolahan lindi secara biologis dilakukan dengan alternatif *Membrane Bio Reactor* (MBR) (Feki *et al.*, 2009), *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) (Imania, 2017), dan *Activated Sludge* (Kurniawan *et al.*, 2010). Pengolahan lindi dengan MBR optimum menurunkan jumlah COD, TKN, Cl⁻ dengan besar efluen masing-masing 2750 mg L⁻¹; 416 mg⁻¹; 4500 mg L⁻¹ (Feki *et al.*, 2009). Pada penelitian yang dilakukan oleh Imania (2017), pengolahan lindi dengan MBBR mampu menurunkan jumlah COD, BOD, Total-N dengan besar efluen masing-masing 1000 mg L⁻¹; 374,2 mg L⁻¹; 88,7 mg L⁻¹. Sementara, proses *Activated Sludge* sebagai pengolahan lindi menghasilkan efluen COD, BOD, NH₃-N berturut-turut yaitu 956 mg L⁻¹; 165 mg L⁻¹; 3 mg L⁻¹ (Kurniawan *et al.*, 2010).

Pengolahan biologis digunakan sebagai langkah awal untuk menurunkan polutan organik dari lindi (Renou *et al.*, 2008). Kemudian, diikuti dengan pengolahan lanjutan berupa proses fisik-kimia untuk memenuhi baku mutu efluen lindi (Ding *et al.*, 2017). Kandungan organik (COD) dan amonium pada lindi dengan konsentrasi masing-masing 3280 mg L⁻¹ dan 2020 mg L⁻¹ dapat hilang seluruhnya pada pengolahan fisik-kimia secara elektrooksidasi menggunakan anoda *Boron Doped-Diamond* (BDD) (Cabeza *et al.*, 2007). Selain itu, elektrooksidasi mampu menghilangkan warna lindi (Fernandes *et al.*, 2014). Penelitian yang dilakukan Del Moro *et al.*, (2016) membuktikan bahwa dari segi ekonomis dalam hal konsumsi energi, proses oksidasi elektrokimia lebih efisien dalam mengolah lindi hasil proses biologis dibandingkan lindi yang belum terolah sama sekali. Penggunaan *Dimensionally Stable Anodes* (DSA) untuk mengolah lindi hasil proses biologis memerlukan konsumsi energi sebesar 472,4 kWh m⁻³ pada kerapatan arus 200 mA cm⁻² dan waktu operasi 240 menit sehingga mampu menyisihkan 98% COD. Sementara, pada lindi yang belum terolah memerlukan 465,2 kWh m⁻³ namun dengan penyisihan COD sebesar 87%. Selain itu,

menurut Scialdone *et al.* (2009) pengaplikasian oksidasi elektrokimia memungkinkan terjadi tanpa penambahan bahan kimia (elektrolit pendukung) karena limbah telah mengandung garam. Anglada *et al.* (2011) dan Moraes *et al.* (2005) mencapai >50% pengurangan *Total Organic Carbon* (TOC) selama proses oksidasi anoda pada lindi tanpa penambahan garam.

Efisiensi penurunan polutan pada proses oksidasi elektrokimia dipengaruhi beberapa faktor antara lain jenis anoda, pH, kerapatan arus, volume efektif reaktor, debit operasional, dan keberadaan larutan yang bertindak sebagai oksidator. Mekanisme oksidasi dalam proses elektrooksidasi dapat berbeda tergantung dari jenis bahan dan/ atau kerapatan arus yang diterapkan (Deng *et al.*, 2007). Dalam Turro *et al.* (2012) oksidasi elektrokimia dengan luas anoda Ti/IrO₂-RuO₂ 12,5 cm² pada kondisi kerapatan arus 32 mA cm⁻², pH 3, volume reaktor 120 mL, serta jarak antar elektroda 1 cm mampu menyisihkan COD sebesar 65%. Selain itu penelitian yang dilakukan Fernandes *et al.* (2014) elektrooksidasi dengan anoda BDD dan katoda *stainless steel* pada kondisi kerapatan arus 30 mA cm⁻², pH 3, volume reaktor 200 mL, debit operasional 1-1,5 mL s⁻¹ serta jarak elektroda 2 cm mampu menyisihkan COD sebesar 56 %. Pada jenis anoda Ti/Pt dengan pH 7, kadar COD mampu diturunkan sebesar 80% yaitu dari konsentrasi awal 51500 mg L⁻¹ menjadi 10000 mg L⁻¹ (Vlyssides *et al.*, 2001).

Pada penelitian Martinez-Huitle dan Brillas (2008) bahan elektroda merupakan parameter terpenting dalam konfigurasi sel elektrokimia karena dapat mempengaruhi oksidan yang terbentuk. Oksidan tersebut adalah *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang termasuk didalamnya yaitu *OH, *O, O₃, H₂O₂. Untuk menghasilkan oksidan ROS, diperlukan potensial oksigen tinggi agar arus yang diterapkan tidak terbuang untuk reaksi samping. Evolusi oksigen sebagai reaksi samping merupakan proses oksidasi air menjadi oksigen yang dapat mengurangi efisiensi proses elektrokimia. Beberapa bahan elektroda seperti PbO₂, DSA berbasis SnO₂, dan BDD yang telah diteliti menunjukkan potensial oksigen berlebih sehingga mampu menghambat evolusi oksigen. Menurut Martinez-Huitle *et al.* (2018) elektroda BDD memiliki dampak signifikan pada elektrosintesis oksidan, memiliki efisiensi arus tinggi dan tahan terhadap korosi. Namun dengan adanya

klorida, penggunaan elektroda BDD perlu mempertimbangkan intensitas arus agar pembentukan produk samping beracun seperti klorat, perklorat, atau senyawa organik terhalogenasi dapat dihindari. Sementara anoda dengan potensial oksigen tinggi yang paling efisien untuk mengolah limbah mengandung klorida adalah DSA (Ti-IrO₂/RuO₂). Pengolahan lindi dengan kombinasi proses MBR dan elektrokimia menggunakan anoda Ti/Pt pada penelitian Feki *et al.* (2009) menunjukkan penyisihan COD, Total Khejdal Nitrogen (TKN), dan warna berturut turut sebesar 85%, 94%, dan 99% dari konsentrasi awal 8000 mg L⁻¹ dan 1800 mg L⁻¹.

Dalam penelitian ini, proses elektrooksidasi dengan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt digunakan sebagai pengolahan lanjutan lindi yang telah terolah secara biologis dengan katoda *stainless steel*. Hal ini merupakan upaya untuk memenuhi baku mutu yang tertera pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Segala alternatif pengolahan air limbah dalam hal ini adalah lindi, dimaksudkan untuk menghasilkan keluaran dengan kualitas yang lebih baik dari sumbernya agar dampak negatif terhadap lingkungan dapat dikurangi. Pada perkembangannya, berbagai alternatif pengolahan tersebut mengarah pada efisiensi konsumsi energi dengan tetap mengoptimalkan persen penyisihan. Maka melalui penelitian ini akan dianalisis efisiensi pengolahan berdasarkan persen penyisihan dan konsumsi energi dengan pengaruh kerapatan arus pada jenis anoda BDD, Ti/IrO₂, maupun Ti/Pt. Sehingga, hasil dari penelitian ini dapat memberikan rekomendasi alternatif pengolahan lanjutan lindi yang telah terolah secara biologis dengan proses *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) maupun lindi lain dengan karakteristik yang sama.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana pengaruh arus pada jenis anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt terhadap efisiensi penyisihan polutan organik dan amonium pada lindi yang telah terolah dengan MBBR?
2. Bagaimana kebutuhan energi pada pengolahan elektrokimia menggunakan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt untuk menurunkan polutan organik yang terkandung dalam lindi yang telah terolah dengan MBBR?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menentukan arus optimum pada jenis anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt untuk penyisihan polutan organik dan amonium pada lindi yang telah terolah dengan MBBR.
2. Menentukan kebutuhan energi minimal untuk penyisihan COD hingga memenuhi baku mutu pada pengolahan elektrokimia menggunakan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini antara lain:

1. Lindi yang digunakan adalah lindi dari TPA Ngipik Gresik yang telah diolah secara biologis dengan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dalam skala laboratorium.
2. Penelitian ini menggunakan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt dengan katoda *stainless steel*.
3. Variabel dalam penelitian ini adalah jenis anoda dan kerapatan arus.
4. Parameter yang diukur adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD₅), *Total Dissolved Solid* (TDS), pH, nitrat, nitrit, TKN, amonium, klorin (Cl₂), dan klorida (Cl).
5. Reaktor penelitian dilakukan dalam skala laboratorium yang terbuat dari bahan akrilik dengan satu kompartemen menggunakan sistem *batch recirculation*.

1.5 Manfaat

Manfaat penelitian ini antara lain:

1. Sebagai informasi mengenai efektivitas proses oksidasi elektrokimia dengan menggunakan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt dengan katoda *stainless steel* dalam pengolahan lindi.
2. Sebagai informasi mengenai alternatif pengolahan lindi di TPA.
3. Memberikan informasi ilmiah mengenai pengaruh arus terhadap efektivitas anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt dalam menurunkan polutan organik dan amonium pada lindi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gambaran Umum Lindi

Lindi merupakan limbah cair yang terbentuk karena masuknya air ke dalam tumpukan sampah kemudian melarutkan unsur-unsur kimia maupun zat organik yang *biodegradabel* (Un *et al.*, 2009). Lindi dapat berasal dari rembesan air hujan, air hasil dekomposisi sampah, dan kadar air dari sampah itu sendiri (Renou *et al.*, 2008). Karakteristik lindi yang dihasilkan tergantung pada beberapa faktor, termasuk tingkat stabilisasi sampah yang ditimbun, sistem pengumpulan sampah, jenis dan komposisi sampah (Fitzke *et al.*, 2013), kelarutan konten sampah (Salem *et al.*, 2008), faktor hidrologi, pemadatan sampah, serta desain dan operasi TPA. Lindi adalah cairan terkontaminasi yang berasal dari bagian bawah fasilitas pembuangan limbah padat seperti tempat pembuangan sampah dengan komponen senyawa organik terlarut, senyawa anorganik dan padatan tersuspensi (Fatta *et al.*, 1999). Kandungan lindi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kandungan Polutan pada Lindi

Kelompok Polutan Lindi	Komponen
Senyawa organik	Asam, alkohol, aldehida dan biasa dikualifikasikan sebagai COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>), BOD (<i>Biochemical Oxygen Demand</i>), DOC (<i>Dissoved Organic Carbon</i>), dan asam lemak volatile.
Senyawa anorganik	Sulfat, klorida, amonium, kalsium, magnesium, natrium, kalium, hydrogen karbonat, besi, mangan, dan logam berat seperti timbal, nikel, tembaga, cadmium, kromium, dan zink.
Senyawa organik xenobiotika (tidak terjadi secara alami di alam)	Hidrokarbon aromatic, fenol, alifatik klorinasi, pestisida, dan plastic termasuk PCB, dioksin, dll.

Sumber: Lee *et al.*, (2010)

Dalam Tchobanoglous *et al.* (1993) pengelompokan lindi berdasarkan umur TPA dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu muda (kurang dari 2 tahun) dan tua (lebih dari 10 tahun). Tipikal konsentrasi kimia masing-masing kelompok lindi dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Karakteristik Lindi Berdasarkan Umur TPA

Parameter	Angka satuan dalam (mg/L)	
	Muda (kurang dari 2 tahun)	Tua (lebih dari 10 tahun)
pH	6	6,6 – 7,5
COD (mg O L ⁻¹)	18000	100-500
BOD ₅ (mg O L ⁻¹)	10000	100-200
TSS (mg L ⁻¹)	500	100-400
N organic (mg L ⁻¹)	200	80-120
Nitrat (mg L ⁻¹)	25	5-10
Ammonia N (mg L ⁻¹)	200	20-40

Sumber: Thobanoglous *et al.*, (1993)

TPA Ngipik telah beroperasi sejak tahun 2002 maka, lindi tergolong ke dalam jenis lindi tua karena >10 tahun (Sari, 2017). Karakteristik lindi TPA Ngipik dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Karakteristik Lindi TPA Ngipik

Parameter	Nilai ^[1]	Nilai ^[2]
COD (mg O L ⁻¹)	2040	5800
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	1400	2268
NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	535	213,21
BOD (mg O L ⁻¹)	350	124,32
TDS (mg L ⁻¹)	10,74	2370
pH	8,5	7,67

Sumber:

[1] Karakteristik lindi TPA Ngipik (Agustina, 2017)

[2] Karakteristik lindi TPA Ngipik (Sari, 2017)

2.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia

Baku mutu lindi adalah ukuran batas kadar unsur pencemar yang terkandung di dalam lindi dari kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang akan dibuang ke lingkungan. Di Indonesia buku

mutu lindi mengacu pada 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. Berikut merupakan baku mutu lindi terdapat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Baku Mutu Lindi di Indonesia

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

Sumber: PERMENLHK No.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah

2.3 Karakteristik Lindi Terolah Secara Biologis

Berikut merupakan beberapa pengolahan lindi secara biologis:

2.3.1 Activated Sludge

Activated sludge merupakan pengolahan limbah secara biologis dengan sistem biakan tersuspensi. *Activated sludge* menggunakan prinsip proses aerobik dimana senyawa organik (BOD) dioksidasi menjadi sel biomassa baru, amonium, air, karbon dioksida, dan gas lainnya (Ningtyas., 2015). Aplikasi *activated sludge* untuk pengolahan lindi memiliki beberapa keuntungan yaitu lumpur yang dihasilkan dapat digunakan sebagai pupuk, selain itu produksi lumpur dapat dikontrol dengan penambahan unit *settling tank* atau dengan resirkulasi ke bak sedimentasi (Kurniawan *et al.*, 2010). Pada penelitian yang dilakukan oleh Setiadi dan Farius (2003), proses biologis dengan *activated sludge* dapat mendegradasi lindi yang terdiri dari senyawa organik *recalcitrant*, dengan rasio BOD₅/COD sekitar 0,1-0,17. Karena itu, proses ini bisa menjadi alternatif pengolahan awal lindi untuk meminimalkan beban pengolahan secara

fisik-kimia agar mendapatkan hasil efluen maksimum yang diinginkan. Dalam proses *batch* pada kondisi tunak setelah 33 hari, nilai awal COD, BOD₅, amonia-N masing-masing adalah 2036 mg L⁻¹; 350 mg L⁻¹; 107,8 mg L⁻¹ dapat dikurangi menjadi 988 mg L⁻¹ (51,1%); 20 mg L⁻¹ (94,3%); 56,8 mg L⁻¹ (89,7%). Berikut beberapa ulasan pengolahan lindi dengan *activated sludge* pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Karakteristik Lindi yang Diolah dengan *Activated Sludge*

Lokasi	Konsentrasi awal lindi		OLR (kg m ⁻³ day)	BOD ₅ / COD	pH	Efisiensi removal (%)	
	COD (mgL ⁻¹)	NH ₃ -N (mgL ⁻¹)				COD	NH ₃ -N
Inggris	24000	790	1,2	0,5	6,0 – 7,5	98	99
Inggris	1200	370	0,06	0,2	NA	41	90
Jakarta	2036	115	0,42	0,17	NA	53	98
Hong Kong	1000	5000	NA	0,22	7,5 – 8,5	95	NA
Hong Kong	7439	5618	NA	0,22	8,5	98	NA

*NA: *Not Available*

Sumber: Setiadi dan Fairus (2003)

2.3.2 Membrane Bio Reactor (MBR)

Dalam Feki *et al.* (2009) pengolahan lindi dengan *Membrane Bio Reactor* (MBR) menunjukkan penurunan konsentrasi COD yang lebih besar daripada sistem konvensional untuk influen/ *feed* yang kurang *biodegradable*. Waktu kontak mikroba dengan polutan organik yang lama meningkatkan penyisihan, selain itu teknologi membran dapat menghasilkan efluen yang jernih. Namun, lindi yang diproses MBR masih mengandung warna, dan konsentrasi COD maupun amonium tinggi. Untuk mengurangi konsentrasi polutan tersebut, proses oksidasi elektrokimia diperlukan sebagai pengolahan lanjutan dari MBR. Berikut merupakan karakteristik lindi yang diolah dengan metode MBR disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Karakteristik Lindi yang Diolah dengan *Membrane Bio Reactor*

Parameter	Karakteristik awal lindi	Efluen lindi dari pengolahan MBR
pH	7,7 - 8.5	7,0 – 7,8
COD (mg O L ⁻¹)	7000	2750
BOD ₅ (mg O L ⁻¹)	650	0
TKN (mg L ⁻¹)	1550	416
NH ₄ (mg L ⁻¹)	1500	408
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	6500	5500
TSS (mg L ⁻¹)	700	0

Sumber: Feki *et al.*, (2009)

2.3.3 Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)

Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) merupakan pengolahan biologis kombinasi yang memanfaatkan dua bentuk biomassa sekaligus, yaitu flok tersuspensi dan terlekat (biofilm). Prinsip kerja MBBR didasari pada penggunaan media sebagai tempat perkembangbiakan mikroorganisme. Media dijaga agar terus bergerak di dalam tangki aerasi sehingga biomassa akan tumbuh membentuk biofilm di permukaannya (Hajipour *et al.*, 2011). Secara prinsip pengolahan, MBBR merupakan pengembangan dari proses *activated sludge* dan *fluidized bed reactor*. Perbedaan utama dari MBBR dengan sistem *activated sludge* konvensional lainnya adalah tidak diperlukannya resirkulasi lumpur (Metcalf dan Eddy, 2014). Selain itu, MBBR membutuhkan lahan yang relatif kecil, waktu pengolahan yang singkat, dapat digunakan untuk debit yang bervariasi, tidak menyebabkan *clogging*, *headloss* rendah, area permukaan spesifik biofilm luas, dan tidak membutuhkan *backwashing* (Gulhane dan Kotangale, 2013). MBBR juga terbukti mampu menurunkan kadar organik karbon dan nutrisi secara efektif tanpa menimbulkan masalah pada proses lumpur aktifnya (Al-Rekabi, 2015). Lindi tidak dapat diolah hanya dengan MBBR karena memiliki konsentrasi COD dan amonium yang tinggi serta warna yang permanen. Oksidasi elektrokimia tampaknya menjadi opsi *post-treatment* yang

menjanjikan karena kemampuannya untuk mengoksidasi senyawa bio-refraktori.

Hasil penelitian pengolahan lindi dengan proses aerobik-anoksik menggunakan MBBR yang telah dilakukan oleh Imania (2017) tersaji pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Karakteristik Lindi yang Diolah dengan *Moving Bed Biofilm Reactor*

Parameter	Karakteristik awal lindi	Efluen pengolahan MBBR
pH	8,8	7,2
COD (mg O L ⁻¹)	21000	2500
BOD ₅ (mg O L ⁻¹)	5088	818
Nitrat (mg L ⁻¹)	22,87	21,92
Nitrit (mg L ⁻¹)	54,10	28,73
Amonium (mg L ⁻¹)	49,61	18,14
TKN (mg L ⁻¹)	41,6	37
pH	8,36	7,23
MLSS (mg L ⁻¹)	4200	1600

Sumber: Imania (2017)

2.3 *Post-treatment* Lindi dengan Elektrokimia

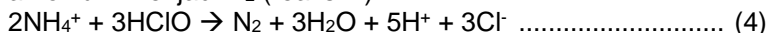
Pengolahan dengan elektrokimia berfungsi sebagai alternatif untuk proses fisik-kimia untuk mendegradasi polutan dari komposisi kompleks (Fernandes *et al.*, 2015). Pengolahan berbasis elektrokimia telah sukses diaplikasikan pada air limbah dengan kandungan polutan kompleks karena pengolahan ini ramah lingkungan, memiliki efisiensi penyisihan tinggi, mudah dalam pengoperasian, dan memungkinkan dioperasikan secara otomatis (Moreira *et al.*, 2017). Elektrokimia yang paling populer digunakan adalah elektrooksidasi (EO) dan elektrokoagulasi (EC). Pengolahan dengan EO menyisihkan polutan organik *refractory* dan amonium dari air limbah dengan pembentukan oksidan yang kuat, seperti *OH dan klorin bebas (Ding *et al.*, 2014 dan Bagastyo *et al.*, 2014), efisiensi pengolahan ini bergantung pada bahan anoda dan perpindahan massa kontaminan dari larutan massal ke permukaan anoda (Moreira *et al.*, 2017). Secara khusus, sebagian

besar penelitian tentang EO untuk lindi difokuskan pada bahan anoda (Fernandes *et al.*, 2016), konfigurasi sel yaitu *batch recirculation* (Silvera *et al.*, 2015), dan parameter operasi, termasuk rapat arus, dosis elektrolit, dan pH (Anglada *et al.*, 2011), untuk menyisihkan polutan organik, warna, dan amonium. Selain itu, keunggulan utama dari proses elektrooksidasi adalah tidak menghasilkan lumpur (Mandal *et al.*, 2017). Berdasarkan pertimbangan ekonomi, proses EO lebih cocok dan efisien untuk pengolahan limbah yang telah melalui pengolahan biologis (Del Moro *et al.*, 2016).

Studi sebelumnya meneliti sifat EO yang diaplikasikan pada lindi dalam menyisihkan komponen organik, warna, dan amonium nitrogen. Oksidasi anodik dalam EO menggunakan bahan anoda yang bervariasi, seperti *Dimensional Stable Anode* (DSA), *Boron Doped Diamond* (BDD), oksida film (PbO₂, SnO₂), dan elektroda berbasis karbon. Selama elektrolisis, polutan dihancurkan baik oleh proses oksidasi langsung atau tidak langsung (Szpyrkowicz *et al.*, 2001 dan Chen, 2004). Zat pengoksidasi utama dalam proses oksidasi elektrokimia dari lindi adalah ion hipoklorit atau asam hipoklorit yang dihasilkan dari ion klorida (reaksi (1) - (3))



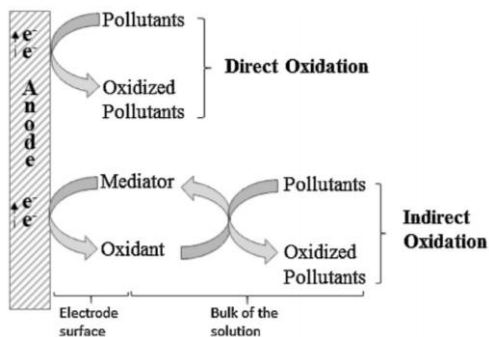
Oksidasi ion klorida dan hidrolisis dari klorin yang dihasilkan akan membentuk asam hipoklorit atau ion hipoklorida tergantung pada pH larutan. Senyawa klorin yang dominan adalah klorida (Cl⁻) pada pH 1-3, HClO pada pH 5-7, dan OCl⁻ pada pH lebih dari 7. Klorin dan hipoklorit mengoksidasi polutan dan direduksi menjadi ion klorida. Menurut Chen (2004), polutan organik dan NH₄ pada lindi yang mengandung konsentrasi klorida >3000 mg/L, dapat didegradasi secara elektrokimia. Cabeza *et al.* (2007) membuktikan bahwa oksidan yang terbentuk mengoksidasi amonium menjadi N₂ (reaksi 4)



Radikal hidroksil atau senyawa reaktif lainnya juga berpartisipasi dalam oksidasi elektrokimia organik. Meskipun, oksidasi langsung dari senyawa organik pada permukaan anoda juga dimungkinkan (Feng *et al.*, 2003).

2.4 Mekanisme Degradasi Polutan pada Proses Elektrooksidasi

Mekanisme degradasi polutan terjadi dengan dua cara yaitu elektrooksidasi (EO) langsung dan tidak langsung. Pada proses elektrooksidasi langsung polutan organik dioksidasi dengan mentransfer elektron ke anoda secara langsung, sementara pada EO tidak langsung pendegradasian polutan organik dilakukan oleh beberapa senyawa elektro-aktif yang bertindak sebagai oksidator. Zat pengoksidasi kuat tertentu juga dapat dihasilkan selama EO tidak langsung dari reaksi anoda atau katoda maupun dari keduanya tergantung pada sifat bahan elektroda yang digunakan. Skema mekanisme oksidasi langsung dan tidak langsung disajikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Mekanisme Oksidasi Langsung dan Tidak Langsung
Sumber: Deng dan Englehardt, (2007)

2.4.1 Oksidasi Langsung

Degradasi zat organik pada oksidasi langsung terjadi melalui dua tahap proses yaitu proses organik dari *bulk solution* ke permukaan anoda lalu mengalami absorpsi dan proses oksidasi polutan pada permukaan anoda melalui transfer elektron.



R = polutan organik target

RO = polutan organik yang teroksidasi

Oksidasi langsung polutan organik terjadi saat sistem elektrokimia dioperasikan pada potensial rendah sebelum reaksi

evolusi oksigen terjadi. Evolusi oksigen merupakan proses oksidasi air menjadi oksigen selama proses elektrokimia yang terjadi pada kondisi 1,2 Volt vs Normal Hydrogen Elektrode (NHE). Laju oksidasi langsung biasanya rendah, tetapi hal ini bergantung pada aktivitas elektrokimia dari masing-masing jenis anoda (Mandal *et al.*, 2017). Efisiensi proses elektrooksidasi dipengaruhi oleh transfer massa substrat dengan transfer elektron pada permukaan elektroda. Tingkat transfer elektron dipengaruhi oleh aktivitas elektroda dan massa jenis (Anglada *et al.*, 2009).

Kelemahan utama dari mekanisme ini adalah pembentukan lapisan polimer di atas permukaan anoda yang menunjukkan “efek keracunan” terhadap sifat elektrokatalitik dari bahan anoda. Kemungkinan pengotoran elektroda oleh pembentukan lapisan polimer tergantung pada sifat adsorpsi bahan anoda, konsentrasi, dan sifat organik yang ditargetkan. Sebagai contoh, pembentukan lapisan polimer kurang terlihat pada anoda BDD (*Boron Doped Diamond*) karena sifat adsorpsi yang lemah dan karakteristik inert (Panizza dan Cerisola, 2009; Fernandes *et al.*, 2015). Dalam Mandal *et al.* (2017) konsentrasi polutan yang tinggi dan keberadaan substansi aromatik yang khusus dapat menghasilkan lebih banyak pelarutan elektroda selama EO langsung. Namun, mekanisme ini dapat mempercepat pembentukan radikal hidroksil yang teradsorpsi pada permukaan anoda yang akan mengoksidasi zat organik melalui elektrolisis tidak langsung.

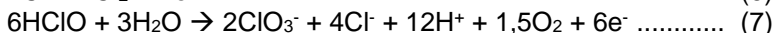
2.4.2 Oksidasi Tidak Langsung

Oksidasi tidak langsung terjadi pada permukaan anoda melalui oksidator berupa hidroksil radikal yang terbentuk melalui *water discharge* atau *bulk solution*. Agen pengoksidasi yang umumnya terbentuk berupa klorin dan hidrogen peroksida. Oksidasi organik dengan hidroksil radikal (*OH) terbagi menjadi dua anoda yaitu anoda aktif dan anoda tidak aktif. Contoh anoda aktif seperti *Dimensionally Stable Anode* (DSA) yang terdiri dari Pt, IrO₂, dan RuO₂. Sedangkan anoda non aktif berupa PbO₂, SnO₂ dan *Boron-Doped Diamond* (Fernandes *et al.*, 2015).

Perbedaan mekanisme oksidasi antara anoda aktif dan anoda tidak aktif terdapat pada proses oksidasi yang terbagi atas *electrochemical conversion* dan *electrochemical combustion*. Proses *electrochemical combustion* yang terjadi pada anoda tidak

aktif melalui aktivasi air akan membentuk *physisorbed active oxygen* seperti hidroksil radikal (*OH) pada permukaan anoda BDD. *Physisorbed active oxygen* akan mengoksidasi polutan organik kompleks hingga mengubahnya menjadi senyawa lain yang disertai pembentukan oksigen (Garcia-Segura *et al.*, 2018). Sementara proses *electrochemical conversion* terjadi pada anoda aktif dengan pembentukan *chemisorbed active oxygen* (*OH) pada permukaan anoda DSA, *active oxygen* tersebut akan mengkonversi polutan kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Namun, proses ini tidak dapat mengoksidasi polutan menjadi karbon dioksida sehingga memerlukan pengolahan lanjutan. Berdasarkan Deng dan Englehardt (2007), rangkaian reaksi pembentukan klorin dan hipoklorit selama proses oksidasi tidak langsung dapat dilihat pada persamaan 6 sampai 12. Hidroksil radikal yang terbentuk pada proses elektrok oksidasi tidak langsung akan teradsorpsi ke permukaan anoda (persamaan 13) dan membantu proses oksidasi senyawa organik (persamaan 14) (Mandal *et al.*, 2017).

Reaksi pada anoda:



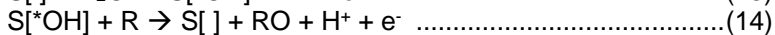
Reaksi pada larutan bulk:



Reaksi pada katoda:



Reaksi oksidasi pada permukaan anoda:



2.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Oksidasi Elektrokimia

Berikut merupakan beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses oksidasi elektrokimia:

2.5.1 Material Elektroda

Proses degradasi organik sangat tergantung pada sifat bahan anoda. Anoda dengan aktivitas elektrokatalitik yang tinggi (seperti platinum, paladium, iridium dioksida, rutenium-titanium dioksida, iridium-titanium dioksida dan timbal dioksida) menghasilkan degradasi organik yang lebih cepat pada potensial rendah. Anoda dengan sifat adsorpsi rendah mengurangi kemungkinan terjadinya pengotoran elektroda selama proses transfer elektron langsung (Panizza dan Cerisola, 2009).

Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) adalah bahan anoda yang paling banyak dipelajari untuk pengolahan lindi. Banyak peneliti mengadopsi anoda BDD untuk mengolah air limbah kompleks karena sifat-sifatnya yang sangat baik seperti, konduktivitas tinggi, ketahanan korosi yang tinggi, memiliki stabilitas kimia yang baik, kelembaman dan sifat adsorpsi rendah dari permukaan anoda yang meminimalisir pembentukan lapisan polimer, overpotensial evolusi oksigen tinggi serta potensi kerja yang luas ($> 3 \text{ V}$) (Troster *et al.*, 2002; Papastavrou *et al.*, 2009; Panizza dan Cerisola, 2009; Zhao *et al.*, 2010). Fernandes *et al.* (2012) telah mengevaluasi kesesuaian anoda BDD untuk pengolahan tersier lindi. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa aplikasi metode elektrokimia optimal pada kondisi tanpa pengenceran dengan kerapatan arus rendah yaitu 50 A m^{-2} sudah mampu menyisihkan $0,45 \text{ g L}^{-1}$ COD. Sementara untuk sampel dengan pengenceran diperlukan kerapatan arus yang tinggi yaitu 700 A m^{-2} sehingga dapat menyisihkan COD sebesar $0,32 \text{ g L}^{-1}$.

Titanium yang dilapisi dengan lapisan oksida tipis iridium atau ruthenium umumnya dikenal sebagai *Dimensionally Stable Anode* atau DSA (Panizza dan Cerisola, 2009). DSA baik digunakan pada oksidasi tidak langsung karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya yaitu aktivitas katalitik tinggi untuk evolusi klorida dan memiliki stabilitas tinggi terhadap korosi anodik (Turro *et al.*, 2012). Sebagai tambahan, disebutkan dalam Sarkka *et al.* (2015) DSA memiliki efisiensi listrik yang bagus, potensial O_2 tinggi, harga lebih murah, tapi elektroda ini memiliki kekurangan yaitu *lifetime* yang singkat serta kurang stabil saat digunakan untuk proses elektrooksidasi. Dalam Turro *et al.* (2012) oksidasi elektrokimia dengan DSA berbasis $\text{Ti/IrO}_2\text{-RuO}_2$ mampu menghilangkan konsentrasi COD sebesar 60% disertai penurunan

65% total karbon dan deklorasi yang sempurna. Persen penyisihan tersebut didapatkan pada 240 menit waktu operasi dengan kerapatan arus 32 mA cm^{-2} dan pH 3.

Logam platina (Pt) telah umum digunakan pada pengolahan air limbah secara elektrokimia karena konduktivitasnya yang tinggi, memiliki stabilitas kimia yang baik, dan memiliki umur yang panjang (Mandal *et al.*, 2017). Anoda dengan lapisan platina juga telah digunakan untuk pengolahan lindi oleh Aloui *et al.* (2009) dan Ramprasad (2012). Pengolahan lindi dengan kombinasi proses MBR-elektrokimia menggunakan anoda Ti/Pt menunjukkan penyisihan COD dan amonium nitrogen sebesar 85% dan 94% dengan konsentrasi awal 7000 mg L^{-1} COD dan 1500 mg L^{-1} amonium nitrogen (Feki *et al.*, 2009).

Berdasarkan jenis anoda, hidroksil radikal dapat memicu reaksi oksidasi parsial dan oksidasi selektif polutan organik, serta mineralisasi. Comninellis (2008) membaginya menjadi dua jenis yaitu anoda aktif yaitu Pt, IrO_2 , dan RuO_2 , serta anoda tidak aktif yaitu PbO_2 , SnO_2 , dan BDD. Perbedaan jenis anoda berdasarkan kekuatan oksidasinya dapat dilihat pada Tabel 2.8. Dari Tabel tersebut, dapat dilihat bahwa anoda BDD memiliki kekuatan oksidasi yang paling tinggi dibandingkan dengan $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$, Ti/Pt, Ti/ PbO_2 dan Ti/ $\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$.

Tabel 2.8 Kekuatan Oksidasi Beberapa Jenis Anoda pada Aplikasi Elektrokimia

Elektroda	Potensi Oksidasi (V)	Entalpi Adsorpsi M-OH	O ₂ Over-potential (V)	Kekuatan Oksidasi Anoda
$\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$	1,4-1,7	↑	0,18	↓
$\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$	1,5-1,8		0,25	
Ti-Pt	1,6-1,9		0,3	
Ti-PbO ₂	1,8-2,0		0,5	
Ti/SnO ₂ -Sb ₂ O ₅	1,9-2,2		0,7	
p-Si/BDD	2,2-2,6		1,3	

Sumber: Comninellis *et al.*, (2008) dengan modifikasi

2.5.2 Kerapatan Arus

Kerapatan arus merupakan perbandingan antara kuat arus dengan luas elektroda. Pada proses elektrooksidasi dibutuhkan arus yang efektif untuk meminimalkan reaksi samping dari evolusi

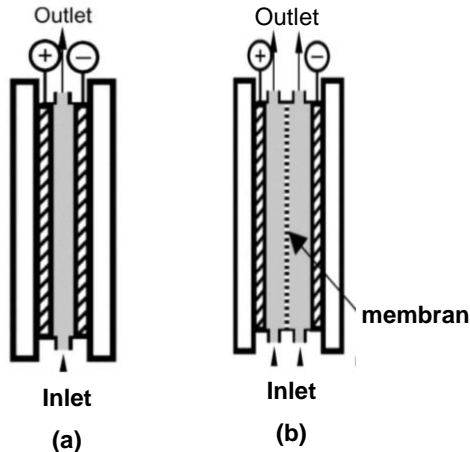
oksigen, selain itu agar biaya yang dikeluarkan lebih ekonomis (Martinez-Huitte *et al.*, 2018). Efisiensi penyisihan COD akan meningkat seiring dengan meningkatnya kerapatan arus. Menurut Quan *et al.* (2013) pada anoda (Ti/RuO₂-IrO₂) minimum dan maksimum kerapatan arus yang digunakan dalam menyisihkan COD dan amonium adalah 5-100 mA cm⁻², lebih dari 100 mA cm⁻² sudah tidak menunjukkan penyisihan COD. Anglada *et al.* (2009) melaporkan bahwa kerapatan arus yang lebih rendah dominan dalam mengoksidasi COD dibandingkan pembentukan klorin pada proses oksidasi tidak langsung di permukaan anoda. Sedangkan penggunaan arus yang tinggi akan meningkatkan pembentukan klorin yang dapat menghambat proses degradasi senyawa organik (Rao *et al.*, 2009).

Oksidasi senyawa organik dapat meningkat pada kisaran arus 20 hingga 50 mA cm⁻², namun bila arus ditingkatkan lebih dari 65 mA cm⁻² akan menunjukkan penyisihan COD yang tidak signifikan (Zhou *et al.*, 2016). Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Fernandes (2011) dengan anoda BDD penerapan kerapatan arus 50 mA cm⁻² mampu menyisihkan COD sebesar 2,51 g L⁻¹. Penggunaan BDD oleh Scialdone *et al.* (2009) dengan kerapatan arus 17 mA cm⁻², pH 2 dan debit 1,2 L s⁻¹ menunjukkan konversi senyawa organik sebesar 99%. Sementara dalam Agustina (2018) dengan reaktor *undivided cell* pada pH 8,5 dengan nilai kerapatan arus 50 mA cm⁻²; 75 mA cm⁻²; 100 mA cm⁻² secara efektif dapat meningkatkan penyisihan COD sebesar 26,84%; 37%; dan 50,59%. Dengan jenis anoda lain yaitu Ti/IrO₂-RuO₂, Turro *et al.* (2012) mendapatkan efisiensi penyisihan COD sebesar 90% pada kondisi pH 3, waktu operasi 240 menit, dan kerapatan arus 32 mA cm⁻².

Penelitian Feki *et al.* (2009) menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan arus akan meningkatkan penyisihan COD dan asam humat, hal ini dikarenakan terjadi peningkatan pembentukan klorin dan/ atau produk hidrolisisnya yang berperan untuk penyisihan COD dan warna. Lindi dari hasil MBR yang diolah dengan elektroda Ti/Pt selama 1 jam, menurunkan COD dari 2750 menjadi 2120, 1660 dan 1000 mg L⁻¹ pada kerapatan arus 0,5 ke 1,5 dan 4 A dm⁻².

2.5.3 Konfigurasi Reaktor

Perencanaan konfigurasi reaktor adalah tahap kunci untuk pengembangan baru material elektroda beserta komposisinya untuk mencapai kondisi reaksi yang optimal dari perangkat skala laboratorium. Konfigurasi elektroda juga memiliki pengaruh besar pada kinerja proses *electroreduction* CO₂ (Martinez-Huitile *et al.*, 2018). Konfigurasi reaktor terbagi menjadi dua jenis yaitu reaktor dengan menggunakan *membrane-divide cell* dan *undivided cell*. *Membrane- divide cell* membutuhkan energi spesifik sebesar 0,34 kWh g⁻¹ COD⁻¹ sedangkan *undivided cell* membutuhkan energi spesifik sebesar 0,24 kWh g⁻¹ COD⁻¹ (Bagastyo *et al.*, 2014). Pada penelitian (Bagastyo *et al.*, 2014) dapat disimpulkan bahwa *membrane-divide cell* membutuhkan konsumsi energi yang lebih tinggi dibandingkan *undivided cell*. Reaktor *undivided cell* dengan anoda DSA (Ti/Pt) mampu menyisihkan amonium (NH₄⁺) sebesar 78-82% (Feki *et al.*, 2009). Berikut merupakan skema *membrane- divide cell* dan *undivided cell* tersaji pada Gambar 2.1.

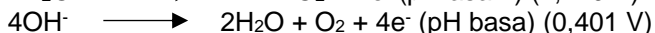
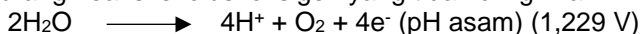


Gambar 2.1 Skema (a) *Undivided Cell* dan (b) *Membrane-Divide Cell*

Sumber: Rondinini (2010)

2.5.4 Nilai pH

Nilai pH memiliki peranan pada keberadaan senyawa aktif dalam lindi selama proses elektooksidasi berlangsung (Mandal *et al.*, 2017). Keberadaan *active species* tersebut sangat erat kaitannya dengan degradasi senyawa organik (terukur sebagai COD) dan amonium. Nilai pH asam memiliki kemampuan dalam meningkatkan laju penyisihan COD melalui reduksi ion karbonat (CO_3^{2-}) dan bikarbonat (HCO_3^-), dimana ion tersebut merupakan ion yang dapat merusak radikal hidroksida (Cossu *et al.*, 1998 dan Angdala *et al.*, 2010). Pembentukan oksigen (*oxygen evolution*), yang merupakan reaksi samping selama proses elektooksidasi juga sangat tergantung pada pH. Pada pH basa, kuat arus lebih banyak digunakan untuk proses pembentukan oksigen dibandingkan dengan proses oksidasi senyawa organik. Hal ini dikarenakan pada pH basa, energi yang dibutuhkan untuk pembentukan oksigen (potensial O_2) lebih kecil dari pada saat pH asam (0,42 V pada suasana basa dan 1,229 V pada suasana asam). Jadi secara teoritis, pada pH asam lebih baik dalam mengurangi reaksi evolusi oksigen yang tidak diinginkan.



Pembentukan *active chlorine* selama proses elektrolisis terjadi pada pH <3,3 namun, pada pH <7,5 klorin tersebut telah berubah menjadi HClO dan pada pH >7,5 menjadi OCl⁻ (Chu *et al.*, 2008).

2.5.5 Debit

Meningkatkan debit aliran pada proses oksidasi elektrokimia dapat meningkatkan transfer massa dan mengurangi difusi ke permukaan anoda (Zhou *et al.*, 2016). Proses pembentukkan agen pengoksidasi seperti hidroksil radikal kurang optimal apabila difusi air ke permukaan anoda berkurang. Tingginya debit aliran juga dapat meningkatkan laju perpindahan klorida dari *bulk solution* ke permukaan anoda sehingga menghasilkan perubahan klorin yang lebih besar. Namun, penggunaan debit yang terlalu rendah mestinya dihindari karena semakin lama waktu tinggal elektrolit di dalam reaktor akan meningkatkan temperatur, bahkan dapat memanaskan larutan di dalam reaktor. Pada debit 1,3 hingga 2,6 mL s⁻¹ dapat meningkatkan penyisihan COD (Panizza *et al.*, 2010). Penelitian oleh Scialdone *et al.* (2009) yang menggunakan anoda

BDD pada kerapatan arus 39 mA cm⁻² dan debit operasi 0,2 L menit⁻¹ mampu mendegradasi 70% COD. Sementara, pada kerapatan arus 17 mA cm⁻² dan debit operasi 1,2 L menit⁻¹ kemampuan degradasi COD mencapai 98%.

2.5 Perhitungan Efisiensi Proses

Efisiensi proses dihitung berdasarkan konsumsi energi yang dibutuhkan dalam menyisihkan polutan.

2.5.1 Hukum Farady

Hukum Faraday I menyatakan bahwa jumlah massa zat yang dihasilkan di elektroda berbanding lurus dengan jumlah listrik yang digunakan selama proses elektrolisis berlangsung. Hal ini dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$m = \frac{i \times e \times t}{96500} \dots\dots\dots(15)$$

Keterangan :

m = massa zat yang dihasilkan (g)

e = berat ekivalen

i = kuat arus (A)

t = waktu (s)

2.5.2 Hukum Coulomb

Besarnya listrik yang mengalir yang dinyatakan dalam Coulomb merupakan arus listrik dikalikan dengan waktu operasi. Hubungan muatan listrik dengan kuat arus dinyatakan dalam rumus berikut :

$$m = I \times t \dots\dots\dots(16)$$

Keterangan :

I = kuat arus (A)

t = waktu (s)

Q = muatan listrik (coloumb)

2.5.3 Konsumsi Energi Spesifik

Dalam aplikasi elektrokimia kelayakan proses dapat dilihat dari segi efisiensi penurunan polutan sedangkan pada segi

ekonomi kelayakan ditentukan oleh konsumsi energi spesifik. Penurunan konsentrasi polutan selama proses elektrokimia dapat dinyatakan dengan fungsi dari muatan listrik spesifik. 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:

$$Q = \frac{J \times A \times t}{V} \dots\dots\dots(17)$$

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

$$J = \frac{I}{A} \dots\dots\dots(18)$$

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

$$Q = \frac{I \times t}{V} \dots\dots\dots(19)$$

$$W = Q \times V \dots\dots\dots(20)$$

Keterangan:

W = konsumsi energi spesifik ($Wh L^{-1}$)

Q = muatan listrik spesifik ($Ah L^{-1}$)

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)

(Anglada *et al.*, 2009).

2.5 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan dalam penelitian pengolahan lindi yang telah terolah secara biologis yang menggunakan metode elektrokimia dengan konfigurasi *reaktor undivided cell* dan jenis anoda BDD, Ti/IrO₂, maupun Ti/Pt. Berikut merupakan hasil penelitian terdahulu yang terdapat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu

Hasil Penelitian	Referensi
Lindi dengan COD sebesar 3973 mg L ⁻¹ langsung diolah dengan anoda DSA memerlukan konsumsi daya 109,83 kWh m ⁻³ untuk penyisihan COD sebesar 56% dengan kerapatan arus 83 mA cm ⁻² dan waktu reaksi 240 menit. Kemudian, pada kerapatan arus 200 mA cm ⁻² proses elektrokimia mengkonsumsi energi sebesar 465,2 kWh m ⁻³ untuk mendapatkan 87% penurunan COD. Sementara pengolahan elektrokimia pada lindi yang terolah secara biologis dengan konsentrasi COD 2259 mg L ⁻¹ menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dengan konsumsi energi yang konstan. Pada kerapatan arus 83 mA cm ⁻² dan waktu reaksi 240 menit konsumsi daya yang diperlukan yaitu 129,17 kWh m ⁻³ dengan kemampuan penyisihan COD sebesar 76%. Bahkan pada 150 menit waktu reaksi dengan kuat arus 133 mA cm ⁻² telah diperoleh penurunan COD sebesar 77%.	Del Moro <i>et al.</i> (2016)
Penelitian ini mengolah lindi dengan karakteristik awal berupa 1855 mg L ⁻¹ COD, 1060 mg L ⁻¹ amonium nitrogen, dan 2800 mg L ⁻¹ klorida dengan menggunakan anoda Ti/TiO ₂ -RuO ₂ pada kerapatan arus 480 A m ⁻² , debit 2000 L jam ⁻¹ , dan waktu reaksi 3 jam. Penurunan kadar polutan COD dan amonium nitrogen yang didapat yaitu 73% dan 49%.	Moraes dan Bertazzoli (2005)
Penelitian dengan anoda Ti/RuO ₂ -IrO ₂ ini mengolah lindi sebanyak 0,2 L dengan konsentrasi COD, amonium nitrogen, dan Cl ⁻ berturut-turut yaitu 560 mg L ⁻¹ , 50 mg L ⁻¹ , 831 mg L ⁻¹ . Proses elektrooksidasi pada kondisi kerapatan arus 680 A m ⁻² , dan waktu reaksi 1,5 jam menghasilkan penyisihan COD dan amonium nitrogen sebesar 66% dan 98%, serta memerlukan konsumsi energi sebanyak 82 Wh g ⁻¹ COD.	Zhang <i>et al.</i> (2011)
Dalam penelitian tersebut menggunakan anoda BDD dengan kerapatan arus 300 A m ⁻² , debit 660 L	Cabezza <i>et al.</i> (2007)

Hasil Penelitian	Referensi
jam ⁻¹ , dan waktu operasi 3 jam mampu menurunkan 86% COD dan 70% amonium nitrogen.	
Kombinasi pengolahan lindi pada konsentrasi awal 8000 mg L ⁻¹ COD dan 2800 mg L ⁻¹ amonium nitrogen menggunakan MBR-EO dengan anoda Ti/Pt, dengan waktu operasi 1 jam, arus 4 A dm ⁻² menyisihkan COD dan amonium nitrogen sebesar 87% dan 99%. Sistem kombinasi ini mengkonsumsi energi sebesar 72 kWh m ⁻³ .	Aloui <i>et al.</i> (2009)
Anoda BDD pada kerapatan arus 39 mA cm ⁻² dan debit operasi 0,2 L menit ⁻¹ mampu mendegradasi 70% COD. Sementara, pada kerapatan arus 17 mA cm ⁻² dan debit operasi 1,2 L menit ⁻¹ kemampuan degradasi COD mencapai 98%.	Scialdone <i>et al.</i> (2009)

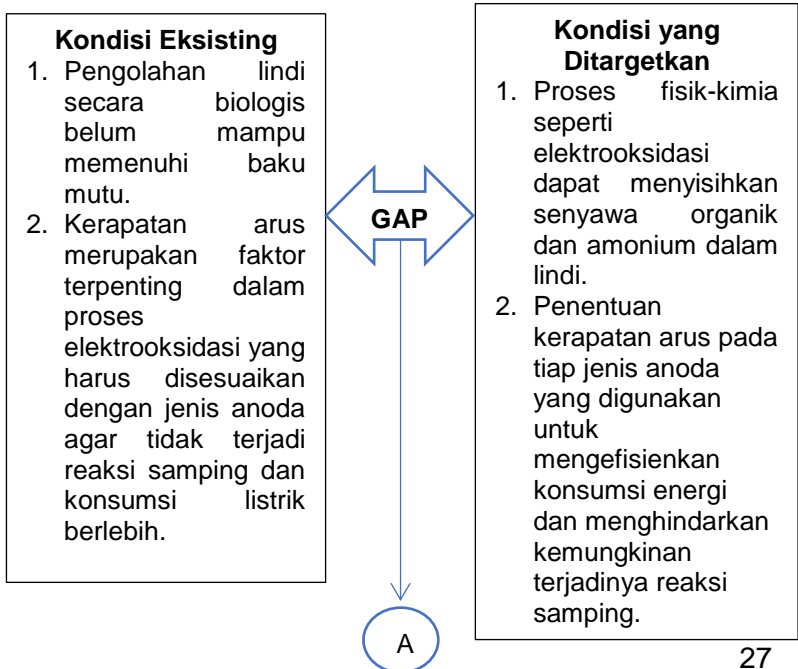
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

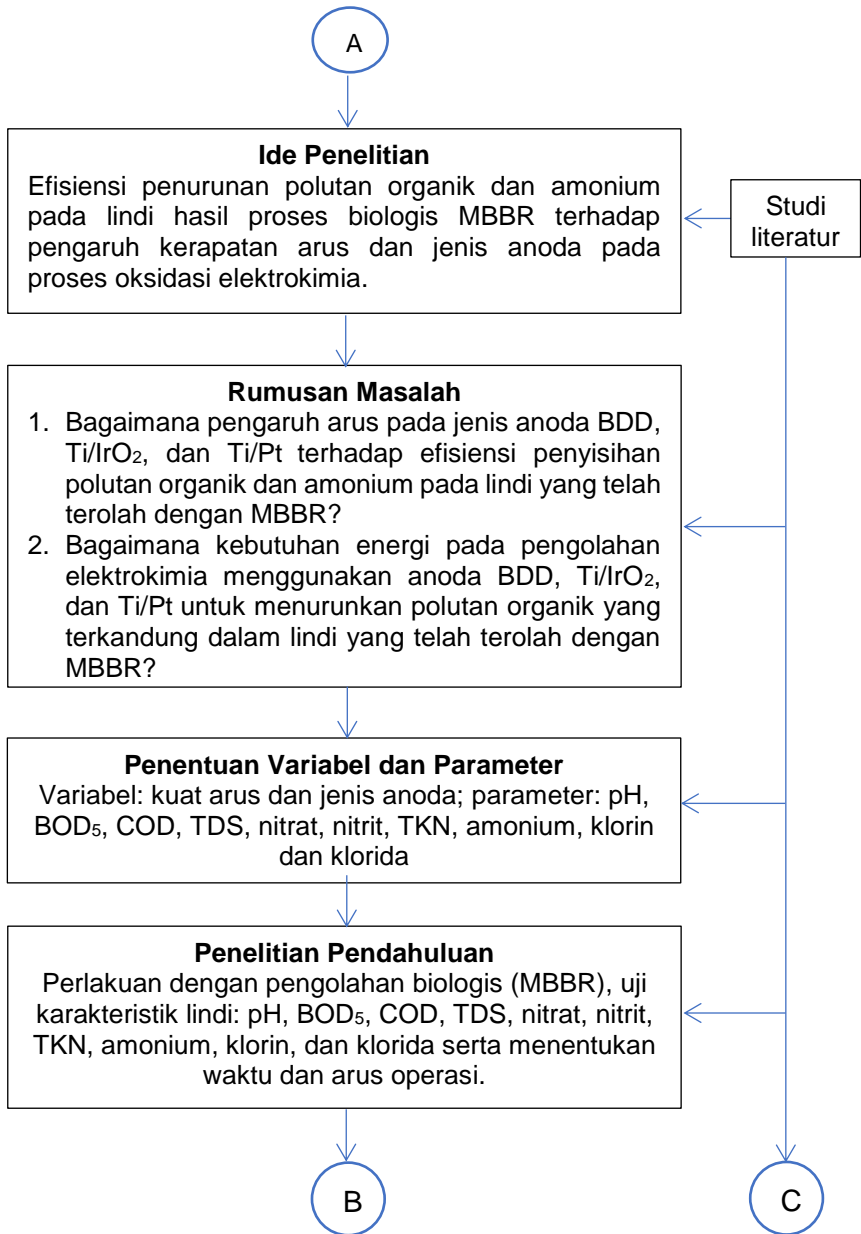
BAB 3 METODE PENELITIAN

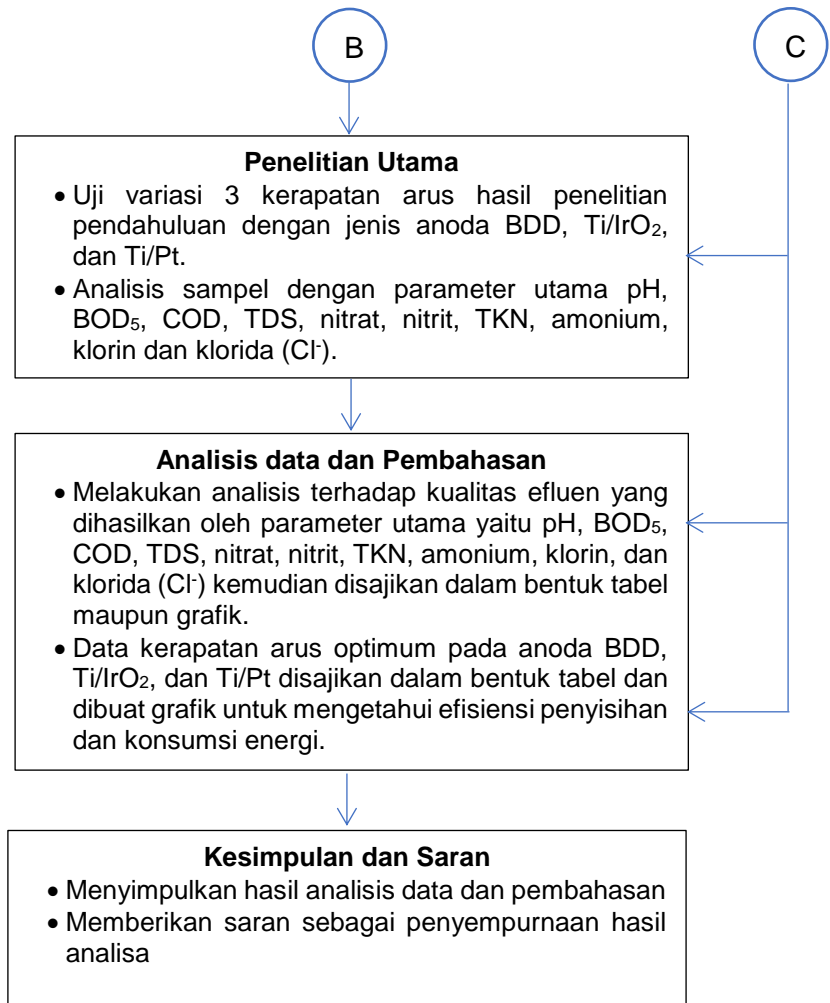
3.1 Kerangka Penelitian

Kegiatan penelitian ini bertujuan untuk menentukan kerapatan arus pada proses oksidasi elektrokimia menggunakan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt dengan katoda *stainless steel*. Sampel yang digunakan yaitu lindi dari TPA Ngipik Gresik yang kemudian akan diolah secara biologis dengan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) terlebih dahulu dalam skala laboratorium.

Penelitian ini didasarkan atas adanya "GAP" antara kondisi ideal yang ditargetkan dengan kondisi eksisting sehingga dapat ditentukan rumusan masalah dan tujuan dari penelitian. Berikutnya, dilakukan persiapan awal penelitian yang terdiri dari persiapan alat dan bahan serta analisis karakteristik lindi untuk memudahkan pelaksanaan penelitian. Setelah itu dilakukan analisis dan pembahasan terkait hasil penelitian untuk merumuskan kesimpulan. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1







Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.2 Ide Penelitian

Ide penelitian didapatkan dari gap antara kondisi eksisting dan kondisi ideal yang ditargetkan. Penelitian ini didasari pada ide penurunan polutan organik secara fisik-kimia pada lindi hasil

proses pengolahan biologis dalam upaya pemenuhan baku mutu air lindi pada 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. Penggunaan anoda BDD, Ti/IrO₂, maupun Ti/Pt pada proses elektrooksidasi memiliki keunggulan dalam menyisihkan polutan organik pada lindi. Namun penyesuaian kerapatan arus pada ketahanan material anoda perlu dipertimbangkan untuk mengefisiensikan konsumsi energi pada proses penyisihan polutan. Dari beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil pengolahan lindi secara biologis belum memenuhi baku mutu air lindi yang telah ditetapkan, sehingga diperlukan alternatif tambahan berupa proses fisik-kimia dalam pengolahan air lindi tersebut.

3.3 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi terkait dengan penelitian. Literatur yang digunakan diperoleh dari buku, jurnal internasional, jurnal penelitian, artikel, *text book*, laporan tugas akhir, thesis, asistensi dengan dosen pembimbing serta literatur yang diakui keabsahannya. Literatur yang dapat menunjang penelitian ini antara lain:

- (1) Karakteristik umum lindi dan komposisi lindi.
- (2) Pengolahan lindi secara biologis dan karakteristik efluen yang dihasilkan.
- (3) Karakteristik limbah yang dapat diolah dengan MBBR dan efluennya.
- (4) Optimalisasi proses nitrifikasi-denitrifikasi pada MBBR.
- (5) Aplikasi metode oksidasi elektrokimia sebagai pengolahan lanjutan lindi yang telah terolah secara biologis.
- (6) Mekanisme proses elektrooksidasi dalam penurunan polutan organik serta amonium.
- (7) Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya proses elektrooksidasi.
- (8) Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD), Titanium/Iridium-Oksida (Ti/IrO₂), dan Titanium/Platina (Ti/Pt)

3.4 Penentuan Variabel dan Parameter

Dalam penelitian ini menggunakan variabel, sebagai berikut:

1. Jenis Anoda

Penelitian ini akan menggunakan anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt. Menurut Martinez-Huitle *et al.* (2018) BDD memiliki potensial oksigen yang tinggi sehingga mampu membentuk oksidan kuat, selain itu BDD juga memiliki efisiensi arus yang tinggi dan tahan terhadap korosi. Sementara, Ti/IrO₂ yang merupakan golongan *Dimensionally Stable Anodes* (DSA) adalah anoda paling efisien untuk pembentukan klorin aktif. Logam Ti/Pt juga diujicobakan sebagai anoda karena materialnya yang stabil pada kondisi *Total Dissolved Solid* (TDS) rendah.

2. Kerapatan Arus

Kerapatan arus optimal pada anoda BDD tanpa penambahan NaCl yaitu 17 mA cm⁻² untuk mendegradasi 85% polutan (Sialdone *et al.*, 2009). Penelitian Turro *et al.* (2011) dengan anoda Ti/RuO₂-IrO₂ mendapatkan efisiensi penyisihan COD sebesar 90% pada kerapatan arus 32 mA cm⁻². Berdasarkan pertimbangan penelitian sebelumnya dan didasarkan pada penelitian pendahuluan terkait penentuan arus optimum maka, dapat ditentukan 3 (tiga) angka kerapatan arus optimum yang ditetapkan sebagai variabel.

Parameter yang diuji pada penelitian ini antara lain BOD₅, COD, pH, TDS, klorida, klorin, nitrat, nitrit, amonium, dan TKN. 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
1.	BOD ₅	Mengetahui penurunan senyawa organik <i>biodegradable</i> pada lindi	Titrisasi	Metode Winkler
2.	COD	Mengetahui tingkat penurunan polutan organik pada lindi	Titrisasi	Closed Reflux dan titrasi
3.	pH	Menganalisis tingkat keasaman pada lindi	pH meter	Potensiometri
4.	TDS	Mengetahui kadar padatan terlarut pada lindi	Filtrasi	Gravimetri

No	Parameter	Tujuan	Instrumen	Metode
5.	Ion Klorida (Cl ⁻)	Mengetahui kandungan klorida dan pengaruhnya terhadap proses elektrooksidasi	Titrasi	Argentometrik Mohr
6.	Total Klorin (Cl ₂)	Mengetahui total senyawa klorin yang terbentuk pada proses elektrooksidasi	DPD	Spektrofotometri
7.	Nitrat	Mengetahui kandungan nitrogen pada lindi dan digunakan dalam mencari Total-N	Spektrofotometer	Brucin asetat
8.	Nitrit	Mengetahui kandungan nitrit pada lindi dan digunakan dalam mencari Total-N	Spektrofotometer	Spektrofotometri
9.	Amonium	Mengetahui kandungan amonium pada lindi	Spektrofotometer	Nessler
10.	TKN	Mengetahui kandungan organik N ⁺ amonium	Spektrofotometer	Nessler

Prosedur analisis tiap parameter terlampir pada Lampiran I.

Pengambilan sampel untuk dianalisis sesuai parameter terdapat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Kebutuhan, Titik, dan Waktu Pengambilan Sampel

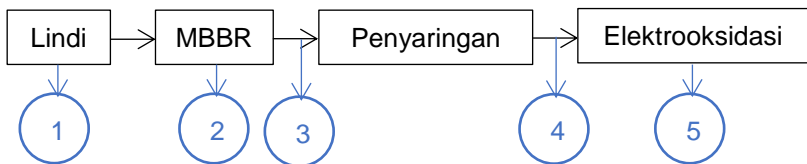
No.	Parameter	Kebutuhan Sampel (mL)	Titik Pengambilan Sampel	Waktu pengambilan Sampel
1.	pH, TDS	20	Feed tank	t ₀ , t ₁ , t ₂ , t ₃ , t ₄ , t ₅ , t ₆
2.	COD	3.5	Feed tank	t ₀ , t ₁ , t ₂ , t ₃ , t ₄ , t ₅ , t ₆
3.	BOD ₅	30	Feed tank	t ₀ , t ₄ , t ₆
4.	Ion Klorida	3	Feed tank	t ₀ , t ₄ , t ₆
5.	Total Klorin	15	Feed tank	t ₀ , t ₄ , t ₆
6.	Nitrat	1.2	Feed tank	t ₀ , t ₄ , t ₆
7.	Nitrit	30	Feed tank	t ₀ , t ₄ , t ₆
8.	Amonium	0.6	Feed tank	t ₀ , t ₄ , t ₆
9.	TKN	30	Feed tank	t ₀ , t ₄ , t ₆
	Total	133.3		

Volume lindi terolah sebanyak 2 L, sehingga maksimal pengambilan volume sampel untuk analisis adalah 10% yaitu 200

mL dari volume lindi terolah. Pengambilan sampel sebanyak 133,3 mL untuk analisis dapat dilakukan karena kurang dari 200 mL dengan mempertimbangkan volume lindi yang berubah ke fase gas saat proses pengolahan. Waktu operasional yang digunakan pada penelitian ini ditentukan setelah dilakukannya penelitian pendahuluan.

3.5 Persiapan Penelitian

Pengolahan lindi diawali dengan proses biologis MBBR yang kemudian efluennya akan disaring dan dilanjutkan dengan pengolahan secara fisik-kimia yaitu elektrooksidasi. Berikut merupakan diagram alir pengolahan lindi terintegrasi biologis-fisik kimia pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Rangkaian Sistem Pengolahan Lindi

Efluen dari pengolahan MBBR akan disaring dengan kertas saring kasar. Karakterisasi akan dilakukan pada titik sampling dengan nomor 1, 2, 3, 4 dan 5. Parameter yang akan dianalisis pada tiap titik sampling yaitu:

- Titik sampling 1: TSS, nitrat, nitrit, amonium, COD, BOD, pH, TDS, Ion klorida
- Titik sampling 2: nitrat, nitrit, amonium
- Titik sampling 3: TSS
- Titik sampling 4: TSS, nitrat, nitrit, amonium, TKN, COD, BOD, pH, TDS
- Titik sampling 5: nitrat, nitrit, amonium, TKN, COD, BOD, pH, TDS, ion klorida, total klorin

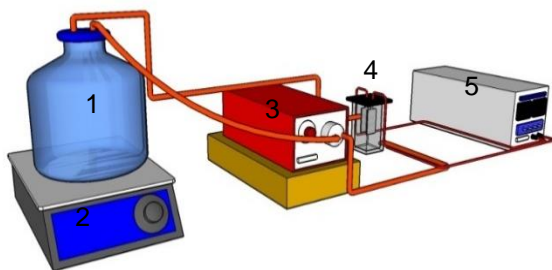
A. Alat yang digunakan dalam penelitian ini, sebagai berikut:

1. Reaktor MBBR

Reaktor MBBR berupa bak plastik dengan diameter 40 cm dan tinggi 90 cm dengan volume reaktor 35 L. Volume pengolahan

pada reaktor MBBR adalah 30 L. Menurut Barwal dan Chaudhary (2014) performa MBBR bergantung pada persen media yang tersedia pada reaktor dan beban organik dari limbah yang diolah. Media yang digunakan adalah media Kaldness tipe 1 sebanyak 20% dari volume pengolahan atau sebanyak 6 L dan terendam dalam lindi. Disisakan 80% ruang untuk biomassa tersuspensi yang akan berperan dalam hidrolisis enzimatis dan bioflokulasi dalam reaktor sehingga dapat meningkatkan efisiensi penyisihan MBBR. Dalam pengolahan ini, reaktor dilengkapi dengan aerator dan pompa *submersible*. Pompa *submersible* digunakan untuk menjaga agar media tetap bergerak di dalam reaktor. Pompa yang digunakan adalah Vosso tipe VS-804 dengan kapasitas pengadukan 2000 L menit⁻¹. Tinggi maksimal pengadukan oleh pompa yaitu maksimal 2 meter.

2. Reaktor Elektrokimia



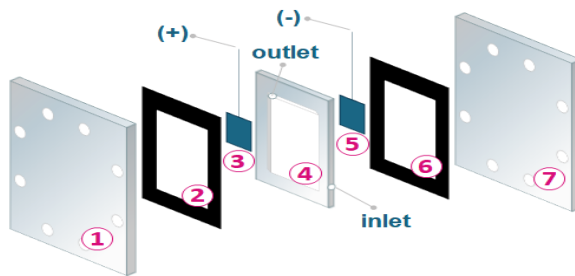
Gambar 3.3 Rangkaian Sistem Oksidasi Elektrokimia

Keterangan:

1. Feed Tank 2L
2. Magnetic Stirrer
3. Pompa peristaltik
4. Reaktor elektrokimia 80 mL
5. DC Power Supply

Reaktor dalam penelitian ini terbuat dari akrilik dengan ukuran 4 x 10 x 2 cm (dimensi dalam, volume efektif 80 cm³) dan menggunakan sistem aliran *batch recirculation*. Lindi dialirkan dari *feed tank* ke reaktor dengan bantuan pompa peristaltik. Setelah lindi dalam reaktor penuh, lindi terdorong keluar melalui outlet dan

dialirkan kembali ke *feed tank*. Pada reaktor ini terdapat lubang sebagai inlet di bagian bawah dan outlet di bagian atas. Inlet dan outlet ini terletak pada sisi yang berseberangan. Reaktor terdiri dari satu kompartemen dimana anoda dan katoda diletakkan di dalam kompartemen yang sama. Penggunaan sistem satu kompartemen (*undivided cell*) lebih efisien dalam konsumsi energi dibandingkan *membrane-devided cell* hal ini didasarkan atas penelitian yang dilakukan oleh Bagastyo *et al.* (2014). Penggunaan dimensi tersebut berdasarkan perbandingan antara luas elektroda dengan volume reaktor yang akan digunakan. Selain itu, semakin rapat jarak antar elektroda maka konsumsi energi yang dibutuhkan juga akan semakin kecil. Rangkaian sistem oksidasi elektrokimia dan detail reaktor terdapat pada Gambar 3.3 dan 3.4.



Gambar 3.4 Reaktor Elektrokimia

Keterangan:

- (1) dan (7) : balok penutup berbahan akrilik ukuran 15 x 9 x 2 cm
- (2) dan (6) : seal karet ukuran luar 14 x 8 cm dan ukuran dalam 10 x 4 cm
- (3) dan (5) : anoda BDD, Ti/IrO₂ dan Ti/Pt ukuran 6 cm²; katoda *stainless steel* ukuran 2 x 3 cm
- (4) : volume efektif reaktor berbahan akrilik ukuran 10 x 4 x 2 cm

3. Elektroda

Anoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah BDD, DSA berbasis Ti/IrO₂, dan Ti/Pt sedangkan katodanya yaitu *stainless steel*. Ukuran elektroda yang digunakan yaitu 6 cm² untuk setiap anoda maupun katoda. Anoda BDD, Ti/IrO₂, Ti/Pt digunakan

karena memiliki potensial oksigen yang tinggi sehingga dapat mendegradasi senyawa organik lebih tinggi dibandingkan anoda lainnya, selain itu terbentuknya evolusi oksigen pada anoda BDD cukup sedikit karena energi yang dibutuhkan cukup besar. Katoda *stainless steel* digunakan karena pada deret volta merupakan jenis logam yang cukup baik dalam reduksi. Jarak antara kedua elektroda yang digunakan adalah 2 cm karena menurut Fernandes *et al.* (2014) hal tersebut mampu meningkatkan penyisihan COD hingga 56%. Sebelum digunakan untuk mengelektrooksidasi lindi, elektroda ini harus dipolarisasi terlebih dahulu dalam larutan asam kuat.

4. Pompa Peristaltik

Pompa peristaltik digunakan untuk mengalirkan air lindi dari *feed tank* menuju inlet reaktor elektrokimia. Dalam Scialdone *et al.* (2009) proses oksidasi elektrokimia tanpa penambahan NaCl sudah mampu mengkonversi polutan organik sebesar 98%, yaitu pada BDD dengan kondisi debit 0,2 L menit⁻¹, kerapatan arus 39 mA cm⁻². Sementara pada DSA diperlukan debit yang lebih tinggi yaitu 1,2 L menit⁻¹ dan arus yang lebih rendah yaitu 17 mA cm⁻². Sehingga debit yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 5 mL s⁻¹. Peningkatan debit pada reaktor *undivided cell* dengan anoda aktif akan memberikan efek negatif yaitu penurunan produksi klorin pada anoda dan menghalangi proses oksidasi tidak langsung.

5. Kabel

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

6. DC Power Supply

DC *power supply* ini berfungsi sebagai sumber listrik pada proses elektrooksidasi lindi. Spesifikasi DC *power supply* yang digunakan adalah dengan arus listrik 0-3 A dan tegangan 0-30 V. Dalam penelitian ini, DC *Power Supply* akan di setting *constant current*, yang artinya kuat arus yang digunakan selama operasi reaktor dibuat konstan, sehingga yang berubah adalah tegangannya.

7. Selang

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

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 duran. Ukuran *feed tank* yang digunakan pada penelitian adalah 2 L.

9. *Copper Tape* dan Kawat Tembaga

Fungsi *copper tape* dan kawat tembaga pada penelitian ini adalah untuk menghubungkan elektroda dengan DC *power supply*.

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

1. Lindi yang digunakan dalam penelitian ini adalah lindi yang berasal dari inlet ABR TPA Ngipik, Gresik. Kemudian dilakukan pengolahan pendahuluan secara biologis dengan MBBR skala laboratorium. Uji karakteristik awal lindi dilakukan dalam penelitian ini sebagai antisipasi adanya perubahan sifat fisik dan kimia pada bahan uji.
2. Reagen
Reagen yang digunakan untuk analisis parameter meliputi COD, BOD₅, TDS, pH, klorin, klorida, nitrat, nitrit, amonium, dan total N.

3.6 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Uji karakteristik awal lindi dari TPA Ngipik Gresik.
2. Pengolahan pendahuluan lindi dengan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dan melakukan pengujian pada parameter amonium, nitrit, dan nitrat.
3. Penentuan Kuat Arus dan Waktu Operasi.

Tiap jenis anoda diuji menggunakan sampel lindi yang telah terolah dengan MBBR. Densitas arus maksimum pada jam ke-9, 12 dan 24 adalah 51 mA cm⁻²; 29,25 mA cm⁻²; dan 13,375 mA cm⁻², serta didapatkan penyisihan COD sebesar 77% dengan kerapatan arus 50 mA cm⁻² dan waktu operasi 8 jam (Novitasari, 2018). Dalam Agustina (2018), pengolahan lindi dengan BDD pada waktu operasional selama 6 jam dan kerapatan arus 75 mA cm⁻² terjadi penurunan terhadap COD sebesar 37%. Sementara pada Hartati (2018), anoda DSA (Ti/IrO₂) mampu menurunkan COD sebesar 54% pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² dengan 4 jam waktu operasi.

Kerapatan arus dan waktu operasi ditentukan berdasarkan tingkat penyisihan COD dan tegangan pada kuat arus yang ditetapkan.

3.7 Penelitian Utama

Setelah didapatkan waktu operasi, kemudian dilakukan penelitian dengan variasi terhadap jenis anoda dan kuat arus. Variasi dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Matriks Variasi Bahan Uji Penelitian

Kuat Arus (mA)	Jenis Anoda		
	BDD (A)	Ti/IrO ₂ (B)	Ti/Pt (C)
Kuat arus 1 (I ₁)	Al ₁	Bl ₁	Cl ₁
Kuat arus 2 (I ₂)	Al ₂	Bl ₂	Cl ₂
Kuat arus 3 (I ₃)	Al ₃	Bl ₃	Cl ₃

Keterangan:

- Al₁ : Anoda BDD dengan kuat arus 1
- Al₂ : Anoda BDD dengan kuat arus 2
- Al₃ : Anoda BDD dengan kuat arus 3
- Bl₁ : Anoda Ti/IrO₂ dengan kuat arus 1
- Bl₂ : Anoda Ti/IrO₂ dengan kuat arus 2
- Bl₃ : Anoda Ti/IrO₂ dengan kuat arus 3
- Cl₁ : Anoda Ti/Pt dengan kuat arus 1
- Cl₂ : Anoda Ti/Pt dengan kuat arus 2
- Cl₃ : Anoda Ti/Pt dengan kuat arus 3

3.8 Analisis Data

Melakukan analisis dan pembahasan terhadap kualitas efluen yang dihasilkan dari parameter COD, BOD₅, TDS, pH, klorin, klorida, nitrat, nitrit, amonium, dan TKN. Kemudian dianalisis dan dibahas mengenai pengaruh kerapatan arus pada tiap jenis anoda terhadap penyisihan polutan organik pada lindi hasil proses biologis. 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 bertujuan untuk mengetahui karakteristik awal sampel lindi, yang kemudian akan dilakukan *pre-treatment* secara biologis dengan menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR).

4.1.1 Karakteristik Awal Lindi

Lindi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari TPA Ngipik, Gresik. Lindi diambil pada inlet bak *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) saat musim hujan. Karakteristik lindi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik Lindi TPA Ngipik

Parameter	Satuan	Konsentrasi
pH		8,47
TSS	mg L ⁻¹	40
TDS	mg L ⁻¹	3100
COD	mg O ₂ L ⁻¹	1440
BOD ₅	mg O ₂ L ⁻¹	323
BOD ₅ /COD		0,224
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	54,71
NO ₂ ⁻	mg L ⁻¹	23,4
NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	78,3
Cl ⁻	mg L ⁻¹	1899

Lindi TPA Ngipik, Gresik dengan nilai pH 8,47 masuk pada rentang pH 7-9 yang menunjukkan bahwa lindi telah melewati fase asidifikasi (Wang *et al.*, 2003). Selain itu, rasio BOD/COD yang mendekati 0,2 menunjukkan bahwa lindi kurang *biodegradable*. Pada Kurniawan *et al.* (2010), lindi bersifat *biodegradable* pada rasio BOD/COD 0,4-0,7 yang mana biasanya tergolong lindi muda. Menurut Martensson *et al.* (1999), seiring bertambahnya usia TPA bakteri metanogenik yang ada akan menyisihkan semua senyawa organik menjadi biogas (metana). Akibatnya, menyisakan bahan organik *non-biodegradable* dan dekomposisi anaerobik menjadi dominan. Proses ini menghasilkan lindi stabil dengan konsentrasi amonium dan COD yang tinggi yaitu 400-5000 mg L⁻¹ dan

5000-20000 mg L⁻¹ (Ehrig, 1983). Parameter amonium dan COD pada sampel lindi tidak mencapai kisaran kemungkinan terjadi karena adanya pengenceran oleh air hujan.

4.1.2 Pembenihan dan Aklimatisasi

Tahap pembenihan dan aklimatisasi dilakukan untuk mengembangbiakan serta mengkondisikan mikroorganisme hingga mencapai kondisi stabil dalam mendegradasi zat organik pada lindi. Mikroorganisme didapat dari *return activated sludge* pada unit *clarifier* IPLT Keputih. Reaktor yang digunakan untuk pembenihan-aklimatisasi terbuat dari plastik berbentuk bak tabung yang dilengkapi pompa *submersible* dan aerator. Proses pembenihan-aklimatisasi dimulai dengan mencampurkan sumber organik yang terdiri dari 30% lindi dan 70% sukrosa pada 18 L lumpur, kemudian diaerasi selama 7 hari. Penambahan sukrosa (dalam bentuk gula pasir) berfungsi sebagai sumber organik bagi mikroorganisme sebelum nantinya mengolah 100% lindi di dalam reaktor (Qaderi *et al.*, 2011). Selanjutnya komposisi sumber organik diganti menjadi 50% lindi dan 50% sukrosa. Pada hari ke-14 pembenihan-aklimatisasi, komposisi tersebut diganti menjadi 70% lindi dan 30% sukrosa yang dilakukan selama 7 hari.

Untuk mengetahui kondisi *steady state* pada pengolahan, maka dilakukan pengukuran COD. Menurut Chen *et al.* (2008), kondisi *steady state* umumnya ditandai dengan diperolehnya efluen sampel yang telah mencapai nilai efisiensi penyisihan COD sebesar 80%. Setelah mencapai kondisi *steady state* yaitu pada hari ke-21, sejumlah sampel disimpan di dalam tangki sebagai stok lumpur yang sudah teraklimatisasi.

Selama proses pembenihan-aklimatisasi dilakukan pula *settleability solid test* untuk mengetahui banyaknya lumpur dan waktu pengendapan lumpur yang dibutuhkan dalam reaktor MBBR. Pada hari ke-21 dilakukan pengurusan/ *decanting supernatant*. Hasil *settleability solid test* menunjukkan bahwa 1 L lumpur membutuhkan waktu pengendapan selama 3 jam, dengan endapan lumpur sebanyak 200 mL. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah lumpur yang dibutuhkan untuk mengolah 30 L lindi adalah sebanyak 6 L. Berikut merupakan gambar *settleability solid test* yang dilakukan pada *imhoffcone*.



Gambar 4.1 *Settleability Solid Test*

Kemudian dianalisis karakteristik lumpur yang meliputi MLSS dan MLVSS sebagai indikator pertumbuhan mikroorganisme dalam reaktor. MLSS merupakan jumlah padatan organik dan mineral yang tersuspensi, termasuk mikroorganisme di dalam larutan yang tercampur. Hasil pengukuran lumpur setelah proses pembenihan-aklimatisasi dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Karakteristik Lumpur Pasca Pembenihan-Aklimatisasi

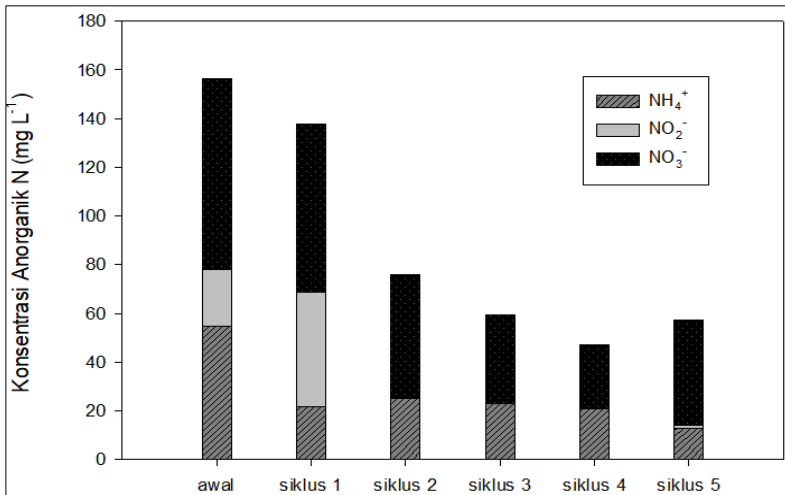
Parameter	Satuan	Konsentrasi
MLSS	mg L ⁻¹	5880
MLVSS	mg L ⁻¹	5316

Perbandingan MLVSS terhadap MLSS menunjukkan nilai diatas 0,6 yang berarti mikroorganisme mampu beradaptasi dan menggunakan lindi sebagai sumber makanan bagi pertumbuhannya (Karmany, 2001). Dicek pula nilai rasio F/M, dimana nilai perbandingan F/M = 0,06 (berdasarkan nilai BOD₅ terhadap MLVSS) dan F/M = 0,27 (berdasarkan nilai COD terhadap MLVSS). Pada penelitian pengolahan lumpur aktif yang dilakukan oleh Kurniasari dan Anggaeni (2014), COD 2250 mg L⁻¹ mampu diturunkan sebesar 23,1% dengan rasio F/M 0,21.

4.1.3 Pengolahan Pendahuluan Secara Biologis

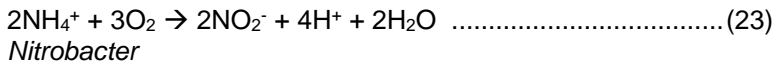
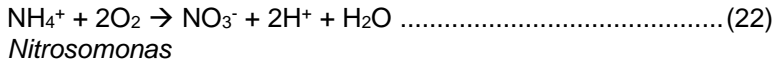
MBBR menggunakan media Kaldness 1 dijalankan dengan durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam setiap 1 (satu) siklusnya. Menurut Chen *et al.* (2008), penurunan konsentrasi amonium akan optimum ketika proses aerobik di dalam MBBR lebih dari 1,25 hari (>30 jam) karena adanya asimilasi mikroorganisme dan nitrifikasi.

Influen lindi yang diolah dengan MBBR dengan rasio COD/amonium yaitu 38,39 mampu menyisihkan 63% amonium, 47% nitrit, dan 4,1% denitrifikasi (Imana, 2018). Penerapan rasio COD/amonium pada rentang 2-10 oleh Yadu *et al.* (2018), didapatkan bahwa removal amonium tertinggi pada radio COD/amonium terendah. Konsentrasi nitrogen sebagai NH_4^+ , NO_2^- , dan NO_3^- selama proses biologis pada MBBR dapat dilihat pada Gambar 4.2.

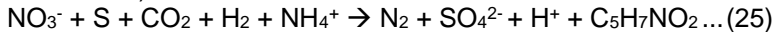


Gambar 4.2 Konsentrasi NH_4^+ , NO_2^- , dan NO_3^- Selama Proses Biologis MBBR

Pengolahan dengan MBBR yang dilakukan pada kondisi COD/amonium 26,32 ini, mampu menyisihkan 66% amonium, 100% nitrit, dan 27% nitrat. Penyisihan nitrogen terjadi karena proses nitrifikasi-denitrifikasi. Proses nitrifikasi terjadi dalam dua tahap yang tidak dapat berbalik (*irreversible*), dimana keduanya dilakukan oleh organisme nitrifikasi yang spesifik (Wang *et al.*, 2005). *Nitrosomonas* mengoksidasi NH_4^+ menjadi nitrit pada kondisi aerobik, sementara *Nitrobacter* mengkonversi nitrit menjadi nitrat, yang relatif tidak berbahaya (Ehrig and Stegmann, 1992). Proses nitrifikasi dijabarkan dalam reaksi-reaksi berikut:



Selanjutnya diperlukan proses denitrifikasi untuk mengurangi konsentrasi nitrat. Proses ini akan mengkonversi nitrat menjadi gas N₂, N₂O, atau NO₂. Reaksi denitrifikasi adalah sebagai berikut (Im *et al.*, 2001):



Gambar 4.2 menunjukkan diakhir pengamatan yaitu pada siklus ke-5 terjadi peningkatan konsentrasi nitrat (NO₃⁻). Produk akhir oksidasi amonium adalah nitrat, sehingga diperlukan proses reduksi nitrat untuk kembali menjadi gas nitrogen (denitrifikasi). Proses ini dilakukan oleh spesies bakteri *Pseudomonas* dan *Clostridium* dalam kondisi anaerobik. Ketersediaan oksigen dalam reaktor menyebabkan hanya terjadi kondisi aerobik dan anoksik, sehingga pengkonversian nitrat menjadi gas N₂, N₂O, atau NO₂ bisa saja tidak terjadi. Hasil pengolahan MBBR tersaji pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Karakteristik Lindi yang Diolah pada MBBR

Parameter	Satuan	Konsentrasi		Removal (%)
		Awal	Akhir	
pH	-	8,47	8,3	-
TSS	mg L ⁻¹	40	68	-
TDS	mg L ⁻¹	3100	1865	40
COD	mg O ₂ L ⁻¹	1440	816	43
BOD ₅	mg O ₂ L ⁻¹	323	212	34,3
BOD ₅ /COD		0,224	0,26	-
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	54,71	13,6	75
NO ₂ ⁻	mg L ⁻¹	23,4	1,09	95
NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	78,3	42,31	46
Cl ⁻	mg L ⁻¹	1899	999,7	47

Data di atas (Tabel 4.3) menunjukkan bahwa lindi hasil pengolahan biologis masih mengandung konsentrasi polutan organik maupun anorganik yang tinggi. Degradasi biologis efektif bila lindi memiliki nilai BOD yang tinggi, namun tidak efisien karena tingginya senyawa organik *non-biodegradable* (Cossu *et al.*,

1998). Pengolahan dengan elektooksidasi mampu menyisihkan polutan organik *non-biodegradable* dan amonium pada pembentukan oksidasi kuat seperti *OH dan klorin bebas (Ding *et al.*, 2014 dan Bagastyo *et al.*, 2014). Berdasarkan Li *et al.* (2001), tingkat penyisihan COD meningkat pada konsentrasi ion klorida antara 2500 mg L⁻¹ hingga 5000 mg L⁻¹. Diketahui bahwa ion klorida hasil pengolahan MBBR mengalami penurunan, sehingga hal ini dapat menurunkan tingkat penyisihan COD.

Sebelum digunakan pada proses elektooksidasi lindi terlebih dahulu disaring dengan kertas saring kasar. Kemudian diukur konsentrasi TSS lindi dan didapatkan nilai 20 mg L⁻¹. Hal ini dilakukan untuk mengurangi padatan tersuspensi yang dapat mengganggu proses elektooksidasi.

4.1.4 Penentuan Kuat Arus dan Waktu Operasi

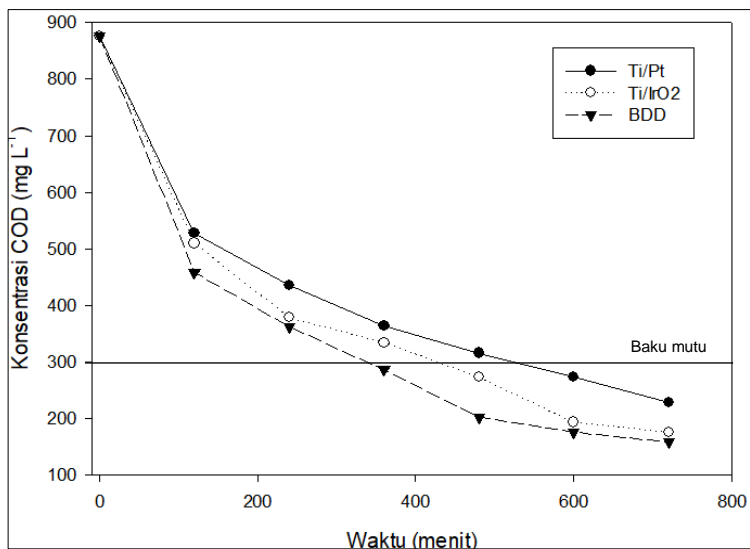
Tegangan merupakan kontrol konsumsi energi yang diperlukan untuk mengalirkan arus listrik. Penentuan variasi kuat arus dilakukan dengan cara mencari arus pada kisaran *voltase* 10-20 volt. Tabel 4.4 merupakan tabel kuat arus (mA) dengan tegangan (volt) pada tiap jenis anoda.

Tabel 4.4 Penentuan Kuat Arus Berdasarkan *Voltase*

Elektroda (Anoda-Katoda)					
Ti/IrO ₂ - SS		Ti/Pt - SS		BDD - SS	
Arus (mA)	Tegangan (volt)	Arus (mA)	Tegangan (volt)	Arus (mA)	Tegangan (volt)
250	12,1	250	10,3	250	10,2
275	13,1	275	11,0	275	10,8
300	14,1	300	11,7	300	11,3
325	14,9	325	12,4	325	11,9
350	15,9	350	13,1	350	12,5
375	16,8	375	13,8	375	13,0
400	17,7	400	14,6	400	13,5
425	18,6	425	15,2	425	14,1
450	19,4	450	16,2	450	14,6

Semakin tinggi tegangan maka semakin banyak kuat arus yang mengalir dan semakin banyak pula penyisihan total karbon (Turro *et al.*, 2012). Namun, peningkatan kerapatan arus pada titik

tertentu akan mengurangi penyisihan COD karena meningkatnya evolusi klorin yang menekan oksidasi senyawa organik (Zhang *et al.*, 2011). Persen penyisihan COD pada anoda BDD meningkat pada kerapatan arus 50-100 mA cm⁻² (Agustina, 2018). Menurut Zhou *et al.* (2016) bila arus ditingkatkan lebih dari 100 mA cm⁻² tidak terjadi peningkatan oksidasi senyawa organik yang signifikan. Pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa penerapan arus yang sama akan menghasilkan tegangan yang berbeda, elektroda BDD-SS memiliki tegangan yang lebih kecil dibanding elektroda Ti/Pt-SS dan Ti/IrO₂-SS. Panizza dan Cerisola (2009) menjelaskan bahwa anoda ruthenium, iridium, titanium oksida umumnya memiliki efisiensi arus yang rendah karena kecenderungannya pada evolusi oksigen. Dari pertimbangan tersebut maka, maka kuat arus yang dipilih pada penelitian ini yaitu 350 mA (59,38 mA cm⁻²) 400 mA (66,67 mA cm⁻²), dan 450 mA (75 mA cm⁻²). Setelah didapatkan tiga variasi kuat arus dilakukan penelitian pendahuluan dengan kuat arus terbesar yaitu 450 mA dan pengondisian nilai pH awal 6.



Gambar 4.3 Grafik Penurunan Konsentrasi COD Tiap Anoda pada Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan selama 12 jam dengan menganalisis penyisihan COD setiap 2 jam sekali. Data hasil analisis tertera pada Lampiran 2, Tabel L2.1. Grafik pada Gambar 4.3 merupakan hasil analisis COD tiap anoda pada penelitian pendahuluan.

Berdasarkan Gambar 4.3, diketahui bahwa proses elektrooksidasi menggunakan anoda Ti/Pt, Ti/IrO₂, dan BDD dapat menurunkan konsentrasi COD seiring dengan bertambahnya waktu. Pada semua jenis anoda penyisihan signifikan terjadi di awal proses yaitu pada menit ke-120. Penurunan konsentrasi COD ini dikarenakan terjadinya proses oksidasi langsung yang dominan dan masih banyak tersedia senyawa organik untuk dioksidasi. Persen penyisihan pada anoda Ti/Pt, Ti/IrO₂, dan BDD di menit ke-120 berturut-turut sebesar 40%, 42%, dan 62%. Waktu operasi yang akan digunakan pada penelitian ini didasarkan pada waktu dimana konsentrasi COD telah memenuhi baku mutu dengan nilai 300 mg L⁻¹. Sehingga waktu operasi selama 600 menit (10 jam) dipilih karena pada parameter COD ketiga jenis anoda telah memenuhi baku mutu.

4.2 Penelitian Utama

Pelaksanaan penelitian utama ini bertujuan untuk menentukan kuat arus optimum untuk tiap jenis anoda sehingga pengolahan lanjutan menggunakan elektrooksidasi ini dapat memenuhi baku mutu dengan konsumsi energi seminimal mungkin. Nilai pH 8,47 dikondisikan menjadi 6 untuk meningkatkan penyisihan senyawa organik. Pada pH asam konsentrasi ion karbonat (CO₃²⁻) dan bikarbonat (HCO₃⁻) berkurang sehingga meningkatkan laju reaksi oksidasi (Angdala *et al.*, 2010). Selain itu, secara teoritis kondisi pH asam lebih menguntungkan dalam mengurangi reaksi evolusi oksigen yang tidak diinginkan. Pengambilan sampel dilakukan pada 7 (tujuh) garis waktu, yaitu t₀ (awal), t₁ (60 menit), t₂ (120 menit), t₃ (180 menit), t₄ (300 menit), t₅ (420 menit) dan t₆ (600 menit). Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk grafik dan tabel.

4.2.1 Pengaruh Kuat Arus Terhadap Penyisihan COD

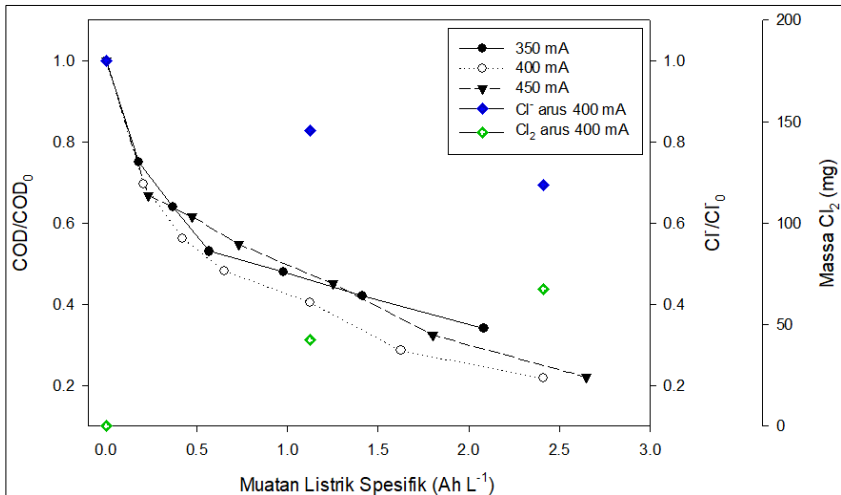
Penyisihan parameter senyawa organik yang terhitung sebagai COD, menunjukkan presentase nilai COD yang tersisa

selama proses elektrooksidasi. Gambar (4.4)-(4.6) merupakan grafik penurunan nilai COD pada lindi yang diolah menggunakan anoda Ti/Pt, Ti/IrO₂, dan BDD dengan 3 (tiga) variasi kuat arus yaitu 350, 400, dan 450 mA. Grafik tersebut menampilkan nilai rasio (COD/COD₀) yang menyatakan massa COD pada waktu (t) banding massa COD pada awal proses. Garis x sebagai muatan listrik spesifik menunjukkan besarnya muatan listrik (kuat arus dikalikan waktu operasi) per- volume lindi yang terolah.

Mandal *et al.* (2017) menjelaskan bahwa selama proses elektrolisis tidak langsung, agen pengoksidasi sebagai penghancur polutan akan terbentuk pada *bulk solution*. Oksidan yang umum terbentuk adalah klorin karena adanya oksidasi klorida yang banyak terkandung dalam lindi. Rangkaian reaksi pembentukan klorin dan hipoklorit selama proses oksidasi tidak langsung dapat dilihat pada persamaan 6 sampai 12 (halaman 16). Gambar (4.4)-(4.6) juga menunjukkan adanya oksidasi klorida menjadi klorin yang berbanding lurus pada penyisihan COD.

(1) Penyisihan COD pada Anoda Ti/Pt

Grafik pada Gambar 4.4 (halaman 50) menunjukkan bahwa pada awal proses terjadi penurunan COD yang signifikan dengan penyisihan dan kebutuhan muatan listrik yang hampir sama untuk semua kuat arus. Kadar COD turun seiring dengan lamanya waktu operasi pada setiap variasi arus. Pada akhir proses, arus 350 mA dengan muatan listrik sebesar 2,08 Ah L⁻¹ mampu menyisihkan 1,09 g (66%) COD. Sementara, arus 400 mA (2,41 Ah L⁻¹) dan 450 mA (2,65 Ah L⁻¹) menghasilkan penyisihan COD dengan kadar yang sama yaitu 1,34 g (78%). Semakin besar kuat arus maka penyisihan COD semakin besar pula, hal ini terjadi pada peningkatan arus 300 mA ke 400 mA. Namun penggunaan kuat arus lebih besar yaitu 450 mA, tidak meningkatkan penyisihan COD. Menurut Ding *et al.* (2018) peningkatan efisiensi removal COD signifikan terjadi pada muatan listrik dibawah 2 Ah L⁻¹. Hal yang sama juga terjadi pada arus 400 mA, pada muatan listrik 1,12 – 1,63 Ah L⁻¹ penyisihan COD sebesar 0,21 g, sementara pada muatan 1,63 – 2,41 Ah L⁻¹ penyisihan COD hanya 0,07 g. Data hasil analisis COD pada anoda Ti/Pt terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.2.

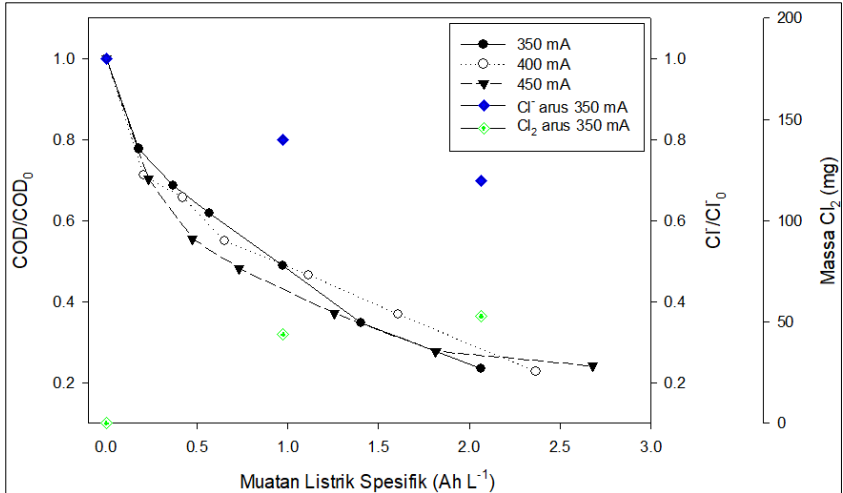


Gambar 4.4 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda Ti/Pt

(2) Penyisihan COD pada Anoda Ti/IrO₂

Dari grafik pada Gambar 4.5 terlihat bahwa penambahan waktu operasi meningkatkan penyisihan nilai COD pada semua variasi arus yang diterapkan. Pada akhir proses oksidasi elektrokimia dengan waktu operasi 10 jam, didapatkan penyisihan COD sebesar 1,26 g (76%); 1,28 g (77%); dan 1,37 g (79%) untuk masing masing kuat arus 350 mA; 400 mA; dan 450 mA. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kuat arus yang diterapkan pada anoda Ti/IrO₂ tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan COD sementara kebutuhan muatan listrik semakin meningkat. Sesuai Quan *et al.* (2013) yang meneliti kerapatan arus dengan *range* 13-78 mA cm⁻², menunjukkan bahwa peningkatan COD efektif pada kerapatan arus hingga 65 mA cm⁻². Muatan listrik spesifik yang diperlukan untuk menyisihkan 76% COD pada kuat arus 350 mA yaitu 2,06 A L⁻¹. Penyisihan COD sebesar 77% pada arus 400 mA dicapai dengan muatan listrik spesifik 2,37 Ah L⁻¹. Sementara, kuat arus 450 mA memerlukan muatan listrik spesifik sebesar 2,68 Ah L⁻¹ untuk 80% penyisihan

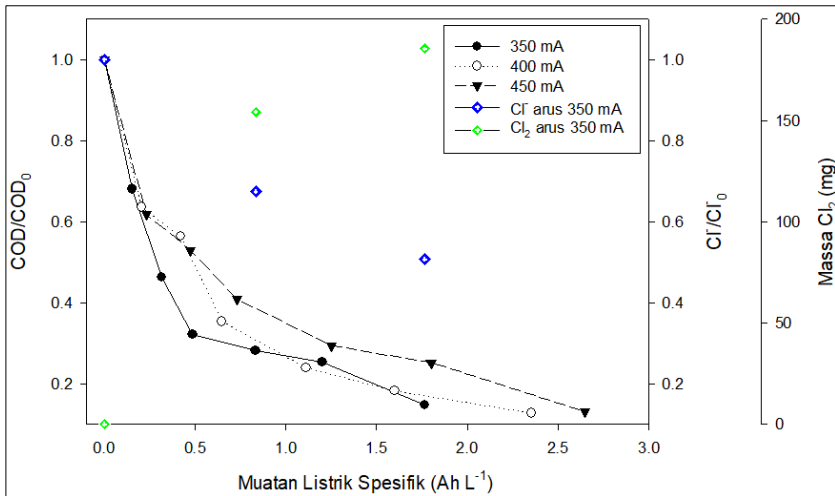
COD. Data lengkap hasil analisis COD terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.3



Gambar 4.5 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda Ti/IrO₂

(3) Penyisihan COD pada Anoda BDD

Gambar 4.6 merupakan grafik penurunan nilai COD pada BDD dengan 3 (tiga) variasi kuat arus yaitu 350, 400, dan 450 mA. Pada waktu operasi 3 jam, penerapan kuat arus terkecil yaitu 350 mA menunjukkan penyisihan COD yang paling besar. Kemudian, pada akhir proses oksidasi elektrokimia dengan waktu operasi 10 jam, didapatkan penyisihan COD sebesar 1,46 g (85%); 1,44 g (87%); dan 1,44 g (87%) untuk masing-masing kuat arus 350 mA; 400 mA; dan 450 mA. Muatan listrik spesifik yang diperlukan untuk menyisihkan 85% COD pada kuat arus 350 mA yaitu 1,76 Ah L⁻¹. Sementara, penyisihan COD sebesar 87% pada arus 400 mA dan 450 mA memerlukan muatan listrik spesifik masing-masing sebesar 2,35 Ah L⁻¹ dan 2,65 Ah L⁻¹. Data lengkap hasil analisis COD terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.4.



Gambar 4.6 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda BDD

Anoda BDD menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (*OH) yang dapat mendegradasi senyawa organik hingga proses mineralisasinya (Ganiyu *et al.*, 2019). Namun menurut Panizza dan Cerisola (2009), produksi *OH tidak berbanding lurus terhadap kerapatan arus yang diterapkan karena terjadi pemborosan arus pada aktivasi elektroda dan reaksi samping seperti evolusi hidrogen. Selain itu, peningkatan kerapatan arus menyebabkan percepatan reaksi evolusi O₂ daripada oksidasi air sehingga mengurangi jumlah *OH yang tersedia untuk mengoksidasi polutan organik.

Jika dilakukan perbandingan hasil penyisihan COD antar jenis anoda, didapatkan persen penyisihan terbesar yaitu pada anoda BDD (87%) diikuti Ti/IrO₂ dan Ti/Pt masing masing 77% dan 78%. Menurut Comninellis (1994), jenis anoda berdasarkan reaksinya dengan *OH dibagi menjadi dua, yaitu anoda aktif (contoh: Ti/IrO₂, Ti/Pt) dan anoda tidak aktif (contoh: BDD). Permukaan anoda aktif interaksinya sangat kuat dengan *OH, sedangkan permukaan anoda tidak aktif interaksinya dengan *OH sangat lemah. Semakin rendah interaksinya, maka potensial O₂

semakin tinggi (evolusi oksigen semakin lemah), sehingga oksidasi senyawa organik akan semakin tinggi pula.

Ketiga anoda yang diujikan pada penelitian ini menunjukkan performa yang bagus dalam memproduksi *Reactive Chlorine Species* (RCS) dari oksidasi klorida. Kadar klorin paling tinggi dihasilkan oleh anoda BDD, menurut Ganiyu *et al.* (2019) hal ini dapat terjadi karena RCS merupakan oksidan sekunder pada proses elektrooksidasi menggunakan BDD. Sedangkan untuk degradasi dan mineralisasi polutan, *OH adalah oksidan mayor dan terkuat pada anoda BDD. Pada kondisi pH >8 oksidasi klorida dominan menghasilkan ClO^- yang dapat bereaksi dengan radikal hidroksil (persamaan (26)-(29)).



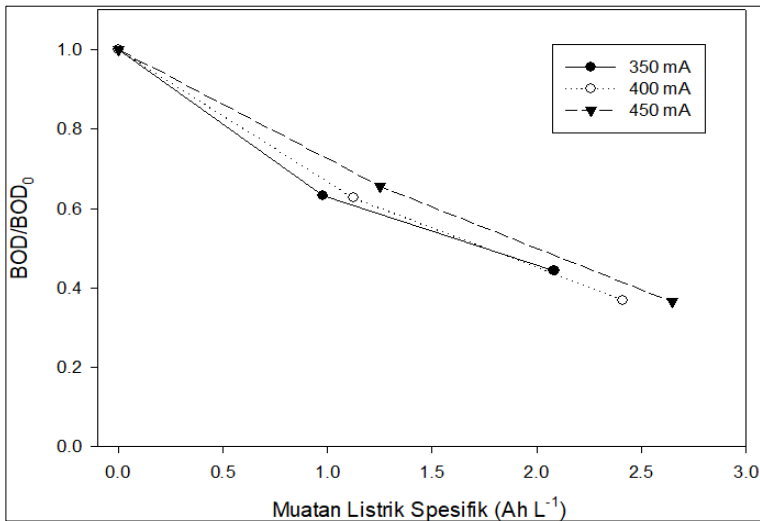
ClO_3^- dan ClO_4^- adalah spesies klor yang tidak diinginkan selama proses desinfeksi atau elektrooksidasi (Siries dan Brillas, 2012). Ion-ion tersebut bereaksi dengan senyawa organik membentuk produk samping (*Disinfectant By-Products*) organik terhalogenasi yang bersifat karsinogenik (Said, 2007). DBP yang umum ditemukan adalah trihalometana (THM) yang terbentuk dari asam hipoklorit. Menurut Kapalka *et al.* (2010), kondisi optimal dapat ditemukan dimana tingkat produksi klorin aktif elektrokimia sama dengan tingkat konsumsi oleh ammonia, sehingga menghambat pembentukan produk samping dan menjaga konsentrasi klorin aktif.

4.2.2 Pengaruh Kuat Arus Terhadap Penyisihan BOD

Berikut merupakan pembahasan pengaruh kuat arus terhadap penyisihan BOD pada tiap jenis anoda. Gambar (4.7)-(4.9) merupakan grafik penurunan nilai BOD pada lindi yang diolah menggunakan anoda Ti/Pt, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt dengan 3 (tiga) variasi kuat arus yaitu 350 mA, 400 mA, dan 450 mA.

(1) Penyisihan BOD pada Anoda Ti/Pt

Gambar 4.7 menunjukkan penyisihan BOD pada muatan listrik spesifik 0,98 Ah L⁻¹ (arus 350 mA; 5 jam); 1,12 Ah L⁻¹ (arus 400 mA; 5 jam); dan 1,25 Ah L⁻¹ (arus 450 mA; 5 jam) berturut-turut yaitu 0,149 g; 0,143 g; dan 1,29 g. Massa BOD terus mengalami penurunan seiring dengan lamanya proses oksidasi elektrokimia. Durasi proses selama 10 jam dengan arus 350 mA (2,08 Ah L⁻¹) mampu menyisihkan 0,225 g (56%) BOD. Penerapan kuat arus yang lebih tinggi juga meningkatkan persen penyisihan BOD, namun tidak signifikan pada arus 450 mA. Pada arus 400 mA (2,41 Ah L⁻¹) dan 450 mA (2,65 Ah L⁻¹) didapatkan penyisihan masing-masing sebesar 0,241 g (63%) dan 0,238 (64%). Data lengkap hasil analisis BOD terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.5.

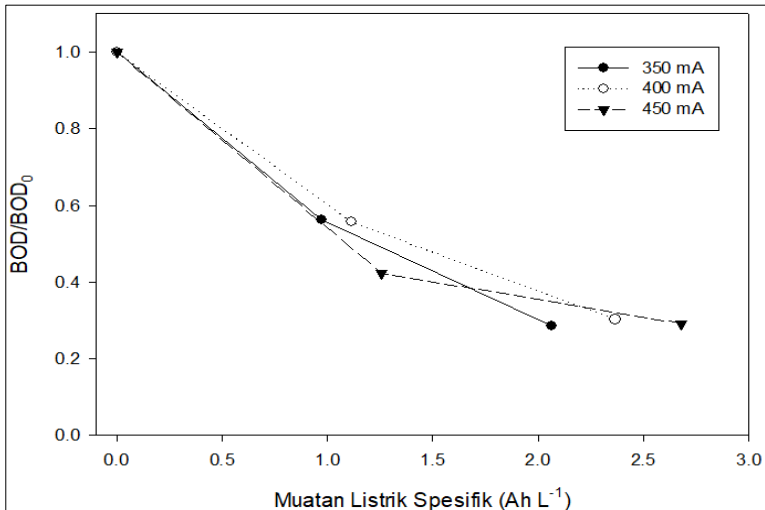


Gambar 4.7 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda Ti/Pt

(2) Penyisihan BOD pada Anoda Ti/IrO₂

Grafik penurunan nilai BOD pada lindi yang diolah menggunakan anoda Ti/IrO₂ dengan 3 (tiga) variasi kuat arus yaitu 350 mA, 400 mA, dan 450 mA dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Penerapan arus tertinggi yaitu 450 mA menunjukkan pengaruh penyisihan BOD terbaik (0,217 g) pada muatan listrik 1,26 Ah L⁻¹. Sementara arus 300 mA (0,97 Ah L⁻¹) dan 400 mA (1,11 Ah L⁻¹) menyisihkan BOD sebesar 0,177 g dan 0,168 g. Massa BOD terus mengalami penurunan hingga akhir proses. Durasi proses selama 10 jam dengan arus 350 mA (2,06 Ah L⁻¹) mampu menyisihkan 0,289 g (71%) BOD. Pada arus 400 mA (2,37 Ah L⁻¹) dan 450 mA (2,68 Ah L⁻¹) didapatkan penyisihan masing-masing sebesar 0,265 g (70%) dan 0,266 g (71%). Data lengkap hasil analisis BOD terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.6.

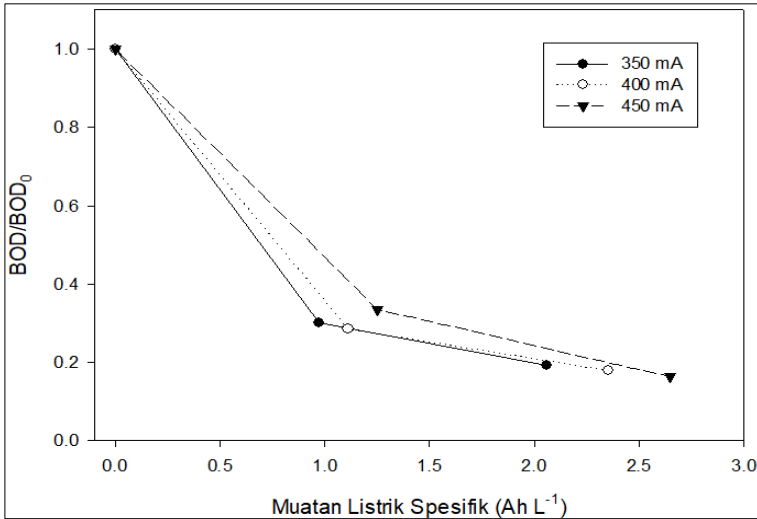


Gambar 4.8 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda Ti/IrO₂

(3) Penyisihan BOD pada Anoda BDD

Penerapan kuat arus yang lebih tinggi tidak berpengaruh signifikan terhadap peningkatan penyisihan BOD (Gambar 4.9). Durasi proses selama 10 jam dengan arus 350 mA mampu menyisihkan 0,308 g (81%) BOD. Pada arus 400 mA dan 450 mA didapatkan penyisihan masing-masing sebesar 0,313 g (82%) dan 0,314 g (84%). Muatan listrik spesifik untuk menyisihkan 81% BOD

pada arus 350 mA sebesar 2,06 Ah L⁻¹. Sementara, penyisihan 82% dan 44% BOD pada arus 400 mA dan 450 mA memerlukan muatan listrik spesifik berturut-turut yaitu 2,35 Ah L⁻¹ dan 2,65 Ah L⁻¹. Data lengkap hasil analisis BOD terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.7.



Gambar 4.9 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda BDD

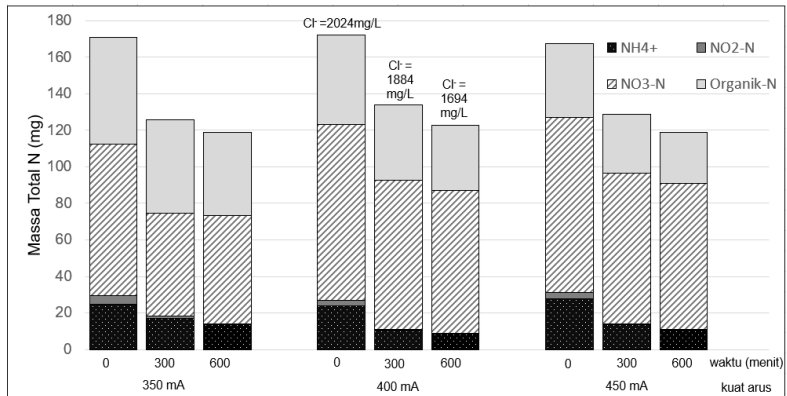
Grafik pada Gambar (4.6)–(4.9) menunjukkan tren yang sama dalam penyisihan BOD pada semua jenis anoda. Variasi kuat arus yang diterapkan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan penyisihan BOD bila dilihat pada akhir proses. Penyisihan massa BOD paling besar didapatkan pada anoda BDD dengan rata-rata penyisihan yaitu 0,312 g (82,1%), disusul anoda Ti/IrO₂ (0,274 g; 70,7%) dan anoda Ti/Pt (0,235 g; 60,7%). Comninellis (1994) menjelaskan bahwa, aktivitas oksidasi anoda Ti/IrO₂ dan Ti/Pt lebih dominan terjadi pada senyawa *non-biodegradable*.

4.2.3 Pengaruh Kuat Arus Terhadap Penyisihan Total Nitrogen

Pada penelitian ini, dekomposisi amonium menjadi nitrogen dan laju evolusi nitrogennya pada elektroda Ti/Pt, Ti/IrO₂, dan BDD akan dibandingkan dengan variasi arus yang diterapkan. Berikut merupakan pembahasan pengaruh kuat arus terhadap penyisihan Total N pada tiap jenis anoda. Gambar (4.10)–(4.12) merupakan perubahan massa Total Nitrogen pada lindi yang diolah menggunakan anoda Ti/Pt, Ti/IrO₂, dan BDD.

(1) Perubahan Nilai Total N pada Anoda Ti/Pt

Massa Total N menurun seiring bertambahnya waktu operasi pada setiap kuat arus yang diterapkan (Gambar 4.10). Massa awal Total N pada kuat arus 350 mA, 400 mA, dan 450 mA berturut-turut yaitu 171 mg; 172,4 mg; dan 167,4 mg. Penyisihan massa Total N setelah proses elektrooksidasi selama 10 jam pada kuat arus 350 mA, 400 mA, dan 450 mA berturut-turut yaitu 52,14 mg (30%); 49,61 mg (49%); dan 48,57 mg (29%). Selama proses oksidasi, penurunan massa amonium linear terhadap besarnya kuat arus yang diterapkan. Kuat arus 450 mA menurunkan amonium sebesar 0,0167 (60,6%); disusul arus 400 mA dan 350 mA yang menurunkan amonium sebesar 0,015 g dan 0,01 g.

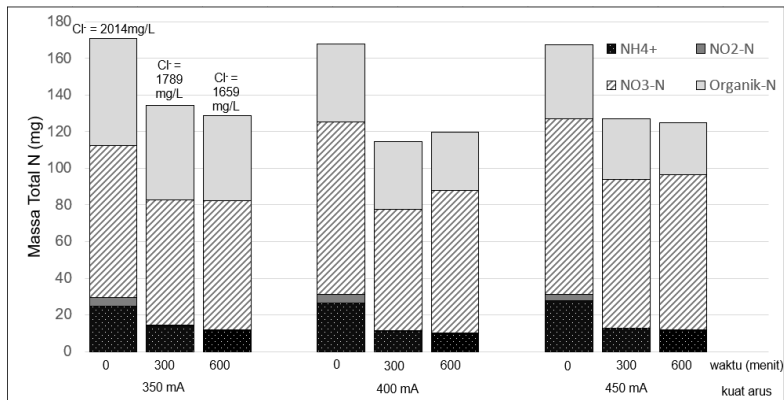


Gambar 4.10 Perubahan Massa Total N pada Anoda Ti/Pt untuk setiap Variasi Kuat Arus

Data hasil analisis Total N selengkapnya yang meliputi amonium (NH_4^+), nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-) dan organik N pada anoda Ti/Pt terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.8.

(2) Perubahan Nilai Total N pada Anoda Ti/IrO₂

Dari diagram tersebut dapat dilihat bahwa pada waktu operasi 300 menit (5 jam) terjadi penurunan massa total N pada setiap variasi kuat arus yang diterapkan (Gambar 4.11). Massa total N pada arus 350 mA, 400 mA, dan 450 mA dengan waktu operasi 300 menit berturut-turut yaitu 134 mg; 114,6 mg; dan 126,4 mg. Namun, pada waktu operasi 600 menit (10 jam) massa total N mengalami kenaikan yang umumnya disebabkan oleh naiknya massa nitrat (NO_3^- -N). Massa total N yang dapat disisihkan pada arus 350 mA, 400 mA, dan 450 mA berturut-turut yaitu 42,35 mg (24,7%); 47,91 mg (28,5%); 43,75 mg (26,1%). Data hasil analisis Total N selengkapnya yang meliputi amonium (NH_4^+), nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-) dan organik N pada anoda Ti/IrO₂ terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.9.

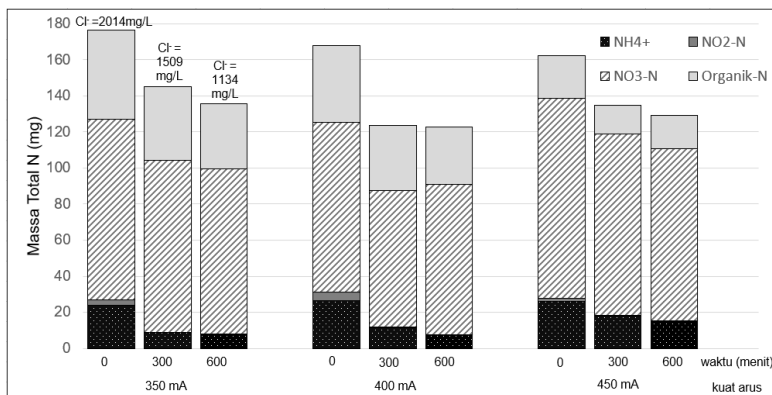


Gambar 4.11 Perubahan Massa Total N pada Anoda Ti/IrO₂ untuk setiap Variasi Kuat Arus

(3) Perubahan Nilai Total N pada Anoda BDD

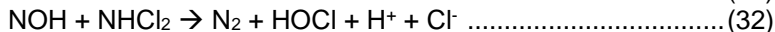
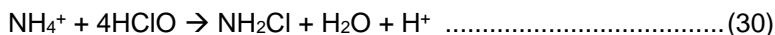
Gambar 4.12 merupakan perubahan massa total Nitrogen pada lindi dengan diolah menggunakan anoda BDD. Massa Total N menurun seiring bertambahnya waktu operasi pada setiap kuat

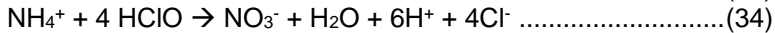
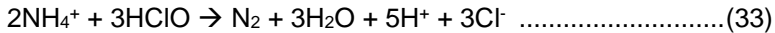
arus yang diterapkan. Penyisihan massa Total N setelah proses elektooksidasi selama 10 jam pada kuat arus 350 mA, 400 mA, dan 450 mA berturut-turut yaitu 40,57 mg (23%); 45,11 mg (26.8%); dan 33,3 mg (20.5%). Data hasil analisis total N selengkapnya yang meliputi amonium (NH_4^+), nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-) dan Organik N pada anoda BDD terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.10.



Gambar 4.12 Perubahan Massa Total N pada Anoda BDD untuk setiap Variasi Kuat Arus

Dilihat dari ketiga diagram batang massa total N diatas (Gambar 4.10–4.12) menunjukkan bahwa adanya penyisihan amonium selama proses elektooksidasi pada semua variasi arus dan jenis anoda. Percobaan yang dilakukan Kim *et al.* (2006), amonium terserap dominan pada anoda Ti/IrO_2 dan Ti/Pt dengan potensial dibawah 80 mA cm^{-2} . Namun pada potensial yang lebih tinggi ion hidroksil akan terserap lebih kuat pada anoda sehingga terjadi evolusi oksigen yang menurunkan reaksi evolusi nitrogen. Perez *et al.* (2012) menjelaskan bahwa degradasi amonium terjadi terutama karena oksidasi tidak langsung oleh Cl_2 atau HClO (persamaan (6)-(10) dan (30)-(34)).

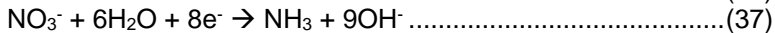
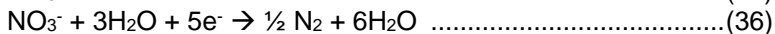
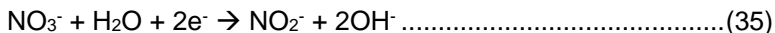




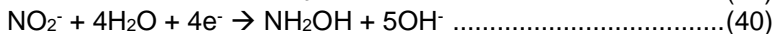
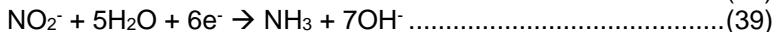
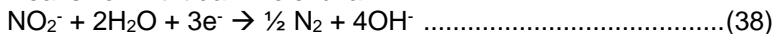
Kapakla *et al.* (2010) menjelaskan, klorin terbentuk karena adanya proses elektooksidasi ion klorida dan selanjutnya dihidrolisis menjadi asam hipoklorida. Kemudian, akan bereaksi dengan amonium untuk membentuk kloroamin yang terurai menjadi gas nitrogen, reaksi ini lebih dominan daripada oksidasi lebih lanjut menjadi klorat dan perklorat pada pH rendah.

Sementara, tidak terjadi penurunan kadar nitrat yang signifikan. Hal ini dapat terjadi karena oksidasi amonium lebih dominan dan katoda *stainless steel* kurang mampu mereduksi ion nitrat. Mekanisme reaksi penyisihan nitrat pada permukaan berdasarkan Mook *et al.* (2012) adalah sebagai berikut:

Reaksi ion nitrat dan molekul air



Reaksi ion nitrit dan molekul air



Material katoda yang pernah diuji-cobakan pada reduksi nitrat yaitu Zn, Cu, Ti, Fe, Pt, Cu/Ni, dan Cu/Zn. Kemampuan reduksi nitrat tertinggi ditunjukkan pada penggunaan katoda Cu/Zn, karena Cu merupakan katoda yang paling efektif dan penambahan Zn dapat meningkatkan aktivitas elektrokatalitik secara signifikan pada penyisihan nitrat (Fan *et al.*, 2003). Pada penelitian Li *et al.* (2009) aplikasi anoda Ti/Pt dan katoda Cu/Zn mampu menyisihkan nitrat sebesar 74% dengan pembentukan amonium 1,5 mg L⁻¹. Selain itu, efisiensi penyisihan nitrat tertinggi diperoleh pada nilai pH 7-8. Sedangkan pada pH 3 (asam) efisiensi akan rendah karena adanya pembentukan hidrogen di katoda selama reduksi nitrat (Kuang *et al.*, 2017). Kendala lain penyisihan nitrat pada penelitian ini yaitu, reaksi oksidasi-reduksi terjadi dalam satu kompartemen, hal ini dapat mengakibatkan ion yang telah

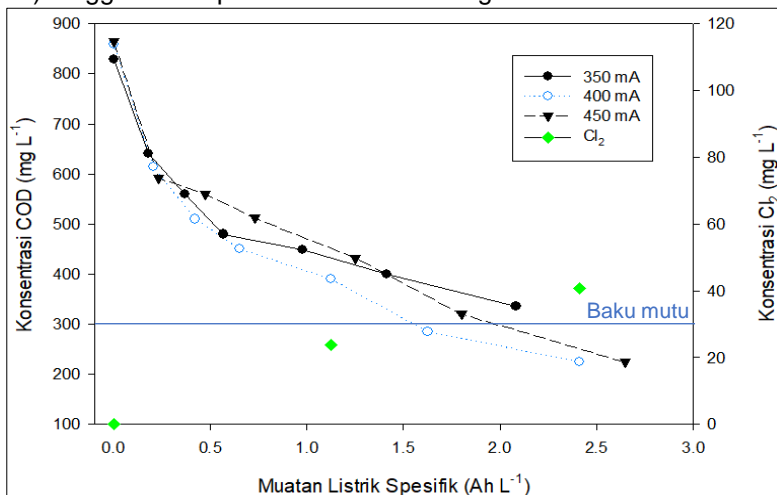
teroksidasi kembali tereduksi atau sebaliknya, sehingga penyisihan ion dalam reaktor sulit terjadi.

4.2.4 Baku Mutu

Pada penelitian ini, baku mutu untuk parameter COD, BOD, total N, dan pH dianalisis.

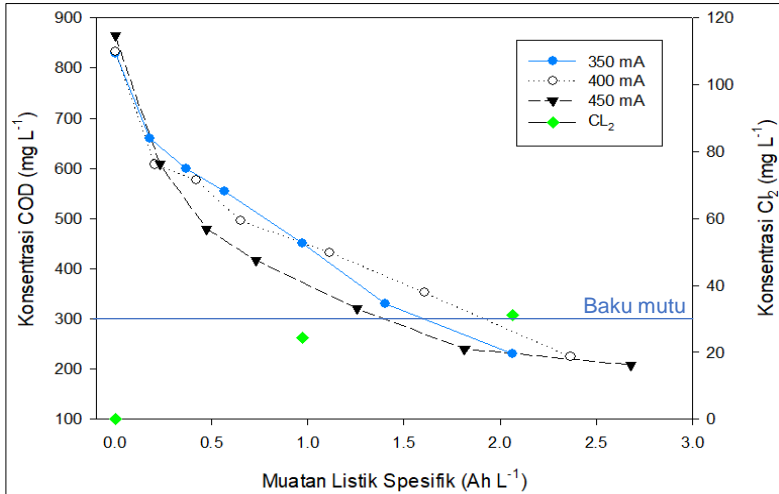
(1) Baku Mutu pada Parameter COD

Lindi yang mengandung Cl^- akan teroksidasi membentuk Cl_2 dimana molekul tersebut dapat terukur sebagai COD. Grafik pada Gambar 4.13 menunjukkan penurunan konsentrasi COD pada anoda Ti/Pt. Percobaan dengan arus 350 mA, belum mampu mencapai baku mutu hingga akhir waktu operasi, yaitu disisakan konsentrasi 336 mg L^{-1} COD dengan kebutuhan muatan listrik sebesar $2,08 \text{ Ah L}^{-1}$. Arus 400 mA pada jam ke-7 ($1,63 \text{ Ah L}^{-1}$) sudah mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD 285 mg L^{-1} dan terus mengalami penurunan pada jam ke-10 ($2,41 \text{ Ah L}^{-1}$) hingga mencapai konsentrasi 225 mg L^{-1} .



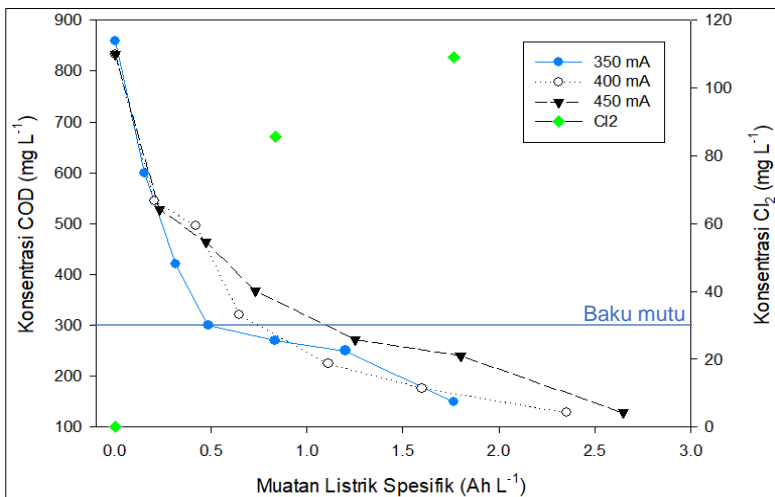
Gambar 4.13 Penurunan Konsentrasi COD pada Anoda Ti/Pt untuk Setiap Variasi Kuat Arus Arus tertinggi yang diterapkan, yaitu 450 mA mampu menurunkan COD hingga mencapai baku mutu pada jam ke-10 ($2,65 \text{ Ah L}^{-1}$)

dengan konsentrasi akhir 224 mg L⁻¹. Data hasil analisis COD pada anoda Ti/Pt selengkapnya terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.11.



Gambar 4.14 Penurunan Konsentrasi COD pada Anoda Ti/IrO₂ untuk Setiap Variasi Kuat Arus

Grafik pada Gambar 4.14 menunjukkan penurunan konsentrasi COD pada anoda Ti/IrO₂. Percobaan dengan arus 350 mA dan 400 mA, mampu mencapai baku mutu COD pada waktu operasi 10 jam, yaitu disisakan konsentrasi 230 mg L⁻¹ dan 224 mg L⁻¹ dengan kebutuhan muatan listrik sebesar 2,06 Ah L⁻¹ dan 2,37 Ah L⁻¹. Sementara pada arus 450 mA pada jam ke-7 (1,81 Ah L⁻¹) sudah mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD 240 mg L⁻¹ dan terus mengalami penurunan pada jam ke-10 (2,68 Ah L⁻¹) hingga mencapai konsentrasi 208 mg L⁻¹. Data hasil analisis COD pada anoda Ti/IrO₂ selengkapnya terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.12.

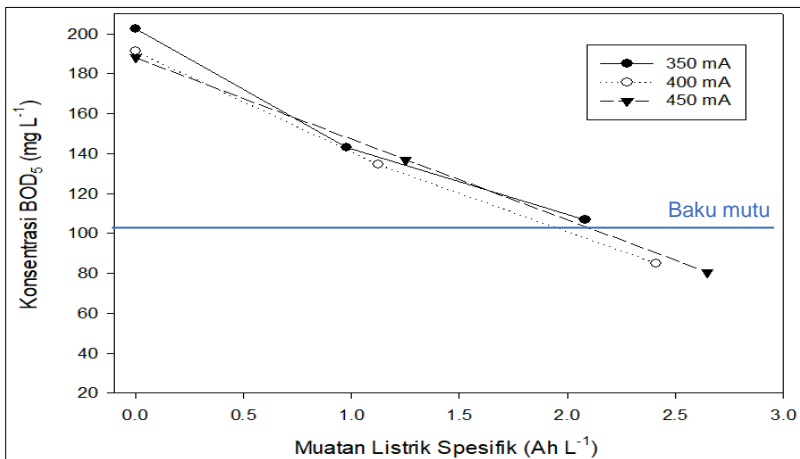


Gambar 4.15 Penurunan Konsentrasi COD pada Anoda BDD untuk Setiap Variasi Kuat Arus

Grafik pada Gambar 4.15 menunjukkan penurunan konsentrasi COD pada anoda BDD. Konsentrasi COD telah memenuhi baku mutu pada waktu operasi 5 jam untuk semua variasi kuat arus. Percobaan dengan arus 350 mA, mampu mencapai baku mutu dengan kebutuhan muatan listrik spesifik sebesar 0,83 Ah L⁻¹; 1,2 Ah L⁻¹; dan 1,7 Ah L⁻¹ untuk konsentrasi COD yang tersisa berturut-turut 270 mg L⁻¹; 250 mg L⁻¹; dan 150 mg L⁻¹. Penyisihan semakin tinggi pada arus 400 mA, didapatkan konsentrasi COD dengan nilai 224 mg L⁻¹; 276 mg L⁻¹; dan 128 mg L⁻¹ dengan kebutuhan muatan listrik spesifik masing-masing yaitu 1,1 Ah L⁻¹; 1,6 Ah L⁻¹; dan 2,3 Ah L⁻¹. Kemudian, pada arus 450 mA didapatkan konsentrasi COD dengan nilai 272 mg L⁻¹; 240 mg L⁻¹; dan 128 mg L⁻¹ dengan kebutuhan muatan listrik spesifik masing-masing yaitu 1,25 Ah L⁻¹, 1,8 Ah L⁻¹, dan 2,6 Ah L⁻¹. Data hasil analisis COD pada anoda BDD selengkapnya terdapat pada Lampiran 2 Tabel L2.13.

(2) Baku Mutu pada Parameter BOD

Grafik pada Gambar 4.16 menunjukkan bahwa baku mutu BOD pada anoda Ti/Pt dapat dicapai oleh arus 400 mA dan 450 mA. Kuat arus 400 mA membutuhkan muatan listrik spesifik sebesar 2,37 Ah L⁻¹ untuk menyisihkan 63% BOD sehingga menghasilkan efluen 85 mg L⁻¹. Pada kuat arus 450 mA penyisihan 64% didapatkan pada muatan listrik spesifik sebesar 2,64 Ah L⁻¹ dengan efluen BOD 80,6 mg L⁻¹. Rasio BOD₅/COD pada Anoda Ti/Pt diawal dan diakhir proses disajikan pada Tabel 4.6.

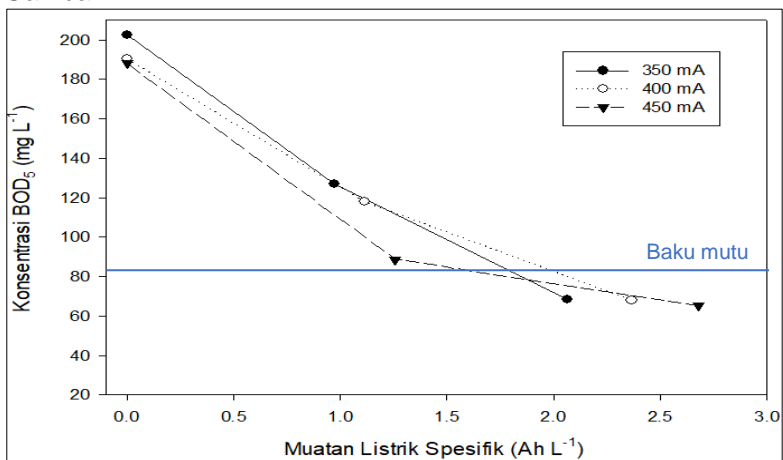


Gambar 4.16 Penurunan Konsentrasi BOD pada Anoda Ti/Pt untuk Setiap Variasi Kuat Arus

Tabel 4.6 Perubahan Nilai BOD₅/COD pada Anoda Ti/Pt

Kuat Arus	Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	ΔBOD ₅ (mg L ⁻¹)	ΔCOD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
350 mA	0,00	202,6	828	95,6	492	0,244
	2,08	107,0	336			0,318
400 mA	0,00	191,3	859	123,3	634	0,222
	2,41	68,0	225			0,302
450 mA	0,00	188	864	107,4	640	0,217
	2,65	80,6	224			0,359

Pada penggunaan anoda lain yaitu Ti/IrO_2 , di akhir proses, baku mutu BOD dapat tercapai pada semua kuat arus yang diterapkan (Gambar 4.17). Muatan listrik spesifik dengan nilai $2,08 \text{ Ah L}^{-1}$; $2,41 \text{ Ah L}^{-1}$; dan $2,65 \text{ Ah L}^{-1}$ pada kuat arus berturut-turut 350 mA ; 400 mA ; dan 450 mA mampu menurunkan konsentrasi BOD menjadi $68,35 \text{ mg L}^{-1}$; 68 mg L^{-1} ; dan $65,3 \text{ mg L}^{-1}$. Grafik penurunan konsentrasi BOD pada anoda Ti/IrO_2 tersaji pada Gambar 4.17.

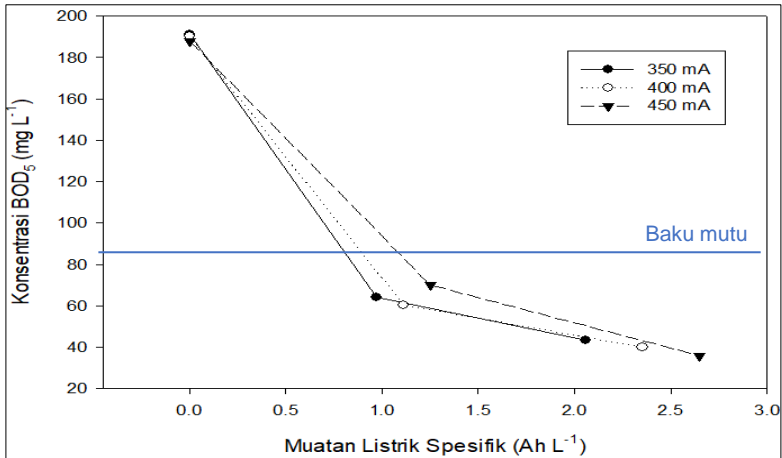


Gambar 4.17 Penurunan Konsentrasi BOD pada Anoda Ti/IrO_2 untuk Setiap Variasi Kuat Arus

Rasio BOD_5/COD pada Anoda Ti/IrO_2 diawal dan diakhir proses disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Perubahan Nilai BOD_5/COD pada Anoda Ti/IrO_2

Kuat Arus	Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	ΔBOD_5 (mg L ⁻¹)	ΔCOD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
350 mA	0,00	202,6	828	134,25	598	0,244
	2,06	68,35	230			0,297
400 mA	0,00	190,4	832	122,40	608	0,228
	2,37	68,00	224			0,303
450 mA	0,00	188,0	864	122,70	656	0,217
	2,68	65,30	208			0,313



Gambar 4.18 Penurunan Konsentrasi BOD pada Anoda BDD untuk Setiap Variasi Kuat Arus

Pada pengambilan sampel ditengah proses (waktu operasi 300 menit), baku mutu BOD dapat tercapai pada semua kuat arus yang diterapkan (Gambar 4.18). Sementara pada akhir proses, muatan listrik spesifik dengan nilai 1,76 Ah L⁻¹; 2,35 Ah L⁻¹; dan 2,65 Ah L⁻¹ pada kuat arus berturut-turut 350 mA; 400 mA; dan 450 mA mampu menurunkan konsentrasi BOD menjadi 43,40 mg L⁻¹; 40 mg L⁻¹; dan 36 mg L⁻¹. Rasio BOD₅/COD pada Anoda BDD diawal dan diakhir proses disajikan pada Tabel 4.8.

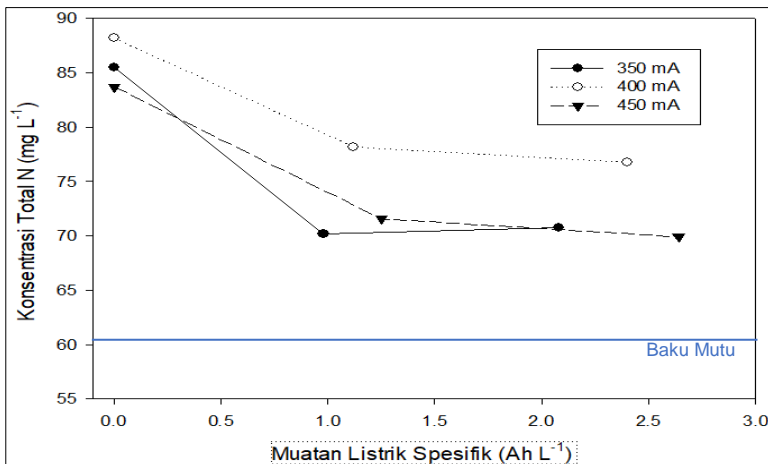
Tabel 4.8 Perubahan Nilai BOD₅/COD pada Anoda BDD

Kuat Arus	Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	ΔBOD ₅ (mg L ⁻¹)	ΔCOD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
350 mA	0,00	191,3	859	147,9	709	0,222
	1,76	43,40	150			0,289
400 mA	0,00	190,4	832	150,4	704	0,228
	2,35	40,00	128			0,312
450 mA	0,00	188,0	832	152,0	704	0,225
	2,65	36,00	128			0,281

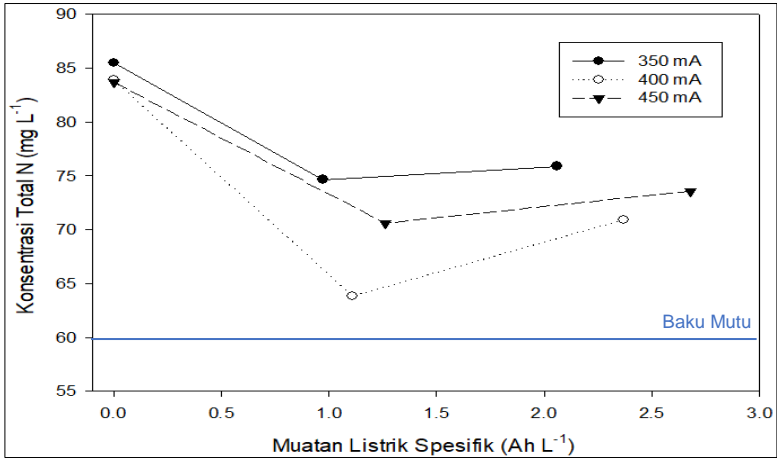
Perubahan nilai BOD/COD tiap jenis anoda dengan variasi kuat arus disajikan pada Tabel (4.5)–(4.8). Dapat diketahui bahwa peningkatan indeks biodegradabilitas terbaik pada anoda Ti/Pt arus 450 mA dengan peningkatan 0,142; disusul anoda Ti/IrO₂ arus 450 mA yaitu 0,096; dan anoda BDD pada arus 400 mA yaitu 0,084. Menurut Mandal *et al.* (2015), pada anoda aktif yaitu Ti/Pt dan Ti/IrO₂ dominan terjadi oksidasi parsial atau *electrochemical conversion* daripada mineralisasi atau *electrochemical combustion* yang dominan terjadi pada anoda tidak aktif yaitu BDD.

(3) Baku Mutu pada Parameter Total N

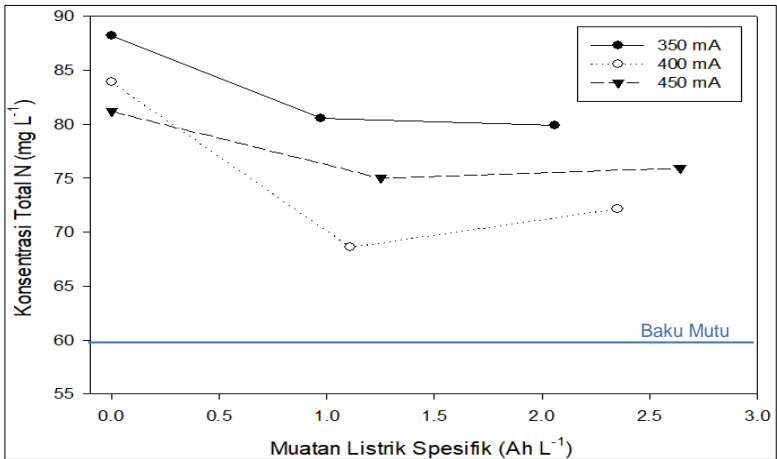
Gambar (4.19) – (4.21) merupakan grafik perubahan konsentrasi total N pada proses elektrooksidasi. Proses oksidasi elektrokimia menggunakan anoda Ti/Pt, Ti/IrO₂, maupun BDD dengan variasi kuat arus 350 mA, 400 mA, dan 450 mA ternyata belum mampu mencapai baku mutu total N. Variasi terbaik dalam penyisihan total N yaitu pada anoda Ti/Pt dengan kuat arus 350 mA, didapatkan penyisihan sebesar 52,14 mg (31%).



Gambar 4.19 Penurunan Konsentrasi Total N pada Anoda Ti/Pt untuk Setiap Variasi Kuat Arus



Gambar 4.20 Penurunan Konsentrasi Total N pada Anoda Ti/IrO₂ untuk Setiap Variasi Kuat Arus



Gambar 4.21 Penurunan Konsentrasi Total N pada Anoda BDD untuk Setiap Variasi Kuat Arus

4.2.5 Konsumsi Energi Spesifik

Kelayakan dari proses elektrokimia dapat dievaluasi berdasarkan konsumsi energi spesifik proses. Perhitungan konsumsi energi spesifik proses dilakukan untuk parameter COD dan amonium dengan membandingkan antara massa yang tersisihkan dengan muatan listrik spesifik. Konsumsi energi spesifik pada parameter COD dapat dilihat pada Tabel 4.15.

(1) Konsumsi Energi Spesifik pada Penyisihan COD

Tabel 4.15 merupakan konsumsi energi spesifik untuk parameter COD pada tiap variasi yang dapat memenuhi baku mutu.

Tabel 4.15 Konsumsi Energi Spesifik Penyisihan COD

Anoda	Kuat arus (mA)	Waktu (jam)	Tegangan (volt)	Muatan Listrik Spesifik (Ah L ⁻¹)	Massa tersisihkan (g)	Konsumsi energi spesifik (Wh g ⁻¹)
Ti/Pt	400	7	15,3	1,61	1,227	42,1
		10	15,3	2,38	1,344	56,7
	450	10	16,4	2,71	1,347	68,6
Ti/IrO ₂	350	7	17,1	2,06	1,266	58,9
	400	10	16,7	2,37	1,285	68,9
		7	17,2	1,80	1,311	49,6
	450	10	17,4	2,65	1,378	70,2
BDD	350	5	12,7	0,97	1,232	21,0
		7	12,7	1,40	1,280	29,2
		10	12,7	2,06	1,463	36,9
	400	5	13,5	1,11	1,260	24,7
		7	13,5	1,60	1,356	32,9
		10	13,5	2,35	1,446	45,8
	450	5	14,8	1,25	1,117	33,0
		7	14,8	1,80	1,244	45,0
		10	14,8	2,65	1,446	55,6

Data diatas (Tabel 4.15) menunjukkan bahwa peningkatan kuat arus menyebabkan peningkatan konsumsi energi pada semua jenis anoda, namun tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap besarnya massa COD yang tersisihkan. Pada anoda Ti/Pt dengan arus 450 mA, diperlukan konsumsi energi

yang lebih besar daripada arus 400 mA sementara penyisihan yang didapatkan hampir sama yaitu 1,344 g dan 1,347 g. Hal yang sama terjadi pada anoda BDD, arus terkecil yang diterapkan menghasilkan penyisihan COD yang paling baik dengan konsumsi energi yang lebih kecil pula. Anoda BDD pada arus 350 mA mampu menyisihkan 1,463 g COD dengan energi 36,9 Wh g⁻¹, sementara arus 400 mA (45,8 Wh g⁻¹) dan 450 mA (55,6 Wh g⁻¹) menyisihkan 1,446 g COD. Ketercapaian baku mutu COD berdasarkan efisiensi energi paling baik ditunjukkan pada penggunaan anoda BDD yang hanya memerlukan energi 21,0 Wh g⁻¹ untuk penyisihan COD dari 832 mg L⁻¹ menjadi 272 mg L⁻¹ (1,232 g; 72%).

(2) Konsumsi Energi Spesifik pada Penyisihan Amonium

Tabel 4.16 menyajikan konsumsi energi yang digunakan untuk penyisihan amonium pada tiap variasi jenis anoda dan kuat arus.

Tabel 4.16 Konsumsi Energi Spesifik Penyisihan Amonium

Anoda	Kuat arus (A)	Tegangan (volt)	Muatan Listrik Spesifik (Ah L ⁻¹)	Massa tersisihkan (g)	Konsumsi energi spesifik (Wh g ⁻¹)
Ti/Pt	350	15.1	2.08	0.0106	7852
	400	15.3	2.38	0,0149	5559
	450	16.4	2.71	0,0167	6006
Ti/IrO ₂	350	17.1	2.06	0.0131	2688
	400	16.7	2.37	0.0166	2380
	450	17.4	2.65	0.0160	2880
BDD	350	12.7	2.06	0.0161	1617
	400	13.7	2.35	0.0190	1691
	450	14.8	2.65	0.0109	3598

Kuat arus 400 mA menunjukkan konsumsi energi yang paling efektif untuk penyisihan amonium pada setiap jenis anoda. Penyisihan amonium paling efisien didapatkan pada anoda BDD arus 400 mA, yaitu 0,01904 g dengan konsumsi energi 1691 Wh g⁻¹.

(3) Aplikasi Kombinasi Pengolahan MBBR-EO

Integrasi pengolahan MBBR-EO dengan variasi anoda dan kuat arus ditujukan pada pemenuhan baku mutu lindi. Berikut merupakan variasi anoda-kuat arus yang menunjukkan penyisihan maksimum:

Anoda	Kuat arus (mA)	Massa tersisihkan (g)		
		COD	BOD	Total-N
Ti/Pt	400	1,230	0,241	0,0496
Ti/IrO ₂	350	1,285	0,265	0,0423
BDD	350	1,446	0,312	0,0405

Jika ditinjau dari variasi anoda, BDD menunjukkan penyisihan yang lebih tinggi dari Ti/IrO₂ maupun Ti/Pt. Hal ini dikarenakan BDD merupakan anoda tidak aktif yang memiliki potensial evolusi oksigen lebih tinggi. Dengan konduktivitas listrik yang baik, BDD mampu memproduksi radikal hidroksil dalam kapasitas besar yang teradsorpsi lemah sehingga secara non-selektif mengoksidasi polutan organik. Pengolahan lindi dengan MBBR-EO pada anoda BDD menghasilkan efluen 128 mg L⁻¹ COD dan 40 mg L⁻¹ BOD yang telah memenuhi baku mutu, sementara total N dengan kadar 72,17 mg L⁻¹ belum memenuhi baku mutu.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan akhir yang diperoleh dari penelitian ini antara lain:

- (1) Anoda Ti/Pt optimum pada kuat arus 400 mA, penyisihan COD dan amonium sebesar 1,344 g ($56,7 \text{ Wh g}^{-1}$) dan 0,015 g (5559 Wh g^{-1}). Sementara pada anoda Ti/IrO₂ dan BDD, kuat arus optimum pada penyisihan COD adalah 350 mA. Anoda Ti/IrO₂ dan BDD masing-masing menyisihkan 1,266 g COD ($58,9 \text{ Wh g}^{-1}$) dan 1,463 g COD ($36,9 \text{ Wh g}^{-1}$). Penyisihan amonium pada anoda Ti/IrO₂ dan BDD optimum pada arus 400 mA, yaitu 0,016 g (2688 Wh g^{-1}) dan 0,019 g (1691 Wh g^{-1}).
- (2) Kebutuhan energi dihitung pada kondisi polutan organik (COD) telah memenuhi baku mutu. Konsumsi energi 21 Wh g⁻¹ pada anoda BDD sudah mampu memenuhi baku mutu dengan efluen 270 mg L⁻¹. Sementara, ketercapaian konsentrasi COD dibawah baku mutu (300 mg L⁻¹) pada anoda Ti/IrO₂ (240 mg L⁻¹) dan Ti/Pt (285 mg L⁻¹) memerlukan energi 49,6 Wh g⁻¹ dan 42,1 Wh g⁻¹.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian mengenai pengolahan lindi dengan proses elektrooksidasi selanjutnya antara lain:

- (1) Material anoda sangat berpengaruh terhadap proses oksidasi pada senyawa organik (COD) maupun anorganik (amonium). Pemilihan material anoda harus disesuaikan dengan target/tujuan pengolahan.
- (2) Dalam penelitian ini total N belum mencapai baku mutu sehingga, perlu mengoptimalkan pengolahan biologis untuk penyisihan total N khususnya nitrat, karena penelitian ini lebih berfokus pada elektrooksidasi (proses oksidasi) sedangkan pengkonversian nitrat menjadi gas N₂ terjadi melalui proses elektoreduksi.
- (3) Penyisihan nitrat menggunakan metode elektrokimia dapat diteliti lebih lanjut dengan penggunaan jenis katoda yang berbeda.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, F. 2018. Proses Oksidasi Elektrokimia pada Lindi Menggunakan Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) dengan Penambahan Ion Klorida dan Sulfat. Tugas Akhir Departemen Teknik Lingkungan ITS, Surabaya.
- Anglada, A., Urtiaga, A., dan Ortiz, I. 2009. Contributions of Electrochemical Oxidation to Wastewater Treatment: Fundamentals and Review of Applications. *Society of Chemical Industry*. 84, 1747-1755.
- Anglada, A., Urtiaga, A., Ortiz, I., Mantzavinos, D., Diamadopoulos, E., 2010. Boron-Doped Diamond Anodic Treatment of Landfill Leachate: Evaluation of Operating Variables and Formation of Oxidation By-Products. *Water Res.* 45, 828-838.
- Aloui, F., Fki, F., Loukil, S., Sayadi, S., 2009. Application of Combined Membrane Biological Reactor and Electro-Oxidation Processes for The Treatment of Landfill Leachates. *Water Sci. Technol.* 60 (3), 605–614.
- Al-Rekabi, W.S. 2015. Mechanisms of Nutrient Removal in Moving Bed Biofilm Reactors. *J. Sci & Eng Res.* 6, 497-517.
- Avsar, Y. 2007. Comparison of Classical Chemical and Electrochemical Processes for Treating Rose Processing Wastewater. *J. Hazard. Mater.* 343, 341-342.
- Aziz, H.A., Yusoff, M.S., Adlan, M.N., Adnan, N.H., Alias, S. 2004. Physico-chemical Removal of Iron from Semi-aerobic Landfill Leachate by Limestone Filter. *Waste Manage.* 24, 353-358
- Bagastyo, A. Y., Batstone, D.J., Kristiana, I., Escher, I.J., Joll C., Radjenovic, J. 2014. Electrochemical Treatment of Reverse Osmosis Concentrate on Boron-Doped Electrodes in Undivided and Divided Cell Configurations. *J. Hazard. Mater.* 279, 111-116.
- Baig, S., Coulomb, I., Courant, P., Liechti, P. 1999. Treatment of Landfill Leachates: Lapeyrouse and Satrod Case Studies. *Ozone: Science & Engineering*, pp. 1-22.
- Barwal, A dan Chaudhary, R. 2014. To Study Performance of Biocarriers in Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Technology and Kinetics of Biofilm for Retrofitting The

- Existing Aerobic Treatment Systems: Review. *Review in Environmental Science and Bio/Technology*. 13:285-299.
- Cabeza, Chang, L.C., Weng, J. E. 2007. Ammonium Removal from Landfill Leachate by Anodic Oxidation. *J. Hazard. Mater.* 144, 715-719.
- Cabeza, A., Urtiaga, A.M., Ortiz, I. 2007. Electrochemical Treatment of Landfill Leachate Using a Boron-Doped Diamond. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46 (5), 1439-1446.
- Camargo, J.A., Alonso, A. Salamanca, Nitrate toxicity to Aquatic Animals: A Review with New Data for Freshwater Invertebrates, *Chemosphere* 58 (2005) 1255–1267.
- Chen. 2004. Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. *Purif. Technol.* 38, 11-41.
- Chen, S., Sun, D., Chung, J.-S. 2008. Simultaneous Removal of COD and Ammonium from Landfill Leachate Using an Anaerobic–Aerobic Moving-Bed Biofilm Reactor System. *Waste Management*, 28(2), 339–346.
- Chu, Y., Zhang, Q., Xu, D., 2008. Advanced Treatment of Landfill Leachate from A Sequencing Batch Reactor (SBR) by Electrochemical Oxidation Process. *J. Environ. Eng. Sci.* 7 (6), 627–633.
- Cominellis, C., 1994. Electrocatalysis In The Electrochemical Conversion/Combustion Of Organic Pollutants For Waste Water Treatment. *Electrochim. Acta* 39 (11/12), 1857–1862.
- Costa, F. M. D., Sarah, D. A. D., Daniele, M. B., Fabiana, V. D. F., Juacyara, C. C. 2018. Evaluation of The Biodegradability and Toxicity of Landfill Leachates After Pretreatment Using Advanced Oxidative Process. *Waste Manage.* 29(9), 2534–2541.
- Cossu, R., Polcaro, A.M., Lavagnolo, M.C., Mascia, M., Palmas, S., Renoldi, F., 1998. Electrochemical Treatment of Landfill Leachate: Oxidation at Ti/PbO₂ And Ti/SnO₂ Anodes. *Environ. Sci. Technol.* 32 (22), 3570–3573.
- Del Moro, G., Prieto-Rodriguez L., De Sanctis M., Di Iaconi C., Malato S., Mascolo G. 2016. Landfill Leachate Treatment: Comparison of Standalone Electrochemical Degradation and Combined with A Novel Biofilter. *Chem. Eng. J.* 288, 87-98.

- Deng, Y., James, D.E., Devid M. 2007. Electrochemical Oxidation for Landfill Leachate Treatment. *Waste Management*, Vol. 27(3), hal: 380-388.
- Ding, J., Zhao Q., Wang K., Hu W., Li W., Li A., Lee D. 2014. Amonium Abatement for Low-Salinity Domestic Secondary Effluent with a Hybrid Electrooxidation and Adsorption Reactor, *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, 9999-10006.
- Ding, J., Wang, K., Wang, S., Zhao, Q., Wei, L., Huang, H., Yuan, Y., Dionysiou, D. D. 2018. Electrochemical Treatment of Bio-Treated Landfill Leachate: Influence of Electrode Arrangement, Potential, and Characteristics. *Chemical Engineering Journal*.
- Ehrig, H. J., Christensen, T. H., Cossu, R., Stegmann, R (ed.). 1989. *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*. Academic Press, London, pp. 213-229.
- Ehrig, H. J., Christensen, T. H., Cossu, R., Stegmann, R (ed.). and Stegmann R, in *Landfilling of Waste: Leachate*, T. E & FN SPON, London, 1992, pp. 185–202.
- Fan, N., Li, Z., Zhou, T., Zhao, L and Wu, N. 2013. Optimization of Electrochemical Denitrification Process Parameters with Box-Behnken Design Chinese. *J. Environ. Eng.*, 7, 1785.
- Fatta, D., Papadopoulos A, Loizidou M A. 1999. Study on the Landfill Leachate and its Impact on the Goundwater Quality of the Geater Area. *Environmental, Geochemical, Health*, pp. 175-190.
- Feki, F., Aloui F., Sayadi S. 2009. Electrochemical Oxidation Post-Treatment of Landfill Leachates Treated with Membrane Bioreactor, *Chemosphere.* 75, 256-260.
- Feng, Yujie, Lisha, Y. Junfeng, L. Bruce. 2003. Develpoment of High Performance Electrchemical Wastewater Treatment System. *J. Hazard. Mater.* 103, 65-78.
- Fernandes, A., Spranger, P., Fonseca, A.D., Pacheco, M.J., Ciriaco, L., Lopes, A., 2014. Effect of Electrochemical Treatments on The Biodegadability of Sanitary Landfill Leachates. *Appl. Catal. B – Environ.* 144, 514–520.
- Fernandes, A., Pacheco M. J., Ciriaco L., Lopes A. 2015. Review on the Electrochemical Processes for The Treatment of

- Sanitary Landfill Leachates: Present and Future, Appl. Catal. B-Environ. 176, 183-200.
- Fernandes, A., Pacheco M. J., Ciriaco L., Lopes A. 2016. Electrochemical Oxidation of Humic Acid and Sanitary Landfill Leachate: Influence of Anode Material, Chloride Concentration and Current Density, Sci. Total Environ. 541, 282-291.
- Fitzke, B., Blume T., Wienands H., Cambiella, A. 2013. Hybrid Processes for the Treatment of Leachate from Landfills, Economic Sustainability and Environmental Protection in Mediterranean Countries through Clean Manufacturing Methods. Springer, pp. 107-126.
- Ganiyu dan Martinez-Huitle. 2019. Nature, Mechanisms and Reactivity of Electrogenerated Reactive Species at Thin-Film Boron-Doped Diamond (BDD) Electrodes During Electrochemical Wastewater Treatment. *ChemElectroChem*. 6 (2019), pp. 2379–2392.
- Garcia-Segura, S., Ocon, J. D., Chong, M.N. 2018. Electrochemical Oxidation Remediation of Real Wastewater Effluents – A Review. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 48-67.
- Gulhane, M. L., Kotangale, A. J. 2013. Moving Bed Biofilm Reactor–New Innovation in the Field of Conventional Biological Wastewater Treatment. *J. Sci. Res.* 2(12), 167–170.
- Hajipour, A., Moghadam N., Nosrati M., Shojasadati S. 2011. Aerobic Thermophilic Treatment of Landfill Leachate in a Moving-Bed Biofilm Bioreactor. *J. Enviro. Sci. Eng.* 8, 3–14.
- Im, J. H., Woo, H. J M.W. Choi, K.B. Han, C.W. Kim. Simultaneous Organic and Nitrogen Removal from Municipal Landfill Leachate Using an Anaerobic–Aerobic System. *Water Res.*, 35 (2001), pp. 2403-2410.
- Imania, A. W. 2018. Pengolahan Lindi Menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dengan *Pre-treatment* Kimiawi Untuk Menurunkan Konsentrasi Organik dan Nitrogen. Tugas Akhir Departemen Teknik Lingkungan, ITS Surabaya.
- Kapalka, A., Joss, L., Anglada, Á., Comminellis, C., & Udert, K. M. (2010). Direct and Mediated Electrochemical Oxidation of

- Ammonia on Boron-Doped Diamond Electrode. *Electrochemistry Communications*, 12(12), 1714–1717.
- Karamany, H. (2001). Combined Suspended/Attached Growth Reactor: Oxygen Transfer Rate. Sixth International Water Technology Conference, IWTC 2001, Alexandria, Egypt.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2016. Baku Mutu Lindi Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Sampah.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M., Rooker, A., Braun, A., Ledin, A., dan Christensen, T. 2002. Present and Long- term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 32, 297-336.
- Kim, K. W., Kim, Y. J., Kim, I. T., Park, G. I., Lee, E. H. 2006. Electrochemical Conversion Characteristics of Ammonia to Nitrogen. *Water Research*, 40(7), 1431–1441.
- Kuang, P., Feng, C., Li, M., Chen, N., Hu, Q., Wang, G., & Li, R. (2017). Improvement on Electrochemical Reduction of Nitrate in Synthetic Groundwater by Reducing Anode Surface Area. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(6), E103–E112.
- Kulikowska, D. 2012. Nitrogen Removal from Landfill Leachate via the Nitrite Route. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 29(2), 211–219.
- Kurniasari, S. dan Anggaeni, C.A.D. 2014. Penggunaan Membran Bioreaktor (MBR) pada *Activated Sludge* dalam Pengolahan Limbah Cair Industri. Laboratorium Teknologi Biokimia. Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
- Kurniawan, T.A., Lo W., Chan G., Silanpaa M E T. 2010. Biological Process for Treatment of Landfill Leachate. *J. Environ. Monit.*, 2010, 12, 2032–2047.
- Lee, A. H., Nikraz, H., Hung, Y. T. 2010. Influence of Waste Age on Landfill Leachate Quality. *International Journal of Environmental Science and Development*, 1(4), 347.
- Li, X. M., Wang, M., Jiao, Z. K., Chen, Z. Y. 2001. Study on Electrolytic Oxidation for Landfill Leachate Treatment (Vol.17).
- Li, M., Feng, C., Zhang, Z., Shen, Z., Sugiura, N. 2009. Electrochemical Reduction of Nitrate Using Various Anodes and a Cu/Zn Cathode, *Electrochem. Commun.* 11 (2009) 1853–1856.

- Lopez, A., Pagano, M., Volpe, A., Claudio Di Pinto, A. 2004. Fenton's Pre-Treatment of Mature Landfill Leachate. *Chemosphere*. 54(7), 1005–1010.
- Mandal, P., Dubey, B.K., Gupta, A.K. 2017. Review on Landfill Leachate Treatment by Electrochemical Oxidation: Drawbacks, Challenges, and Future Scope. *Waste Management*.
- Martensson, A. M., Aulin, A., Wahlberg, O., Argen, S. 1999. Effect of humic substances on the mobility of toxic metals in mature landfills. *Waste Manage. Res.*, 17 (1999), pp. 296-304.
- Martinez-Huittle, C., Brillas E. 2008. Electrochemical Alternatives for drinking water disinfection. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2008;47:1998–2005.
- Martinez-Huittle, C.A., Rodrigo M.A., Scialdone O. 2018. *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. Butterworth-Heinemann. Elsevier.
- Metcalf and Eddy. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4th ed.). New York: Mc Graw Hill.
- Mook, W. T., Chakrabarti, M. H., Aroua, M. K., Khan, G. M. A., Ali, B. S., Islam, M. S., Abu Hassan, M.A. 2012. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review. *Desalination* 285: 1-13.
- Moraes, P.B. dan Bertazzoli, R. 2005. Electrodegradation Of Landfill Leachate in A Flow Electrochemical Reactor. *Chemosphere* 58 (1), 41–46.
- Moreira, F.C., Boaventura R.A.R., Brillas E., Vilar V.J.P. 2017. Electrochemical Advanced Oxidation Processes: Are View on Their Application to Synthetic and Real Waste Waters, *Appl. Catal. B-Environ.* 202, 217–261.
- Ningtyas, R. 2015. *Pengolahan Limbah dengan Proses Lumpur Aktif*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kimia, ITB. Bandung.
- Panizza, M. dan Cerisola, G. 2009. Direct and Mediated Anodic Oxidation of Organic Pollutants. *Chem. Rev.* 109 (12), 6541–6569.
- Panizza, M., Delucchi, M., Sirés, I., 2010. Electrochemical Process for the Treatment of Landfill Leachate. *J. Appl. Electrochem.* 40 (10), 1721–1727.

- Panizza, M., Martinez-Huitle, C.A., 2013. Role of Electrode Materials for The Anodic Oxidation of a Real Landfill Leachate-Comparison Between Ti-Ru-Sn Ternary Oxide, PbO₂ And Boron-Doped Diamond Anode. *Chemosphere* 90 (4), 1455–1460.
- Papastavrou, C., Mantzavinos, D., Diamadopoulos, E., 2009. A Comparative Treatment of Stabilized Landfill Leachate: Coagulation and Activated Carbon Adsorption Vs. Electrochemical Oxidation. *Environ. Technol.* 30 (14), 1547–1553.
- Pérez, J. Saiz, R. Ibañez, A.M. Urtiaga, I. Ortiz. 2012. Assessment of The Formation of Inorganic Oxidation By-Products During The Electrocatalytic Treatment of Ammonium from Landfill Leachates, *Water Res.* 46: 2579-2590.
- Qaderi, F., Ayati, B., Ganjidoust, H. (Eds.). 2011. Role of Moving Bed Biofilm Reactor and Sequencing Batch Reactor in Biological Degradation of Formaldehyde Wastewater. *Journal of Environment, Health, Sciences dan Engineering*, 8(4), 295-306
- Quan, X., Cheng, Z., Chen, B., 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.
- Ramprasad, C., 2012. Electrochemical Treatment of Landfill Leachate. *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.* 1, 57–67.
- Renou, S., Givaudan J.G., Poulain S., Dirassouyan F., Moulin P. 2008. Landfill leachate treatment: review and opportunity, *J. Hazard. Mater.* 150, 468–4 93.
- Rao, N.N., Rohit, M., Nitin, G., Parameswaran, P.N., Astik, J.K., 2009. Kinetics of Electrooxidation of Landfill Leachate in A Three-Dimensional Carbon Bed Electrochemical Reactor. *Chemosphere* 76 (9), 1206–1212.
- Rondinini, S., Vertova, A., in: C. Comninellis, G. Chen (Eds.), *Electrochemistry for the Environment*, Springer New York, New York, NY, 2010. Copyright 2010, Springer Nature.
- Saleh, C dan Purnomo H. 2014. Analisis Efektifitas Instalasi Pengolahan Limbah Lindi di TPA Supit Urang Kota Malang. *Jurnal Teknik Pengairan*, Vol.5 (1), hal 103-109.

- Salem, Z., Hamouri, K., Djemaa, R., Allia K. 2008. Evaluation of Landfill Leachate Pollution and Treatment. *Desalination* 220, pp. 108-114.
- Sari, P. P. I. 2017. Kombinasi Proses Elektrodialisis dan Oksidasi Elektrokimia Sebagai Alternatif Pra-Pengolahan Lindi. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan ITS, Surabaya.
- Sirés, I. dan Brillas, E. 2012. Remediation of water pollution caused by pharmaceutical residues based on electrochemical separation and degradation technologies: a review. *Environ Int* 40:212–229
- Särkkä, H., Bhatnagar, A., Sillanpää, M. 2015. Recent developments of electro-oxidation in water treatment — A review. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754 (Supplement C), 46–56.
- Scialdone, O., Randazzo, S., Galia, A., Silvestri, G. 2009. Electrochemical Oxidation of Organic in Water: Role Of Operative Parameters In The Absence And In The Presence Of NaCl. *Water Research*. 43, 2260-2272.
- Setiadi, T., dan Fairus, S. 2003. Hazardous waste landfill leachate treatment using an activated sludge-membrane system. *Water Science and Technology*, 48(8), 111 117. doi:10.2166/wst.2003.0459
- Silveira, J.E., Zazo J.A., Pliego G., Bidoia E.D., Moraes P.B. 2015. Electrochemical Oxidation of Landfill Leachate In A Flow Reactor: Optimization Using Response Surface Methodology. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 5831-5841.
- Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C., Kaul, S.N. 2001. A Comparative Study on Oxidation of Disperse Dyes by Electrochemical Process, Ozone, Hypochlorite and Feton Reagent. *Water Res.* 35, 2129-2136.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A. 1993. *Integeted Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues*. New York : Mc-Gaw Hill.
- Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L., Ghrabi, A. 2007. Landfill Leachate Treatment with Ozone and Ozone/Hydrogen Peroxide Systems. *J. Hazard. Mater.* 140(1–2), 316–324.
- Torobi, P.M.I., Christina, N.M., Jubhar, C. 2015. Lindi TPA Melalui Sistem Sinambung Anaerob Dan Aerob Cultur-Alga. 873–877.

- Turro, E., Giannis, A., Cossu, R., Gidarakos, E., Mantzavinos, D., Katsaounis, A., 2012. Reprint of: electrochemical oxidation of stabilized landfill leachate on DSA electrodes. *J. Hazard. Mater.* 207–208, 73–78.
- Troster, I., Fryda, M., Herrmann, D., Schafer, L., Hanni, W., Perret, A., Blaschke, M., Kraft, A., Stadelmann, M., 2002. Electrochemical advanced oxidation process for water treatment using DiaChem_ electrodes. *Diam. Relat. Mater.* 11, 640–645.
- Un, U T, Koparal, A S, and Ogutveren, U B. January 2009. Electrocoagulation of Vegetable Oil Refinery Wastewater Using Aluminium Electrodes. *Journal of Environmental Management.* 90(1):428-433.
- Valero, F., Barcelo, A., dan Arbs, R. 2011. Electrodialysis Technology Theory and Applications Desalination Trends and Technology. Croatia :In Tech.
- Wang, F., Smith, M.G., and El-din, G.M. 2003. Application of Advanced Oxidation Methods for Landfill Leachate Treatment-A Review. *Environ. Eng. Sci.* (2): 413-427.
- Wiratini, N. M., dan Kartowasono, N. 2016. Dampak Rangkaian Sel Elektroda Al-C dalam Elektrokimia untuk Mendegradasi Limbah Tekstil. *Reaktor*, 16(2), 65-71.
- Zhang, H., Ran, X., Wu, X., Zhang, D., 2011. Evaluation of Electrooxidation Of Biologically Treated Landfill Leachate Using Response Surface Methodology. *J. Hazard. Mater.* 188 (1–3), 261–268.
- Zhao, G., Pang, Y., Liu, L., Gao, J., 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. *J. Hazard. Mater.* 179 (1–3), 1078–1083.
- Zhou, B., Yu, Z., Wei, Q., Long, H.Y., Xie, Y., Wang, Y., 2016. Electrochemical Oxidation of Biological Pretreated And Membrane Separated Landfill Leachate Concentrates On Boron Doped Diamond Anode. *Appl. Surf. Sci.* 377, 406–415.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 1 PROSEDUR ANALISIS

1. Pengukuran COD (SNI 6989.73.2009)

Prinsip

Ion dikromat akan mengoksidasi COD sampel pada suhu tinggi, hal ini menyebabkan perubahan Cr (VI) menjadi Cr (III).

Alat dan Bahan

(1) Tabung vial COD

(2) *Closed Refluks Digester*

(3) *Digestion solution*

Melarutkan 10,216 g $K_2Cr_2O_7$ yang telah dikeringkan selama 2 jam pada suhu $150^{\circ}C$ ke dalam 500 mL *aquadest*, menambahkan 167 mL H_2SO_4 pekat dan 33,3 g $HgSO_4$, kemudian mendinginkannya dan mengencerkan dengan *aquadest* hingga volume 100 mL

(4) *Sulfuric acid reagent*

Menambahkan $AgSO_4$ ke dalam H_2SO_4 pekat dengan komposisi 5,5 g Ag_2SO_4 / kg H_2SO_4 . Kemudian memiendamkannya hingga 2 hari agar terlarut.

(5) Larutan Ferro Amonium Sulfat (FAS) 0.01 N

(6) Larutan Indikator Ferroin

Melarutkan 1,485 g orthophenanthroline dan 0,695 g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ke dalam 100 mL *aquadest* dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

Prosedur

(1) Membersihkan tabung vial COD, caranya dibilas dan dikocok dengan air kran sebanyak 1 kali, kemudian dengan *aquadest* 2 kali, lalu dikeringkan.

(2) Mengambil 2,5 mL sampel yang telah diencerkan 10 kali.

(3) Menambahkan 1,5 mL *digestion solution* atau larutan dikromat ke dalam vial.

(4) Menambahkan 2,5 mL *sulfuric acid reagent* atau larutan $AgSO_4 + H_2SO_4$ ke dalam vial.

(5) Mengatur suhu pada *digester* hingga $150^{\circ}C$

(6) Memasukkan vial ke dalam *digester*, lalu tekan tombol *run/enter*.

(7) Menurunkan suhu *digester* setelah 2 jam, tunggu hingga suhu $100^{\circ}C$. Kemudian ambil vial, diamkan hingga bersuhu ruang dan suspensi larutannya mengendap.

- (8) Memindahkan sampel dari vial ke dalam erlenmeyer dan menambahkan 1 tetes indikator ferroin kemudian titrasi menggunakan larutan standar FAS 0.01 N hingga warna kuning berubah menjadi merah-coklat yang tidak hilang selama 1 menit.
- (9) Perhitungan nilai COD dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut

$$\text{COD (mg O}_2\text{/L)} = \frac{(A-B) \times N \text{ FAS} \times 8000}{\text{Vol.sampel}} \times P$$

Dimana:

- A = mL FAS titrasi blanko
- B = mL FAS titrasi sampel
- N = Normalitas larutan FAS
- P = Nilai pengenceran

2. Pengukuran BOD (SNI 6989.72.2009)

Prinsip

Sampel ditambahkan ke dalam larutan pengencer jenuh oksigen yang telah diberi larutan nutrisi dan bibit mikroba. Kemudian diinkubasi dalam ruang gelap pada suhu $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 5 hari. Nilai BOD dihitung berdasarkan selisih konsentrasi oksigen terlarut 0 (nol) hari dan 5 (lima) hari. Bahan kontrol standar dalam uji BOD ini digunakan larutan glukosa-asam glutamat.

Alat dan Bahan

- (1) Labu pengencer 100 mL
- (2) Labu takar 500 mL
- (3) Botol winkler 300 mL dan 150 mL
- (4) Larutan Buffer Fosfat
Melarutkan 0,85 g KH_2PO_4 , 0,2175 g K_2HPO_4 , 0,334 g $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan 0,17 g NH_4Cl ke dalam 100 mL *aquadest* pada labu pengencer 100 mL.
- (5) Larutan Pereaksi Oksigen
Melarutkan 40 g NaOH , 15 g KI dan 2 g NaN_3 ke dalam 100 mL *aquadest* dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

Prosedur

- (1) Membuat air pengencer yang disesuaikan pada banyaknya sampel, dengan prosedur:
 - a. Menambahkan 1 mL larutan buffer fosfat per liter air.
 - b. Menambahkan 1 mL larutan magnesium sulfat per liter air.
 - c. Menambahkan 1 mL larutan kalium klorida per liter air.
 - d. Menambahkan 1 mL larutan feri klorida per liter air.
 - e. Menambahkan 10 mg bubuk inhibitor.
 - f. Melakukan aerasi minimal selama 2 jam.
 - g. Menambahkan 1 mL larutan benih per liter air.
- (2) Menuang sampel sesuai dengan perhitungan pengenceran, tambahkan air pengencer sampai batas labu takar 500 mL.
- (3) Menuang larutan pada labu takar ke dalam botol winkler 250 mL dan melakukan uji DO menggunakan DO meter.
- (4) Memasukkan botol winkler 250 mL ke dalam inkubator bersuhu 20°C selama 5 hari.
- (5) Setelah 5 hari, larutan pada botol winkler 250 mL juga dianalisis pula kadar DOnya dengan DO meter.
- (6) Menghitung BOD dengan rumus berikut:

$$BOD_5^{20} = \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)] \times (1 - P)}{P}$$
$$P = \frac{mL \text{ sampel}}{\text{volume hasil pengenceran (500 mL)}}$$

Keterangan:

- X_0 = Oksigen terlarut sampel pada $t_{0\text{hari}}$
 X_5 = Oksigen terlarut pada $t_{5\text{hari}}$
 B_0 = Oksigen terlarut blankol pada $t_{0\text{hari}}$
 B_5 = Oksigen terlarut blankol pada $t_{5\text{hari}}$
 P = derajat pengenceran

3. Pengukuran TDS

Prinsip

Potensiometri adalah cara analisis berdasarkan pengukuran beda potensial.

Alat dan Bahan

- (1) Beaker glass 100 mL
- (2) Alat pH ion lab
- (3) Sampel
- (4) Aquadest

Prosedur

- (1) Menyiapkan 10 mL sampel.
- (2) Membilas batang silinder pH ion lab dengan larutan *aquadest* dan mengeringkannya menggunakan tisu.
- (3) Menyalakan pH ion lab, mengatur mode pada pengukuran TDS lalu mencelupkan silinder pH ion lab ke dalam sampel.
- (4) Menunggu angka pembacaan TDS stabil hingga muncul tulisan \sqrt{AUTO} pada layar, lalu mencatat angka TDS yang muncul pada layar pH ion lab.

4. Pengukuran pH (SNI 06-6989.11-2004)

Prinsip

pH diukur berdasarkan aktivitas ion hidrogen dengan metode potensiometri/ elektrometri menggunakan alat pH meter.

Alat dan Bahan

- (1) pH meter
- (2) Gelas ukur
- (3) Kertas tisu
- (4) 10 mL sampel

Prosedur

- (1) Menyiapkan sampel sebanyak 10 mL
- (2) Mengeringkan elektroda pH meter dengan tisu, kemudian membilasnya dengan *aquadest*.
- (3) Membilas elektroda dengan sampel.
- (4) Mencelupkan elektroda ke dalam sampel hingga pH meter menunjukkan pembacaan yang tetap (muncul tulisan *ready*).
- (5) Mencatat hasil pembacaan angka pada layer pH meter.

5. Pengukuran Ion Klorida (SNI 06-6989.19-2004)

Prinsip

Senyawa klorida dalam contoh uji air dapat dititrasi dengan larutan perak nitrat dalam suasana netral atau sedikit basa (pH 7 sampai dengan pH 10), menggunakan larutan indikator kalium kromat. Perak klorida diendapkan secara kuantitatif sebelum terjadinya titik akhir titrasi, yang ditandai dengan mulai terbentuknya endapan perak kromat yang berwarna merah kecoklatan.

Alat dan Bahan

- (1) Buret 25 mL atau 50 mL
- (2) Erlenmeyer 100 mL

- (3) Pipet ukur
- (4) Larutan standar perak nitrat (AgNO_3) 1/35,45 N
- (5) Larutan indikator kalium kromat (K_2CrO_4) 5%
- (6) Bubuk MgO

Prosedur

- (1) Mengambil 25 mL sampel dan memasukkannya ke dalam erlenmeyer 100 mL.
- (2) Menambahkan 0,5 mL indikator K_2CrO_4 dan kocok hingga merata
- (3) Menambahkan 1 sendok/ spatula bubuk MgO.
- (4) Melakukan titrasi dengan larutan AgNO_3 1/35,45 N.
- (5) Menghitung kadar klorida dengan rumus berikut:

$$Cl \text{ (mg/L)} = \frac{(B-A) \times N \text{ AgNO}_3 \times 35,45}{V}$$

Keterangan:

- A = volume titrasi larutan AgNO_3 1/35,45 N pada blanko
 B = volume titrasi larutan AgNO_3 1/35,45 N pada sampel
 N = Normalitas AgNO_3
 V = volume sampel

6. Pengukuran Total Klorin

Prinsip

Total klorin yang terdapat pada sampel akan berikatan dengan DPD membentuk warna merah muda keunguan.

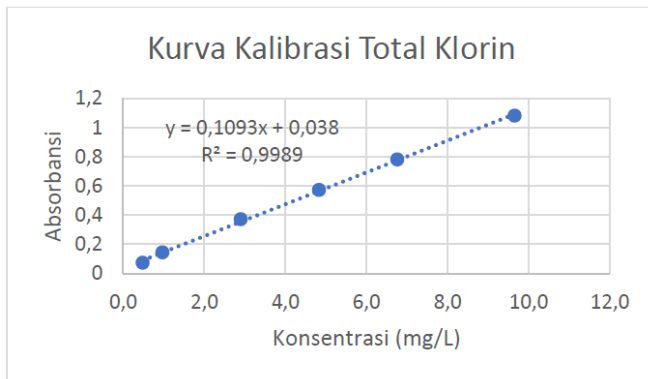
Pembuatan kurva Kalibrasi

- (1) Menyiapkan larutan induk NaOCl 12%
- (2) Mengencerkan larutan induk NaOCl menjadi larutan dengan konsentrasi 0,5; 1; 3; 5; 7 dan 10 mg L⁻¹ NaOCl menggunakan *aquadest*.
- (3) Menuangkan serbuk DPD untuk 5 mL sampel ke dalam vial
- (4) Menuangkan masing-masing larutan ke dalam vial yang telah berisi serbuk DPD.
- (5) Mencari panjang gelombang optimum, kemudian membaca absorbansi larutan pada spektrofotometer dengan panjang gelombang optimum yang telah didapatkan.

Prosedur Analisis

- (1) Menuangkan seluruh serbuk DPD dalam 1 kemasan ke dalam satu vial.

- (2) Menuangkan masing-masing 5 mL sampel ke dalam vial yang berisi DPD sebagai sampel dan tidak berisi DPD sebagai blanko.
- (3) Membaca pada spektrofotometer dengan panjang gelombang 510 nm dengan blanko adalah sampel 5 mL yang tidak diberi DPD.
- (4) Memasukkan panjang gelombang yang didapat ke dalam persamaan kurva kalibrasi.



7. Nitrat (SNI 6989-79.2011)

Prinsip

Percobaan ini menggunakan metode brucin asetat dan penambahan H_2SO_4 . Analisa dilakukan dengan spektrofotometer dari absorbansi kurva kalibrasi sehingga diperoleh kadar nitrat pada sampel.

Alat dan Bahan

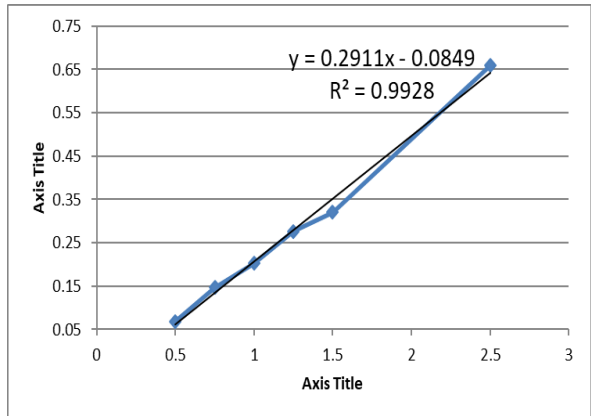
- (1) Erlenmeyer 50 mL 2 buah
- (2) Spektrofotometer dan kuvet
- (3) Pipet ukur
- (4) Larutan brucin asetat
- (5) Larutan asam sulfat (H_2SO_4) pekat

Prosedur

- (1) Mengambil 2 mL sampel dan 2 mL *aquadest* (sebagai blanko) kemudian memasukkannya ke masing-masing Erlenmeyer 50 mL
- (2) Menambahkan 2 mL larutan brucin asetat

- (3) Menambahkan 4 mL asam sulfat (H_2SO_4) pekat
- (4) Mengocoknya dan mendinginkan selama 10 menit
- (5) Melakukan pengukuran menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 400 μm
- (6) Penentuan persamaan kurva kalibrasi

mg/L	A
0.5	0.069
0.75	0.147
1	0.203
1.25	0.276
1.5	0.32
2.5	0.659



7. Pengukuran Nitrit (06-6989-9.2004)

Prinsip

Nitrit dalam suasana asam (pH 2-2,5) akan bereaksi dengan sulfanilamid (SA) dan NED dihydrochloride membentuk senyawa ozon yang berwarna merah keunguan. Larutan warna yang terbentuk diukur absorbansinya secara spektrofotometri pada panjang gelombang maksimum 543 nm.

Alat dan Bahan

- (1) Spektrofotometer
- (2) Labu ukur (50 mL, 250 mL, 500 mL, 1000 mL)
- (3) Pipet ukur
- (4) Beaker glass 100 mL
- (5) Erlenmeyer
- (6) Neraca analitik
- (7) *Aquadest* bebas nitrit
- (8) glass wool
- (9) kertas saring bebas nitrit ukuran pori 0,45 μm
- (10) Larutan sulfanilamida ($\text{H}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{SO}_2\text{NH}_2$)

Melarutkan 5 g sulfanilamida dalam campuran 300 mL *aquadest* dan 50 mL HCl pekat. Kemudian mengencerkan dengan *aquadest* hingga 500 mL.

(11) Larutan NED Dihidroklorida

Melarutkan 500 mg N-(1-naphthyl)-ethylene diamine dihydrochloride (NED Dihidroklorida) dalam 500 mL *aquadest*. Menyimpan dalam botol gelap dan menyimpan di refrigerator. Ganti setiap bulan atau bila berwarna coklat.

(12) Larutan natrium oksalat ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 0,05 N),

(13) Larutan FAS 0,05 N

Melarutkan 19,607 g $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam *aquadest*. Kemudian menambahkan 20 mL H_2SO_4 pekat hingga 1000 mL.

(14) Larutan standar nitrit 250 mg/L

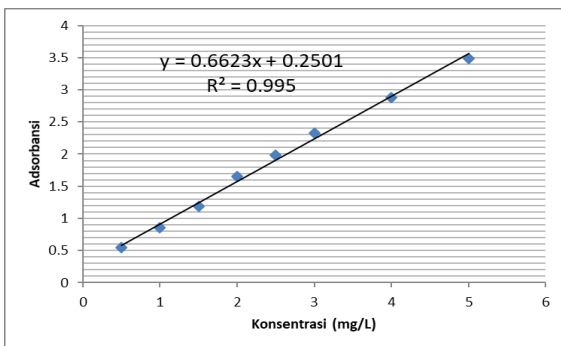
Melarutkan 1,232 g NaNO_2 dalam 1000 mL *aquadest*. Membiarkan sedikitnya 1 minggu, lalu saring dengan glass wool dan simpan dalam botol berwarna coklat.

(15) Larutan kalium permanganat (KMnO_4 0,05 N)

Prosedur

- (1) Memasukkan 50 mL sampel ke dalam *beaker glass*
- (2) Menambahkan 1 mL larutan sulfanilamida, kocok dan biarkan 2 menit hingga 8 menit.
- (3) Menambahkan 1 mL larutan NED dihidrochlorida, kocok biarkan selama 10 menit dan segera lakukan pengukuran (pengukuran tidak boleh dilakukan lebih dari 2 jam).
- (4) Mengukur absorbansi larutan dengan spektrofotometer menggunakan panjang gelombang 543 nm.
- (5) Penentuan persamaan kurva kalibrasi

mg L ⁻¹	A
0.5	0.543
1	0.857
1.5	1.185
2	1.655
2.5	1.983
3	2.33
4	2.879
5	3.484



8. Pengukuran Amonium (SNI 06-6989-30.2005)

Prinsip

Analisa amonium dilakukan dengan metode nessler yang kemudian diukur pada spektrofotometer dengan panjang gelombang optimum yang telah dicari.

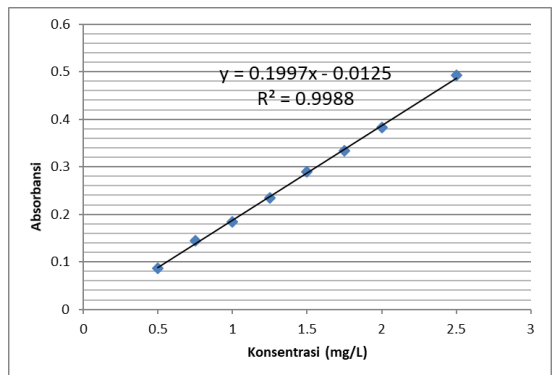
Alat dan Bahan

- (1) Spektrofotometer
- (2) Labu erlenmeyer 100 mL
- (3) Larutan garam signet
Melarutkan 50 g K.Na.Tatrat ke dalam 500 mL *aquadest*, kemudian ditambahkan 5 mL larutan nessler sebagai pengawet.
- (4) Nessler
Mencampur dan menghaluskan 50 g serbuk HgI₂ dan 35 g KI kemudian dilarutkan dengan 80 g NaOH yang sudah dilarutkan dengan *aquadest* hingga 500 mL. Biarkan mengendap dan diambil supernatannya.

Prosedur

- (1) Memasukkan masing-masing 25 mL sampel ke dalam 2 labu erlenmeyer 100 mL
- (2) Menambahkan 1 mL larutan nessler
- (3) Menambahkan 1,25 mL larutan garam signet dan mendiamkan selama 10 menit
- (4) Membaca spektrofotometer dengan panjang optimum 400 nm.
- (5) Kurva kalibrasi

ppm	A (NH ₄ -N)
0.5	0.086
0.75	0.145
1	0.184
1.25	0.234
1.5	0.289
1.75	0.334
2	0.382
2.5	0.492



9. Pengukuran TKN (SNI 06-6989-30.2005)

Prinsip

Senyawa nitrogen organik dalam sampel diubah menjadi garam amonium dengan H_2SO_4 dan katalis (CuSO_4).

Alat dan bahan

- (1) Alat kjeldahl
- (2) Spektrofotometer
- (3) Labu ukur 100 mL
- (4) Nessler (pembuatan sama seperti analisis amonium)
- (5) Garam Signet (pembuatan sama seperti analisis amonium)
- (6) *Digestion reagent*

Melarutkan 134 g K_2SO_4 dan 7,3 g CuSO_4 pada 800 mL aquadest, kemudian tambahkan 134 mL H_2SO_4 . Ketika larutan sudah dalam kondisi dingin suhu ruang, tambahkan aquadest hingga volume 1 L.

Prosedur

- (1) Memasukkan 10 mL sampel + 10 mL *digestion reagent* ke dalam *kjeldahl flasks*, kemudian tambahkan aquadest hingga volume 100 mL
- (2) Panaskan *kjeldahl flasks* pada kisaran suhu $375^\circ - 385^\circ$ untuk proses *digest* yang efektif hingga disisakan sekitar 10 mL destilat.
- (3) Larutkan sisa destilat hingga 100 mL dengan aquadest.
- (4) Pengukuran TKN dilakukan seperti pada analisis amonium.

LAMPIRAN 2 DATA HASIL ANALISIS

Tabel L2.1 Konsentrasi COD Tiap Anoda pada Penelitian Pendahuluan

Waktu (jam)	Konsentrasi COD (mg/L)		
	Ti/Pt	Ti/IrO ₂	BDD
0	876	876	876
2	528	510	334
4	435	378,4	246,4
6	364,3	334,4	202,4
8	316	272,8	176
10	272,8	193,6	158,4
12	228,8	176	158,4

Tabel L2.2 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda Ti/Pt

Waktu (jam)	I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀
0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
1	0,18	0,75	0,21	0,70	0,23	0,67
2	0,37	0,64	0,42	0,56	0,47	0,62
3	0,57	0,53	0,65	0,48	0,73	0,55
5	0,98	0,48	1,12	0,40	1,25	0,45
7	1,41	0,42	1,63	0,29	1,80	0,32
10	2,08	0,34	2,41	0,22	2,65	0,22

Q= Muatan Listrik Spesifik

Tabel L2.3 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda Ti/IrO₂

Waktu (jam)	I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀
0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
1	0,18	0,78	0,21	0,71	0,23	0,70
2	0,37	0,69	0,42	0,66	0,47	0,56
3	0,57	0,62	0,65	0,55	0,73	0,48
5	0,97	0,49	1,11	0,47	1,26	0,37
7	1,40	0,35	1,61	0,37	1,81	0,28
10	2,06	0,24	2,37	0,23	2,68	0,24

Q= Muatan Listrik Spesifik

Tabel L2.4 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan COD pada Anoda BDD

Waktu (jam)	I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	COD /COD ₀
0	0,000	1,00	0,000	1,00	0,000	1,00
1	0,154	0,68	0,205	0,64	0,231	0,67
2	0,316	0,46	0,421	0,57	0,474	0,62
3	0,486	0,32	0,649	0,36	0,730	0,55
5	0,833	0,28	1,111	0,24	1,250	0,45
7	1,200	0,25	1,600	0,19	1,800	0,32
10	1,765	0,15	2,353	0,13	2,647	0,22

Q= Muatan Listrik Spesifik

Tabel L2.5 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda Ti/Pt

Waktu (jam)	I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀
0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
5	0,98	0,63	1,12	0,62	1,25	0,65
10	2,08	0,44	2,40	0,368	2,64	0,364

Q= Muatan Listrik Spesifik

Tabel L2.6 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda Ti/IrO₂

Waktu (jam)	I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀
0	0,000	1,00	0,000	1,00	0,000	1,00
5	0,97	0,56	1,11	0,56	1,26	0,42
10	2,06	0,29	2,37	0,30	2,68	0,29

Q= Muatan Listrik Spesifik

Tabel L2.7 Pengaruh Kuat Arus terhadap Penyisihan BOD pada Anoda BDD

Waktu (jam)	I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀	Q (Ah L ⁻¹)	BOD /BOD ₀
0	0,000	1,00	0,000	1,00	0,000	1,00
5	0,97	0,30	1,11	0,285	1,25	0,33
10	2,06	0,19	2,35	0,178	2,65	0,16

Q= Muatan Listrik Spesifik

Tabel L2.8 Pengaruh Kuat Arus terhadap Perubahan Massa Total N pada Anoda Ti/Pt

Arus (mA)	Waktu (jam)	Amonium (NH ₄ ⁺) (mg)	Nitrit (NO ₂ ⁻) (mg)	Nitrat (NO ₃ ⁻) (mg)	Organik N (mg)	Total N (mg)
350	0	24,80	4,80	82,80	58,60	171,00
	5	16,83	1,43	56,56	50,84	125,66
	10	14,11	0,08	59,30	45,36	118,86
400	0	24,00	3,00	96,00	49,40	172,40
	5	10,68	0,13	81,88	41,12	133,81
	10	9,05	0,03	78,02	35,69	122,79
450	0	27,6	3,60	96,00	40,20	167,40
	5	13,68	0,13	82,80	32,22	128,83
	10	10,88	0,00	79,90	28,05	118,83

Tabel L2.9 Pengaruh Kuat Arus terhadap Perubahan Massa Total N pada Anoda Ti/IrO₂

Arus (mA)	Waktu (jam)	Amonium (NH ₄ ⁺) (mg)	Nitrit (NO ₂ ⁻) (mg)	Nitrat (NO ₃ ⁻) (mg)	Organik N (mg)	Total N (mg)
350	0	24,80	4,80	82,80	58,60	171,00
	5	14,20	0,29	68,31	51,41	134,20
	10	11,70	0,00	70,68	46,27	128,65
400	0	26,60	4,60	94,00	42,60	167,80
	5	11,13	0,23	66,41	36,79	114,57
	10	9,97	0,06	77,74	32,11	119,88
450	0	27,60	3,60	96,00	40,20	167,40
	5	12,71	0,00	80,55	33,11	126,37
	10	11,59	0,00	84,00	28,05	123,65

Tabel L2.10 Pengaruh Kuat Arus terhadap Perubahan Massa Total N pada Anoda BDD

Arus (mA)	Waktu (jam)	Amonium (NH ₄ ⁺) (mg)	Nitrit (NO ₂ ⁻) (mg)	Nitrat (NO ₃ ⁻) (mg)	Organik N (mg)	Total N (mg)
350	0	24,00	3,00	100,00	49,40	176,40
	5	8,82	0,07	95,40	40,68	144,97
	10	7,82	0,00	91,80	36,21	135,83
400	0	26,60	4,60	94,00	42,60	167,80
	5	11,52	0,50	75,60	35,82	123,44
	10	7,57	0,12	83,30	31,71	122,69
450	0	26,20	1,36	111,00	23,80	162,36
	5	18,00	0,18	100,62	16,20	135,00
	10	15,30	0,06	95,37	18,36	129,09

Tabel L2.11 Hasil Analisis Konsentrasi COD Pada Anoda Ti/Pt

I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
Q (Ah L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Q (Ah L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Q (Ah L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)
0,00	828	0,00	859	0,00	864
0,18	640	0,21	614	0,23	592

I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)	Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)	Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)
0,37	560	0,42	510	0,47	560
0,57	480	0,65	450	0,73	512
0,98	448	1,12	390	1,25	432
1,41	400	1,63	285	1,80	320
2,08	336	2,41	225	2,65	224

Tabel L2.12 Hasil Analisis Konsentrasi COD Pada Anoda Ti/IrO₂

I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)	Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)	Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)
0,00	828	0,00	832	0,00	864
0,18	660	0,21	608	0,23	608
0,37	599	0,42	576	0,47	480
0,57	554	0,65	496	0,73	416
0,97	450	1,11	432	1,26	320
1,40	330	1,61	352	1,81	240
2,06	230	2,37	224	2,68	208

Tabel L2.13 Hasil Analisis Konsentrasi COD Pada Anoda BDD

I = 350 mA		I = 400 mA		I = 450 mA	
Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)	Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)	Q (Ah L⁻¹)	COD (mg L⁻¹)
0,000	859	0,000	832	0,000	832
0,154	600	0,205	544	0,231	528
0,316	420	0,421	496	0,474	464
0,486	300	0,649	320	0,730	368
0,833	270	1,111	224	1,250	272
1,200	250	1,600	176	1,800	240
1,765	150	2,353	128	2,647	128

Tabel L2.14 Hasil Analisis Konsentrasi Total N Pada Anoda Ti/Pt

Arus (mA)	Waktu (jam)	Amonium (mg L ⁻¹)	Nitrit (mg L ⁻¹)	Nitrat (mg L ⁻¹)	Organik N (mg L ⁻¹)	Total N (mg L ⁻¹)
350	0	12,4	2,4	41,4	29,3	85,5
	5	9,4	0,8	31,6	28,4	70,2
	10	8,4	0,05	35,3	27	70,75
400	0	12	1,5	47	24,7	88,2
	5	6	0,076	37	23,1	78,17
	10	5,45	0,02	46	21,5	76,77
450	0	13,8	1,8	48	20,1	83,7
	5	7,6	0,073	46	17,9	71,6
	10	6,4	0	47	16,5	69,9

Tabel L2.15 Hasil Analisis Konsentrasi Total N Pada Anoda Ti/IrO₂

Arus (mA)	Waktu (jam)	Amonium (mg L ⁻¹)	Nitrit (mg L ⁻¹)	Nitrat (mg L ⁻¹)	Organik N (mg L ⁻¹)	Total N (mg L ⁻¹)
350	0	12,4	2,4	41,4	29,3	85,5
	5	7,9	0,16	38	28,6	74,66
	10	6,9	0	41,7	27,3	75,9
400	0	13,3	2,3	47	21,3	83,9
	5	6,2	0,13	37	20,5	63,83
	10	5,9	0,04	46	19	70,94
450	0	13,8	1,8	48	20,1	83,7
	5	17,1	0	45	18,5	70,6
	10	6,9	0	50	16,7	73,6

Tabel L2.16 Hasil Analisis Konsentrasi Total N Pada Anoda BDD

Arus (mA)	Waktu (jam)	Amonium (mg L ⁻¹)	Nitrit (mg L ⁻¹)	Nitrat (mg L ⁻¹)	Organik N (mg L ⁻¹)	Total N (mg L ⁻¹)
350	0	12	1,5	50	24,7	88,2
	5	4,9	0,04	53	22,6	80,54

Arus (mA)	Waktu (jam)	Amonium (mg L⁻¹)	Nitrit (mg L⁻¹)	Nitrat (mg L⁻¹)	Organik N (mg L⁻¹)	Total N (mg L⁻¹)
	10	4,6	0	54	21,3	79,9
400	0	13,3	2,3	47	21,3	83,9
	5	6,4	0,28	42	19,9	68,58
	10	4,45	0,04	49	18,65	72,17
450	0	13,1	1,8	55,5	11,9	81,18
	5	10	0	55,9	9	75
	10	9	0	56,1	10,8	75,9

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 3 DOKUMENTASI PENELITIAN



Gambar L3.1 Operasi Reaktor Elektrooksidasi



Gambar L3.2 Lindi Hasil Olahan Proses Elektrooksidasi



Gambar L3.3 Analisis Sampel

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGAFI PENULIS



Penulis dilahirkan pada tanggal 13 Agustus 1996 di Salatiga, Jawa Tengah. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di SDN Kauman Kidul Salatiga, SMPN 1 Salatiga, SMAN 1 Salatiga. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan kuliah di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan (FTSLK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis pernah aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) pada tahun 2016-2018 sebagai *Steering Committee* Masa Kenal Lingkungan (MKL) dan tergabung dalam Komunitas Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL). Penulis juga aktif di kepanitiaan tingkat kampus seperti Koordinator ITS Expo 2017 dan pernah menjadi asisten Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan pada tahun 2018. Penulis dapat dihubungi melalui surel di arumsofianahidayati@gmail.com.



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

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)
No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Rabu, 3 Juli 2019

Nilai TOEFL 463

Pukul : 07.30 - 9.30

Lokasi : TL 102 105

Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt pada Lindi Terolah secara Biologis

Nama : Arum Sofiana Hidayati

NRP. : 0321154000012

Topik : Penelitian Laboratorium

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1	Kesimpulan → hasil jelas memenuhi batas mcr.
2	Reaksi ? dicek kembali.

Arum 23/7

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

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

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

Dosen Pembimbing

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



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 3 Juli 2019

Pukul : 07.30 - 9.30

Lokasi : TL 102

Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt pada Lindi Terolah secara Biologis

Nama : Arum Sofiana Hidayati

NRP. : 03211540000012

Topik : Penelitian Laboratorium

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	<p>Pelbiki pada hal ✓</p> <p>(9) - keelektronan = ? Contoh nya ? ✓</p> <p>(9) - proses activated sludge = ?</p> <p>10 - Tabel 2.5 → apa arti N.A ? Kaya dengan kandungan fosfor ? ✓</p> <p>11 - Seny. Biorefraktori = ?</p> <p>- OH & Klorin bebas bekerja pd. EO. apakah arti -OH & kl. bebas?</p> <p>Mekanisme kerjanya Agn ? *OH pada ^{site of lamping} kat. 16</p> <p>hal 13 Pers. reaksi (2) ^{dan (4)} ketubuh ? ✓ (20)</p> <p>- Agn permukaan & jelekuan elektro oksidasi & elektrokoagulasi ?</p> <p>- N organik bisa di EO akan jadi apa? Mencegah Nity⁺ removalnya rendah?</p> <p style="text-align: right;">Jurnal S 22/07/2019</p>

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji

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

(Jurnal S)

Dosen Pembimbing

(Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phill., Ph.D)

(Arseto)



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
 Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)
 No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
 Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
 Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 3 Juli 2019
 Pukul : 07.30 - 9.30
 Lokasi : TL 102
 Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt pada Lindi Terolah secara Biologis
 Nama : Arum Sofiana Hidayati
 NRP. : 0321154000012
 Topik : Penelitian Laboratorium

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Realisasi penguraian organik? (16 pers 19)
2.	Direct oksidasi (CO ₂), indirect (NH ₄) → Jelaskan realisasi → HCO ₂ + NH ₄ → ... (sebelum persamaan ini) HCO ₂ harus mereduksi komponen lain (hal 59) CO ₂ vs NH ₄ (with arrows pointing to CO ₂ and NH ₄)
3.	Mengapa arus semalai tinggi semalai memperburuk removal? Jelaskan konsep arus listrik dan elektrokimia
4.	Pemruhan melalui direct oksidasi nyiluh' rx orde berapa? (x=?)

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
 Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
 Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
 Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, S.T., MEPM.

Dosen Pembimbing (Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D)

(Signature)

(Signature)



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
 Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)
 No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
 Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
 Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Rabu, 3 Juli 2019
 Pukul : 07.30 - 9.30
 Lokasi : TL 102
 Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda BDD, Ti/IrO₂, dan Ti/Pt pada Lindi Terolah secara Biologis

Nama : Arum Sofiana Hidayati
 NRP. : 03211540000012
 Topik : Penelitian Laboratorium

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	<p>Bahas, mana yg lebih baik <u>Ti/Pt</u> vs <u>BDD</u> simpulkan (70) ✓</p> <p>Faktor² apa yg berpengaruh pada proses? jelaskan (Pertanyaan) (materi, pH, komposisi, kapasitas arus, debit?) ✓</p> <p>Apakah melukukan MBBR? Atau penelitian dg lain? ✓</p> <p>Bahas effien vs MBBR. juga % removal? (45)</p> <p>⊖ Bahas → Belum mampu TAN → yg paling baik (69) ⊖</p> <p>⊖ Mengapa ClO₃⁻ dan ClO₄⁻ berbahaya? jelaskan... (53)</p> <p>kesimpulan sesuaikan dg signain → THAM? → ?</p> <p>→ S.6 Ti/Pt → tdk. ⇐</p> <p>S.4. BDD</p> <p>acc. teknik? ✓</p> <p>M. 22/7</p>

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
 Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
 Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
 Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, S.T.

Ellina

Dosen Pembimbing (Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D)

(Arseto)




FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR


Nama : Arum Safiana Hidayati
NRP : 0321154000002
Judul Tugas Akhir : Oksidasi Elektrokimia dengan Menopromakan Anoda BDD, Ti/TiO_2 ,
dan Ti/PE pada Lindir Terolah Biologis

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1.	Perbaikan salah ketik dan penulisan persamaan reaksi	reaksi persamaan sudah diselaraskan dengan koefisien bilangan bulat
2.	Tabel 2.5 → N.A kenapa dipadatkan pustaka	N.A sudah diperbaiki (halaman 10)
3.	Simpulkan anoda mana yang memiliki performa terbaik	Sudah disebutkan pada bab aplikasi kombinasi pengolahan MBR-EO (halaman 71)
4.	Perbaiki abstrak (diperpanjang, 3 paragraf saja)	abstrak sudah diperbaiki (halaman i dan ii)
5.	Sesuaikan kesimpulan dengan tujuan, bahasa kesimpulan singkat, padat, dan jelas	kesimpulan sudah diperbaiki (halaman 73)

Dosen Pembimbing,


Aneta Yeldi Bagasyo, S.T., M.T., M.Phill., Ph.D

Mahasiswa Ybs.,


Arum Safiana Hidayati



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Arum Sapora Kuduiphi
NRP : 03211540000012
Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan menggunakan anoda boron doped diamond, Ti/TiO₂, Ti/Pt pada limbah terakasi secara biologis

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	29/01 2019	Pembahasan pasca sidang proposal terkait karakteristik limbah, parameter, dan variabel penelitian.	Ab
2.	4/02 2019	Pemilihan jenis anoda dan teknik penelitian pendahuluan untuk menentukan kuat arus serta waktu operasi lama	Ab
3.		Pelaksanaan pengolahan pendahuluan dengan MBBR. Seeding - aklimatisasi	Ab
4.		Pemilihan konsentrasi pengolahan biologis → parameter nitrat dan ammonium pada tiap siklus	Ab
5.		Pemilihan kuat arus, waktu operasi berdasarkan hasil analisis COD pada penelitian pendahuluan.	Ab
6.	23/04 2019	asistensi progress running dan hasil analisis bb	Ab
7.	20/05 2019	laporan kemajuan dan hasil asistensi dosen penguji	Ab
8.	28/06 2019	Pembahasan reaktor C ₂ pada proses oksidasi, tujuannya - kemampuan	Ab
9.	29/07 2019	Asistensi RUMUT dan finishing laporan akhir	Ab

Surabaya, Juli 2019
Dosen Pembimbing

Amu