



TUGAS AKHIR - RE 184804

**OKSIDASI ELEKTROKIMIA DENGAN MENGGUNAKAN  
ANODA *BORON-DOPED DIAMOND* (BDD) PADA LINDI  
TEROLAH SECARA BIOLOGIS**

DIAN NOVITASARI  
0321154000038

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 *BORON-DOPED DIAMOND* (BDD) PADA LINDI  
TEROLAH SECARA BIOLOGIS**

DIAN NOVITASARI  
0321154000038

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 BIOLOGICALLY  
TREATED LANDFILL LEACHATE USING BORON-DOPED  
DIAMOND (BDD) ANODE**

DIAN NOVITASARI  
NRP. 0321154000038

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 BORON-DOPED DIAMOND (BDD) PADA LINDI  
TEROLAH SECARA BIOLOGIS**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik

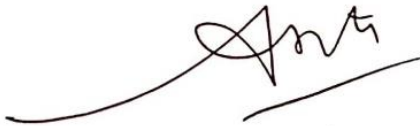
Pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

Oleh:

**DIAN NOVITASARI**  
NRP. 0321154000038

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 *BORON-DOPED DIAMOND* (BDD) PADA LINDI TEROLAH SECARA BIOLOGIS**

Nama Mahasiswa : Dian Novitasari  
NRP : 03211540000038  
Departemen : Teknik Lingkungan ITS  
Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T.,  
M.Phil., Ph.D.

### **ABSTRAK**

Pengolahan lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Indonesia sebagian besar menggunakan sistem biologis. Salah satu TPA yang mengolah lindi secara biologis adalah TPA Ngipik, Gresik. Kualitas lindi hasil proses biologis dengan sistem *Anaerobic Baffle Reactor* (ABR) pada TPA Ngipik belum memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan. Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif pengolahan tambahan seperti oksidasi elektrokimia dengan kombinasi membran CEM dan AEM. Pengolahan fisik-kimia dengan menggunakan oksidasi elektrokimia mampu menurunkan polutan organik dan menyisihkan total-N dalam lindi pada saat yang sama. Proses oksidasi elektrokimia dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain densitas arus, konsentrasi elektrolit, pH, dan jenis anoda yang digunakan. Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) dapat memfasilitasi pembentukan *active species* berupa klorida radikal ( $\text{Cl}_2^{\cdot-}$ ) dan sulfat radikal ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ). Pembentukan senyawa *active species* berperan dalam menyisihkan polutan organik pada oksidasi tidak langsung. Tujuan penelitian ini adalah menentukan kebutuhan energi serta pengaruh perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  terhadap efisiensi pengolahan elektrokimia menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) untuk menurunkan kandungan polutan organik pada lindi terolah secara biologis, menentukan pengaruh densitas arus terhadap efisiensi penyisihan polutan organik dan total-N pada lindi terolah secara biologis, dan menentukan variasi molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  dan densitas arus yang paling optimum dalam pemenuhan baku mutu.

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan reaktor elektrokimia yang terbuat dari akrilik dengan ukuran 5 cm x 10 cm x 2 cm pada kompartemen lindi dan 5 cm x 10 cm x 1 cm pada kompartemen buffer fosfat. Anoda yang digunakan yaitu *Boron-Doped Diamond* (BDD) dengan ukuran 2 x 4 cm. Sedangkan katoda yang digunakan adalah *stainless steel* dengan ukuran 2 x 4 cm. Lindi yang akan diolah sebesar 2 L dengan menggunakan sistem *batch recirculation*. Penelitian ini terdiri dari penelitian pendahuluan dan penelitian utama. Penelitian pendahuluan dilakukan untuk menentukan karakteristik awal lindi dan menentukan lama waktu operasi. Penelitian utama dilakukan variasi densitas arus dan perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$ . Variasi densitas arus yang digunakan adalah 25 mA cm<sup>-2</sup>; 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup>. Variasi perbandingan molar yang digunakan adalah  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10. Parameter yang dianalisis meliputi COD, BOD<sub>5</sub>, pH, TDS, Total-N, Total Kjeldhal Nitrogen (TKN), Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Nitrit (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), Ion Klorida (Cl<sup>-</sup>), dan Ion Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

Kondisi optimum penyisihan COD dan total-N dicapai pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$  dengan densitas arus 25 mA/cm<sup>-2</sup>. Pada kondisi tersebut penyisihan COD sebesar 2,28 g (92%) dengan kebutuhan energi 0,0057 kWh/g dan penyisihan total-N sebesar 1,771 g (59%) dengan kebutuhan energi 0,00745 kWh/g. Dalam variasi tersebut nilai COD telah memenuhi baku mutu, sedangkan nilai total-N belum dapat memenuhi baku mutu.

**Kata kunci:** *Boron-doped diamond*, ion sulfat, lindi, oksidasi elektrokimia, pengolahan biologis

# **ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF BIOLOGICALLY TREATED LANDFILL LEACHATE USING BORON-DOPED DIAMOND (BDD) ANODE**

Name : Dian Novitasari  
Register Number : 03211540000038  
Departement : Teknik Lingkungan ITS  
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T.,  
M.Phill., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Leachate treatment at Indonesia's municipal solid waste landfill mostly use biological systems. One of the landfill that processes leachate biologically is Ngipik Landfill in Gresik. The effluent quality of biological processed leachate using an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) system at this landfill has not comply with the quality standards. Therefore, additional treatment alternatives are required. An electrochemical oxidation combined with CEM and AEM membranes is a suitable alternative because it can degrade organic pollutants and remove total-N in the leachate at the same time. The electrochemical oxidation process is influenced by several factors including current density, electrolyte concentration, pH, and the type of anode used. Boron-doped diamond anodes (BDD) facilitates the formation of active species such as radicals of chlorides ( $\text{Cl}^\cdot$ ,  $\text{Cl}_2^\cdot$ ) and sulfates ( $\text{SO}_4^\cdot$ ). Active species participate in removing organic pollutants through indirect oxidation. The purpose of this study was to determine the energy consumption and to investigate the effect of  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  molar ratio on electrochemical treatment efficiency using BDD to degrade organic pollutants and to remove total-N content in biologically treated leachate.

This research was conducted on a laboratory scale using an electrochemical reactor made of acrylic with a size of 5 cm x 10 cm x 2 cm for leachate compartment and 5 cm x 10 cm x 1 cm for phosphate buffer compartment. The anode used is BDD with a size of 2 x 4 cm, while the cathode used is stainless steel with a size of 2 x 4 cm. Each experiments treated a 2 L leachate sample using a batch recirculation system. This research consists of preliminary

research and main research. Preliminary research was carried out to analyze the initial characteristics of biologically treated leachate and determine the duration of operation. The main study carried out to evaluate the effect of current density (25; 37,5; and 50 mA cm<sup>-2</sup>) and [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] molar ratio (1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10). The parameters analyzed included COD, BOD<sub>5</sub>, pH, TDS, Total-N, Total Kjeldhal Nitrogen (TKN), Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), Chloride Ion (Cl<sup>-</sup>), and Ion Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

The optimum condition for COD and total-N removals was achieved when [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] molar ratio was 1:4 with a current density of 25 mA/cm<sup>-2</sup>. Under this condition, COD removed was 2,28 g (92%) with energy requirement of 0,0057 kWh/g and total-N removal was 1,771 g (59%) with energy requirement of 0,00745 kWh/g. This condition lead to the fulfilment of COD effluent quality standard but not for N-total.

**Keywords:** Biological treatment, *boron-doped diamond*, electrochemical oxidation, leachate, sulfate ion



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan ilmu, perlindungan, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Oksidasi Elektrokimia dengan menggunakan Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD)". Atas arahan dan bimbingan yang telah diberikan hingga terselesaikannya tugas akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D. selaku dosen pembimbing dan Ibu Ervin Nurhayati, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D. selaku dosen co-pembimbing tugas akhir, terima kasih atas arahan, bimbingan, ilmu, kesabaran, dan motivasi yang telah diberikan selama ini.
2. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc., Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, M.T., dan Bapak Alfian Purnomo, S.T., M.T. selaku dosen pengarah, terima kasih atas arahan, kritik yang membangun dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Hadi Sutrisno, Bapak Ashari dan Ibu Iin selaku laboran yang senantiasa membantu selama di Laboratorium.
4. Ibu, Ayah, dan saudara penulis atas segala dukungan do'a dan semangat yang telah diberikan selama ini.
5. Teman-teman Teknik Lingkungan angkatan 2015 khususnya Devi, Fahrudin, Aga, Emil, Marisa, Rofiqoh, Vira, Dewi, Lifa, Arum, dan Ino yang telah memberikan semangat dan bantuan dalam melaksanakan penelitian.

Penulis menyadari masih jauh dari kata sempurna dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan oleh penulis. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

**"Halaman ini sengaja dikosongkan"**

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan .....	5
1.4 Ruang Lingkup .....	5
1.5 Manfaat .....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Lindi .....	7
2.1.1 Pengertian Lindi .....	7
2.1.2 Kandungan Lindi .....	7
2.1.3 Karakteristik Umum Lindi .....	7
2.1.4 Karakteristik Lindi Sebelum Pengolahan Biologis dan Setelah Pengolahan Biologis .....	8
2.1.5 Baku Mutu Lindi di Indonesia .....	9
2.2 Pengolahan Lindi Secara Biologis .....	9
2.2.1 <i>Aerated Lagoon</i> .....	9
2.2.2 Kolam Anaerobik.....	10
2.2.3 Kolam Fakultatif .....	10
2.2.4 Kolam Maturasi.....	11
2.2.5 Anaerobic Baffle Reactor (ABR).....	11
2.2.6 <i>Sequencing Batch Reactor</i> (SBR) .....	12
2.3 Alternatif Pengolahan Fisik-Kimia Lindi .....	12
2.3.1 Metode Koagulasi-Flokulasi.....	12
2.3.2 Metode <i>Advanced Oxidation Process</i> (AOPs).....	13
2.3.3 Adsorpsi Karbon Aktif .....	13
2.3.4 Metode Elektrokimia .....	14

2.4	Mekanisme Proses Elektro-oksidasi Dalam Penurunan Polutan Organik dengan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) .....	17
2.4.1	Mekanisme Proses Degradasi Polutan Organik Menggunakan Oksidasi Elektrokimia dengan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) .....	19
2.4.2	Anoda Boron Doped Diamond (BDD) .....	21
2.4.3	Katoda Stainless Steel .....	22
2.5	Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Oksidasi Elektrokimia.....	22
2.5.1	Kerapatan Arus .....	22
2.5.2	Karakteristik Elektroda .....	24
2.5.3	Konfigurasi Reaktor .....	27
2.5.4	Penggunaan Elektrolit .....	27
2.5.5	Debit Aliran .....	29
2.5.6	Pengaruh pH terhadap Lindi .....	29
2.5.7	Jenis Membran.....	30
2.6	Perhitungan Efisiensi Proses .....	32
2.6.1	Hukum Faraday I.....	32
2.6.2	Hukum Coulomb.....	33
2.6.3	Konsumsi Energi Spesifik .....	33
2.7	Penelitian Terdahulu .....	34
	<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>37</b>
3.1	Deskripsi Umum .....	37
3.2	Kerangka Penelitian.....	37
3.3	Ide Penelitian .....	40
3.4	Studi Literatur.....	40
3.5	Penentuan Variabel dan Parameter .....	40
3.6	Persiapan Penelitian .....	44
3.7	Penelitian Pendahuluan.....	51
3.8	Penelitian Utama .....	52
	<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>55</b>
4.1	Penelitian Pendahuluan.....	55
4.1.1	Karakteristik Awal Lindi.....	55
4.1.2	Penentuan Durasi Proses Oksidasi .....	57
4.2	Penelitian Utama .....	61

4.2.1.1 Perubahan Nilai TDS dan pH pada Kompartemen Lindi dan Buffer Kompartemen Fosfat.....	61
4.2.1.2 Penyisihan COD pada Lindi.....	69
4.2.1.3 Nilai Total Nitrogen pada Lindi .....	74
4.2.1.4 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ dan $\text{NO}_2^-$ .....	80
4.2.1.5 Penyisihan Massa Ammonium pada Lindi dan Buffer Fosfat.....	82
4.2.1.6 Kesetimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat .....	88
4.3 Kebutuhan Energi Spesifik Proses Elektrooksidasi.....	91
4.4 Proses Oksidasi Elektrokimia Sebagai <i>Post-Treatment</i> dalam Pemenuhan Baku Mutu Lindi.....	94
4.5 Perubahan Nilai Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dan Klorida ( $\text{Cl}^-$ ) pada Lindi	101
4.6 Perhitungan Beban COD pada Influen dan Kebutuhan Biaya COD Total .....	104
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	107
DAFTAR PUSTAKA.....	109
LAMPIRAN A PERHITUNGAN KEKUATAN IONIK.....	119
LAMPIRAN B PROSEDUR PERCOBAAN.....	121
LAMPIRAN C DATA HASIL ANALISIS.....	133
LAMPIRAN D PERHITUNGAN KEBUTUHAN PENAMBAHAN $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	157
LAMPIRAN E DOKUMENTASI PENELITIAN .....	159
BIODATA PENULIS.....	165

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tipikal Komposisi Lindi Baru dan Lama .....	8
Tabel 2.2	Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik Sebelum dan Sesudah Pengolahan menggunakan <i>Anaerobic Filter</i> (AF).....	8
Tabel 2.3	Baku Mutu Lindi di Indonesia .....	9
Tabel 2.4	Hasil Pengolahan Lindi menggunakan <i>Sequencing Batch Reactor</i> (SBR) .....	12
Tabel 2.5	Kelebihan dan Kelemahan Pada Pengolahan Lindi Secara Fisik-kimia .....	15
Tabel 2.6	Potensial Evolusi Oksigen Pada Kondisi Asam .....	21
Tabel 2.7	Kekuatan Oksidasi Pada Berbagai Jenis Anoda yang digunakan untuk Mineralisasi Elektrokimia pada Media Asam.....	25
Tabel 2.8	Kelebihan dan Kekurangan Kinerja Elektroda pada Proses Elektrooksidasi .....	26
Tabel 3.1	Metode Analisis pada Setiap Parameter .....	41
Tabel 3.2	Kebutuhan, Titik dan Waktu Pengambilan Sampel....	43
Tabel 3.3	Spesifikasi Membran <i>Cation Exchange Membrane</i> (CEM) dan <i>Anion Exchange Membrane</i> (AEM) .....	49
Tabel 3.4	Variasi Bahan Uji Penelitian .....	52
Tabel 4.1	Karakteristik Influen Pengolahan ABR Lindi pada TPA Ngipik, Gresik .....	56
Tabel 4.2	Karakteristik Influen Pengolahan ABR Hasil Pengenceran Dua Kali .....	56
Tabel 4.3	Penentuan Durasi Waktu Operasi Berdasarkan Densitas Arus Listrik .....	58
Tabel 4.4	Kebutuhan Energi Spesifik Parameter COD .....	91
Tabel 4.5	Kebutuhan Energi Spesifik Parameter Total-N .....	93
Tabel 4.6	Baku Mutu Lindi di Indonesia .....	94
Tabel 4.7	Penurunan Konsentrasi COD pada Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] ....	95
Tabel 4.8	Penurunan Konsentrasi COD pada Densitas Arus .....	95
Tabel 4.9	Penurunan Konsentrasi COD pada Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] ....	96
Tabel 4.10	Penurunan Konsentrasi Total-N Pada Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] .....	97

Tabel 4.11 Penurunan Konsentrasi Total-N Pada Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]	97
Tabel 4.12 Penurunan Konsentrasi Total-N Pada Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]	98
Tabel 4.13 Konsentrasi Nilai BOD Awal dan Akhir Pada Lindi	98
Tabel 4.15 Hasil Analisis Klorida (Cl <sup>-</sup> ) pada Lindi	103
Tabel LC. 1 Penyisihan Massa COD pada Penelitian Pendahuluan	133
Tabel LC. 2 pH dan TDS Lindi pada Penelitian Pendahuluan	133
Tabel LC. 3 pH dan TDS Buffer Fosfat pada Penelitian Pendahuluan	133
Tabel LC. 4 Massa TDS Lindi pada variasi Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup>	135
Tabel LC. 5 Nilai pH Lindi pada variasi Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup>	135
Tabel LC.6 Massa TDS Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup>	135
Tabel LC.7 Nilai pH Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup>	135
Tabel LC.8 Massa TDS Lindi pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup>	136
Tabel LC.9 Nilai pH Lindi pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup>	136
Tabel LC.10 Massa TDS Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup>	136
Tabel LC.11 Nilai pH Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup>	136
Tabel LC.12 Massa TDS Lindi pada variasi Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup>	137
Tabel LC.13 Nilai pH Lindi pada variasi Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup>	137
Tabel LC.14 Massa TDS Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup>	137
Tabel LC.15 Nilai pH Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup>	138
Tabel LC.16 Penurunan Nilai COD pada Variasi Densitas Arus	138



Tabel LC.17 Penurunan Nilai COD pada Variasi Densitas Arus .....	139
Tabel LC.18 Penurunan Nilai COD pada Variasi Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	140
Tabel LC.19 Nilai Total - N pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 25 mA/cm <sup>-2</sup> .....	141
Tabel LC.20 Nilai Total - N pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 37,5 mA/cm <sup>-2</sup> .....	142
Tabel LC.21 Nilai Total - N pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 50 mA/cm <sup>-2</sup> .....	143
Tabel LC.22 Total Anorganik Nitrogen sebagai NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> pada Lindi dengan Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> ...	144
Tabel LC.23 Total Anorganik Nitrogen sebagai NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> pada Lindi dengan Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup> ..	145
Tabel LC.24 Total Anorganik Nitrogen sebagai NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> pada Lindi dengan Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	146
Tabel LC.25 Hasil Analisis Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) dengan Variasi Densitas Arus 25 mA/cm <sup>-2</sup> .....	147
Tabel LC.26 Hasil Analisis Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) dengan Variasi Densitas Arus 37,5 mA/cm <sup>-2</sup> .....	148
Tabel LC.27 Hasil Analisis Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) dengan Variasi Densitas Arus 50 mA/cm <sup>-2</sup> .....	149
Tabel LC.28 Kesetimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 25 mA/cm <sup>-2</sup> dengan Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 .....	150
Tabel LC. 29 Kesetimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 37,5 mA/cm <sup>-2</sup> dengan Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 .....	151
Tabel LC.30 Kesetimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 50 mA/cm <sup>-2</sup> dengan Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 .....	152
Tabel LC.31 Perubahan BOD Variasi Molar Rasio [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 .....	153
Tabel LC.32 Hasil Analisis Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) pada Lindi .....	153
Tabel LC. 33 Hasil Analisis Ion Klorida (Cl <sup>-</sup> ) pada Lindi .....	154

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram pada proses elektrolisis .....	14
Gambar 2.2 Mekanisme Proses Oksidasi Tidak Langsung dan Oksidasi Langsung .....	18
Gambar 2. 3 Reaksi Elektro-oksidasi antara Zat Organik dengan Anoda <i>Boron Doped Diamond</i> (BDD) .....	19
Gambar 2. 4 Nilai pH yang Menghasilkan Penurunan Polutan Organik .....	30
Gambar 3. 2 Kerangka Penelitian .....	39
Gambar 3. 3 Skema Sistem Elektrokimia dengan Membran .....	46
Gambar 3. 4 Reaktor Elektrokimia .....	47
Gambar 4.1 Penyisihan [COD/COD <sub>0</sub> ] dan Densitas Arus pada Lindi selama Proses Elektrooksidasi .....	57
Gambar 4.2 Nilai pH dan Penyisihan Massa TDS .....	60
Gambar 4.3 Perubahan Massa TDS dan pH pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> .....	62
Gambar 4.4 Perubahan Nilai TDS pada Buffer Fosfat dengan Variasi Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> .....	63
Gambar 4.5 Perubahan Nilai TDS pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup> .....	65
Gambar 4.6 Perubahan Nilai TDS pada Buffer Fosfat dengan Variasi Densitas Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup> .....	65
Gambar 4.7 Perubahan Nilai TDS pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	67
Gambar 4.8 Perubahan Nilai TDS pada Buffer Fosfat dengan Variasi Densitas Arus 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	68
Gambar 4.9 Penurunan nilai COD pada variasi densitas arus 25 mA cm <sup>-2</sup> .....	70
Gambar 4. 10 Penurunan Konsentrasi COD pada variasi densitas arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup> .....	72
Gambar 4.12 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:1 dengan Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> , 37,5 mA cm <sup>-2</sup> , dan 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	75
Gambar 4.13 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:8 dengan Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> , 37,5 mA cm <sup>-2</sup> , dan 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	78

Gambar 4.14 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:10 dengan Densitas Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> , 37,5 mA cm <sup>-2</sup> , dan 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	79
Gambar 4.15 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> pada Arus 25 mA cm <sup>-2</sup> .....	80
Gambar 4.16 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> pada Arus 37,5 mA cm <sup>-2</sup> .....	80
Gambar 4.17 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> pada Arus 50 mA cm <sup>-2</sup> .....	81
Gambar 4.18 Penyisihan Massa Amonium dengan densitas arus .....	83
Gambar 4.19 Penyisihan Massa Amonium dengan densitas arus .....	85
Gambar 4.20 Penyisihan Massa Amonium dengan densitas arus .....	86
Gambar 4.21 Kesetimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 25 mA/cm <sup>-2</sup> dengan Perbandingan .....	88
Gambar 4.22 Kesetimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 37,5 mA/cm <sup>-2</sup> dengan Perbandingan .....	89
Gambar 4.23 Kesetimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 50 mA/cm <sup>-2</sup> dengan Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 .....	89
Gambar 4.24 Diagram Alir Pengolahan Lindi .....	100

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sejauh ini bentuk pengolahan lindi di TPA Indonesia masih dilakukan secara konvensional dengan sistem biologis berupa kolam (Said dan Hartaja, 2015). Salah satu TPA yang mengolah lindi menggunakan sistem biologis adalah TPA Ngipik, Gresik. Bentuk pengolahan lindi pada TPA Ngipik, Gresik menggunakan *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR). Pengolahan lindi pada TPA Ngipik, Gresik tidak berjalan secara optimum sehingga kandungan pencemar lindi berupa senyawa organik dan nitrogen sangat tinggi (Alamsjah, 2016). Sampah yang tertimbun di TPA mengalami serangkaian proses degradasi fisika, kimia, dan biologis, sehingga menghasilkan cairan yang disebut lindi. Sifat kompleks yang dimiliki lindi berasal dari berbagai senyawa organik, anorganik, logam berat (Aziz *et al.*, 2004) dan senyawa *xenobiotik* (polutan) (Kjeldsen *et al.*, 2002). Hal tersebut menyebabkan kerusakan pada lingkungan khususnya air tanah dan permukaan tanah, karena tingginya konsentrasi zat organik dan toksisitas (Costa *et al.*, 2018). Air lindi memiliki karakteristik COD sebesar 150-100000 mg/L, BOD<sub>5</sub> 100-90000 mg/L, Total-N sebesar 50-5000 mg/L (Ali, 2011). Faktor yang mempengaruhi kualitas lindi diantaranya adalah curah hujan dan usia TPA (Torobi *et al.*, 2015). Lindi juga mengandung zat berbahaya seperti nitrogen amonia, klorin, nitrat (Tchobanoglous *et al.*, 1993) dan komponen organik yang *biodegradable*.

Pengolahan lindi menggunakan sistem biologis memiliki beberapa kelemahan seperti lahan yang digunakan cukup besar, waktu tinggal yang dibutuhkan cukup lama berkisar antara 30-50 hari dan kualitas efluen lindi yang dihasilkan belum memenuhi baku mutu yang berlaku (Said dan Hartaja, 2015). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Mehmood *et al.* (2009), kualitas efluen pada lindi menggunakan *aerated lagoons* dengan konsentrasi Amonium-N (9,3 mg/L), Nitrit-N (0,3 mg/L), Nitrat-N (183,4 mg/L) sehingga didapatkan Total-N sebesar 193 mg/L. Lindi dengan kandungan Total-N sebesar 193 mg/L masih belum memenuhi baku mutu yang berlaku.

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, kualitas air lindi TPA Ngipik menggunakan ABR masih belum memenuhi baku mutu yang berlaku. Berdasarkan permasalahan di atas, maka perlu adanya alternatif tambahan yang bertujuan sebagai pemenuhan baku mutu air lindi agar mencegah dampak negatif bila dibuang ke lingkungan bebas dan badan air.

Ada berbagai metode dalam pengolahan lindi khususnya pengolahan secara fisik-kimia seperti AOPs, adsorpsi, karbon aktif, koagulasi-flokulasi, dan elektrokimia (Kurniawan *et al.*, 2006). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan *et al.* (2006), kinerja pengolahan air lindi menggunakan kombinasi ozon dengan *Granular Activated Carbon* (GAC) menunjukkan prosentase removal COD sebesar 86% dan ammonia (NH<sub>3</sub>-N) sebesar 50% dengan masing-masing konsentrasi awal lindi 8000 mg/L dan 2620 mg/L, sehingga konsentrasi COD turun menjadi 1120 mg/L dan ammonia turun menjadi 1310 mg/L. Hasil dari pengolahan tersebut belum memenuhi baku mutu yang berlaku.

Pada perkembangannya pengolahan lindi menggunakan oksidasi elektrokimia atau biasa disebut dengan elektrooksidasi dinilai mampu dalam menurunkan kandungan organik, menghilangkan zat warna, dan meningkatkan biodegradasi pada lindi (Fernandes *et al.*, 2014). Elektrokimia dengan kombinasi membran memiliki keunggulan yaitu selektif terhadap ion yang melewati membran, sehingga hanya ion-ion tertentu yang dapat lolos (Valero *et al.*, 2011). Proses degradasi senyawa polutan yang kompleks juga dapat dilakukan dengan oksidasi elektrokimia. Oksidasi elektrokimia dapat mengoksidasi polutan organik menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O untuk mencegah pergeseran kontaminan dari satu fase ke fase lainnya (Deng dan Englehardt, 2007). Dari segi ekonomis, proses oksidasi elektrokimia lebih efisien dalam mengolah lindi terolah secara biologis dibandingkan lindi yang belum terolah sama sekali (Moro *et al.*, 2016). Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi proses oksidasi elektrokimia dengan kombinasi membran

adalah jenis elektroda, konfigurasi sel, densitas arus, dosis elektrolit, jenis membran, jarak antar elektroda, dan pH. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Feki *et al.* (2009), terkait pengolahan oksidasi elektrokimia pada lindi terolah secara biologis dengan menggunakan reaktor bermembran dan menggunakan elektroda Ti/Pt, menunjukkan hasil prosentase removal COD sebesar 85%, TKN (94%) dan, warna (99%) serta melaporkan bahwa standar baku mutu efluen yang dihasilkan telah memenuhi baku mutu.

Penambahan ion sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) sebagai elektrolit dapat menurunkan polutan organik lebih tinggi dibandingkan tanpa penambahan elektrolit (Silveira *et al.*, 2014) dan penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  juga dapat menjadi sumber tambahan pada kinerja oksidan elektrogenerasi (Turro *et al.*, 2012). Berdasarkan Agustina (2018) bahwa pada penambahan 0,05 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (1,014 gram) dengan anoda BDD mampu menyisihkan COD sebesar 59% dengan konsumsi energi sebesar 0,0277 g Wh<sup>-1</sup>. Pengolahan lindi sebagai *post-treatment* menggunakan lindi yang memiliki kandungan Cl yang tinggi dan bersalinitas, sehingga pengolahan lindi dari TPA yang berada dekat dengan pantai. Lindi yang memiliki kandungan klorida yang tinggi dapat mengurangi penggunaan listrik karena dapat memperkecil hambatan listrik (Bgastyo *et al.*, 2014). Berdasarkan Bagastyo *et al.* (2013), pada penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,05M menggunakan proses elektrooksidasi dengan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) terjadi peningkatan penyisihan COD dari 60% menjadi 74%. Selain itu, dalam penelitian terkait kombinasi elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia yang dilakukan oleh Sari, (2017), menunjukkan penyisihan COD tertinggi dengan penambahan NaCl sebesar 2 g/L mampu menyisihkan COD sebesar 77,93% (10,96 gram) serta konsumsi energi spesifik sebesar 11,067 Wh L<sup>-1</sup>. Penelitian tersebut menggunakan anoda karbon dan katoda besi. Berdasarkan Agustina (2018) menyatakan bahwa pada pH 8,5 dengan nilai kerapatan arus 50, mA cm<sup>-2</sup>, 75 mA cm<sup>-2</sup>, 100 mA cm<sup>-2</sup> secara efektif dapat meningkatkan penyisihan COD sebesar 26,84%, 37% dan 50,59%.

Jenis elektroda yang digunakan dalam oksidasi elektrokimia adalah elektroda inert, seperti Pt dan karbon sedangkan alternatif dalam pemilihan anoda lebih bervariasi seperti  $\text{TiO}_2/\text{RuO}_2$ ,  $\text{PbO}_2/\text{SnO}_2$ ,  $\text{Ti}/\text{Pt}$ ,  $\text{SPR PbO}_2/\text{Ti}$ , dan  $\text{p-Si}/\text{BDD}$ . Di dalam oksidasi elektrokimia pada anoda terjadi proses oksidasi secara tidak langsung dan oksidasi secara langsung (Deng dan Englehardt, 2007). Anoda BDD memiliki kemampuan degradasi yang sangat aktif dalam mengoksidasi senyawa organik, karena dapat memfasilitasi pembentukan senyawa radikal hidroksil ( $\text{OH}^\cdot$ ). Anoda BDD menghasilkan oksidan kuat berupa fosfat ( $\text{H}_2\text{PO}_4^\cdot$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ), klorida ( $\text{Cl}^\cdot$ ,  $\text{Cl}_2^\cdot$ ), sulfat ( $\text{SO}_4^\cdot$ ), dan karbonat ( $\text{CO}_3^\cdot$ ). Senyawa tersebut dapat bertindak sebagai oksidan langsung dan tidak langsung untuk mineralisasi polutan mikro di permukaan anoda atau sebagian besar larutan (Farhat *et al.*, 2017).

Dalam penelitian ini menganalisis kebutuhan energi serta efisiensi pengolahan dan pengaruh penambahan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  secara elektrokimia menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) untuk menurunkan polutan organik yang terkandung dalam lindi terolah secara biologis. Proses oksidasi elektrokimia dengan menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) diharapkan secara efektif dapat menurunkan polutan organik yang terkandung dalam lindi terolah secara biologis. Lindi yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengenceran dua kali pada influen ABR TPA Ngipik. Katoda yang digunakan penelitian adalah *stainless steel* dan jenis membran yang digunakan adalah *Cation Exchange Membrane* (CEM) dan *Anion Exchange Membrane* (CEM). Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat menjadi rekomendasi alternatif pengolahan lindi setelah pengolahan biologis agar dapat memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian antara lain:

1. Bagaimana pengaruh perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  terhadap efisiensi penyisihan COD dan total-N pada proses oksidasi elektrokimia pada lindi terolah secara biologis menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD).



2. Bagaimana pengaruh densitas arus terhadap efisiensi penyisihan polutan organik dan total-N pada lindi terolah secara biologis.
3. Bagaimana variasi molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  dan densitas arus yang paling optimum dalam pemenuhan baku mutu dan energi yang dibutuhkan.

### 1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menentukan pengaruh perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  terhadap efisiensi penyisihan COD dan total-N pada proses oksidasi elektrokimia pada lindi terolah secara biologis menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD).
2. Menentukan pengaruh densitas arus terhadap efisiensi penyisihan polutan organik dan total-N pada lindi terolah secara biologis.
3. Menentukan variasi molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  dan densitas arus yang paling optimum dalam pemenuhan baku mutu dan energi yang dibutuhkan.

### 1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini antara lain:

1. Lindi yang digunakan adalah lindi dari kolam penampungan TPA Ngipik, Gresik.
2. Penelitian ini menggunakan anoda *Boron Doped Diamond* (BDD) dan katoda *stainless steel*.
3. Parameter utama yang dianalisis adalah COD, BOD<sub>5</sub>, TDS, Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), dan pH.
4. Reaktor yang digunakan terbuat dari bahan *acrylic* dengan tiga kompartemen, dengan membran *Cation Exchange Membrane* (CEM) dan *Anion Exchange Membrane* (AEM) serta menggunakan sistem *batch recirculation*.
5. Variabel yang digunakan adalah densitas arus dan perbandingan molar rasio  $[\text{Cl}^-] : [\text{SO}_4^{2-}]$ .
6. Percobaan dalam skala laboratorium.

### 1.5 Manfaat

Manfaat penelitian ini antara lain:

1. Sebagai informasi terkait efektifitas proses oksidasi elektrokimia dengan menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) pada pengolahan lindi terolah secara biologis.
2. Memberikan informasi ilmiah terkait pengaruh penambahan elektrolit yang mengandung  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  terhadap efektifitas anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) dalam menurunkan polutan organik pada lindi terolah secara biologis.
3. Sebagai informasi alternatif pengolahan lindi setelah proses biologis di TPA Ngipik maupun TPA lainnya.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Lindi**

##### **2.1.1 Pengertian Lindi**

Sampah yang tertimbun di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) akan mengalami serangkaian proses degradasi fisika, kimia, dan biologi, sehingga menghasilkan cairan berwarna gelap yang disebut dengan lindi (Costa *et al.*, 2018). Lindi merupakan limbah cair yang mengandung polutan organik dan anorganik yang timbul akibat dari masuknya air ke dalam timbunan sampah sehingga melarutkan materi serta hasil dekomposisi senyawa organik (Saleh dan Purnomo, 2014). Faktor yang mempengaruhi kualitas lindi diantaranya adalah curah hujan dan usia TPA (Torobi *et al.*, 2015).

##### **2.1.2 Kandungan Lindi**

Kandungan Lindi dibagi dalam tiga kelompok besar yaitu bahan organik, bahan anorganik dan senyawa organik xenobiotik. Kandungan lain yang terdapat dalam lindi pada skala kecil seperti arsenat, barium, borat, kobalt, litium, merkuri, selenat dan sulfida. Komponen yang terkandung pada bahan organik antara lain asam, alkohol, aldehida dan lain-lain biasanya dihitung sebagai COD (*Chemical Oxygen Demand*), BOD (*Biological Oxygen Demand*), DOC (*Dissolved Organic Carbon*), volatil lainnya, senyawa fulvat dan senyawa humat. Komponen yang terkandung pada bahan anorganik antara lain sulfat, klorida, amonium, kalsium, magnesium, natrium, kalium, hidrogen karbonat, besi, dan mangan. Selain itu juga mengandung logam berat seperti timah, nikel, tembaga, kadmium, kromium, dan seng. Komponen yang terkandung pada senyawa organik xenobiotik antara lain hidrokarbon aromatik, fenol, diklorinasi alifatik, pestisida, dan plastizers termasuk PCB, *dioxin*, PAH, dll (Lee *et al.*, 2010).

##### **2.1.3 Karakteristik Umum Lindi**

Karakteristik lindi umumnya memiliki warna coklat muda, coklat tua hingga mendekati warna hitam. Warna pada air lindi menunjukkan besarnya kandungan konsentrasi bahan organik pada air lindi tersebut, semakin mendekati warna hitam maka semakin tinggi pula kandungan bahan organik (Fitrianti, 2011). Berikut ini

merupakan Tipikal komposisi Lindi yang disajikan dalam Tabel 2.1 di bawah ini:

Tabel 2.1 Tipikal Komposisi Lindi Baru dan Lama

Komponen	Angka satuan dalam mg/L		
	Lindi baru (kurang dari 2 tahun)		Lindi lama (lebih dari 10 tahun)
	Range	Tipikal	
BOD <sub>5</sub>	2.000-3.000	10.000	100-200
TOC	1.500-20.000	6.000	80-160
COD	3.000-60.000	18.000	100-500
TSS	200-2.000	500	100-400
Nitrogen organik	10-800	200	80-120
Nitrat	5-40	25	5-10
Total fosfat	5-100	30	5-10
Sulfat	50-1.000	300	20-50
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Nitrogen amonia	10-800	200	20-40

Sumber: Tchobanoglous *et al.* (1993)

#### 2.1.4 Karakteristik Lindi Sebelum Pengolahan Biologis dan Setelah Pengolahan Biologis

Karakteristik lindi sebelum pengolahan biologis memiliki kandungan berbahaya yang sangat tinggi, sehingga dapat mencemari apabila dibuang ke badan air. Pada Tabel 2.2 merupakan karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik sebelum dan sesudah pengolahan menggunakan AF.

Tabel 2.2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik Sebelum dan Sesudah Pengolahan menggunakan *Anaerobic Filter* (AF)

Komponen	Influen Lindi Pengolahan <i>Anaerobic Filter</i> (AF)	Efluen Lindi Pengolahan <i>Anaerobic Filter</i> (AF)
COD	10.115,7 mg/L	8.727,3 mg/L
BOD	1.307,9 mg/L	1.554,1 mg/L
TSS	210 mg/L	330 mg/L
Total-N	530,5 mg/L	293,4 mg/L

Sumber: Alamsjah (2016)

### 2.1.5 Baku Mutu Lindi di Indonesia

Peraturan terkait Baku mutu lindi di Indonesia telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Baku mutu lindi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Baku Mutu Lindi di Indonesia

Komponen	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6-9	-
BOD	150	mg/L
COD	300	mg/L
TSS	100	mg/L
Total N	60	mg/L

Sumber: PERMENLHK Nomor 59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016

### 2.2 Pengolahan Lindi Secara Biologis

Pada lindi muda yang memiliki tingkat biodegradabilitas yang tinggi, sangat efektif untuk mengolah senyawa organik dan nitrogen dengan pengolahan biologis. Proses degradasi senyawa organik oleh mikroorganisme terjadi pada pengolahan biologis. Namun terdapat senyawa yang menghambat proses biologis yaitu senyawa *refractory*, seperti asam humat dan asam fulvat (Renou *et al.*, 2008). Berikut ini merupakan beberapa metode pengolahan lindi secara biologis:

#### 2.2.1 *Aerated Lagoon*

Prinsip yang digunakan pada *aerated lagoon* adalah penggunaan kolam dengan jumlah lebih dari satu. Air lindi di alirkan secara terbuka pada kolam *lagoon* 1 hingga 4, setiap *lagoon* terdapat sistem berupa aerator yang dapat memproduksi oksigen dari gelembung udara. Pada penelitian yang dilakukan oleh Mehmood *et al.* (2009), pengolahan tersebut didapatkan hasil Amonium-N sebesar 9,3 mg/l; Nitrit-N sebesar 0,3 mg/l; Nitrat-N sebesar 183,4 mg/l sehingga didapatkan Total-N sebesar 193 mg/l. Menurut 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, efluen Total-N yang diperbolehkan sebesar 60 mg/l sehingga tidak memenuhi baku mutu air lindi.

### **2.2.2 Kolam Anaerobik**

Prinsip kerja pada kolam anaerobik adalah padatan diendapkan ke dasar kolam, dimana padatan tersebut dicerna secara anaerobik di dalam kolam. Kolam anaerobik memiliki nilai oksigen terlarut yang sangat rendah karena dirancang untuk menerima beban organik (BOD) yang dapat mencapai 10.000 mg/l. Kolam anaerobik memiliki kedalaman  $\pm$  5 meter agar kondisi kolam tetap dalam keadaan anaerobik sehingga bakteri anaerobik dapat bekerja secara maksimum. Berdasarkan efisiensi kolam anaerobik diasumsikan mencapai 70%. Efisiensi tersebut menghasilkan BOD efluen sebesar 3000 mg/l (Friadi, 2015). Menurut 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, efluen BOD yang diperbolehkan sebesar 150 mg/l sehingga tidak memenuhi baku mutu air lindi.

### **2.2.3 Kolam Fakultatif**

Kolam fakultatif merupakan lanjutan pengolahan dari kolam anaerobik. Proses pengolahan kolam fakultatif terbagi menjadi dua proses yaitu proses aerobik yang terjadi pada bagian atas kolam dimana oksigen berasal dari hasil fotosintesis ganggang, angin dan proses anaerobik yang terjadi pada dasar kolam. Kolam fakultatif memiliki kedalaman antara 1 - 2,4 meter. Efisiensi kolam fakultatif diasumsikan mencapai 80%. Berdasarkan efisiensi tersebut menghasilkan BOD efluen sebesar 600 mg/l (Friadi, 2015). Menurut 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, efluen BOD yang diperbolehkan sebesar 150 mg/l sehingga tidak memenuhi baku mutu air lindi.

#### **2.2.4 Kolam Maturasi**

Kolam maturasi merupakan lanjutan pengolahan dari kolam fakultatif. Kolam maturasi atau biasa disebut dengan kolam pematangan memiliki fungsi dalam penghancuran *phatogen* dan termasuk proses aerobik. Hal tersebut terjadi karena kondisi yang tidak baik bagi bakteri *faecal* dan virus sehingga mati dengan kecepatan tinggi. Kolam maturasi memiliki ketinggian 2-3 meter, namun lebih banyak digunakan pada ketinggian 2 meter karena penghancuran *phatogen* akan lebih baik pada kolam dangkal. Efisiensi kolam maturasi diasumsikan mencapai 60%. Berdasarkan efisiensi tersebut menghasilkan BOD efluen sebesar 240 mg/l (Friadi, 2015). Menurut 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, efluen BOD yang diperbolehkan sebesar 150 mg/l sehingga tidak memenuhi baku mutu air lindi.

#### **2.2.5 Anaerobic Baffle Reactor (ABR)**

Pengolahan lindi secara biologis dapat dilakukan dengan sistem anaerobik. Pengolahan anaerobik terbagi menjadi dua jenis yaitu secara tersuspensi dan terlekat. Jenis pengolahan secara tersuspensi dapat dilakukan dengan proses *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) dan *Anaerobic Baffle Reactor* (ABR). Jenis pengolahan secara terlekat dapat dilakukan dengan *anaerobic filter* dan *fluidized bed reactor*. Jenis pengolahan yang sering digunakan adalah ABR, karena memiliki kemampuan untuk mengatasi terjadinya *shock loading*. ABR memiliki fungsi dalam memisahkan zat padat tersuspensi pada air limbah dengan proses *suspended growth*. Pada proses anaerobik terjadi tiga tahap proses oksidasi yaitu hidrolisis, fermentasi dan metanogenesis (Metcalf dan Eddy, 2003). Zona yang dimiliki ABR berjumlah tiga yaitu zona *asidogenesis*, *methanogenesis* dan zona *buffer*. Pada zona asidifikasi terjadi penurunan pH. Metanogenesis terjadi pembentukan CH<sub>4</sub>, sehingga pada zona buffer digunakan untuk mempertahankan mempertahankan CH<sub>4</sub> agar proses dalam reaktor berjalan dengan baik. Pada penelitian yang dilakukan (Wang dan Shen, 2018), pengolahan lindi menggunakan ABR dapat meningkatkan rasio BOD/COD 0,2-0,3 menjadi 0,4-0,6.

Namun pada penelitian tersebut, pengolahan ABR belum dapat memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan. Sehingga perlu adanya pengolahan tambahan berupa pengolahan secara fisik-kimia.

### 2.2.6 Sequencing Batch Reactor (SBR)

Berikut ini merupakan tabel hasil pengolahan lindi menggunakan SBR, sebagai berikut:

Tabel 2.4 Hasil Pengolahan Lindi menggunakan *Sequencing Batch Reactor* (SBR)

Parameter	Unit	Influen sampel	Efluen sampel	Efisiensi Pengolahan
BOD <sub>5</sub>	mg/L	150.60	43.20	71%
COD	mg/L	2455	1130.15	54%
pH		8.2	8.4	-
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg/L	598	160.4	73%
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg/L	172.5	302.11	-
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg/L	61.7	116.29	-
Cl <sup>-</sup>	mg/L	1750	708.70	49%

Sumber: Laitinen *et al.* (2005)

Berdasarkan nilai efluen lindi pada Tabel 2.4, lindi yang dihasilkan belum dapat memenuhi baku mutu air lindi yang berlaku.

## 2.3 Alternatif Pengolahan Fisik-Kimia Lindi

Permasalahan dalam pengolahan lindi secara biologis belum dapat memenuhi standar baku mutu efluen, sehingga masih diperlukan pengolahan khusus dalam mengolah air lindi tersebut. Berikut ini merupakan beberapa alternatif dalam pengolahan lindi:

### 2.3.1 Metode Koagulasi-Flokulasi

Prinsip yang digunakan pada metode koagulasi-flokulasi adalah pengadukan. Pada koagulasi terjadi proses destabilisasi dengan pengadukan cepat sedangkan flokulasi terjadi proses aglomerasi partikel dengan pengadukan lambat (Mu'minah, 2008). Koloid maupun partikel kecil yang telah mengalami destabilisasi akan mempercepat kontak antar partikel sehingga partikel tersebut menempel dan menjadi agregat yang lebih besar. Agregat yang



memiliki ukuran besar dapat dengan mudah mengalami pengendapan. Koagulan yang digunakan adalah  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{FeCl}_3$  (Zouboulis *et al.*, 2004). Metode pengadukan dibedakan menjadi pengadukan mekanis, pengadukan hidrolis dan pengadukan pneumatis. Kelemahan metode ini yaitu dapat meningkatkan konsentrasi aluminium dan besi pada air, penyisihan  $\text{NH}_3\text{-N}$  rendah dan menghasilkan lumpur dalam jumlah yang banyak (Silva *et al.*, 2004).

### 2.3.2 Metode *Advanced Oxidation Process* (AOPs)

Pada penelitian Hutagulung *et al.* (2010), sistem yang digunakan oleh *Advanced Oxidation Process* (AOPs) adalah kombinasi antara Ozon-UV- $\text{H}_2\text{O}_2$  dan karbon aktif. Prinsip kerja yang digunakan pada AOPs adalah memanfaatkan radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ) yang berasal dari reaksi antara kombinasi Ozon-UV-  $\text{H}_2\text{O}_2$  dalam air, sedangkan karbon aktif memiliki peran dalam membantu proses absorpsi mikro polutan hasil oksidasi AOPs. Berikut ini merupakan reaksi pada ozon dan ultraviolet sehingga menghasilkan radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ), pada persamaan (1) dan (2):  
 $\text{O}_3 + \text{UV} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}(\text{1D})$ .....(1)  
 $\text{O}(\text{1D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\cdot\text{OH}$ .....(2)

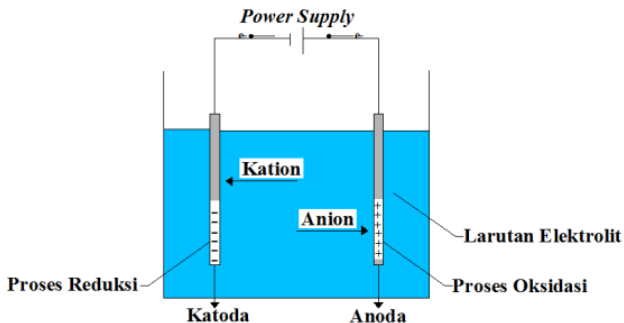
Dari reaksi diatas dihasilkan radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ) yang memiliki kemampuan oksidasi yang tinggi sebesar 2,8 V, sedangkan lampu ultraviolet mampu membunuh bakteri pada panjang gelombang tertentu ( $\lambda = 254 \text{ m}$ ). Hal tersebut berpotensi dalam mengoksidasi berbagai senyawa organik yang terkandung dalam air. Penurunan COD dengan sistem AOPs berkisar antara 47,28% hingga 94,51% untuk limbah resin cair.

### 2.3.3 Adsorpsi Karbon Aktif

*Granular Activated Carbon* (GAC) merupakan adsorben yang berfungsi untuk mengadsorpsi senyawa organik dan anorganik. Hal tersebut terjadi karena adsorben memiliki permukaan yang luas, permukaan yang reaktif, kapasitas adsorpsi yang tinggi dan merupakan *microporous structure*. Pada penelitian Kargi *et al.* (2004), dihasilkan penurunan COD sebesar 87% dengan konsentrasi awal COD 7000 mg/L dengan menggunakan adsorben PAC.

### 2.3.4 Metode Elektrokimia

Sel elektrokimia merupakan reaksi kimia yang disebabkan oleh adanya arus listrik karena adanya sebuah reaksi kimia, arus listrik tersebut berasal dari elektroda yang terhubung dengan aliran listrik (Harahap, 2016). Elektro-oksidasi merupakan teknologi yang berkembang pada elektrokimia dalam menyisihkan polutan organik di dalam elektrolit (Costa *et al.*, 2018). Elektrokimia juga ada yang menggunakan membran (Thompson Brewster *et al.*, 2016). Beberapa penelitian, menunjukkan bahwa oksidasi elektrokimia mampu menurunkan senyawa organik, fosfat, spesies yang mengandung nitrogen, warna dan padatan tersuspensi. Pada proses oksidasi elektrokimia juga memiliki keunggulan lain seperti ramah lingkungan karena tidak membutuhkan dosis presipitan, peralatan yang digunakan sederhana dan penggunaan yang mudah (Ding *et al.*, 2018).



Gambar 2. 1 Diagram pada proses elektrolisis  
Sumber : Anglada *et al.* (2009), dengan modifikasi

Pada gambar diatas *power supply* akan mengalirkan arus listrik ke elektroda yang bermuatan negatif (katoda) dan bermuatan positif (anoda). Pada elektroda tersebut akan menghasilkan ion-ion berupa anion dan kation. Perpindahan ion terjadi karena larutan yang digunakan adalah larutan elektrolit. Pada ion kation akan bergerak ke elektroda yang bermuatan negatif (katoda) dan sebaliknya. Berikut ini merupakan Tabel 2.5 yang menunjukkan perbandingan kelebihan dan kelemahan pada pengolahan lindi secara fisik-kimia.

Tabel 2.5 Kelebihan dan Kelemahan Pada Pengolahan Lindi Secara Fisik-kimia

Metode Pengolahan Fisik-kimia	Kelebihan	Kelemahan	Sumber
Koagulasi-flokulasi	Penyisihan COD sebesar 40%, proses penerapannya sederhana serta efisiensi dalam pengolahan lindi tinggi.	Dapat meningkatkan konsentrasi aluminium dan besi pada air, kemampuan dalam menyisihkan NH <sub>3</sub> -N rendah dan menghasilkan lumpur dalam jumlah yang banyak.	(Zouboulis <i>et al.</i> , 2004);(Bakraouy <i>et al.</i> , 2017); (Silva <i>et al.</i> ,2004)
Amonium Stripping	Removal ammonia dapat mencapai 90%, pengolahan sederhana, biaya yang dibutuhkan tidak terlalu banyak pada pengolahan lindi yang berumur muda.	Bila digunakan pada kondisi optimum dapat meningkatkan nilai pH.	(Ozturk <i>et al.</i> , 2003)
Adsropsi Karbon Aktif	Menunjukkan prosentase removal COD sebesar 86% dan ammonia (NH <sub>3</sub> -N) sebesar 50% dengan masing-masing konsentrasi awal lindi 8000 mg/L dan 2620 mg/L.	Penambahan adsorben diperlukan.	(Kurniawan <i>et al.</i> , 2006); (Kargi <i>et al.</i> , 2004)
AOPs	Berpotensi dalam mengoksidasi berbagai macam senyawa organik, minyak dan bakteri yang terkandung dalam air ;	Belum mampu menurunkan konsentrasi COD, warna, kekeruhan, TSS dan BOD hingga memenuhi	(Hutagalung <i>et al.</i> , 2010) ; (Susanto <i>et al.</i> , 2017)

Metode Pengolahan Fisik-kimia	Kelebihan	Kelemahan	Sumber
	penyisihan COD dan BOD pada AOPs kombinasi fenton dapat mencapai 83% dan 52%.	baku mutu yang ditetapkan.	
Elektrokimia	Penyisihan COD sebesar 96% , mampu menghilangkan zat warna, menurunkan kandungan organik dan meningkatkan kemampuan biodegradasi pada lindi ; tidak memerlukan pemakaian bahan kimia, terbentuknya polutan baru ( <i>secondary pollutant</i> ) sangat kecil selama proses oksidasi elektrokimia berlangsung ; dapat menurunkan kandungan organik, menghilangkan zat warna dan meningkatkan tingkat biodegradasi pada lindi.	Terjadi korosif pada elektroda dan membutuhkan energi listrik.	(Anglada <i>et al.</i> , 2009); (Avsar, 2007) ; (Fernandes <i>et al.</i> , 2014)

## 2.4 Mekanisme Proses Elektro-oksidasi Dalam Penurunan Polutan Organik dengan Anoda Boron Doped Diamond (BDD)

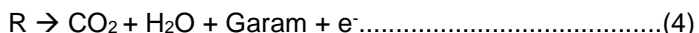
Elektro-oksidasi terbagi menjadi dua yaitu oksidasi langsung dan oksidasi tidak langsung, sebagai berikut :

### 1. Oksidasi Langsung

Pada oksidasi langsung terjadi dua tahap proses yaitu proses organik dari *bulk solution* ke permukaan anoda lalu mengalami absorpsi dan terjadi proses pada permukaan anoda melalui transfer elektron yaitu proses oksidasi. Efisiensi proses elektro-oksidasi 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). Berikut ini merupakan tahap oksidasi langsung persamaan (9) pada elektrokimia *conversion* dan persamaan (10) pada elektrokimia *combustion* :



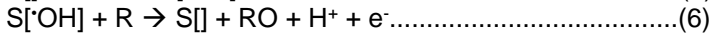
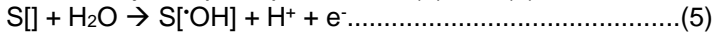
Dimana R merupakan target polutan organik dan RO merupakan polutan organik yang teroksidasi. Elektrokimia *conversion* merupakan proses oksidasi pada senyawa organik. Oksidasi langsung akan berlangsung apabila kondisi operasi lebih rendah dari potensial O<sub>2</sub> (kondisi saat evolusi oksigen terjadi) (Mandal *et al.*, 2017).



Pada reaksi diatas senyawa organik yang merupakan target polutan organik berubah menjadi air, CO<sub>2</sub> dan komponen anorganik lainnya (Anglada *et al.*, 2009).

## 2. Oksidasi Tidak Langsung

Oksidasi tidak langsung akan berlangsung pada daerah yang memiliki potensi terjadinya evolusi oksigen serta berlangsungnya proses degradasi dipengaruhi oleh jenis elektroda yang dipilih dan kondisi penelitian (Mandal *et al.*, 2017). Hasil reaksi yang terbentuk dari evolusi oksigen berupa spesies baru yang bertindak sebagai oksidasi pada permukaan anoda. Oksidasi Organik Pada Permukaan Anoda ditujukan pada persamaan (3) dan (4).



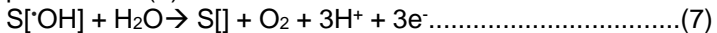
Keterangan :

S = adsorpsi hidroksil yang dihasilkan dari radikal

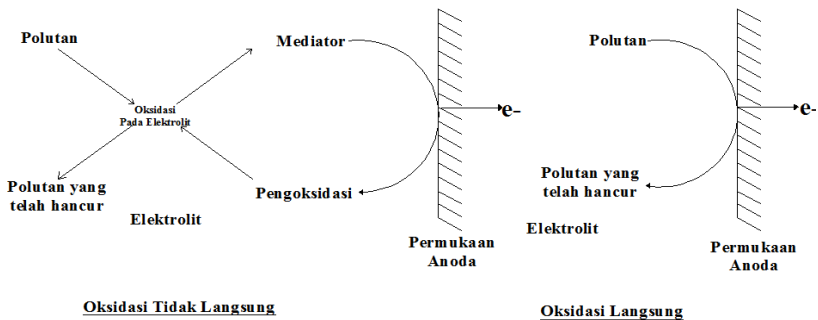
R = polutan organik

RO= polutan organik yang teroksidasi

Pada proses oksidasi tidak langsung, penggunaan kuat arus yang dibutuhkan cukup tinggi karena digunakan untuk reaksi evolusi  $O_2$ . Berikut ini merupakan reaksi evolusi  $O_2$  pada persamaan (5)



Pada Gambar 2.2 merupakan skema dalam proses elektro-oksidasi secara langsung dan tidak langsung.

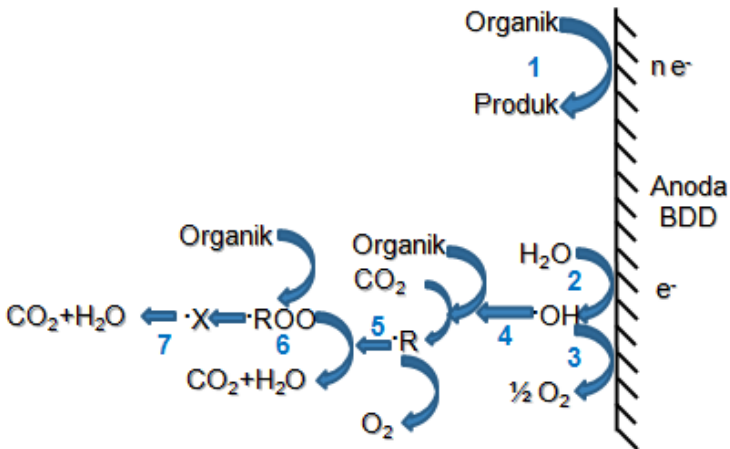


Gambar 2.2 Mekanisme Proses Oksidasi Tidak Langsung dan Oksidasi Langsung

Sumber: Anglada *et al.* (2009), dengan modifikasi

### 2.4.1 Mekanisme Proses Degradasi Polutan Organik Menggunakan Oksidasi Elektrokimia dengan Anoda Boron Doped Diamond (BDD)

Oksidasi elektrokimia merupakan teknologi alternatif yang dapat digunakan untuk menurunkan polutan organik terutama dalam menggunakan anoda *Boron Doped Diamond* (BDD). Kemampuan anoda *Boron Doped Diamond* (BDD) dalam oksidasi polutan organik tergolong kuat karena berkaitan erat dengan elektrogenerasi radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ). Reaksi yang terjadi pada radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ) dalam air termasuk cepat dan menghasilkan oksidan yang paling kuat dengan standar potensial  $E^0 = 2,74 \text{ V}$ . Berikut ini merupakan reaksi radikal hidroksil dalam air pada persamaan (6) dan ilustrasi umum reaksi elektro-oksidasi antara zat organik dengan anoda BDD pada Gambar 2.3:



Gambar 2. 3 Reaksi Elektro-oksidasi antara Zat Organik dengan Anoda *Boron Doped Diamond* (BDD)

Sumber : Lan *et al.* (2018), dengan modifikasi

Berikut ini merupakan penjelasan proses reaksi yang terjadi pada Gambar 2.3, sebagai berikut:

1. Terjadi proses pemecahan senyawa kompleks (organik) menjadi senyawa yang lebih sederhana secara langsung pada permukaan anoda BDD, namun dekontaminasi yang dihasilkan lemah. Proses pemecahan senyawa kompleks menjadi lebih sederhana, karena adanya arus listrik yang menghasilkan elektron.
2. Terjadi proses pembentukan agen pengoksidasi berupa senyawa radikal hidroksil yang berasal dari aktivasi air radikal lain  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  menjadi radikal sulfat. Oksidasi tersebut berlangsung secara tidak langsung pada permukaan anoda BDD. Agen pengoksidasi berupa senyawa radikal memiliki fungsi dalam mendegradasi senyawa organik. Ion-ion yang dapat dirubah menjadi agen pengoksidasi adalah ion yang bermuatan negatif (-) seperti  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ .
3. Reaksi samping dari aktivasi air sehingga menghasilkan evolusi oksigen.
4. Pada oksidasi tidak langsung polutan organik tidak dapat didegradasi secara langsung. Pembentukan agen pengoksidasi bertujuan untuk mengubah polutan organik menjadi bentuk lain yang lebih sederhana bahkan terjadi mineralisasi menjadi senyawa  $\text{CO}_2$ .
5. Hasil samping dari reaksi pada nomor 4 adalah senyawa yang lebih sederhana namun bertindak sebagai oksidan kuat karena merupakan senyawa radikal yang sederhana. Senyawa tersebut akan bertindak sebagai agen pengoksidasi lagi dan membentuk senyawa baru yang lebih sederhana serta terbentuknya mineralisasi berupa  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$
6. Pembentukan senyawa baru yang lebih sederhana dan terbentuknya mineralisasi.
7. Pembentukan mineralisasi berupa  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  yang mengindikasikan polutan organik dalam lindi telah hilang.

Siklus reaksi yang terjadi pada Gambar 2.3 akan berulang-ulang yaitu pembentukan senyawa baru yang lebih sederhana sebagai agen pengoksidasi dan terbentuk mineralisasi berupa  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ .



### 2.4.2 Anoda Boron Doped Diamond (BDD)

Beberapa penelitian menyatakan bahwa penggunaan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) cocok dalam mengolah limbah cair, karena sifat yang dimiliki anoda tersebut sangat baik. Anoda BDD memiliki sifat-sifat seperti tahan terhadap korosi, stabil, konduktivitas yang dihasilkan tinggi, merupakan anoda yang inert dan evolusi terhadap oksigen tinggi. Selain itu, anoda BDD mampu mendegradasi senyawa *refractory* hingga 100%. Berikut ini adalah Tabel 2.6 mengenai potensial evolusi oksigen pada kondisi asam.

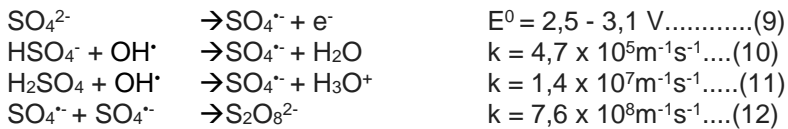
Tabel 2.6 Potensial Evolusi Oksigen Pada Kondisi Asam

Jenis Anoda	Standar Potensial Evolusi Oksigen vs Standar Hidrogen Elektroda	Kondisi
RuO <sub>2</sub>	1,47 V	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
IrO <sub>2</sub>	1,52 V	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Pt	1,6 V	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Grafit	1,7 V	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
SnO <sub>2</sub>	1,9 V	0,05 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
PbO <sub>2</sub>	1,9 V	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
BDD	2,3 V	0,5 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Sumber: Panizza dan Cerisola (2009)

Pada tabel di atas dapat disimpulkan bahwa anoda BDD memiliki standar hidrogen elektroda yang paling tinggi yaitu sebesar 2,3 V. Sedangkan standar potensial evolusi oksigen adalah 1,23 V. Standar potensial evolusi oksigen pada anoda BDD mengindikasikan bahwa dalam proses oksidasi tidak langsung akan mendegradasi senyawa organik yang lebih dominan dibandingkan terbentuknya evolusi oksigen, karena dibutuhkan energi yang cukup tinggi dalam membentuk evolusi oksigen. Sedangkan pada anoda lain pembentukan evolusi oksigen tidak dibutuhkan energi yang tinggi sehingga dalam mendegradasi senyawa organik kurang efisien dibandingkan dengan anoda BDD. Terbentuknya evolusi oksigen tidak diharapkan karena dapat menghambat degradasi senyawa organik. Selain itu, kebutuhan energi yang dikeluarkan juga akan lebih tinggi, karena pembentukan tersebut memerlukan energi berupa arus listrik.

Anoda BDD memiliki fungsi dalam mengaktifasi air agar senyawa organik dapat terdegradasi dan menghasilkan radikal hidroksil (OH<sup>•</sup>). Kemampuan anoda BDD dalam mengaktifasi ion-ion dalam lindi hingga membentuk senyawa radikal seperti fosfat (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>•</sup> PO<sub>4</sub><sup>•2-</sup>), klorida (Cl<sup>•</sup> Cl<sub>2</sub><sup>•-</sup>), sulfat (SO<sub>4</sub><sup>•-</sup>) dan karbonat (CO<sub>3</sub><sup>•-</sup>). Berikut ini merupakan reaksi pembentukan SO<sub>4</sub><sup>•-</sup> pada persamaan (7) hingga (10).



Pada reaksi di atas pembentukan SO<sub>4</sub><sup>•-</sup> berasal dari proses elektrooksidasi langsung ion sulfat serta melalui reaksi antara radikal hidroksil (OH<sup>•</sup>) dengan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> (Farhat *et al.*, 2017).

### 2.4.3 Katoda Stainless Steel

Penggunaan kaoda *stainless steel* karena pada deret volta merupakan jenis logam yang cukup baik dalam reduksi. Poin utama dalam penelitian ini adalah proses oksidasi sehingga tidak terlalu membutuhkan material katoda yang sangat baik. Selain itu, bahan material mudah dicari dan harga terjangkau untuk mengimbangi harga anoda BDD. Beberapa literatur menggunakan elektroda *stainless steel* sebagai proses pengolahan air. Pada penelitian yang dilakukan oleh Tsai *et al.* (1997), metode elektrokimia untuk mengolah lindi dengan menggunakan anoda *stainless steel* dapat menyisihkan COD hingga 30%-50%.

## 2.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Oksidasi Elektrokimia

Berikut ini merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi proses oksidasi elektrokimia, sebagai berikut:

### 2.5.1 Kerapatan Arus

Pada proses elektro-oksidasi dibutuhkan arus yang efektif agar biaya yang dikeluarkan lebih ekonomis. Kerapatan arus merupakan perbandingan antara kuat arus dengan luas elektroda.

Oksidasi senyawa organik dapat meningkat pada kisaran arus 20 hingga 50 mA cm<sup>-2</sup>, bila arus ditingkatkan lebih dari 65 mA cm<sup>-2</sup> akan menunjukkan penyisihan COD yang tidak signifikan (Zhou *et al.*, 2016). Pada penelitian yang dilakukan oleh Feki *et al.* (2009), menggunakan reaktor bermembran dengan proses elektrokimia sebagai *post-treatment* dalam mengolah lindi, efluen yang dihasilkan pada waktu operasional optimal (t = 1 jam dan densitas arus = 4 A dm<sup>-2</sup>) dengan elektroda Ti/Pt dapat menurunkan COD hingga 85%, TKN (94%) dan warna (99%).

Pada nilai arus sebesar 65 mA cm<sup>-2</sup> dapat efektif meningkatkan penyisihan amonium dan BOD (Quan *et al.*, 2013). Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Agustina, (2018) bahwa pada pH 8,5 dengan nilai kerapatan arus 50, mA cm<sup>-2</sup>, 75 mA cm<sup>-2</sup>, 100 mA cm<sup>-2</sup> secara efektif dapat meningkatkan penyisihan COD sebesar 26,84%, 37% dan 50,59%. Pada penelitian yang dilakukan oleh Quan *et al.* (2013) Penyisihan COD dan amonium yang baik adalah pada nilai kerapatan arus hingga 65 mA cm<sup>-2</sup> dengan penelitian arus yang digunakan berkisar antara 13-78 mA cm<sup>-2</sup>. Minimum dan maksimum kerapatan arus yang digunakan dalam menyisihkan COD dan Amonium adalah 5-100 mA cm<sup>-2</sup>, lebih dari 100 mA cm<sup>-2</sup> sudah tidak menunjukkan penyisihan COD.

*Direct Current Supply* merupakan cara yang efektif dalam mempercepat perpindahan ion dari kation dan anion menuju katoda dan anoda. Efisiensi penyisihan COD akan meningkat seiring dengan meningkatnya kerapatan arus. Peningkatan kerapatan arus yang lebih tinggi dapat menurunkan efisiensi penyisihan pada COD. Anglada *et al.* (2009) melaporkan bahwa kerapatan arus yang lebih rendah lebih 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). Berdasarkan penelitian Feng *et al.* (2016) menyatakan bahwa oksidasi elektrokimia dalam mengolah limbah obat menggunakan elektroda Ti/Pt/PbO<sub>2</sub> dan BDD dengan penambahan elektrolit Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> secara *batch* menggunakan densitas arus yang berbeda (10, 20 dan 30 mA/cm<sup>2</sup>) mampu

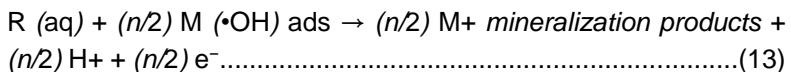
meremoval COD antara 60-95%. Penelitian tersebut berlangsung selama 6 jam dengan penyisihan COD paling tinggi menggunakan anoda BDD. Densitas yang efektif dalam meremoval COD sebesar 30 mA/cm<sup>2</sup>.

### 2.5.2 Karakteristik Elektroda

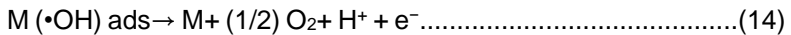
Elektroda memiliki peranan penting dalam proses degradasi senyawa organik. Pada proses elektro-oksidasi, selektivitas dan efektivitas proses dipengaruhi oleh elektroda sehingga pemilihan jenis elektroda yang tepat sangat penting. Berikut ini merupakan sifat-sifat yang harus dimiliki oleh elektroda :

1. Secara fisik dan kimia memiliki stabilitas yang tinggi, tahan terhadap korosi dan erosi
2. Konduktivitas listrik tinggi
3. Aktivitas katalis dan selektivitas
4. Memiliki jangka waktu (*life time*) yang lama dan biaya yang dibutuhkan murah

Sifat-sifat tersebut berfungsi sebagai penyisihan COD yang tinggi. Secara umum awal mekanisme mineralisasi elektrokimia yaitu air mengalami *discharge* pada bagian anoda aktif (M) lalu terbentuk radikal hidroksil yang teradsorpsi (M(•OH) ads) yang ada dalam proses mineralisasi polutan organik (R) pada larutan, dengan persamaan (11) sebagai berikut:



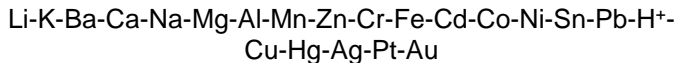
Pada reaksi diatas akan membentuk senyawa oksida (O<sub>2</sub>), dengan reaksi lain, dengan persamaan (12) sebagai berikut:



Jenis-jenis anoda yang digunakan adalah Iridium (Ir), Ruthenium (Ru), Titanium (Ti), Timah oksida (SnO<sub>2</sub>), Karbon (Ca) dan grafit, Platinum (Pt) dan *Boron-Doped Diamond* (BDD). Anoda karbon dan grafit dapat digunakan dalam degradasi senyawa organik. Pada konsentrasi 1414 mg/L anoda grafit dapat menyisihkan COD

sebesar 68% (Bahsir *et al.*, 2009). Anoda yang bereaksi dengan ( $\cdot\text{OH}$ ) terbagi menjadi dua yaitu anoda aktif dan anoda tidak aktif. Anoda tidak aktif memiliki potensial  $\text{O}_2$  dan kekuatan oksidasi yang tinggi, karena interaksi dengan ( $\text{OH}^*$ ) sangat lemah yang menandakan potensial  $\text{O}_2$  semakin tinggi (evolusi oksigen semakin lemah).

Elektroda memiliki fungsi mengalirkan arus listrik dalam sel elektrolisis. Elektroda terbagi menjadi dua jenis yaitu elektroda inert dan elektroda tidak inert. Perbedaan utama pada keduanya adalah pada rekasinya. Elektroda inert tidak mengalami reaksi redoks pada katoda dan anoda sehingga yang berperan aktif dalam reaksi redoks adalah elektrolit. Contoh elektroda inert adalah karbon (C) dan Platina (Pt). Pada elektroda tidak inert mengalami reaksi oksidasi pada anoda seperti besi (Fe), aluminium (Al), tembaga (Cu), seng (Zn), perak (Ag) dan emas (Au). Berikut ini merupakan susunan lengkap deret volta pada logam :



$E^\circ_{\text{red}}$  negatif terletak di sebelah kiri  $\text{H}^+$ . Semakin ke kiri, menandakan logam-logam tersebut cenderung mengalami oksidasi atau reduktor karena nilai  $E^\circ_{\text{red}}$  semakin kecil. Semakin ke kanan, logam-logam tersebut cenderung mengalami reduksi atau oksidator. Tabel 2.7 Kekuatan Oksidasi Pada Berbagai Jenis Anoda yang digunakan untuk Mineralisasi Elektrokimia pada Media Asam.

Tabel 2.7 Kekuatan Oksidasi Pada Berbagai Jenis Anoda yang digunakan untuk Mineralisasi Elektrokimia pada Media Asam

Jenis Elektroda	Entalpi Adsorpsi M-OH	Potensial Oksidasi (V)	Kekuatan Oksidasi Pada Anoda	$\text{O}_2$ Over-potential (V)
$\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$ (DSA- $\text{Cl}_2$ )	Chemisorption OH radikal ↑	1,4-1,7	↓	0,18
$\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ (DSA- $\text{O}_2$ )		1,5-1,8		0,25
Ti/Pt		1,7-1,9		0,3

Jenis Elektroda	Entalpi Adsorpsi M-OH	Potensial Oksidasi (V)	Kekuatan Oksidasi Pada Anoda	O <sub>2</sub> Over-potential (V)
Ti/PbO <sub>2</sub>		1,8-2,0		0,5
Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<i>Physisorption</i> OH radikal	1,9-2,2		0,7
p-Si/BDD		2,2-2,6		1,3

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

Pada tabel 2.8 dapat disimpulkan bahwa anoda BDD memiliki kekuatan oksidasi yang paling besar dibandingkan dengan anoda lainnya. Berikut ini merupakan Tabel 2.8 Kelebihan dan Kekurangan Kinerja Elektroda pada Proses Elektrokodisasi:

Tabel 2.8 Kelebihan dan Kekurangan Kinerja Elektroda pada Proses Elektrokodisasi

Jenis Elektroda	Kelebihan	Kekurangan
Ti	Memiliki keunggulan stabil dalam reaksi redoks	Mahal dan pasif
Pt	Termasuk jenis elektroda yang inert dan potensial O <sub>2</sub> tinggi	Mahal
PbO <sub>2</sub>	Efisiensi listrik yang dibutuhkan baik, murah, efektif dalam oksidasi polutan, penggunaannya mudah dan potensial O <sub>2</sub> tinggi	Mudah berkarat dan menghasilkan ion Pb <sup>2+</sup> yang bersifat racun
Elektroda DSA	Pada proses oksidasi tidak langsung memiliki kinerja yang baik, efisiensi listrik yang dibutuhkan baik, potensial O <sub>2</sub> tinggi, murah dan mudah didapatkan	Kestabilan terhadap elektrokimia masih kurang dan memiliki jangka waktu ( <i>lifetime</i> ) yang singkat
BDD	Termasuk jenis elektroda yang inert, potensial O <sub>2</sub> tinggi, efisiensi listrik yang dibutuhkan baik, tahan terhadap korosi dan kestabilan terhadap elektrokimia tinggi	Mahal

Sumber: Särkkä *et al.* (2015), dengan modifikasi

Pada tabel di atas dapat disimpulkan bahwa anoda BDD memiliki potensial cukup tinggi dalam kinerja elektroda pada proses elektrooksidasi.

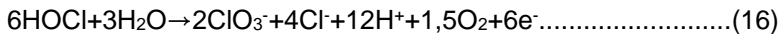
### 2.5.3 Konfigurasi Reaktor

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 COD sedangkan *undivided cell* membutuhkan energi spesifik sebesar 0,24 kWh/g COD (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*. Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Sari (2017), didapatkan penyisihan COD pada pH 8,5 dengan penambahan NaCl 2 g/l sebesar 77,93% dengan konsentrasi awal COD sebesar 5800 mg/L. Penelitian tersebut menggunakan *membrane-divide cell* dan didapatkan konsumsi energi spesifik sebesar 11,06711 kWh/m<sup>3</sup>. Pada penelitian ini digunakan *membrane-divide cell*.

### 2.5.4 Penggunaan Elektrolit

Berdasarkan Riyanto (2013), elektrolit merupakan ion-ion yang terlarut. Larutan terbagi menjadi larutan elektrolit dan larutan non elektrolit. Larutan elektrolit merupakan larutan yang mudah menghantarkan listrik sehingga senyawa yang terkandung dalam larutan tersebut merupakan senyawa garam yang bermuatan elektrik. Larutan non elektrolit merupakan larutan yang tidak dapat menghantarkan listrik. Penambahan buffer asam dan basa pada saat awal proses oksidasi elektrokimia berlangsung, memiliki fungsi sebagai penyeimbang ion karena arus dapat bergerak bila terdapat elektron. Berdasarkan Bagastyo et al. (2013), pada penambahan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,05 M menggunakan proses elektrooksidasi dengan anoda Boron-Doped Diamond (BDD) terjadi peningkatan penyisihan COD dan DOC dari 60% menjadi 74% dan 41% menjadi 51%. Penambahan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20 mM) juga dapat menjadi sumber tambahan pada kinerja oksidan elektrogenesis (Turro et al., 2012). Berdasarkan Agustina (2018) menyatakan bahwa pada penambahan 0,05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dengan anoda BDD mampu menyisihkan COD sebesar 59% dengan

konsumsi energi sebesar 0,0277 g Wh-1. Pada larutan elektrolit terjadi oksidasi senyawa organik dengan proses elektrooksidasi tidak langsung. Pada proses tersebut terjadi perusakan polutan di *bulk solution* oleh agen pengoksidasi yang berasal dari permukaan anoda. Agen pengoksidasi yang terbentuk adalah klorin (Cl<sup>·</sup>), hipoklorit (OCl<sup>·</sup>), asam hipoklorit (HClO), asam peroksodisulfat (H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>), hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) dan HBrO. Reaksi pembentukan klorin dan hipoklorit saat proses oksidasi tidak langsung, sebagai berikut:



Reaksi yang terjadi di katoda, sebagai berikut:



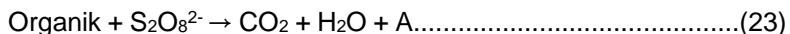
Reaksi yang terjadi pada larutan *bulk*, sebagai berikut:



(Deng dan Englehardt, 2006)

Efek penambahan elektrolit Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pada pengolahan lindi berdasarkan penelitian Chiang *et al.* (1995) dan Turro *et al.* (2012) menyatakan bahwa oksigen yang mengandung anion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> memiliki potensi dalam meningkatkan reaksi samping dari evolusi oksigen dari pada produksi klorin pada permukaan anoda. Elektrogenersi klorin/hipoklorit dapat terhambat karena adanya sulfat. Hipoklorit dapat menghasilkan efek yang merugikan pada polutan. Pada permukaan anoda terjadi persaingan antara ion sulfat dengan Cl<sup>-</sup> sebagai zat elektro aktif dan adsorpsi ion sulfat yang terhidrasi oleh hidrat, lebih cepat dalam menekan pembentukan klorin atau hipoklorit (Bagastyo *et al.*, 2012). Penambahan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sebagai elektrolit dapat menurunkan polutan yang lebih tinggi dibandingkan tanpa penambahan elektrolit (Silveira *et al.*, 2014). Berikut ini merupakan reaksi pembentukan spesies pengoksidasi S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> pada persamaan (19) hingga (21).





Dimana A adalah produk yang dihasilkan selama reaksi (Mao *et al.*, 2008).

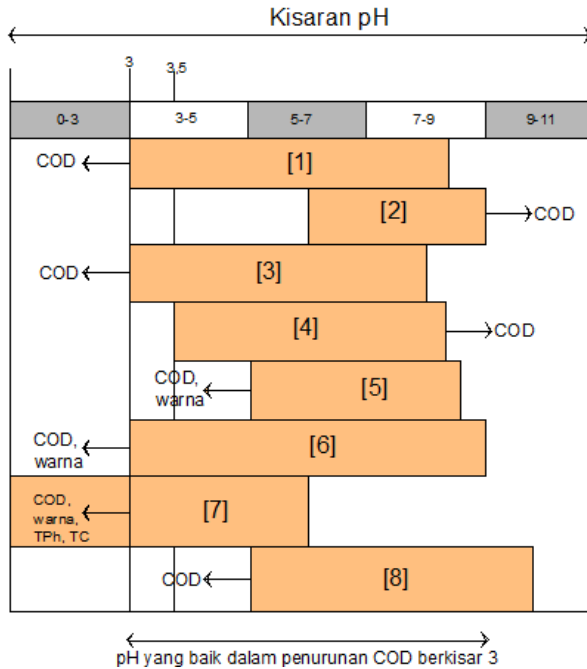
### 2.5.5 Debit Aliran

Pada proses elektrooksidasi dibutuhkan debit yang tidak rendah, karena dapat meningkatkan temperatur bila waktu tinggal elektrolit didalam reaktor lama. Pada penelitian Zhou *et al.* (2016), debit aliran 0,55 mL/detik dapat menyisihkan COD sebesar 84,98%, debit aliran 1,1 mL/detik dapat menyisihkan COD sebesar 81,38% dan debit aliran 1,67 mL/detik dapat menyisihkan COD sebesar 87,5%. Semakin tinggi debit aliran akan meningkatkan proses kontak dengan anoda BDD sehingga proses degradasi senyawa organik semakin cepat pula.

### 2.5.6 Pengaruh pH terhadap Lindi

pH memiliki peranan pada keberadaan *active species* dalam lindi selama proses elektrooksidasi berlangsung (Mandal *et al.*, 2017). pH asam memiliki kemampuan dalam meningkatkan laju penyisihan COD melalui reduksi ion karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) dan bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), dimana ion tersebut merupakan ion yang dapat merusak radikal hidroksida. pH yang baik dalam penyisihan COD adalah pH 3 dengan kondisi asam (Chu *et al.*, 2008). Pada proses elektro-oksidasasi terjadi reaksi samping yang membentuk oksigen. Hal tersebut bergantung pada pH, bila pH dalam keadaan basa maka kuat arus lebih banyak digunakan dari pada proses oksidasi senyawa organik. Pada proses pembentukan oksigen pH basa membutuhkan energi yang lebih kecil dibandingkan dengan pH asam yaitu sebesar 0,42 V pada pH basa dan 1,229 V pada pH asam (Chu *et al.*, 2008). Namun pada pH 8 penyisihan amonium dapat meningkat karena gas ammonia terbentuk seperti pada persamaan (22).





Gambar 2. 4 Nilai pH yang Menghasilkan Penurunan Polutan Organik  
 Sumber: <sup>[1]</sup> (Cossu *et al.*, 1998), <sup>[2]</sup> (Vlyssides *et al.*, 2001), <sup>[3]</sup> (Chu *et al.*, 2008), <sup>[4]</sup> (Anglada *et al.*, 2011), <sup>[5]</sup> (Panizza *et al.*, 2010), <sup>[6]</sup> (Mussa *et al.*, 2015), <sup>[7]</sup> (Turro *et al.*, 2012), <sup>[8]</sup> (Zhou *et al.*, 2016) (dalam Mandal *et al.*, 2017), dengan modifikasi

Dari Gambar 2.4 dapat disimpulkan bahwa kinerja pH yang baik dalam penurunan polutan organik pada lindi adalah pH 5.

### 2.5.7 Jenis Membran

Terdapat berbagai jenis membran salah satunya adalah *ion exchange membrane*. Jenis membran tersebut terbagi menjadi dua yaitu *Cation Exchange Membrane* (CEM) dan *Anion Exchange Membrane* (AEM). *Cation Exchange Membrane* (CEM) berfungsi dalam melewatkan ion-ion yang bermuatan positif, sedangkan *Anion Exchange Membrane* (AEM) berfungsi dalam melewatkan ion-ion yang bermuatan negatif. Keunggulan dari kedua membran tersebut yaitu bersifat *permeabel* hanya ion-ion tertentu yang dapat

lolos, potensi penyumbatan cukup lama, hambatan listrik kecil, bahan yang digunakan tidak larut dalam air, tahan terhadap kondisi pH yang berfluktuasi dan mudah dalam penggunaannya. Selama proses operasi dalam mengolah air termasuk lindi, membran dapat mengalami peristiwa *fouling*. Hal tersebut terjadi karena adanya endapan partikel ireversibel, garam, koloid yang tertahan pada permukaan membran selama proses berlangsung. *Fouling* dapat terjadi pada membran penukar ion karena terbentuknya suspensi yang bermuatan positif dan negatif. Padatan suspensi dapat berupa surfaktan, asam humat, polielektrolit dan material-material biologis. Komponen tersebut akan berkumpul pada permukaan membran sehingga resistansi membran meningkat. Permasalahan tersebut dapat ditangani dengan melakukan polaritas sehingga padatan suspensi yang bermuatan dapat dibuang (Husada, 2016). Selain itu, hal tersebut dapat ditangani dengan melakukan *precondition* pada membran CEM dan AEM untuk merenggangkan pori-pori pada membran serta perlu dilakukan pencucian ulang dan penggantian membran bila sudah terjadi *fouling*.

Pemisahan ion dapat terjadi akibat adanya membran yang bersifat *permeabel*. Mekanisme perpindahan ion dalam larutan elektrolit menggunakan membran yaitu ion positif (kation) bergerak menuju elektroda yang bermuatan negatif (katoda) dan sebaliknya ion negatif (anion) bergerak menuju elektroda yang bermuatan positif (anoda). Namun katoda tidak dapat mereduksi kation logam dari golongan IA, IIA, IIIA, Al dan Mn dalam pelarut air sehingga menghasilkan reaksi pada persamaan (1) dan dapat mereduksi kation logam H<sup>+</sup> dan kecuali golongan IA, IIA, IIIA, Al dan Mn pada persamaan (2) dan (3), sebagai berikut :



Anion sisa asam oksida pada anoda tidak dapat mengoksidasi anion logam seperti (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>3-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, ClO<sub>4</sub><sup>4-</sup>) dalam pelarut air, sehingga yang mengalami oksidasi adalah air pada persamaan (4) dan anion (OH<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>) dapat dioksidasi dalam pelarut air pada persamaan (5) dan (6), sebagai berikut :

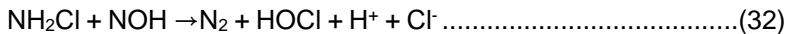
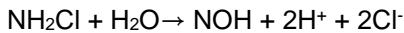
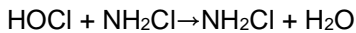
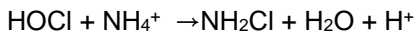
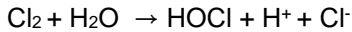


Berikut merupakan proses oksidasi tidak langsung pada penyisihan NH<sub>3</sub> oleh klorin secara elektrokimia yang berfungsi untuk menurunkan kadar Total-N pada reaksi di anoda persamaan (7) dan elektrolit persamaan (8), sebagai berikut :

Reaksi pada anoda :



Reaksi pada elektrolit :



(White, 1986)

## 2.6 Perhitungan Efisiensi Proses

Berikut ini merupakan perhitungan efisiensi terhadap proses oksidasi elektrokimia :

### 2.6.1 Hukum Faraday I

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

$$m = \frac{ixext}{96500} \dots\dots\dots(33)$$

Keterangan :

m : massa zat yang dihasilkan (gram)

e : berat ekivalen

i : kuat arus (A)

t : waktu (s)

### 2.6.2 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 :

$$Q = I \times t \dots\dots\dots(34)$$

i : kuat arus (A)

t : waktu (s)

Q : muatan listrik (coloumb)

### 2.6.3 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 proses elektrooksidasi:

$$Q = \frac{J \times A \times t}{v} \dots\dots\dots(35)$$

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

$$J = \frac{I}{A} \dots\dots\dots(36)$$

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

$$Q = \frac{I \times t}{v} \dots\dots\dots(37)$$

$$W = Q \cdot V \dots\dots\dots(38)$$

Keterangan :

W = konsumsi energi spesifik (kWh/m<sup>3</sup>)

Q = muatan listrik spesifik (kAh/m<sup>3</sup>)

I = kuat arus listrik (A)

J = kerapatan arus (A/m<sup>2</sup>)

V = tegangan listrik (V)

A = luas elektroda (m<sup>2</sup>)  
 t = waktu operasi (s)  
 V = volume elektrolit (L)  
 (Anglada *et al.*, 2009)

## 2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan acuan dalam penelitian yang menggunakan metode elektrokimia dengan membran dan oksidasi elektrokimia dalam penyisihan polutan organik yang terdapat pada lindi. Berikut merupakan hasil penelitian terdahulu yang terdapat pada Tabel 2.9

Tabel 2. 9 Hasil Penelitian Terdahulu

Penulis	Hasil Penelitian
(Sari, 2017)	Dalam penelitian terkait dengan kombinasi elektrodialisis dan elektrokimia pada pengolahan lindi menunjukkan penyisihan COD tertinggi dengan penambahan NaCl sebesar 2 g/L mampu menyisihkan COD sebesar 77,93% (10,96 gram) serta konsumsi energi spesifik sebesar 11,067 Wh L <sup>-1</sup> . Penelitian tersebut menggunakan anoda karbon dan katoda besi.
(Bagastyo <i>et al.</i> , 2013)	Pada proses elektrooksidasi dengan menggunakan anoda <i>Boron-Doped Diamond</i> (BDD) terjadi peningkatan penyisihan COD dan DOC dari 60% menjadi 74% dan 41% menjadi 51% pada penambahan Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,05 M.
(Feki <i>et al.</i> , 2009)	Dalam penelitian tersebut menggunakan reaktor bermembran dengan proses elektrokimia sebagai <i>post-treatment</i> dalam mengolah lindi, efluen yang dihasilkan pada waktu operasional optimal (t = 1 jam dan densitas arus = 4 A dm <sup>-2</sup> ) dengan elektroda Ti/Pt terjadi penurunan COD sebesar 85%, TKN sebesar 94% dan warna sebesar 99%.
(Agustina, 2018)	Dalam penelitian tersebut menggunakan penambahan 0,05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1,014 g) dengan anoda BDD mampu menyisihkan COD sebesar 59% dengan konsumsi energi sebesar 0,0277 g Wh <sup>-1</sup> dan pada pH 8,5 dengan nilai kerapatan arus 50, mA cm <sup>-2</sup> , 75 mA cm <sup>-2</sup> , 100mA

<b>Penulis</b>	<b>Hasil Penelitian</b>
	cm <sup>-2</sup> secara efektif dapat meningkatkan penyisihan COD sebesar 26,84%, 37% dan 50,59%.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



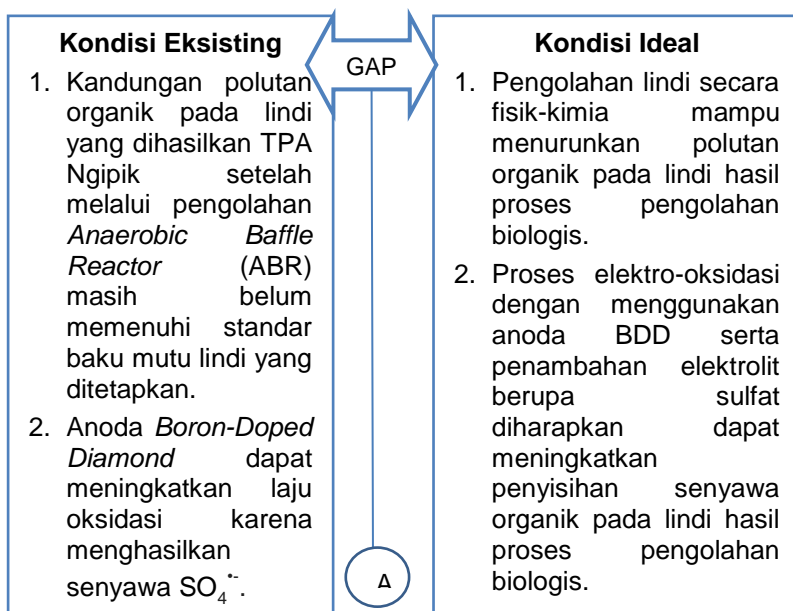
## BAB 3 METODE PENELITIAN

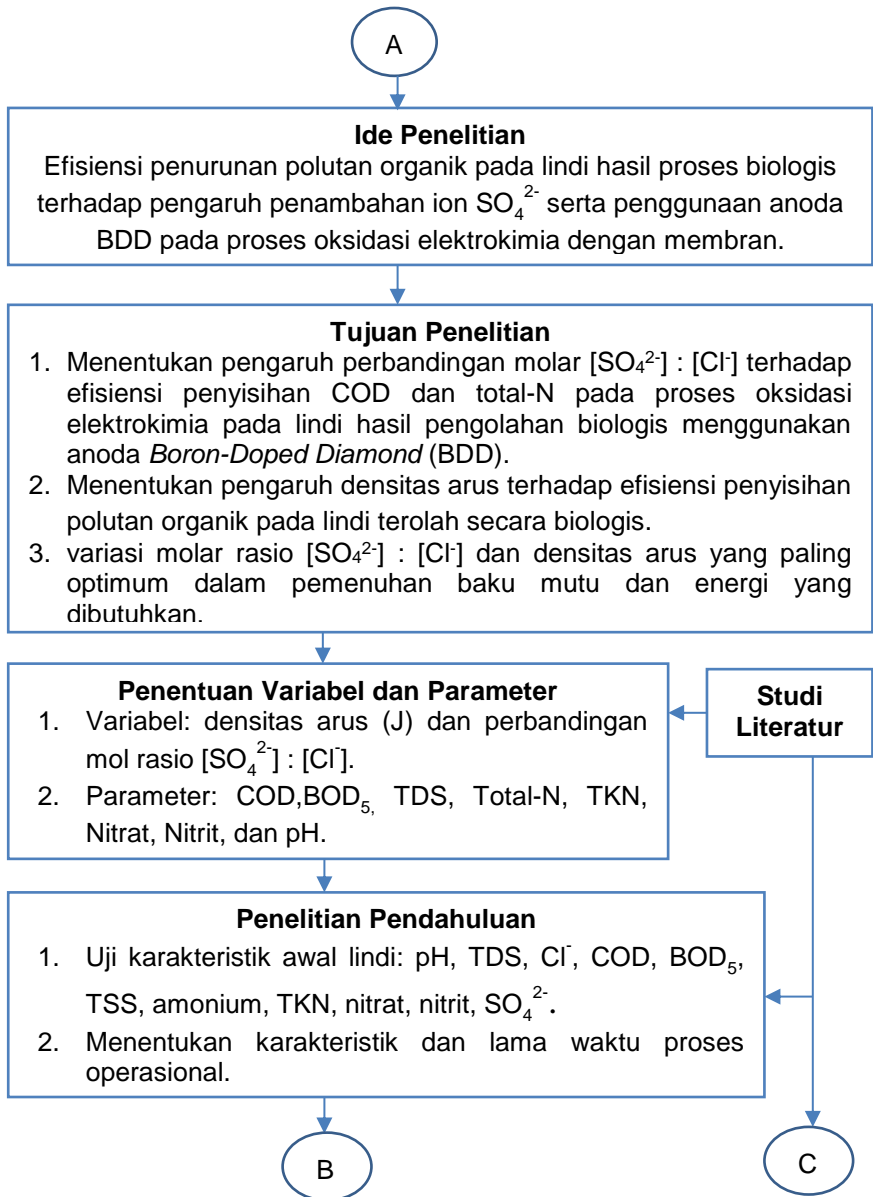
### 3.1 Deskripsi Umum

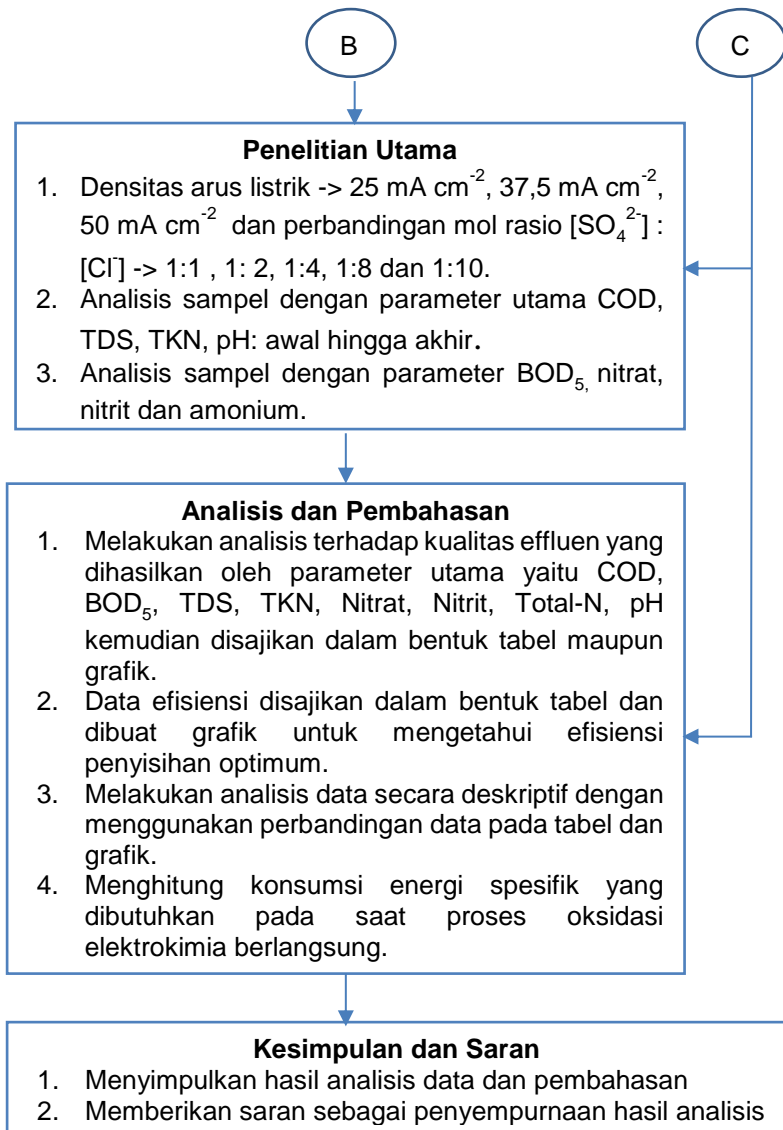
Tujuan dari penelitian ini yaitu menganalisis efisiensi pengolahan lindi terolah secara biologis menggunakan metode elektrokimia dengan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) serta pemenuhan baku mutu. Efisiensi proses oksidasi dilihat berdasarkan tingkat penyisihan polutan organik terukur sebagai COD dan total-N. Bahan uji yang digunakan pada penelitian ini berasal dari influen pengolahan ABR Lindi pada TPA Ngipik, Gresik dengan pengenceran 2 kali. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Departemen Teknik Lingkungan ITS selama bulan September hingga Desember 2018.

### 3.2 Kerangka Penelitian

Berikut ini merupakan tahapan pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1







Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

### 3.3 Ide Penelitian

Ide penelitian didapatkan dari gap antara kondisi eksisting dan kondisi ideal. Penelitian ini didasari pada ide penurunan polutan organik secara fisik-kimia pada lindi terolah secara biologis untuk memenuhi baku mutu efluen air lindi. Anoda BDD pada proses elektooksidasi memiliki keunggulan dalam mengaktivasi senyawa radikal berupa sulfat. Penambahan elektrolit berupa  $\text{SO}_4^{2-}$  dapat meningkatkan penyisihan polutan organik dalam lindi. Hasil pengolahan lindi secara biologis belum memenuhi baku mutu air lindi yang telah ditetapkan, sehingga diperlukan analisis lebih lanjut mengenai pengaruh penambahan ion sulfat terhadap efisiensi proses elektooksidasi. Metode ini dioptimalkan dengan pengondisian pH awal lindi dan penambahan *active species* berupa  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### 3.4 Studi Literatur

Studi literatur digunakan untuk meningkatkan pengetahuan peneliti dengan cara mencari informasi. 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.
- (3) Alternatif pengolahan fisik-kimia yang digunakan dalam penurunan polutan organik pada lindi terolah secara biologis.
- (4) Mekanisme proses elektooksidasi dalam penurunan polutan organik.
- (5) Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya proses elektooksidasi.
- (6) Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD).

### 3.5 Penentuan Variabel dan Parameter

Dalam penelitian ini menggunakan variabel, sebagai berikut:

#### 1. Penentuan variasi densitas arus listrik

Dalam penelitian akan ditentukan besarnya variasi densitas arus listrik yang akan digunakan. Variasi ini diperoleh dari voltase yang berhubungan dengan membran, sehingga hambatan yang dihasilkan lebih besar. Spesifikasi kuat arus

listrik berkisar antara 0-3 *ampere* sedangkan tegangan yang digunakan berkisar antara 0-30 volt. Variasi densitas arus yang digunakan pada penelitian ini antara lain 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup> atau bila dinyatakan dalam kuat arus yaitu 0,2 A; 0,3 A; dan 0,4 A. Kerapatan arus berhubungan dengan pembentukan agen pengoksidasi yang berperan penting dalam proses oksidasi tidak langsung. Agen pengoksidasi berfungsi dalam menurunkan polutan organik yang terkandung dalam lindi.

2. Perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>]

Variabel selanjutnya adalah perbandingan rasio molar pada elektrolit. Elektrolit yang digunakan adalah Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Elektrolit tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] terhadap efisiensi proses oksidasi elektrokimia menggunakan anoda BDD pada lindi hasil proses biologis. Anoda BDD mampu meningkatkan laju oksidasi karena menghasilkan senyawa radikal seperti klorida dan sulfat. Variasi perbandingan molar rasio pada [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10.

Parameter yang akan diuji dalam penelitian ini adalah COD, BOD<sub>5</sub>, TSS, amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), TDS, TKN, Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Nitrit (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), dan pH. Berikut merupakan metode analisis pada setiap parameter yang disajikan pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Metode Analisis pada Setiap Parameter

Parameter	Tujuan	Instrumen	Metode	Sumber
BOD <sub>5</sub>	Mengetahui konsentrasi akhir setelah proses pengolahan fisik-kimia	Titrasi	Metode Winkler	SNI 6989.72:2009
COD	Mengetahui tingkat penurunan polutan organik pada lindi	Spektroquant	Closed Reflux dan colorimetric	<i>Standard Methods of Water and Wastewater</i> , 22nd edition, 2012

<b>Parameter</b>	<b>Tujuan</b>	<b>Instrumen</b>	<b>Metode</b>	<b>Sumber</b>
pH	Menganalisis tingkat keasaman pada bahan yang diuji	pH meter	Potensi-Ometri	SNI 06-6989.11-2004
Nitrat	Mengetahui kandungan nitrogen pada lindi dan digunakan dalam mencari Total-N	Spektrofotometer	<i>Brucine</i>	SNI 6989.79:2011
Nitrit	Mengetahui kandungan nitrit pada lindi dan digunakan dalam mencari Total-N	Spektrofotometer	Spektrofotometri	SNI 06-6989.9-2004
TKN (Total Kjedahl Nitrogen)	Mengetahui kandungan organik N+ amonium dan digunakan dalam mencari Total-N	Spektrofotometer	Nessler	SNI 06-6989.30-2005
TDS	Menganalisis daya hantar listrik yang dihasilkan pada bahan uji	<i>Salinity</i> meter	Konduktimeter	SNI 06-6989.1-2004
Amonium	Mengetahui kandungan Amonium pada lindi dan tingkat penyisihan TAN dalam lindi	Spektrofotometer	Nessler	SNI 06-6989.30-2005
TSS	Mengetahui kadar solid yang terkandung pada lindi awal	Filtrasi	Gravimetri	<i>Standard Methods of Water and Wastewater</i> , 22nd edition, 2012
Sulfat	Mengetahui kandungan sulfat pada lindi dan pengaruh	Spektrofotometer	Turbidimetri	<i>Standard Methods of Water and Wastewater</i> ,

Parameter	Tujuan	Instrumen	Metode	Sumber
	terhadap proses elektooksidasi			22nd edition 2012
Cl <sup>-</sup>	Mengetahui konsentrasi Cl <sup>-</sup> pada lindi dan pengaruh terhadap proses elektooksidasi	Titrasi	Argen-trome-trik Mohr	SNI 06-6989.19-2004

Pada penelitian ini titik pengambilan sampel berada pada dua titik yaitu pada lindi dan buffer fosfat. Pengambilan titik sampel dan kebutuhan sampel selama proses elektooksidasi terdapat pada Tabel 3.2, sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Kebutuhan, Titik dan Waktu Pengambilan Sampel

Parameter	Kebutuhan Sampel (mL)	Titik Pengambilan Sampel dalam Reaktor	Waktu Pengambilan Sampel
BOD <sub>5</sub>	5	Lindi	t <sub>0</sub> , t <sub>2</sub> , t <sub>4</sub>
COD	5	Lindi	t <sub>0</sub> , t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub> , t <sub>3</sub> , t <sub>4</sub>
pH+TDS	10	- PH+TDS: Lindi dan larutan buffer fosfat	- pH+TDS: t <sub>0</sub> , t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub> , t <sub>3</sub> , t <sub>4</sub>
Nitrat	4	Lindi	t <sub>0</sub> , t <sub>2</sub> , t <sub>4</sub>
Nitrit	12,5	Lindi	t <sub>0</sub> , t <sub>2</sub> , t <sub>4</sub>
TKN (Total Kjedahl Nitrogen)	25	Lindi	t <sub>4</sub>
Amonium	12,5	Lindidan larutan buffer fosfat	t <sub>0</sub> , t <sub>2</sub> , t <sub>4</sub>
TSS	25	Karakteristik awal lindi	t <sub>0</sub>
Sulfat	10	Karakteristik awal lindi	t <sub>0</sub>
Cl <sup>-</sup>	12,5	Karakteristik awal lindi	t <sub>0</sub>
<b>Total</b>	<b>121,5</b>		

Waktu operasional yang digunakan pada penelitian ini selama 8 jam dimana tiap sampel akan di ambil setiap 2 jam.  $t_0$  uji karakteristik awal lindi,  $t_1$  pengambilan sampel saat 2 jam,  $t_2$  pengambilan sampel saat 4 jam,  $t_3$  pengambilan sampel saat 6 jam, dan  $t_4$  pengambilan sampel saat 8 jam. Dalam beberapa literatur menyatakan bahwa sisa volume efektif yang diperbolehkan adalah sebesar 10%. Dalam penelitian ini mengolah lindi sebanyak 200 mL, sehingga sisa volume lindi yang diperbolehkan adalah 20 mL. Pada penelitian ini menyisahkan lindi sebesar 78,5 mL. Nilai tersebut memenuhi aturan pada sisa volume efektif.

### 3.6 Persiapan Penelitian

Persiapan awal yang dilakukan sebelum melakukan penelitian yaitu membuat reaktor skala laboratorium serta menyiapkan alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian.

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

##### 1. Reaktor Elektrokimia

Reaktor dalam penelitian ini terbuat dari akrilik dan menggunakan sistem *batch recirculation*. Selain itu reaktor juga terdiri dari 3 kompartemen dan 2 membran (membran CEM dan membran AEM). Dimensi reaktor yang digunakan terbagi menjadi dua yaitu kompartemen yang menampung lindi berdimensi 5 cm x 10 cm x 2 cm sedangkan pada larutan buffer fosfat berdimensi 5 cm x 10 cm x 1 cm. Dimensi tersebut merupakan dimensi dalam reaktor. Perbedaan ukuran reaktor tersebut dimaksudkan untuk penggunaan peralatan yang lebih efisien dan ekonomis.

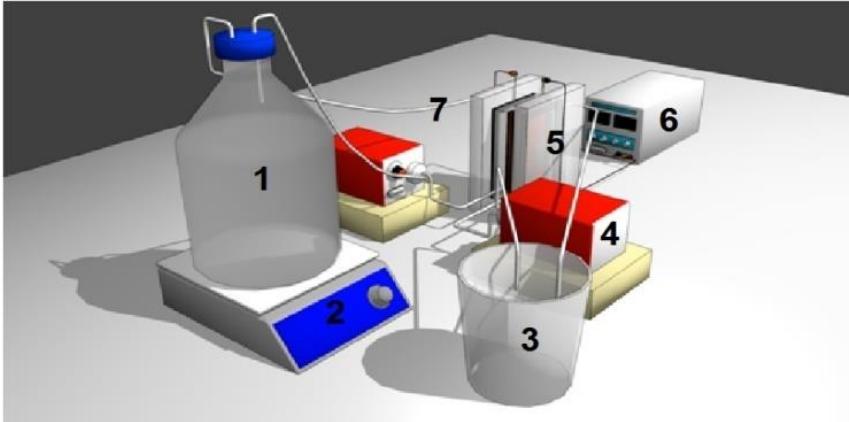
Kompartemen pada larutan buffer fosfat memiliki dimensi lebih tipis dibandingkan pada lindi. Hal tersebut bertujuan untuk menampung limbah hasil produk *reject* pada kompartemen anoda dan katoda. Pada kompartemen anoda dan katoda menampung zat pencemar yang berasal dari lindi yang diolah sehingga perlu volume yang lebih besar. Selain itu, semakin rapat jarak antar elektroda maka konsumsi arus yang dibutuhkan juga akan semakin kecil.



Reaktor ini dilengkapi dengan lubang yang terletak pada sisi yang berseberangan sebagai inlet dan outlet. Penggunaan dimensi tersebut berdasarkan perbandingan antara luas elektroda dengan volume reaktor yang akan digunakan. Berdasarkan penelitian Bagastyo *et al.* (2013), metode elektrodialisis dengan proses oksidasi elektrokimia menggunakan elektroda Si/BDD dengan dimensi 24 cm<sup>2</sup> (4,8 x 5 x 0,1 cm) dan kompartemen dengan volume efektif reaktor 200 mL (dimensi dalam 20 x 5 x 2 cm) mampu meremoval COD dari 60% menjadi 74%. Penelitian ini menambahkan sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Pada penelitian yang dilakukan oleh Agustina (2018), pada luas elektroda sebesar 2 cm x 4 cm dengan volume efektif reaktor 80 mL (dimensi dalam 2 cm x 4 cm x 10 cm) menggunakan metode elektrokimia dan anoda BDD dengan penambahan 0,05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (mol SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:Cl<sup>-</sup>) dapat menyisihkan COD sebesar 59% dengan konsumsi energi sebesar 0,0277 g Wh<sup>-1</sup>. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Sari, (2017) penambahan NaCl sebesar 2 g/L mampu menyisihkan COD sebesar 77,93% (10,96 gram) serta konsumsi energi spesifik sebesar 11,067 Wh L<sup>-1</sup>. Penelitian tersebut menggunakan anoda karbon dan katoda besi dengan dimensi 5 cm x 5 cm serta dimensi dalam kompartemen 20 cm x 10 cm x 2 cm. Dari literatur tersebut maka penelitian ini menggunakan pertengahan dari ukuran reaktor pada literatur sebagai pembandingan. Selain itu, dipilih elektroda dengan dimensi 2 cm x 4 cm mampu menyisihkan COD dengan baik dan efisiensi kebutuhan energi yang digunakan tidak terlalu tinggi.

Berdasarkan Deng dan James, (2007) oksidasi elektrokimia dalam mengolah lindi menggunakan sistem *batch recirculation* melalui pompa peristaltik, volume yang digunakan dalam percobaan skala laboratorium di bawah 2 L. Mekanisme penggunaan alat tersebut yaitu lindi terolah ditampung ke dalam *feed tank* sebanyak 2 L. Lindi tersebut akan mengalir menuju inlet reaktor pada bagian anoda dengan bantuan pompa peristaltik dan akan naik secara *upflow* menuju katoda. Lindi akan naik secara *upflow* pada bagian katoda menuju outlet. Outlet dari lindi tersebut akan dialirkan kembali ke dalam *feed tank*. Sedangkan kompartemen pada bagian tengah akan

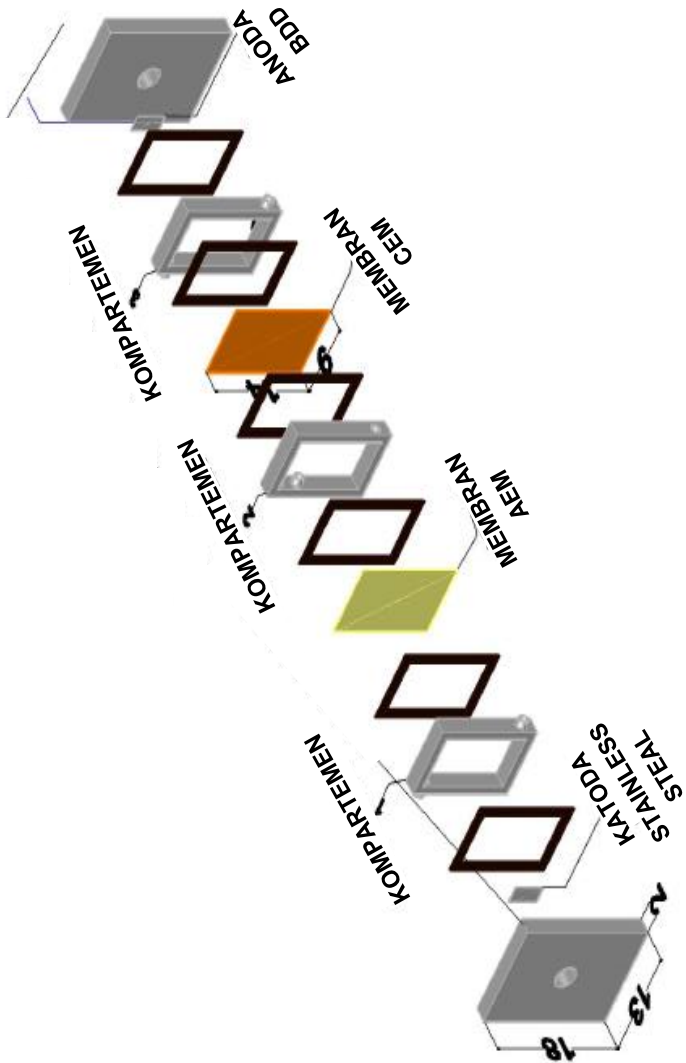
mengalirkan buffer fosfat menuju inlet reaktor dengan bantuan pompa submersible dan akan naik secara *upflow* menuju outlet bila penuh. Outlet dari lindi tersebut akan dialirkan kembali ke dalam bak yang terisi buffer fosfat. Berikut ini merupakan skema sistem elektrokimia dan dimensi reaktor elektrokimia.



Gambar 3.2 Skema Sistem Elektrokimia dengan Membran

Keterangan :

1. *Feed Tank* untuk menampung lindi sebesar 2 L
2. *Magnetic Stirrer*
3. *Buffer Fosfat* sebanyak 2 L
4. Pompa peristaltik 7 ml/detik
5. Reaktor elektrokimia dengan membran
6. *Power DC Supply*
7. Selang dengan ukuran 7 mm



Gambar 3.3 Reaktor Elektrokimia

## 2. Elektroda

Anoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah anoda *Boron Doped Diamond* (BDD) sedangkan katoda yang digunakan adalah katoda *stainless steel*. Penggunaan anoda BDD karena dapat memfasilitasi pembentukan senyawa radikal yang berfungsi dalam penyisihan polutan organik. Penggunaan katoda *stainless steel* karena dalam deret volta merupakan jenis logam yang cukup baik dalam reduksi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Tsai *et al.* (1997) metode elektrokimia untuk mengolah lindi dengan menggunakan anoda *stainless steel* dapat menyisihkan COD hingga 30%-50%. Poin utama dalam penelitian ini adalah proses oksidasi sehingga tidak terlalu membutuhkan material katoda yang sangat baik. Selain itu, bahan material mudah dicari dan harga terjangkau untuk mengimbangi harga anoda BDD. Dimensi elektroda yang digunakan sebesar 2 cm x 4 cm dengan jarak antara kedua elektroda sebesar 2 cm pada anoda sedangkan pada katoda jarak elektroda sebesar 1 cm. Bentuk elektroda persegi panjang karena luas permukaan reaktor yang digunakan persegi panjang (memakai sistem *upflow*) sehingga aliran menjadi lebih laminar dan pengadukan sempurna. Elektroda harus dipolarisasi terlebih dahulu dalam larutan asam kuat sebelum elektroda digunakan untuk proses elektrok oksidasi lindi. Hal tersebut bertujuan untuk mengkutubkan anoda dan katoda.

## 3. Pompa Peristalik

Pompa peristaltik digunakan untuk mengalirkan air lindi dari *feed tank* menuju inlet reaktor elektrokimia. Debit yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 7 mL/detik.

## 4. Membran

Membran yang digunakan dalam penelitian ini adalah *cation exchange membrane* (CEM/+) dengan tipe CMI 7000S dan *Anion Exchange Membrane* (AEM/-) dengan tipe CMI . Pemilihan membran CEM bertujuan untuk melewatkan ion-ion yang bermuatan positif agar berpindah dari kompartemen anoda ke kompartemen katoda. Hal tersebut bertujuan agar penurunan senyawa organik yang terjadi di anoda lebih tinggi

karena dalam anoda terjadi proses oksidasi tidak langsung yang menghasilkan agen pengoksidasi. Pada proses tersebut ion yang bermuatan negatif akan diubah menjadi senyawa radikal sehingga menjadi oksidan yang kuat dalam mendegradasi senyawa organik. Sebelum digunakan dalam operasi reaktor, membran terlebih dahulu di rendam pada larutan NaCl 5% selama 24 jam. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Sari, 2017) masa pakai membran AEM dan CEM saat mengolah lindi secara elektrokimia selama 12 jam adalah 3 kali pengoperasian. Husada, (2016) menyebutkan bahwa membran penukar ion memiliki umur yang panjang walaupun air yang diolah memiliki kandungan yang buruk. Berikut ini merupakan spesifikasi membran yang digunakan:

Tabel 3. 3 Spesifikasi Membran *Cation Exchange Membrane* (CEM) dan *Anion Exchange Membrane* (AEM)

<b>Spesifikasi Teknik</b>	<b>CMI - 7000 S</b>	<b>CMI - 7000 S</b>
Ketebalan (mm)	0,45 ± 0,025	0,45 ± 0,025
Total Exchange Capacity (meq g <sup>-1</sup> )	1,6 ± 0,1	1,3± 0,1
Luas hambatan (ohm cm <sup>-2</sup> )	<30	<40
Densitas Arus Maksimal (A m <sup>-2</sup> )	<500	<500
Stabilitas Temperatur Maksimal (°C)	90	90

Sumber: USA: Membranes International Inc (2016)

5. Kabel  
Kabel memiliki fungsi sebagai aliran arus listrik ke masing-masing elektroda dari DC *power supply*.
6. DC *Power Supply*  
Kuat arus listrik memiliki fungsi sebagai sumber listrik pada proses elektrooksidasi lindi. Spesifikasi kuat arus yang digunakan berkisar antara 0-3 A sedangkan tegangan yang digunakan berkisar antara 0-30 V. Dalam penelitian ini, kuat arus yang digunakan adalah 0,2 A; 0,3 A; 0,4 A. Selama masa

operasi reaktor dibuat konstan, sehingga yang berubah adalah tegangan.

7. Selang  
Selang yang digunakan dengan diameter 0,5 cm. Fungsi selang pada penelitian ini untuk mengalirkan lindi dari *feed tank* menuju reaktor dan 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 influen pengolahan menggunakan ABR di TPA Ngipik, Gresik yang diencerkan dua kali. Pengenceran lindi sebesar dua kali didasarkan pada penyesuaian karakteristik efluen pengolahan biologis yang tertera pada Tabel 2.4. Hal ini dapat diasumsikan juga bahwa efisiensi pengolahan ABR adalah sebesar 50%. Volume lindi yang digunakan pada setiap eksperimen sebesar 2 L untuk proses oksidasi elektrokimia dengan sistem *batch recirculation*. Sebelum di olah lindi terlebih dahulu disaring dengan menggunakan kertas saring berdiameter 0,5 mikron. Uji karakteristik awal lindi dilakukan setiap eksperimen untuk parameter COD,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , pH, dan TDS.
2. Larutan Buffer Fosfat  
Larutan buffer fosfat yang dibutuhkan dalam setiap percobaan sebesar 2 L. Dalam penelitian ini buffer fosfat berfungsi sebagai penyeimbang ion yang terdapat pada

kompartemen sebelah (anoda). Hal tersebut digunakan karena arus dapat bergerak apabila pada dua kompartemen terdapat elektron. Dalam penelitian ini kejenuhan *aquadest* dapat dilihat saat uji parameter TDS, apabila hasil yang diuji tidak ada perubahan maka bisa diindikasikan *aquadest* jenuh. Namun hal tersebut bukan alasan utama dalam menilai *aquadest* telah jenuh, karena terdapat faktor lain seperti membran mengalami *fouling* dan lindi yang diolah sudah optimum. *Aquadest* yang telah jenuh akan diganti saat proses berlangsung.

3. Larutan NaCl 5%  
Larutan NaCl 5% memiliki fungsi sebagai *pre-conditioning* membran. Berfungsi untuk merenggangkan pori-pori pada membran.
4. Padatan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
Padatan tersebut digunakan sebagai ion pendukung dalam mendegradasi senyawa organik.
5. Reagen  
Reagen yang digunakan untuk analisis parameter meliputi pH, TDS, Cl<sup>-</sup>, COD, BOD<sub>5</sub>, TSS, nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitrit (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), TKN, dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

### 3.7 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Uji karakteristik awal lindi hasil proses pengolahan biologis pada TPA Ngipik. Parameter yang diuji antara lain pH, TDS, Cl<sup>-</sup>, COD, BOD<sub>5</sub>, TSS, amonium, TKN, nitrat, nitrit, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.
2. Penentuan lama waktu operasional proses penelitian terhadap operasional proses dilakukan selama 8 jam.
3. Penentuan rapat arus optimum dan waktu operasional  
Dalam penelitian akan ditentukan besarnya variasi arus listrik yang akan digunakan. Variasi ini diperoleh dari voltase yang berhubungan dengan membran, sehingga hambatan yang dihasilkan lebih besar karena terbagi menjadi 2 kompartemen. Variasi densitas arus listrik yang digunakan

adalah 25 mA cm<sup>-2</sup>; 37,5 mA cm<sup>-2</sup>; 50 mA cm<sup>-2</sup>. Penentuan variasi arus listrik juga akan dipertimbangkan.

### 3.8 Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan terhadap variasi arus listrik dengan perbandingan molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Agustina (2018), penambahan sulfat dalam mengolah lindi secara elektrokimia dengan anoda BDD dapat menyisihkan COD sebesar 55% sedangkan pada penambahan Cl<sup>-</sup> dapat menyisihkan COD sebesar 34%, keduanya dalam pH 3. Pada penelitian tersebut penambahan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> mampu menyisihkan COD lebih besar dibandingkan dengan penambahan Cl<sup>-</sup>. Tujuan dari penambahan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> karena berperan sebagai agen pengoksidasi seperti HOCl, untuk meningkatkan degradasi senyawa organik. Tujuan variasi densitas arus karena berpengaruh pada kecepatan reaksi dalam mendegradasi senyawa organik. Kerapatan arus berhubungan dalam pembentukan agen pengoksidasi pada proses oksidasi tidak langsung. Variasi dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 4 Variasi Bahan Uji Penelitian

Variasi densitas arus (mA/cm <sup>2</sup> )	Perbandingan mol rasio [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]				
	1:1(A)	1:2(B)	1:4(C)	1:8(D)	1:10(E)
25 mA/cm <sup>2</sup> = J <sub>1</sub> (A)	AA	AB	AC	AD	AE
37,5 mA/cm <sup>2</sup> = J <sub>2</sub> (B)	BA	BB	BC	BD	BE
50 mA/cm <sup>2</sup> = J <sub>3</sub> (C)	CA	CB	CC	CD	CE

Keterangan :

AA : perlakuan dengan mol rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1 dan J<sub>1</sub>= 25 mA/cm<sup>2</sup>

AB : perlakuan dengan mol rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:2 dan J<sub>1</sub>= 25 mA/cm<sup>2</sup>

AC : perlakuan dengan mol rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:4 dan J<sub>1</sub>= 25 mA/cm<sup>2</sup>

AD : perlakuan dengan mol rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:8 dan J<sub>1</sub>= 25 mA/cm<sup>2</sup>

AE : perlakuan dengan mol rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10 dan J<sub>1</sub>= 25 mA/cm<sup>2</sup>



- BA : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$  dan  $J_2 = 37,5 \text{ mA/cm}^2$
- BB : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$  dan  $J_2 = 37,5 \text{ mA/cm}^2$
- BC : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$  dan  $J_2 = 37,5 \text{ mA/cm}^2$
- BD : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$  dan  $J_2 = 37,5 \text{ mA/cm}^2$
- BE : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  dan  $J_2 = 37,5 \text{ mA/cm}^2$
- CA : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$  dan  $J_3 = 50 \text{ mA/cm}^2$
- CB : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$  dan  $J_3 = 50 \text{ mA/cm}^2$
- CC : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$  dan  $J_3 = 50 \text{ mA/cm}^2$
- CD : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$  dan  $J_3 = 50 \text{ mA/cm}^2$
- CE : perlakuan dengan mol rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  dan  $J_3 = 50 \text{ mA/cm}^2$

Perlakuan pada penelitian ini sebanyak 15. Pada awal penelitian, penambahan buffer fosfat ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) dibutuhkan sebagai penyeimbang ion, karena kompartemen bagian tengah berisi *aquadest* yang tidak mengandung ion sehingga dapat menyebabkan arus tidak bergerak. Kemudian melakukan analisis sampel dengan parameter utama COD, TDS, TKN, Nitrat, Nitrit, dan pH. Pada variasi molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  merupakan lindi asli, dimana tidak ada penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Namun dilakukan pengkondisian pH awal lindi yaitu sebesar 5 dengan menambahkan  $\text{HNO}_3$ . Perhitungan penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dapat dilihat pada lampiran D.

### 3.9 Analisis dan Pembahasan

Melakukan analisis dan pembahasan terhadap kualitas efluen yang dihasilkan dari parameter COD, TDS, TKN, Nitrat, Nitrit, pH, Total-N, dan konsumsi energi spesifik. Kemudian dianalisis dan dibahas mengenai pengaruh densitas arus dan perbandingan molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  terhadap penyisihan polutan organik pada

lindi hasil proses biologis. Data hasil penelitian akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

### **3.10 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.

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Penelitian Pendahuluan**

Tujuan dari penelitian pendahuluan adalah untuk menganalisis karakteristik awal lindi dan menentukan lama waktu operasi pada proses elektrokimia yang digunakan dalam penelitian utama.

##### **4.1.1 Karakteristik Awal Lindi**

Lindi yang digunakan dalam penelitian ini adalah lindi influen yang diolah menggunakan ABR di TPA Ngipik, Gresik. Pada penelitian ini tidak menggunakan lindi dari efluen pengolahan ABR pada TPA Ngipik, Gresik. Kandungan organik COD pada lindi setelah pengolahan ABR sangat tinggi yaitu mencapai 17000 mg/L sehingga sangat sulit untuk diolah pada proses oksidasi elektrokimia sebagai pemenuhan baku mutu lindi. Tingginya efluen lindi ABR pada konsentrasi COD disebabkan oleh pengolahan ABR pada TPA Ngipik, Gresik tidak beroperasi dengan baik sehingga lindi menjadi terakumulasi. Selain itu, pada penelitian Alamsjah (2016) menyatakan pada kondisi lapangan, IPL TPA Ngipik Gresik melakukan pengurasan sebanyak satu kali semenjak bangunan beroperasi dan tidak ada ruang lumpur pada bangunan tersebut. Berdasarkan penelitian Laitinen *et al.* (2005), persen removal COD dengan pengolahan biologis yaitu sebesar 50%, sehingga dalam penelitian ini disimulasikan dengan pengenceran dua kali pada lindi. Pada nilai persen removal COD 50% didapatkan dari kandungan COD sebelum pengolahan sebesar biologis sebesar 2455 mg L<sup>-1</sup> setelah dilakukan pengolahan biologis kandungan COD turun menjadi 1130 mg L<sup>-1</sup> sehingga didapatkan persen removal sebesar 54%. Pengenceran dua kali dilakukan sebagai alternatif pengganti pengolahan biologis sebelumnya, karena dalam penelitian ini lindi yang diolah merupakan efluen dari pengolahan biologis sebagai *post-treatment*. Karakteristik lindi TPA Ngipik, Gresik dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik Influen Pengolahan ABR Lindi pada TPA Ngipik, Gresik

Parameter	Unit	Konsentrasi
pH		8,58
TDS	g/L	7,93
Cl <sup>-</sup>	mg/L	4299
COD	mgO <sub>2</sub> /L	2011,25
BOD <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	133,33
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	173,776
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	14,77
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	7,601
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	1033,33
BOD <sub>5</sub> /COD		0,066

Tabel 4.2 Karakteristik Influen Pengolahan ABR Hasil Pengenceran Dua Kali

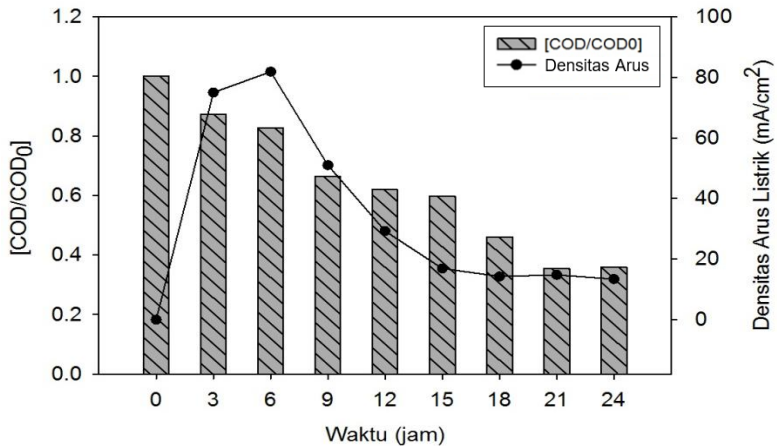
Parameter	Unit	Konsentrasi
pH		8,72
TDS	g/L	7,27
Cl <sup>-</sup>	mg/L	1999,375
COD	mgO <sub>2</sub> /L	1168
BOD <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	66,5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	63,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	16,11
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	218,345
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	539,2857
BOD <sub>5</sub> /COD		0,05

Berdasarkan karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik nilai COD dan BOD<sub>5</sub> yang telah diuji didapatkan nilai rasio BOD<sub>5</sub>/COD sebesar 0,05. Berdasarkan Alvarez Vazquez *et al.* (2004), lindi dengan rasio BOD<sub>5</sub>/COD < 5 termasuk dalam golongan lindi *stabilized*. Kandungan BOD sudah memenuhi baku mutu lindi, dibuktikan dengan karakteristik BOD awal yaitu sebesar 133,3 mg/L setelah dilakukan pengenceran, karakteristik BOD menjadi 66,5 mg/L. Kandungan COD di awal yaitu sebesar 2011,25 mg/L, sedangkan setelah dilakukan pengenceran dua kali, kandungan COD masih belum memenuhi baku mutu air lindi yaitu sebesar 1168 mg/L. Baku mutu lindi di Indonesia untuk parameter COD yaitu 300 mg/L. Oleh karena itu, perlu adanya pengolahan lindi lebih lanjut sebelum

dibuang ke lingkungan bebas agar tidak menimbulkan pencemaran air tanah dan air permukaan.

#### 4.1.2 Penentuan Durasi Proses Oksidasi

Durasi proses oksidasi ditentukan berdasarkan tingkat penyisihan COD, densitas arus listrik, TDS, dan pH. Durasi proses oksidasi yang diperlukan dalam penelitian pendahuluan adalah 24 jam dengan titik pengambilan sampel pada jam ke-  $t_0$  (awal),  $t_3$  (3 jam),  $t_6$  (6 jam),  $t_9$  (9 jam),  $t_{12}$  (12 jam),  $t_{15}$  (15 jam),  $t_{18}$  (18 jam),  $t_{21}$  (21 jam) dan  $t_{24}$  (24 jam). Debit yang digunakan sebesar 7 mL/detik. Dengan waktu tinggal lindi dalam reaktor yaitu 14,28 detik. Data hasil analisis COD, pH, dan TDS pada lindi terdapat pada Lampiran C Tabel LC.1 hingga Tabel LC.3. Berikut ini merupakan Gambar 4.1 perbandingan massa COD pada waktu ( $t$ ) terhadap massa COD awal [ $COD/COD_0$ ].



Gambar 4.1 Penyisihan  $[COD/COD_0]$  dan Densitas Arus pada Lindi selama Proses Elektrooksidasi

Berdasarkan Gambar 4.1, menunjukkan penyisihan massa COD pada setiap interval waktu 3 jam ( $t_0-t_3$ ,  $t_3-t_6$ ,  $t_6-t_9$ ,  $t_9-t_{12}$ ,  $t_{12}-t_{15}$ ,  $t_{15}-t_{18}$ ,  $t_{18}-t_{21}$ , dan  $t_{21}-t_{24}$ ) berturut- turut 0,607 g (13%), 0,222 g (5%), 0,78 g (20%), 0,216 g (7%), 0,106 g (4%), 0,654 g (23%), 0,512 g (23%), dan -0,02 g (-1%). Penyisihan massa COD terbesar

terdapat pada interval waktu pada jam ke-6 hingga jam ke-9 yaitu sebesar 0,78 g dengan persen removal sebesar 20%. Sedangkan konsentrasi COD penurunan pada t-0, t-3, t-6, dan t-9 berturut-turut sebesar 2400,5 mg L<sup>-1</sup>, 2150,5 mg L<sup>-1</sup>, 2036,21 mg L<sup>-1</sup>, 1679,071 mg L<sup>-1</sup>. Berdasarkan penyisihan massa COD tersebut, maka di pilih waktu operasi antara jam ke-6 hingga jam ke-8. Selain itu penurunan konsentrasi COD pada jam ke-6 menuju jam ke-9 cukup tinggi. Pemilihan waktu operasi juga dilihat dari sisi arus yang dihasilkan serta TDS dan pH yang terbentuk. Penyisihan COD pada penelitian ini terbilang rendah karena tidak menambahkan elektrolit dan pengkondisian awal pH. Penambahan elektrolit dapat meningkatkan penyisihan polutan organik pada oksidasi tidak langsung karena dapat membentuk senyawa *active species*. pH berpengaruh pada laju oksidasi dalam menentukan spesies klor aktif yang muncul pada efluen.

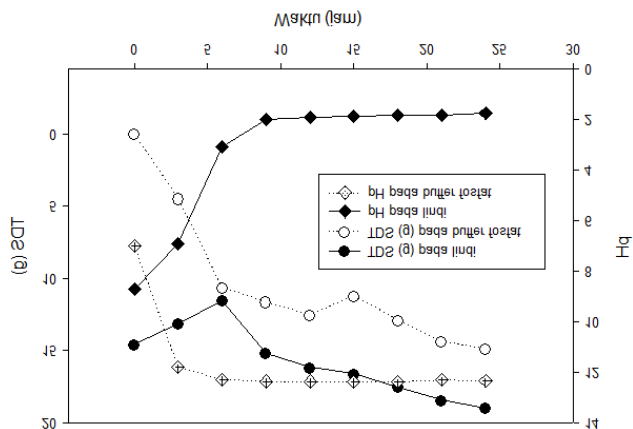
Berdasarkan penelitian pendahuluan juga dilihat nilai densitas arus yang dihasilkan selama proses elektrooksidasi berlangsung. Berikut ini Tabel 4.3 penentuan durasi waktu operasi berdasarkan densitas arus listrik yang dihasilkan selama proses elektrooksidasi berlangsung selama 24 jam.

Tabel 4.3 Penentuan Durasi Waktu Operasi Berdasarkan Densitas Arus Listrik

Waktu (jam)	Densitas Arus (mA cm <sup>-2</sup> )
0	0
3	75
6	81,875
8	65,75
9	51
12	29,25
15	16,875
18	14,25
21	14,75
24	13,375

Densitas arus yang digunakan dalam penelitian pendahuluan adalah  $75 \text{ mA cm}^{-2}$  pada 3 jam pertama kemudian 3 jam berikutnya menggunakan densitas arus listrik maksimum. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui kemampuan densitas arus listrik selama proses oksidasi elektrokimia berlangsung. Berdasarkan Tabel 4.3 diketahui bahwa efisiensi densitas arus listrik selama proses oksidasi elektrokimia mengalami penurunan. Dalam penelitian ini telah ditetapkan variasi densitas arus yang digunakan yaitu  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ ,  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ , dan  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ . Namun, pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pada jam ke-12 hingga jam ke-24 nilai densitas arus listrik berkisar antara  $13,375 \text{ mA cm}^{-2}$  hingga  $29,25 \text{ mA cm}^{-2}$ , nilai tersebut belum mencapai variasi densitas arus listrik yang digunakan dalam penelitian ini yaitu mencapai  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ . Selain itu, dengan mempertimbangkan ketahanan arus listrik yang dihasilkan selama proses oksidasi elektrokimia berlangsung, waktu operasi selama 9 jam tidak dipilih untuk penelitian utama, sehingga dipilih waktu operasional selama 8 jam untuk menjaga kestabilan arus listrik.

Berdasarkan penelitian pendahuluan juga dilakukan analisis parameter pH dan TDS pada lindi serta larutan buffer fosfat. Data hasil analisis pH dan TDS terdapat pada Lampiran C Tabel LC.3. Berikut ini merupakan Gambar 4.2 Nilai pH dan penyisihan massa TDS pada lindi dan larutan buffer fosfat.



Gambar 4.2 Nilai pH dan Penyisihan Massa TDS

Fluktuasi nilai pH pada Gambar 4.2 menunjukkan terjadinya kenaikan pH pada buffer fosfat sementara pada lindi mengalami penurunan pH. Hal tersebut terjadi karena terjadi proses reduksi pada kompartemen katoda dan oksidasi pada kompartemen anoda. Kenaikan pH pada katoda disebabkan oleh penggunaan *Cation Exchange Membrane* (CEM) yang dapat meningkatkan pH akibat adanya transport proton dan ion hidroksil (Rozendal *et al.*, 2007).

Selama 9 jam waktu operasi, pH pada lindi mengalami penurunan yang cukup tinggi yaitu 8,72 menjadi 1,99. Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat perpindahan ion  $H^+$  serta ion  $OH^-$  dalam proses elektrodialisis. Pada jam ke-24 nilai pH mengalami penurunan hingga mencapai 1,76. Nilai pH lindi yang sangat asam, apabila dibuang ke badan air maka dapat menyebabkan badan air menjadi korosif. Berdasarkan percobaan penelitian ini, maka digunakan waktu operasi selama 8 jam, hal tersebut untuk mencegah terjadinya penurunan pH yang sangat tinggi. Selain itu, terjadi peningkatan TDS seiring dengan penurunan pH. Peningkatan TDS dapat terjadi karena pH pada lindi menjadi sangat asam. Peningkatan massa TDS dalam penelitian ini kemungkinan terjadi karena selama proses elektrooksidasi proses yang dominan terjadi adalah proses oksidasi dan reduksi pada ion-ion tertentu dibandingkan dengan proses oksidasi senyawa organik. Penurunan pH pada kompartemen anoda menunjukkan adanya mekanisme pada kompartemen anoda yang menghasilkan ion-ion  $H^+$ . Proses elektrodialisis dengan menggunakan membran *Cation Exchange Membrane* (CEM) dapat menyebabkan reduksi kation yang menghasilkan gas hidrogen (Rozendal *et al.*, 2007). Tingginya TDS yang terkandung pada lindi dapat membahayakan lingkungan apabila di buang ke badan air.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Cabeza *et al.*, (2007) pengolahan lindi pada proses elektrooksidasi menggunakan anoda BDD mampu menyisihkan COD dan  $NH_4^+-N$  mendekati 100% setelah 6-8 jam waktu operasional. Dari hasil penelitian penyisihan COD, densitas arus listrik, pH, dan TDS dipilih waktu



operasional selama 8 jam dengan pengambilan titik sampel t<sub>0</sub> (awal), t<sub>2</sub> (2 jam), t<sub>4</sub> (4 jam), t<sub>6</sub> (6 jam), dan t<sub>8</sub> (8 jam).

## 4.2 Penelitian Utama

Penelitian utama bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan ion pendukung berupa SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> sebagai *active species* serta menentukan nilai densitas arus listrik yang efektif dalam proses elektrooksidasi pada lindi menggunakan anoda BDD. Variasi yang digunakan dalam penelitian utama adalah variasi perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]: [Cl<sup>-</sup>] yaitu dengan perbandingan 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10. Variasi yang kedua adalah penggunaan densitas arus listrik yaitu sebesar 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup>. Pada penelitian utama juga digunakan variasi pH awal proses yaitu pH 5.

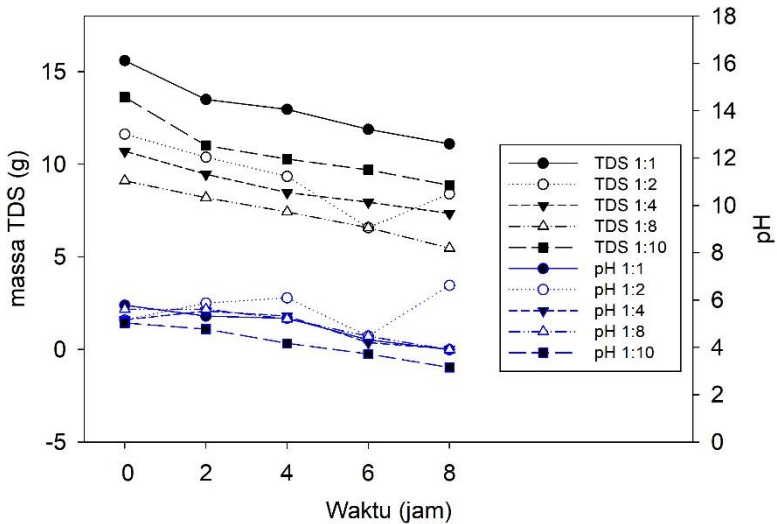
Efisiensi dari proses elektrooksidasi dengan variasi perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] dan densitas arus listrik tersebut dilihat berdasarkan tingkat penyisihan COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, TKN, dan konsumsi energi spesifik. Penurunan nilai COD dan total-N dinyatakan dalam normalisasi massa (Ct/Co), yaitu massa pada waktu (t) dibandingkan massa awal. Sumbu y dinyatakan pada grafik sebagai (Ct/Co) dan sumbu x merupakan waktu (jam) selama proses elektrooksidasi. Sedangkan, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, dan NO<sub>2</sub><sup>-</sup> dinyatakan dalam massa.

### 4.2.1.1 Perubahan Nilai TDS dan pH pada Kompartemen Lindi dan Buffer Kompartemen Fosfat

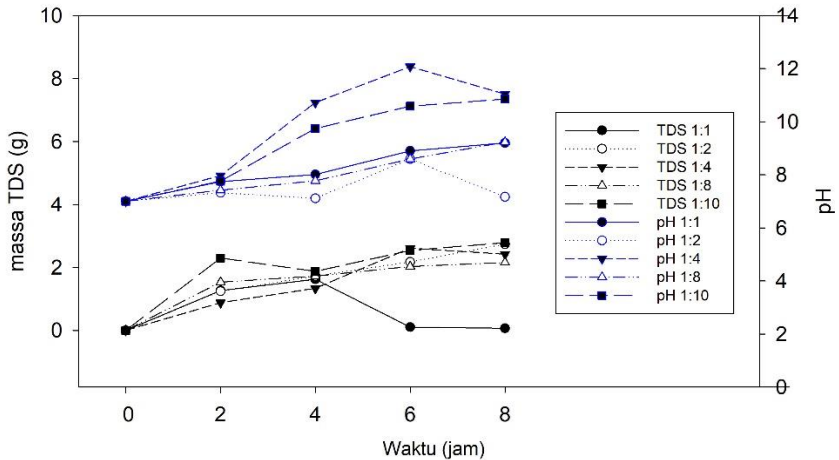
TDS pada lindi menunjukkan adanya ion-ion terlarut berupa senyawa organik dan anorganik yang dapat melewati membran anion dan membran kation. Penambahan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan pengkondisian pH 5 pada lindi yang mengakibatkan kondisi lindi menjadi lebih asam dapat mengakibatkan TDS pada awal lindi meningkat. Namun seiring bertambahnya lama waktu operasional terjadi penurunan TDS pada lindi dan peningkatan TDS pada kompartemen berisi buffer fosfat.

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pada lindi akan terdisosiasi menjadi Na<sup>+</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Pada ion Na<sup>+</sup> akan berpindah menuju buffer fosfat melalui membran CEM sedangkan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> akan mengalami oksidasi tidak langsung

dengan anoda BDD sehingga terbentuk agen pengoksidasi berupa radikal sulfat. Data hasil analisis perubahan massa TDS dan pH pada lindi dan buffer fosfat pada seluruh variasi tertera pada Lampiran C Tabel LC.4 hingga LC.15. Pada Gambar 4.3 menunjukkan perubahan massa TDS dan pH pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8 dan 1:10. dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ .

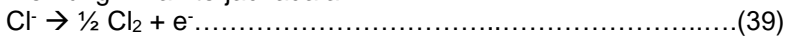


Gambar 4.3 Perubahan Massa TDS dan pH pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$



Gambar 4.4 Perubahan Nilai TDS pada Buffer Fosfat dengan Variasi Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa pH lindi pada seluruh variasi mengalami penurunan selama waktu operasi. Pada variasi 1:1, 1:4, 1:8, dan 1:10 mengalami penurunan selama 8 jam waktu operasi. Selain itu, tingkat keasaman pH tersebut cukup tinggi yaitu sebesar 3,9 ([SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] = 1:1), 3,93 ([SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] = 1:4), dan 3,9 ([SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] = 1:8). Pada rentang pH ini (pH<7,5) persenyawaan klorin yang dominan terbentuk adalah HOCl. Reaksi yang memungkinkan terjadi adalah:



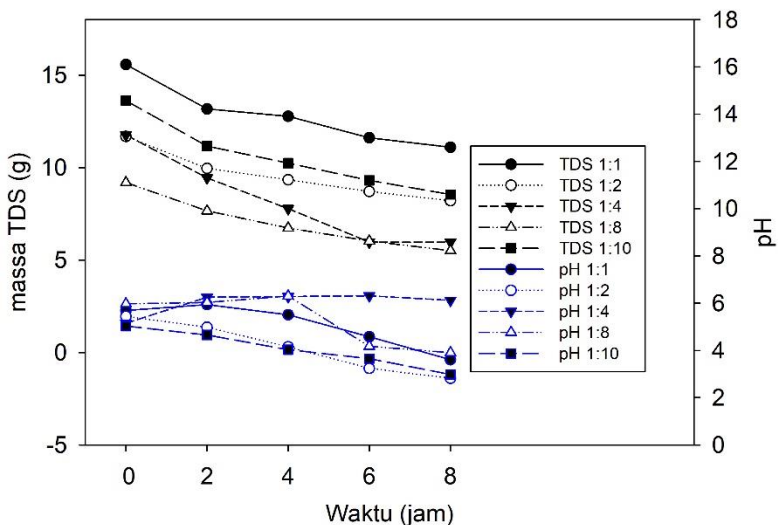
(Anglada *et al.*, 2011)

Penurunan pH lindi tersebut juga dapat disebabkan karena adanya proses elektrodialisis. Berdasarkan Gambar 4.4 pH pada kompartemen buffer fosfat mengalami kenaikan selama 8 jam waktu operasi, kecuali pada variasi 1:1. Nilai pH pada variasi 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 yaitu sebesar 9,2; 7,17; 11,04; 9,23 dan 10,85 dimana pH awal buffer fosfat sebesar 7. Kenaikan pH pada buffer fosfat menandakan bahwa kandungan H<sup>+</sup> pada kompartemen lindi berpindah menuju kompartemen buffer fosfat.

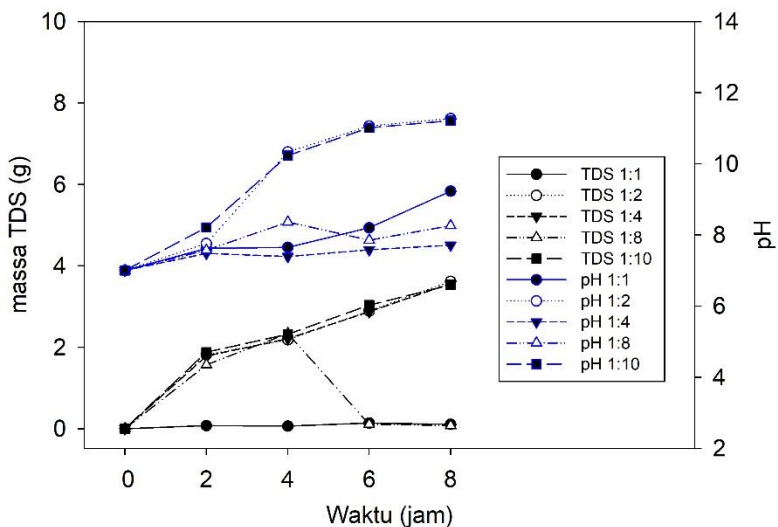
Pada variasi 1:2 terjadi peningkatan pH pada jam ke-0 menuju jam ke-4 kemudian mengalami penurunan di jam ke-6 dan naik kembali pada jam ke-8. Berdasarkan "breakpoint" pembentukan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{HSO}_4^-$  dapat terjadi pada rentang pH <2. Namun pH lindi maksimum pada variasi 1:2 selama 8 jam waktu operasi sebesar 7,17 sehingga tidak terbentuk  $\text{H}^+$  melainkan  $\text{SO}_4^{2-}$ . Peningkatan pH pada variasi tersebut dimungkinkan terjadi karena tidak terbentuknya spesies baru berupa  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pada anoda yang bersifat asam.

Sedangkan TDS pada variasi 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 sebesar 4,49 g (29%), 3,23 g (28%), 3,36 g (31%), 3,64 g (40%), dan 4,76 g (35%). Pada Gambar 4.3 massa TDS relatif mengalami penurunan selama 8 jam waktu operasi pada seluruh variasi, kecuali pada variasi 1:2. Berdasarkan (Cossu *et al.*, 1998; Anglada *et al.*, 2010), pada pH asam dapat menurunkan konsentrasi pada ion-ion karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) dan bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), dimana ion-ion tersebut dapat merusak senyawa radikal hidroksil. Penurunan TDS lindi kemungkinan disebabkan oleh berkurangnya ion-ion karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) dan bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) sehingga menurunkan kandungan TDS pada lindi. Selain itu, adanya proses elektrodialisis selama 8 jam waktu operasi ditandai dengan massa TDS yang tertangkap pada kompartemen yang berisi buffer fosfat.

Massa TDS pada buffer fosfat mengalami peningkatan yaitu dari 0 g menjadi 0,07 g sampai 2,79 g. Nilai TDS pada buffer fosfat untuk perbandingan 1:1 yaitu 0 g menjadi 0,07 g. Pada variasi 1:2 yaitu 0 g menjadi 2,74 g. Pada variasi 1:4 yaitu 0 g menjadi 2,42 g. Pada variasi 1:8 yaitu 0 g menjadi 2,16 g. Pada variasi 1:10 yaitu 0 g menjadi 2,79 g. Peningkatan massa TDS tertinggi terdapat pada variasi 1:10. Hal tersebut menandakan bahwa ion-ion yang terdapat pada kompartemen lindi telah berpindah menuju kompartemen yang berisi buffer fosfat.

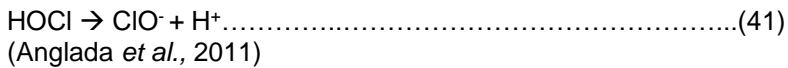


Gambar 4.5 Perubahan Nilai TDS pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$



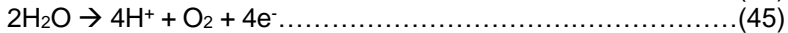
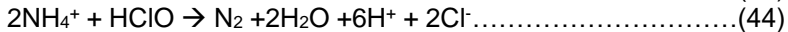
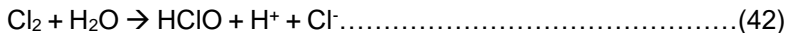
Gambar 4.6 Perubahan Nilai TDS pada Buffer Fosfat dengan Variasi Densitas Arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa pH operasi pada lindi dengan perbandingan  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 mengalami penurunan, yaitu dari  $\pm 5$  menjadi  $\pm 2,82$  sampai 3,9 setelah 8 jam waktu operasi. Namun pada perbandingan 1:4 pH lindi mengalami kenaikan dari 5,15 menjadi 6,12. Hal tersebut dapat terjadi karena pada rentang pH  $\pm 6$  persenyawaan klorin yang kemungkinan terbentuk adalah  $\text{ClO}^-$ . Reaksi yang memungkinkan terjadi adalah:



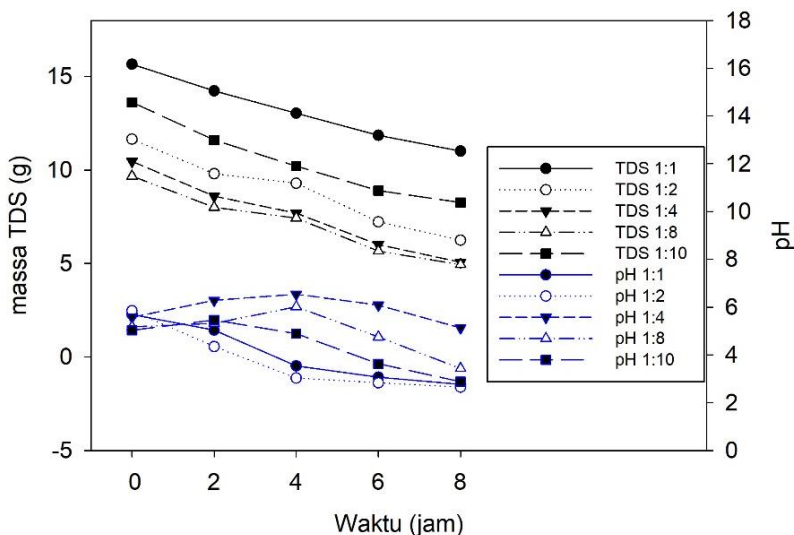
Sedangkan pada buffer fosfat mengalami kenaikan pH. Pada pengukuran pH buffer fosfat hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH buffer fosfat naik dari 7 menjadi 7,71-11,27. Kenaikan pH pada buffer fosfat menunjukkan bahwa pH lindi berpindah menuju konsentrat yang berisi buffer fosfat.

Selain itu, peningkatan pH pada lindi menjadi lebih asam dikarenakan pada saat proses elektrok oksidasi mengalami reaksi pada persamaan (31-34), dimana reaksi tersebut menghasilkan evolusi hidrogen (Feki *et al.*, 2009).

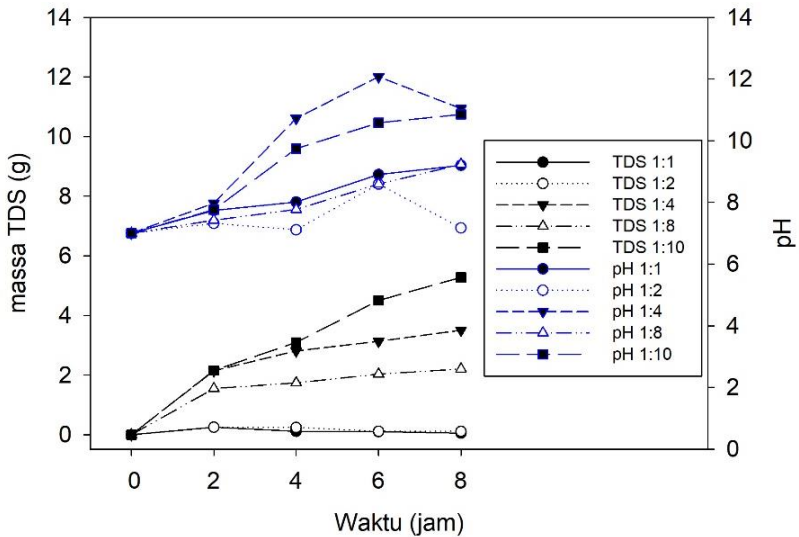


Sedangkan massa TDS lindi pada variasi 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 sebesar 4,47 g (29%), 3,48 g (30%), 5,80 g (49%), 3,68 g (40%), dan 5,08 g (37%). Pada Gambar 4.5 massa TDS lindi relatif mengalami penurunan pada seluruh variasi. Penurunan massa TDS lindi kemungkinan disebabkan karena adanya proses elektrodialisis selama 8 jam waktu operasi yang ditandai dengan massa TDS yang tertangkap pada kompartemen yang berisi buffer fosfat.

Massa TDS pada buffer fosfat mengalami peningkatan yaitu dari 0 g menjadi 0,07 g sampai 2,79 g. Nilai TDS pada buffer fosfat untuk perbandingan 1:1 yaitu 0 g menjadi 0,11 g. Pada variasi 1:2 yaitu 0 g menjadi 3,62 g. Pada variasi 1:4 yaitu 0 g menjadi 3,57 g. Pada variasi 1:8 yaitu 0 g menjadi 0,08 g. Pada variasi 1:10 yaitu 0 g menjadi 3,53 g. Pada variasi 1:1 dan 1:8 peningkatan massa TDS terbilang cukup rendah. Hal tersebut kemungkinan dapat terjadi karena proses oksidasi pada kompartemen lindi lebih dominan dibandingkan proses elektrodialisis. Peningkatan massa TDS tertinggi terdapat pada variasi 1:10. Hal tersebut menandakan bahwa ion-ion yang terdapat pada kompartemen lindi telah berpindah menuju kompartemen yang berisi buffer fosfat. TDS pada lindi mengandung komponen anorganik berupa sulfat, klorida, amonium, kalsium, magnesium, natrium, kalium, hidrogen karbonat, dan lain sebagainya. Hal tersebut dibuktikan dengan terdapatnya kandungan sulfat, ammonium, dan klorida yang terukur pada lindi dan buffer fosfat.

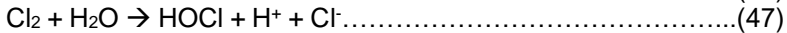
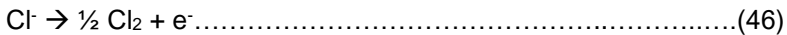


Gambar 4.7 Perubahan Nilai TDS pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup>



Gambar 4.8 Perubahan Nilai TDS pada Buffer Fosfat dengan Variasi Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup>

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa pH operasi pada lindi dengan perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 mengalami penurunan, yaitu dari ±5 menjadi ±3 setelah 8 jam waktu operasi. Pada rentang pH ini persenyawaan klorin yang dominan adalah HOCl. Reaksi yang memungkinkan terjadi adalah:



(Anglada *et al.*, 2011)

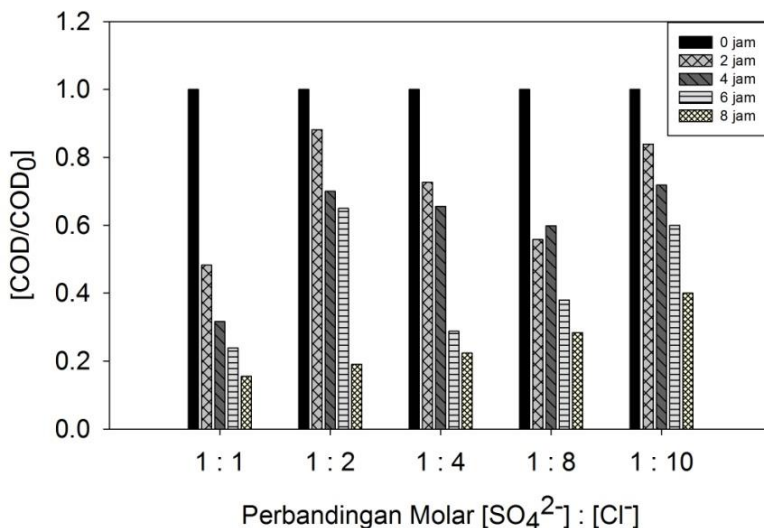
Sedangkan pada buffer fosfat mengalami kenaikan pH. Pada pengukuran pH buffer fosfat hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH buffer fosfat naik dari 7 menjadi 7,17-10,85. Kenaikan pH pada buffer fosfat menunjukkan bahwa pH lindi berpindah menuju konsentrat yang berisi buffer fosfat.



Nilai TDS selama proses elektrooksidasi mengalami perubahan. Perubahan nilai massa TDS pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 pada lindi adalah 4,64 g (30%), 5,40 g (46%), 5,39 g (52%), 4,73 g (49%), dan 5,36 g (39%). Sedangkan pada buffer fosfat terjadi peningkatan nilai TDS yaitu dari 0 g menjadi 0,07 g sampai 2,79 g. Nilai TDS pada buffer fosfat untuk perbandingan 1:1 yaitu 0 g menjadi 0,06 g. Pada variasi 1:2 yaitu 0 g menjadi 0,11 g. Pada variasi 1:4 yaitu 0 g menjadi 3,51 g. Pada variasi 1:8 yaitu 0 g menjadi 2,21 g. Pada variasi 1:10 yaitu 0 g menjadi 5,28 g. Peningkatan massa TDS tertinggi terdapat pada variasi 1:10. Hal tersebut menandakan bahwa ion-ion yang terdapat pada kompartemen lindi telah berpindah menuju kompartemen yang berisi buffer fosfat.

#### **4.2.1.2 Penyisihan COD pada Lindi**

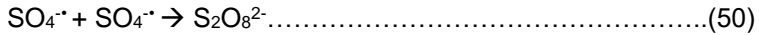
Analisis COD memiliki tujuan untuk mengetahui kandungan organik yang direpresentasikan dari kebutuhan oksigen. Pada proses elektrooksidasi terjadi proses oksidasi langsung dan tidak langsung. Pada proses oksidasi tidak langsung dapat memfasilitasi terbentuknya *active species* yang menghancurkan polutan organik. Salah satu *active species* yang dihasilkan adalah sulfat radikal ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ) (Farhan *et al.*, 2017).  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  tersebut terbentuk karena adanya  $\text{OH}^{\cdot}$  yang bereaksi dengan  $\text{SO}_4^{2-}$ . Pada Gambar 4.7 di bawah ini dapat dilihat penurunan nilai COD pada lindi dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$  dan variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$  yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8 dan 1:10. Data lengkap hasil analisis COD terdapat pada Lampiran C Tabel LC.16 hingga LC.18.



Gambar 4.9 Penurunan nilai COD pada variasi densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>

Penyisihan COD pada variasi perbandingan molar 1:1, 1:2, 1:4, 1:8 dan 1:10 berturut-turut yaitu 2,35 g (84%), 1,33 g (81%), 1,44 g (78%), 1,08 g (72%), dan 2,23 g (60%). Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai COD cenderung mengalami penurunan, kecuali pada perbandingan 1:6 pada jam ke-4 mengalami kenaikan namun tidak signifikan. Hal tersebut kemungkinan dapat terjadi akibat terbentuknya total klorin selama proses elektrooksidasi sehingga mempengaruhi dalam pengukuran COD (Agustina, 2018). Penurunan nilai COD tertinggi terdapat pada variasi 1:1 dimana pada jam ke-0 menuju jam ke-8 mengalami penurunan sebesar 84%. Hal tersebut dapat terjadi karena dihasilkannya SO<sub>4</sub><sup>-</sup> dari reaksi pembentukan antara HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dengan OH<sup>•</sup>. Selain itu, juga dihasilkan senyawa peroxodisulfat yang berperan aktif dalam menyisihkan polutan organik. Berikut ini merupakan persamaan dalam pembentukan sulfat radikal dan peroxodisulfat sebagai berikut:

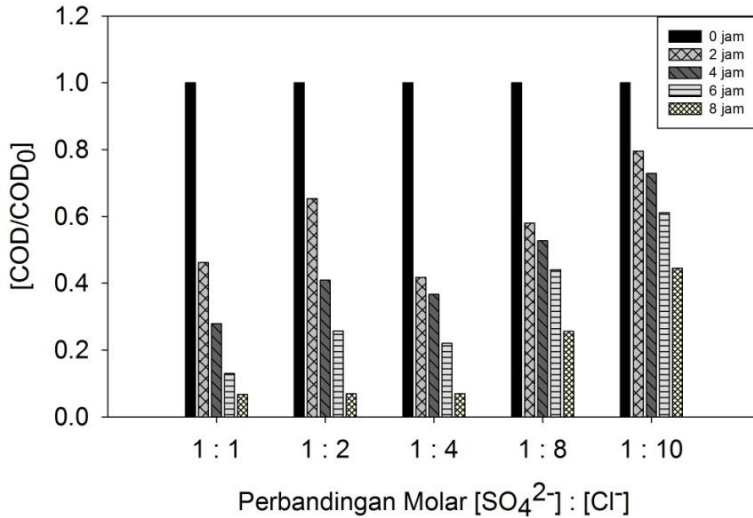




(Mao *et al.*, 2008)

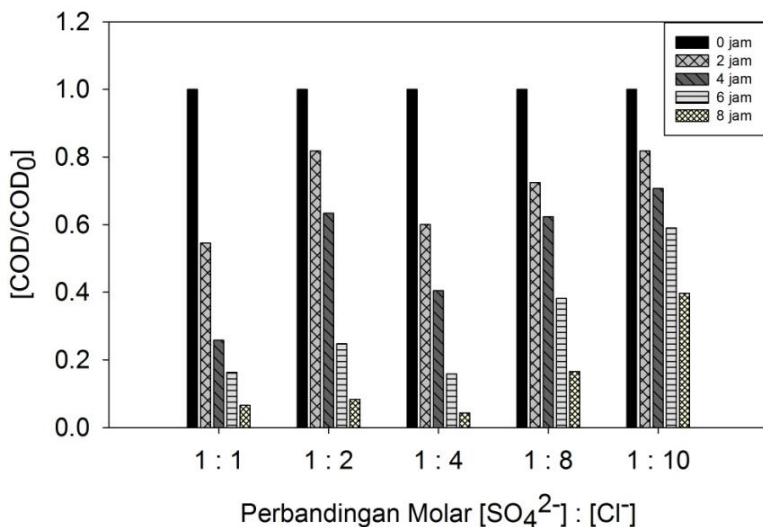
Pada variasi 1:2, penurunan nilai COD tertinggi terjadi setelah 6 jam proses elektrooksidasi. Pada variasi perbandingan molar 1:4 dan 1:8, COD mengalami penurunan pada 2 jam pertama dan 1:6 mengalami sedikit kenaikan pada jam ke-4 pada proses elektrooksidasi. Dari hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada variasi densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, tingkat penyisihan paling tinggi dicapai pada perbandingan molar 1:1. Penyisihan COD paling rendah pada perbandingan 1:10.

Kandungan sulfat akhir proses elektrooksidasi tertera pada Lampiran C Tabel LC.32. Kandungan sulfat akhir proses elektrooksidasi pada perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] :[Cl<sup>-</sup>]= 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 berturut-turut adalah 726,19 mg/L, 845,238 mg/L, 373,81 mg/L, 152,381 mg/L, 773,81 mg/L. Pada proses elektrooksidasi dengan menggunakan anoda BDD, keberadaan ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan persulfat (S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>) dibentuk dari proses oksidasi langsung dengan transfer elektron dan tidak langsung dengan pembentukan senyawa intermediate sulfat radikal melalui reaksi OH<sup>•</sup> (Khamis *et al.*, 2010; Ozcan *et al.*, 2008). Namun ion persulfat (S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>) mampu berdifusi menjauh dari permukaan elektroda ke dalam *bulk liquid* sehingga dapat diaktifkan lebih lanjut, seperti ion besi (Fe) membentuk radikal sulfat yang reaktif (Romero *et al.*, 2010). Oleh karena itu, baik S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>•-</sup> memungkinkan dalam peningkatan oksidasi dari ROC<sub>ED</sub> + Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pada anoda BDD.



Gambar 4. 10 Penurunan Konsentrasi COD pada variasi densitas arus 37,5 mAcm<sup>-2</sup>

Penyisihan massa COD pada variasi densitas arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup> dengan perbandingan molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 berturut-turut adalah 2,32 g (93%), 2,4 g (93%), 2,2 g (93%), 1,32 (74%) dan 2,06 g (56%). Pada grafik tersebut nilai COD cenderung mengalami penurunan pada seluruh variasi. Pada variasi 1:1 hingga 1:4 tidak terlihat signifikan pada titik akhir (jam ke-8), karena menghasilkan penyisihan COD yang sama dalam arti tidak ada perubahan yang signifikan bila kandungan Cl<sup>-</sup> pada lindi tinggi.



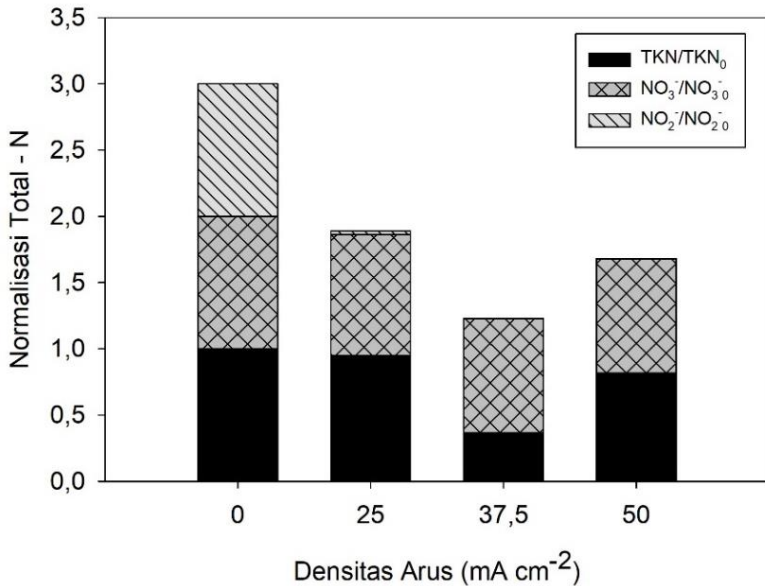
Gambar 4. 11 Penurunan Konsentrasi COD pada variasi densitas arus 50 mA cm<sup>-2</sup>

Penyisihan massa COD pada variasi densitas arus 50 mA cm<sup>-2</sup> dengan perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] yaitu 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, dan 1:10 berturut-turut adalah 1,92 g (93%), 1,73 g (92%), 1,42 g (96%), 1,97 (83%), dan 2,24 g (60%). Pada penyisihan COD menggunakan densitas arus 50 mA cm<sup>-2</sup>, grafik tersebut cenderung memiliki kesamaan dengan densitas arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup>. Pada penelitian Luze *et al.* (2015) menyatakan bahwa kehadiran ion klorida dan bikarbonat dapat mempengaruhi proses oksidasi berdasarkan SO<sub>4</sub><sup>•-</sup>. Reaksi antara SO<sub>4</sub><sup>•-</sup> dan Cl<sup>-</sup> lebih mengarah pada pembentukan Cl<sup>•</sup> dengan persamaan SO<sub>4</sub><sup>•-</sup> + Cl<sup>-</sup> → Cl<sup>•</sup> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Pada pH 3 produk klorin yang dominan adalah Cl<sub>2</sub>, sedangkan pada pH < 7,5 adalah HClO, dan pada pH > 7,5 produk klorin yang dominan adalah OCl<sup>-</sup>. Pada penelitian ini, penyisihan COD pada pH 3 lebih tinggi dibandingkan dengan penyisihan COD pada pH 5. Hal tersebut terjadi karena pada pH 3 produk klorin yang dominan adalah Cl<sub>2</sub>. Tingkat oksidasi Cl<sub>2</sub> lebih tinggi dibandingkan dengan HClO dan OCl<sup>-</sup>.

Berdasarkan Farhat *et al.* (2017), senyawa sulfat dalam proses elektrooksidasi dapat teraktivasi menjadi radikal sulfat yang bertindak sebagai agen pengoksidasi yang dapat mendegradasi senyawa *refractory*. Semakin tinggi penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang diberikan, tingkat penyisihan COD juga semakin tinggi, hal ini dapat terjadi karena terbentuknya oksidator kuat berupa radikal sulfat, selain radikal hidroksida, pada proses oksidasi tidak langsung.  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  merupakan oksidan kuat yang sangat baik, dengan standard potensial redoks ( $E^0$ ) sebesar 2,6 V. Pada saat radikal sulfat terbentuk, radikal sulfat tersebut dapat dengan cepat menyerang senyawa yang dapat teroksidasi termasuk senyawa organik dan anorganik seperti  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$ . Selain itu, radikal sulfat juga dapat bereaksi dengan air dan membentuk  $\text{OH}^{\cdot}$ . Berdasarkan hasil penyisihan massa COD optimum pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{Cl}^-]$  dan densitas arus listrik, dapat disimpulkan bahwa pada densitas arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  dapat menyisihkan nilai COD hingga 96%. Selain itu, persen removal pada densitas arus listrik  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan densitas arus listrik  $25 \text{ mA cm}^{-2}$  dan  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ .

#### **4.2.1.3 Nilai Total Nitrogen pada Lindi**

Pada penelitian ini, Total-N didapatkan dari akumulasi nilai TKN,  $\text{NO}_3^-$  dan  $\text{NO}_2^-$ . Penentuan nilai Total-N menjadi salah satu pertimbangan untuk mengetahui pemenuan baku mutu dalam parameter Total-N. Data hasil nilai Total-N tertera pada Lampiran C Tabel LC.19 hingga Tabel LC.21. Konsentrasi Total-N dengan densitas arus  $25 \text{ mA/cm}^{-2}$ ,  $37,5 \text{ mA/cm}^{-2}$ , dan  $50 \text{ mA/cm}^{-2}$  pada lindi dapat dilihat pada Gambar 4.12 hingga Gambar 4.14.

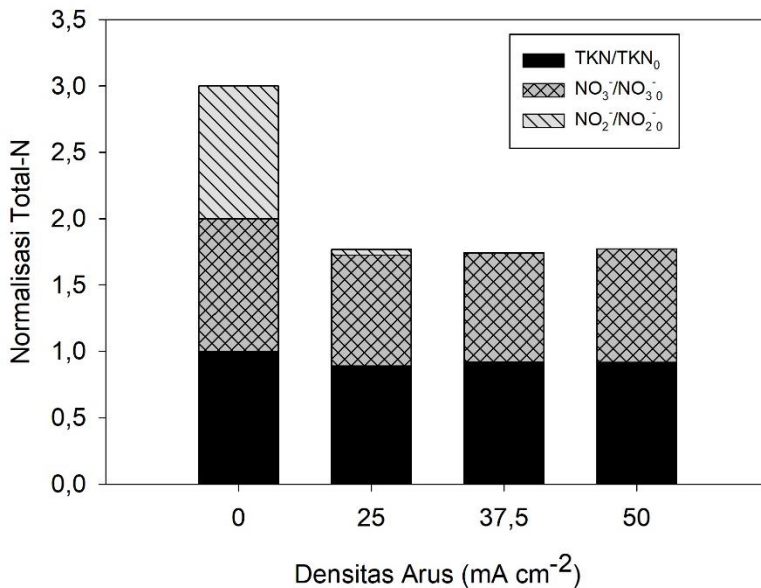


Gambar 4.12 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:1 dengan Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup>

Pada variasi densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup> dengan perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>]= 1:1, nilai total nitrogen mengalami penurunan selama 8 jam proses elektrooksidasi. Penyisihan nilai total nitrogen pada densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA adalah 1,11 g (37%), 1,771 g (59%), dan 1,318 g (44%). Penyisihan nilai total nitrogen pada variasi densitas arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup> lebih besar dibandingkan dengan densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup> dan 50 mA cm<sup>-2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa pentingnya arus listrik dalam menurunkan senyawa nitrogen.

Nilai TKN pada lindi mengalami penurunan di seluruh variasi densitas arus. Pada densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup> dan 50 mA cm<sup>-2</sup>, nilai TKN mengalami penurunan yang cukup rendah, sedangkan pada variasi 37,5 mA cm<sup>-2</sup> nilai TKN mengalami penurunan yang paling tinggi dibandingkan variasi densitas arus lainnya. Hilangnya

TKN pada lindi dimungkinkan karena adanya oksidasi oleh organik-N menjadi ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), serta adanya oksidasi oleh  $\text{Cl}^-$ . Sedangkan nilai nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) dan nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) pada lindi relatif mengalami penurunan yang hampir sama pula. Hilangnya nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) karena adanya proses elektrodialisis yang ditandai dengan berpindahkannya konsentrasi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) pada lindi menuju kompartemen yang berisi larutan buffer fosfat. Selain itu juga dapat disebabkan karena proses elektrooksidasi oleh  $\text{Cl}^-$ . Adapun konsentrasi nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) relatif mengalami penurunan yang cukup drastis pada seluruh variasi. Penurunan tersebut dimungkinkan terjadi karena nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) teroksidasi menjadi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Selain itu, sebagian juga ada yang berpindah ke kompartemen tengah (larutan yang berisi buffer fosfat).

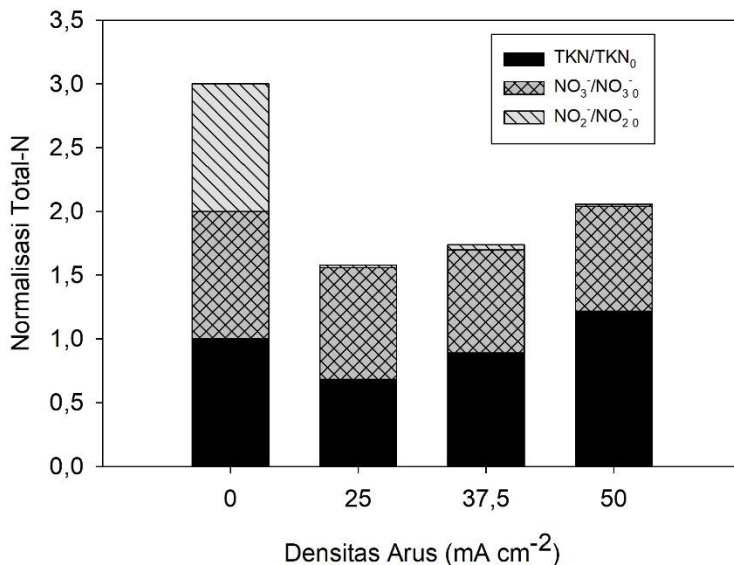


Gambar 4.13 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:2 dengan Densitas Arus 25  $\text{mA cm}^{-2}$ , 37,5  $\text{mA cm}^{-2}$ , dan 50  $\text{mA cm}^{-2}$

Pada variasi densitas arus 25  $\text{mA cm}^{-2}$ , 37,5  $\text{mA cm}^{-2}$ , dan 50  $\text{mA cm}^{-2}$  dengan perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ , nilai total nitrogen mengalami penurunan selama 8 jam proses



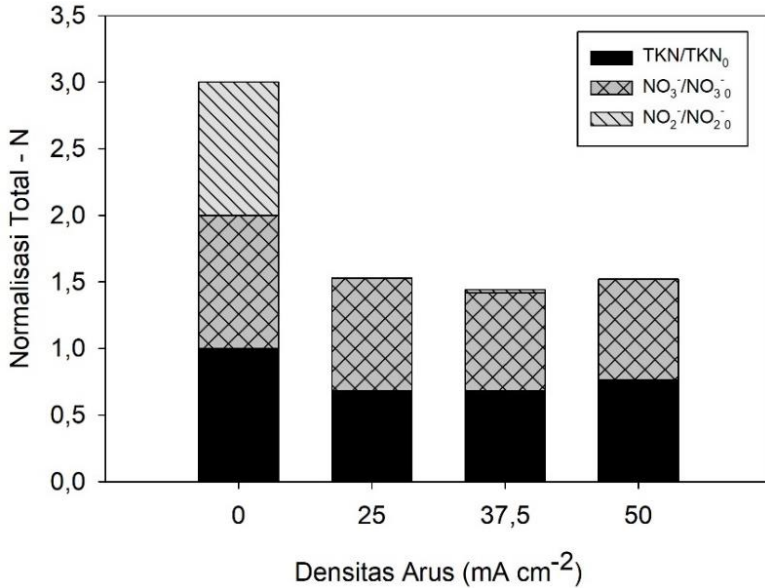
elektrooksidasi. Penyisihan nilai total nitrogen pada densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA adalah 1,23 g (41%), 1,257 g (42%), dan 1,228 g (41%). Penyisihan nilai total nitrogen pada seluruh variasi densitas arus mengalami penurunan nilai nitrogen yang relatif sama. Pada Gambar 4.13, nilai TKN, nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), dan nitrit (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) mengalami penurunan yang relatif sama, selama 8 jam proses oksidasi elektrokimia.



Gambar 4.14 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:4 dengan Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup>

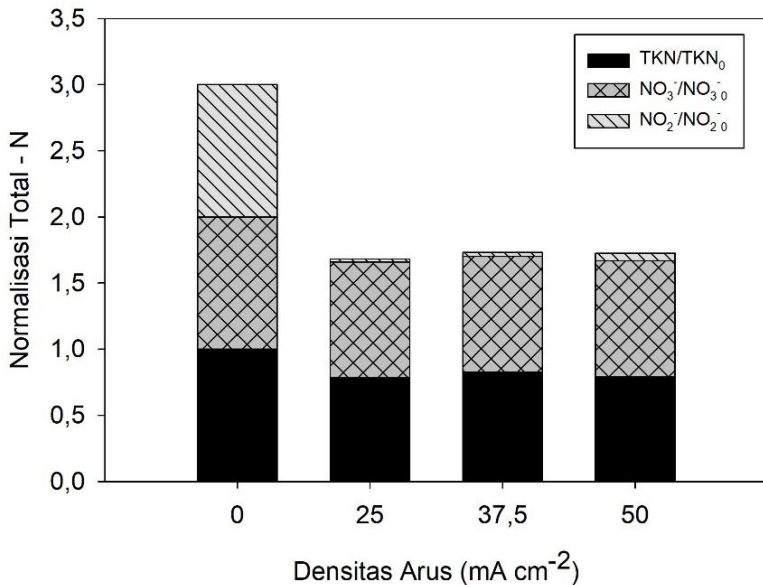
Pada variasi densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup> dengan perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:4, nilai total nitrogen mengalami penurunan selama 8 jam proses elektrooksidasi. Penyisihan nilai total nitrogen pada densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA adalah 1,422 g (47%), 1,263 g (42%), dan 0,944 g (31%). Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai densitas arus yang digunakan, semakin rendah tingkat penyisihan yang dihasilkan. Penyisihan tertinggi terdapat pada variasi densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>. Pada Gambar

4.14, nilai TKN, nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), dan nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) mengalami penurunan yang relatif sama, selama 8 jam proses oksidasi elektrokimia.



Gambar 4.15 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:8 dengan Densitas Arus 25  $\text{mA cm}^{-2}$ , 37,5  $\text{mA cm}^{-2}$ , dan 50  $\text{mA cm}^{-2}$

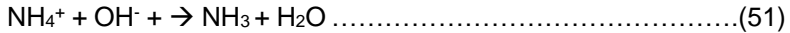
Pada variasi densitas arus 25  $\text{mA cm}^{-2}$ , 37,5  $\text{mA cm}^{-2}$ , dan 50  $\text{mA cm}^{-2}$  dengan perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ , nilai total nitrogen mengalami penurunan selama 8 jam proses elektrooksidasi. Penyisihan nilai total nitrogen pada densitas arus 25  $\text{mA cm}^{-2}$ , 37,5  $\text{mA cm}^{-2}$ , dan 50  $\text{mA cm}^{-2}$  adalah 1,47 g (49%), 1,561 g (52%), dan 1,481 g (49%). Penyisihan nilai total nitrogen pada variasi densitas arus 37,5  $\text{mA cm}^{-2}$  lebih besar dibandingkan dengan densitas arus 25  $\text{mA cm}^{-2}$  dan 50  $\text{mA cm}^{-2}$ . Namun, penurunan nilai total nitrogen pada seluruh variasi relatif mengalami penurunan yang sama. Pada Gambar 4.15, nilai TKN, nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), dan nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) mengalami penurunan yang relatif sama, selama 8 jam proses oksidasi elektrokimia.



Gambar 4.16 Nilai Total-N pada Perbandingan 1:10 dengan Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup>

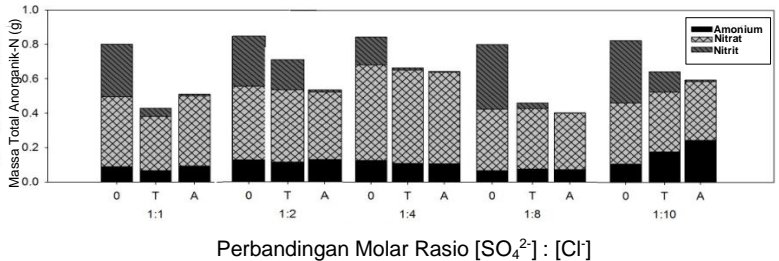
Pada variasi densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup> dengan perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10, nilai total nitrogen mengalami penurunan selama 8 jam proses elektrooksidasi. Penyisihan nilai total nitrogen pada densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup> adalah 1,318 g (44%), 1,269 g (42%), dan 1,276 g (43%). Pada seluruh variasi densitas arus listrik dengan perbandingan molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10, relatif mengalami penurunan pada seluruh variasi.

Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa massa penyisihan total nitrogen tertinggi terdapat pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1 dengan densitas arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup> yaitu sebesar 1,771 g (59%). Pada variasi tersebut kandungan pH pada lindi sangat basa yaitu mencapai 11. Sejalan dengan penelitian Chu *et al.* (2008), penyisihan ammonia dapat meningkat pada kondisi basa, sehingga gas ammonia akan terbentuk seperti pada (persamaan 48).

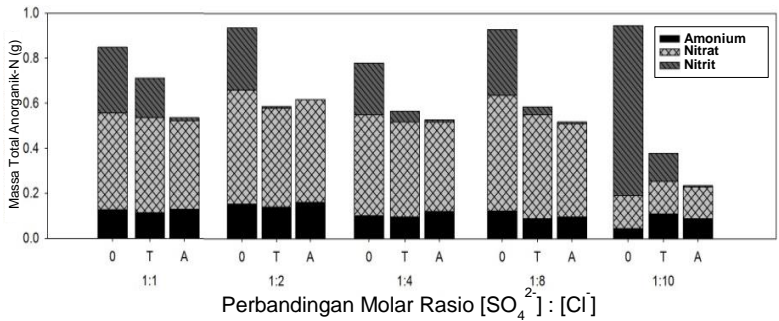


#### 4.2.1.4 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ dan $\text{NO}_2^-$

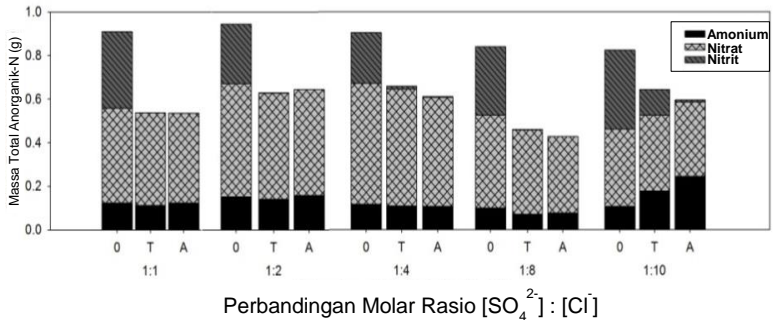
Pada penelitian ini, dekomposisi ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) menjadi organik-N dan laju evolusi nitrogen pada anoda BDD akan dibandingkan dengan variasi yang ditetapkan. Data massa total anorganik-N meliputi  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  terdapat pada Lampiran C Tabel LC.22 hingga LC.24.



Gambar 4.17 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  pada Arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$



Gambar 4.18 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  pada Arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$



Gambar 4.19 Massa Total Anorganik Nitrogen sebagai  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  pada Arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$

Berdasarkan Gambar 4.12 hingga 4.14 dapat dilihat bahwa penghilangan nitrit dan pembentukan nitrat terjadi secara bersamaan. Massa amonium pada perbandingan 1:1 hingga 1:8 relatif tetap sedangkan pada 1:10 mengalami kenaikan. Pada nitrat, massa yang dihasilkan cenderung relatif mengalami penurunan sangat sedikit. Sedangkan pada nitrit, massa nitrit mengalami penurunan yang sangat signifikan hingga mendekati angka 0.

Pada kondisi densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$  dengan perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8$  dan  $1:10$  menunjukkan hingga 8 jam operasi reaktor penyisihan total anorganik nitrogen berturut-turut sebesar  $0,291 \text{ g}$  (36%),  $0,313 \text{ g}$  (37%),  $0,160$  (24%),  $0,476 \text{ g}$  (50%), dan  $0,057$  (28%). Pada variasi 1:8 total organik nitrogen mengalami penurunan yang paling tinggi dengan kandungan  $\text{Cl}^-$  yang cukup tinggi. Dalam proses elektrooksidasi penyisihan ammonium terjadi karena adanya klorin aktif yang juga akan menghasilkan gas nitrogen, sedangkan radikal hidroksil dapat meningkatkan pembentukan nitrat (Li *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 2012). Tingginya  $\text{Cl}^-$  yang terkandung dalam lindi cenderung menghilangkan nitrogen dibandingkan dengan  $\text{SO}_4^{2-}$ . Pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) relatif tetap, namun pada perbandingan 1:10 terjadi kenaikan. Hal tersebut terjadi karena berubahnya organik-N menjadi ammonium

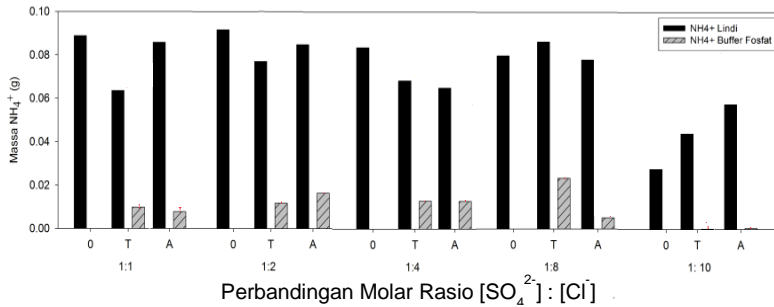
( $\text{NH}_4^+$ ), namun di salah satu sisi juga berubah menjadi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) dan nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ). Adapun massa nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) mengalami penurunan yang cukup rendah, namun pada perbandingan 1:1 mengalami kenaikan pada jam ke-4 menuju jam ke-8 dan perbandingan 1:10 mengalami kenaikan pada dan jam ke-0 menuju jam ke-8. Penurunan massa nitrat dimungkinkan terjadi karena mengalami proses elektrodialisis yaitu berpindahannya nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) menuju ke tengah (larutan buffer fosfat) dalam jumlah yang sedikit. Terbentuknya nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) dimungkinkan karena adanya oksidasi oleh nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ). Sedangkan massa nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) relatif mengalami penurunan yang cukup tinggi pada seluruh variasi. Hal tersebut terjadi karena nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) teroksidasi menjadi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Selain itu, hilangnya nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dapat terjadi karena tergesernya senyawa nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) dari kompartemen lindi menuju kompartemen buffer fosfat.

Pada densitas arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$  penyisihan total anorganik nitrogen berturut-turut sebesar  $0,427 \text{ g}$  (44%),  $0,255 \text{ g}$  (34%),  $0,252 \text{ g}$  (32%),  $0,329 \text{ g}$  (44%), dan  $0,427 \text{ g}$  (75%). Sedangkan pada densitas arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  berturut-turut sebesar  $0,373 \text{ g}$  (41%),  $0,241 \text{ g}$  (32%),  $0,235 \text{ g}$  (32%), dan  $0,413 \text{ g}$  (32%). Pada Gambar 4.11 massa total anorganik nitrogen cenderung mengalami penurunan pada seluruh variasi. Pada variasi 1:2 terjadi peningkatan massa total nitrogen cukup kecil pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Hal tersebut dapat terjadi karena sedikitnya  $\text{Cl}^-$  yang terkandung dalam lindi sehingga oksidasi ammonium tidak cenderung turun. Secara umum, gas nitrogen dan nitrat adalah produk utama dari oksidasi amonium selama proses elektrooksidasi (Pérez *et al.*, 2012). Selain itu, tingkat penyisihan oleh reaksi radikal hidroksil lebih lambat dalam menyisihkan ammonium dibandingkan dalam menyisihkan COD (Fernandes *et al.*, 2016).

#### **4.2.1.5 Penyisihan Massa Ammonium pada Lindi dan Buffer Fosfat**

Data hasil analisis ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, \text{ dan } 1:10$  dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}, 37,5 \text{ mA cm}^{-2}, \text{ dan } 50 \text{ mA cm}^{-2}$  tertera pada Lampiran C Tabel LC.25 –Tabel LC.27. Grafik 4.17 hingga 4.19

berikut menunjukkan penyisihan massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ ,  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ , dan  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ .



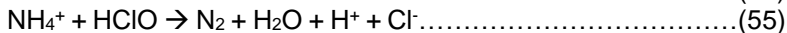
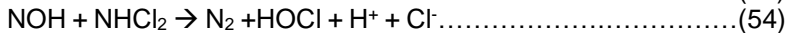
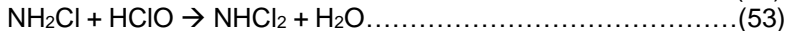
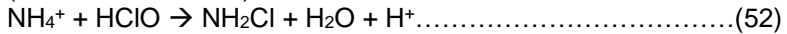
Gambar 4.20 Penyisihan Massa Amonium dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$

Pada proses elektrooksidasi dengan variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{Cl}^-]= 1:1$  dan  $1:2$ , massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) menurun pada jam ke-0 menuju jam ke-4, kemudian meningkat pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Sedangkan pada variasi  $1:4$ , massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) mengalami penurunan selama 8 jam waktu operasi. Pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{Cl}^-]= 1:8$ , massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) meningkat pada 4 jam pertama, kemudian mengalami penurunan pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Pada variasi  $1:10$ , massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) mengalami peningkatan selama 8 jam waktu operasi. Penyisihan ammonium lindi setelah 8 jam beroperasi pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{Cl}^-]= 1:1, 1:2, 1:4, \text{ dan } 1:8$  dengan densitas arus listrik  $25 \text{ mA cm}^{-2}$  yaitu sebesar  $0,003 \text{ g (3\%)}$ ,  $0,010 \text{ g (7\%)}$ ,  $0,022 \text{ g (22\%)}$ , dan  $0,002 \text{ g (2\%)}$ . Namun pada variasi  $1:10$  ammonium lindi mengalami kenaikan sebesar  $0,029 \text{ g}$ . Kenaikan massa ammonium dimungkinkan terjadi karena organik-N teroksidasi menjadi senyawa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).

Penyisihan massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) lindi berkaitan erat dengan adanya proses elektrooksidasi dan elektrodialisis. Adanya proses elektrodialisis selama 8 jam waktu operasi ditandai dengan massa ammonium lindi yang tertangkap pada kompartemen yang berisi

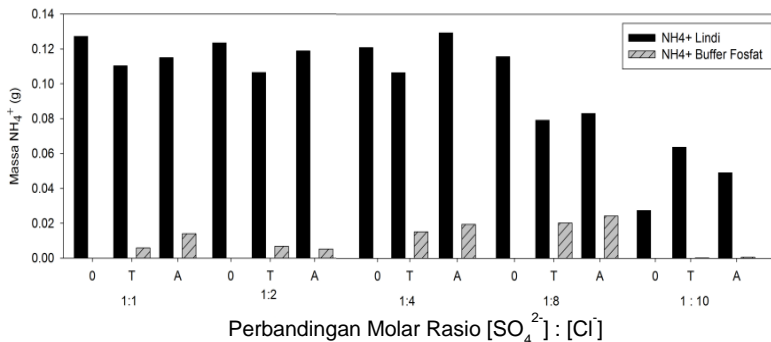
buffer fosfat. Pada Gambar 4.17 terlihat bahwa pada kompartemen buffer fosfat terdapat massa ammonium dalam jumlah kecil. Massa ammonium buffer fosfat pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, \text{ dan } 1:10$  mengalami peningkatan sebesar 0,008 g, 0,023 g, 0,015 g, 0,005 g, dan 0,0003 g.

Proses elektrooksidasi dalam penyisihan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) sangat bergantung pada peranan oksidasi langsung oleh klorin ( $\text{Cl}^-$ ) dan hipklorit ( $\text{OCl}^-$ ) (Anglada *et al.*, 2011). Sedangkan peranan oksidasi tidak langsung dalam menyisihkan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) bergantung pada klor aktif (Mandal *et al.*, 2017). Proses penyisihan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) oleh hipoklorit terjadi melalui reaksi 48-51 (Mandal *et al.*, 2017).



Pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, \text{ dan } 1:10$  dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ , penyisihan massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) tertinggi terdapat pada perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ . Pada perbandingan tersebut, diketahui bahwa kandungan  $\text{Cl}^-$  pada lindi lebih tinggi dibandingkan dengan variasi 1:1, 1:2, dan 1:4, sedangkan kandungan  $\text{SO}_4^{2-}$  paling rendah dibandingkan variasi 1:1, 1:2, dan 1:4. Pada perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  sebagai kontrol, diketahui bahwa nilai  $\text{Cl}^-$  yang terkandung paling tinggi dan tidak ada penambahan  $\text{SO}_4^{2-}$  namun proses oksidasi elektrokimia sangat kecil. Hal tersebut dimungkinkan terjadi karena berubahnya nitrogen menjadi bentuk lain berupa ammonium.





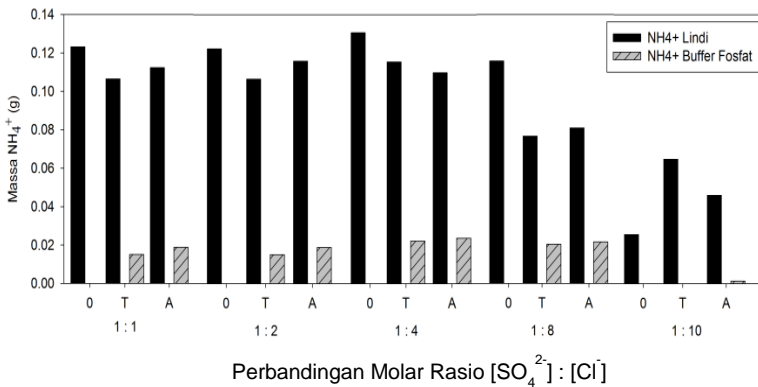
Gambar 4.21 Penyisihan Massa Amonium dengan densitas arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup>

Pada proses elektrooksidasi dengan variasi perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1, 1:2, 1:4, dan 1:8, massa amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) menurun pada 4 jam pertama, kemudian meningkat pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Sedangkan pada variasi 1:10, massa amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) meningkat pada 4 jam pertama, kemudian menurun pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Penyisihan amonium lindi setelah 8 jam beroperasi pada variasi perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1, 1:2, dan 1:8 dengan densitas arus listrik 37,5 mA cm<sup>-2</sup> yaitu sebesar 0,012 g (10%), 0,005 g (4%), dan 0,028 g (28%). Pada variasi 1:4 dan 1:10, penyisihan massa amonium meningkat pada jam awal menuju akhir yaitu sebesar 0,007 g dan 0,022 g. Kenaikan massa amonium dimungkinkan terjadi karena organik-N teroksidasi menjadi senyawa amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Fluktuasi massa amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) dapat terjadi karena berubahnya amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) menjadi bentuk senyawa lain selama 8 jam waktu operasi berlangsung, sehingga tidak terukur pada saat dilakukan uji amonium (Agustina, 2018).

Penyisihan massa amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) lindi juga berkaitan erat dengan adanya proses elektrodialisis. Adanya proses elektrodialisis selama 8 jam waktu operasi ditandai dengan massa amonium lindi yang tertangkap pada kompartemen yang berisi buffer fosfat. Pada Gambar 4.18 terlihat bahwa pada kompartemen buffer fosfat selama 8 jam waktu operasi mengalami peningkatan

massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Pada massa ammonium buffer fosfat variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8,$  dan  $1:10$  mengalami peningkatan sebesar  $0,014 \text{ g}, 0,005 \text{ g}, 0,017 \text{ g}, 0,021 \text{ g},$  dan  $0,00061 \text{ g}.$

Pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8,$  dan  $1:10$  dengan densitas arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ , penyisihan massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) tertinggi terdapat pada perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8.$  Hal tersebut terjadi karena adanya proses elektrodialisis yang di tandai dengan berpindahnya massa ammonium lindi menuju kompartemen buffer fosfat. Pada Tabel LC.27 dapat dilihat bahwa massa ammonium buffer fosfat tertinggi berada pada variasi  $1:8.$  Berdasarkan Mandal *et al.* (2017) penyisihan ammonium sangat bergantung pada klorin dan hipoklorit yang terbentuk selama proses elektrooksidasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa penyisihan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pada variasi penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  yang tinggi menghasilkan penyisihan ammonium yang lebih kecil.



Gambar 4.22 Penyisihan Massa Amonium dengan densitas arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$

Pada proses elektrooksidasi dengan variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2,$  dan  $1:8,$  massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) menurun pada 4 jam pertama, kemudian meningkat pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Pada variasi  $1:4,$  massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) mengalami

penurunan selama 8 jam waktu operasi. Sedangkan pada variasi 1:10, massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) meningkat pada 4 jam pertama, kemudian menurun pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Penyisihan ammonium lindi setelah 8 jam beroperasi pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, \text{ dan } 1:8$  dengan densitas arus listrik  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  yaitu sebesar 0,011 g (9%), 0,006 g (5%), 0,015 g (16%), dan 0,030 g (30%). Pada variasi 1:10, penyisihan massa ammonium meningkat pada jam awal menuju akhir yaitu sebesar 0,062 g.

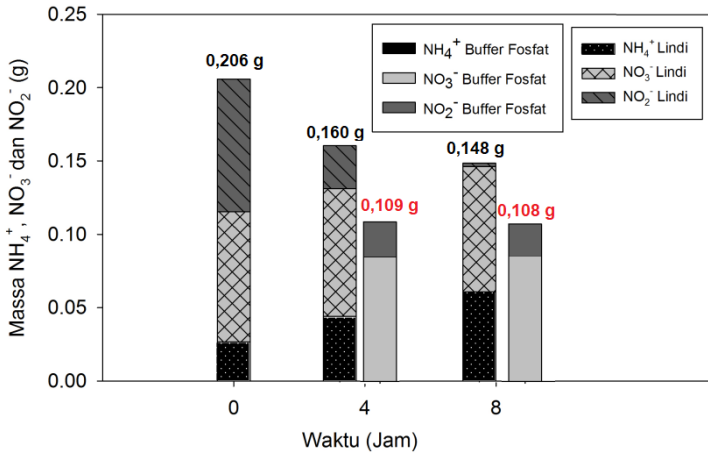
Pada proses penyisihan ammonium terdapat dua proses penyisihan  $\text{NH}_4^+$  yaitu proses elektooksidasi dan elektrodialisis. Pada proses elektooksidasi,  $\text{NH}_4^+$  teroksidasi menjadi bentuk senyawa lain berupa  $\text{NO}_3^-$  dan  $\text{NO}_2^-$ . Sedangkan pada proses elektrodialisis, sebagian  $\text{NH}_4^+$  berpindah menuju ke tengah (larutan berisi buffer fosfat) melalui membran CEM. Pada Gambar 4.19 terlihat bahwa pada kompartemen buffer fosfat selama 8 jam waktu operasi mengalami peningkatan massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Pada massa ammonium buffer fosfat variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, \text{ dan } 1:10$  mengalami peningkatan sebesar 0,019 g, 0,019 g, 0,017 g, 0,019 g, dan 0,0007 g. Di sisi lain, ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pada lindi juga mengalami kenaikan, hal tersebut dapat terjadi karena dihasilkan dari oksidasi organik-N membentuk  $\text{NH}_4^+$ . Maka dengan adanya kandungan  $\text{Cl}^-$  yang tinggi pada lindi, cenderung mengoksidasi  $\text{NH}_4^+$  lebih cepat, sehingga  $\text{NH}_4^+$  lebih cepat hilang.

Pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1, 1:2, 1:4, 1:8, \text{ dan } 1:10$  dengan densitas arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ , penyisihan massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) tertinggi terdapat pada perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ . Disamping itu, densitas arus yang baik dalam penyisihan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) yaitu terdapat pada densitas arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  sebesar 0,030 g (30%). Berdasarkan Anglada *et al.* (2009) semakin tinggi densitas arus yang digunakan, penyisihan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) juga semakin tinggi karena evolusi klorin atau hipoklorit yang dihasilkan juga lebih besar. Keberadaan sulfat dapat menghambat pembentukan klor / hipoklorit yang dapat menyisihkan ammonium. Selain itu, sulfat berkompetisi dengan ion  $\text{Cl}^-$  untuk membentuk *active species* dan adsorpsi pada ion sulfat

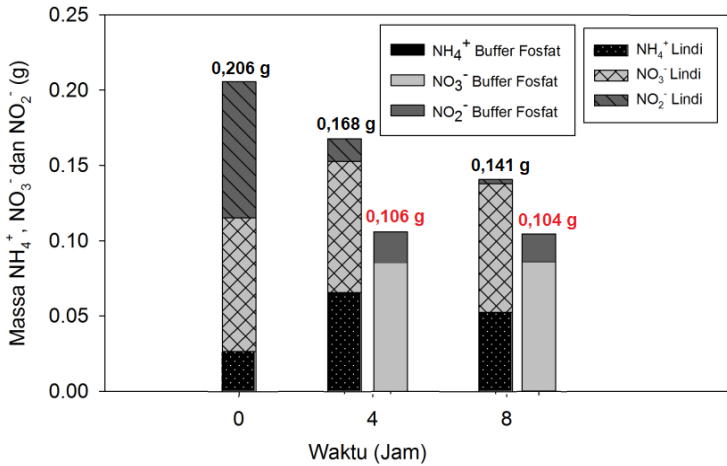
lebih cepat sehingga menghambat pembentukan klorin / hipoklorit (Bagastyo et al., 2012). Meskipun  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebagai elektrolit belum mampu bekerja dengan baik, namun mampu menyisihkan polutan organik lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan elektrolit lainnya (Silveira et al., 2014).

#### 4.2.1.6 Keseimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat

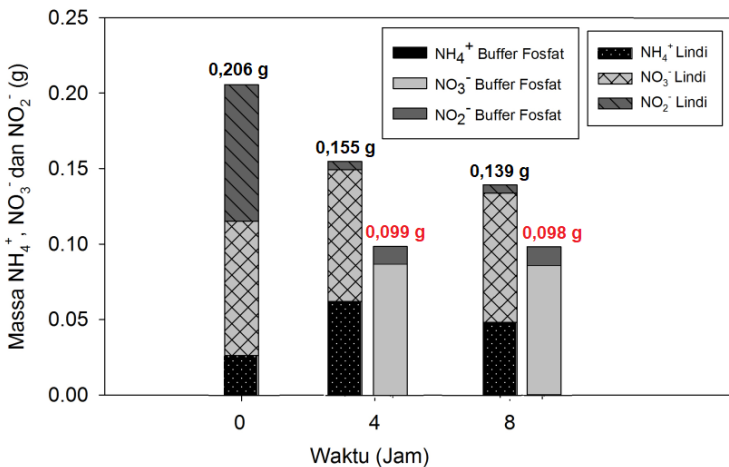
Grafik keseimbangan massa penyisihan amonium, nitrat, nitrit pada lindi dan buffer fosfat pada variasi  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  dan densitas arus litrik ( $25 \text{ mA cm}^{-2}$ ,  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ , dan  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ ) tertera pada table LC.28 hingga LC.30. Pada perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  merupakan reaktor kontrol yang tidak menggunakan penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Grafik keseimbangan massa penyisihan amonium, nitrat, nitrit dengan densitas arus  $25 \text{ mA/cm}^{-2}$ ,  $37,5 \text{ mA/cm}^{-2}$ , dan  $50 \text{ mA/cm}^{-2}$  pada lindi dapat dilihat pada Gambar 4.21 hingga Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Keseimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat  $25 \text{ mA/cm}^{-2}$  dengan Perbandingan  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$



Gambar 4.24 Kestimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat  $37,5 \text{ mA/cm}^2$  dengan Perbandingan  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$



Gambar 4.25 Kestimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat  $50 \text{ mA/cm}^2$  dengan Perbandingan  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$

Pada Gambar 4.21 hingga Gambar 4.23 dapat dilihat bahwa penurunan massa penyisihan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), dan nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) tertinggi dicapai oleh densitas arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  yaitu sebesar  $0,139 \text{ g}$ . Berdasarkan An Anglada *et al.* (2009) semakin tinggi kuat arus yang digunakan maka penghilangan nitrogen juga akan semakin tinggi. Selain itu, tingginya kandungan  $\text{Cl}^-$  pada lindi dapat menyisihkan kandungan nitrogen yang tinggi pula. Pada perbandingan 1:10 dengan seluruh variasi densitas arus memiliki penyisihan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), dan nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) yang relatif sama. Massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pada lindi dengan variasi densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$  cenderung mengalami kenaikan pada jam ke-0 menuju jam ke-8. Sedangkan pada variasi densitas arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$  dan  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  cenderung mengalami kenaikan pada jam ke-0 menuju jam ke-4 lalu mengalami penurunan pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Terbentuknya ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dimungkinkan terjadi karena organik-N teroksidasi menjadi ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Sedangkan hilangnya massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) kemungkinan disebabkan adanya senyawa  $\text{Cl}^-$  yang mengoksidasi ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Adapun ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dapat teroksidasi menjadi bentuk lain berupa organik-N. Selain mengalami proses elektrooksidasi, ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) juga dapat mengalami proses elektrodialisis yang di tandai dengan berpindahannya massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pada kompartemen lindi menuju kompartemen buffer fosfat dalam jumlah sangat kecil.

Massa nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) pada lindi dengan variasi densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$  cenderung mengalami kenaikan pada jam ke-0 menuju jam ke-8. Pada variasi densitas arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$  dan  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  cenderung mengalami kenaikan pada jam ke-0 menuju jam ke-4 lalu mengalami penurunan pada jam ke-4 menuju jam ke-8. Terbentuknya nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) disebabkan oleh oksidasi oleh nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) menjadi nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ).

Pada Grafik di atas dapat dilihat bahwa, massa amonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pada kompartemen lindi mengalami kenaikan yang cukup tinggi pada jam ke-0 menuju jam ke-4, sedangkan massa nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) yang dihasilkan cenderung sama dan masa nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) yang dihasilkan mengalami penurunan yang cukup tajam. Namun pada kompartemen berisi buffer fosfat, massa ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) yang

terkandung sangat kecil sedangkan massa yang paling tinggi adalah massa nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Hal tersebut dapat dimungkinkan terjadi karena nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) yang terkandung dalam lindi berubah menjadi bentuk lain berupa nitrat. Sedangkan pada nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) tidak mengalami perubahan massa namun berpindah pada kompartemen berisi buffer fosfat. Massa nitrat pada lindi cenderung hampir sama karena dimungkinkan ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dan nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) berubah menjadi bentuk lain berupa nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Secara umum, gas nitrogen dan nitrat adalah produk utama dari oksidasi amonium selama proses elektrooksidasi (Pérez *et al.*, 2012).

### 4.3 Kebutuhan Energi Spesifik Proses Elektrooksidasi

Kebutuhan energi spesifik dievaluasi berdasarkan kelayakan dari proses elektrokimia. Perhitungan konsumsi energi spesifik proses yang dilakukan untuk parameter COD dan total nitrogen dengan membandingkan antara massa yang tersisihkan dengan muatan listrik spesifik. Konsumsi energi spesifik pada parameter COD dan Total-N sebagai TKN,  $\text{NO}_3^-$  dan  $\text{NO}_2^-$  dengan membandingkan antara massa yang tersisihkan dengan muatan listrik spesifik. Konsumsi energi spesifik pada parameter COD dan Total-N sebagai TKN,  $\text{NO}_3^-$  dan  $\text{NO}_2^-$  dapat dilihat pada Tabel 4.4 hingga Tabel 4.6.

Tabel 4.4 Kebutuhan Energi Spesifik Parameter COD

Variasi		Muatan Listrik Spesifik (kWh/L)	%R COD	Massa tersisihkan (g)	Kebutuhan energi spesifik (kWh/g)
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$	Densitas Arus Listrik ( $\text{mA cm}^{-2}$ )				
1:1	25	0,01369	84%	2,350	0,00582
1:2		0,00907	81%	1,330	0,00682
1:4		0,00834	78%	1,440	0,00579
1:8		0,00916	72%	1,080	0,00848
1:10		0,01342	60%	2,230	0,00602
1:1	37,5	0,01319	93%	2,320	0,00569
1:2		0,01768	93%	2,4	0,00737
1:4		0,01741	93%	2,2	0,00791

Variasi		Muatan Listrik Spesifik (kWh/L)	%R COD	Massa tersisihkan (g)	Kebutuhan energi spesifik (kWh/g)
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]	Densitas Arus Listrik (mA cm <sup>-2</sup> )				
1:8	50	0,01822	74%	1,32	0,01380
1:10		0,01940	56%	2,06	0,00942
1:1		0,01813	93%	1,92	0,00944
1:2		0,02520	92%	1,73	0,01457
1:4		0,03137	96%	1,42	0,02209
1:8		0,03245	83%	1,97	0,01647
1:10		0,01867	60%	2,24	0,00834

Berdasarkan Tabel 4.4, semakin tinggi densitas arus listrik yang digunakan maka kebutuhan energi spesifik (kWh/g) yang digunakan juga akan semakin tinggi. Penyisihan massa COD terbesar pada variasi densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup> terjadi pada perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>]= 1:1, yaitu sebesar 2,350 g (0,00582 kWh/g), lalu diikuti oleh perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>]= 1:10 yaitu sebesar 2,23 g (0,00602 kWh/g). Kemudian disusul oleh variasi perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>]= 1:2, 1:4, dan 1:8 yang tertera pada Tabel 4.4.

Pada variasi densitas arus listrik 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, penyisihan COD tertinggi terdapat pada molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:2, yaitu sebesar 2,4 g (0,00737 kWh/g). Kemudian penyisihan COD tertinggi disusul oleh variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1 yaitu sebesar 2,32 g (0,00569 kWh/g) dimana kebutuhan arus yang dibutuhkan selama proses elektrokimia adalah yang paling kecil dibandingkan variasi lainnya. Sedangkan pada variasi densitas arus listrik 50 mA cm<sup>-2</sup>, penyisihan COD tertinggi terdapat pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10, yaitu sebesar 2,24 g (0,00834 kWh/g).



Tabel 4.5 Kebutuhan Energi Spesifik Parameter Total-N

Variasi		Muatan Listrik Spesifik (kWh/L)	%R (Total-N)	Massa tersisi-hkan (g)	Kebutuhan energi spesifik (kWh/g)
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]	Densitas Arus Listrik (mA cm <sup>-2</sup> )				
1:1	25	0,0137	37%	1,110	0,0123
1:2		0,0091	41%	1,232	0,0074
1:4		0,0083	47%	1,422	0,0059
1:8		0,0092	49%	1,470	0,0062
1:10		0,0134	44%	1,318	0,0102
1:1	37,5	0,0132	59%	1,771	0,0074
1:2		0,0177	42%	1,257	0,0141
1:4		0,0174	42%	1,263	0,0138
1:8		0,0182	52%	1,561	0,0117
1:10		0,0194	42%	1,269	0,0153
1:1	50	0,0181	42%	1,318	0,0138
1:2		0,0252	44%	1,228	0,0205
1:4		0,0314	41%	0,944	0,0332
1:8		0,0325	49%	1,481	0,0219
1:10		0,0187	43%	1,276	0,0146

Berdasarkan Tabel 4.3, penyisihan massa total nitrogen terbesar terjadi pada molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] = 1:1 dengan densitas arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup> yaitu sebesar 1,771 g (0,0074 kWh/g). Kemudian diikuti oleh molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] = 1:8 pada densitas arus 50 mA cm<sup>-2</sup>. Berdasarkan Anglada *et al.* (2009), semakin tinggi densitas arus yang digunakan, penyisihan ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) juga semakin tinggi karena evolusi klorin atau hipoklorit yang dihasilkan juga lebih besar. Secara keseluruhan pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1 pada densitas arus listrik 37,5 mA cm<sup>-2</sup> mampu meningkatkan penyisihan pada semua parameter serta mampu menurunkan kebutuhan energi spesifik yang tinggi.

Berdasarkan perhitungan kebutuhan energi spesifik yang dihasilkan, dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan variasi optimum dalam menurunkan polutan organik dan total-N. Pertimbangan pemilihan variasi optimum juga mempertimbangkan jumlah bahan kimia yang ditambahkan, maka dipilih variasi optimum pada perbandingan molar [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:4 dengan

densitas arus listrik  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ . Pada variasi tersebut kebutuhan energi yang dibutuhkan cukup kecil dibandingkan variasi lainnya yaitu sebesar  $0,00579 \text{ kWh/g}$  untuk COD, sedangkan total-N sebesar  $0,0059 \text{ kWh/g}$ .

#### 4.4 Proses Oksidasi Elektrokimia Sebagai *Post-Treatment* dalam Pemenuhan Baku Mutu Lindi

Pada TPA Ngipik Gresik, Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) yang digunakan adalah ABR (*Anaerobic Bioreactor*). Namun, pengolahan ABR tersebut tidak berjalan secara optimum sehingga lindi terakumulasi. Efluen lindi pada pengolahan ABR mengandung konsentrasi COD sebesar  $17000 \text{ mg/L}$ . Kandungan COD yang tinggi menyebabkan pencemaran pada badan air, sehingga dapat mengganggu ekosistem air serta kesehatan manusia. Ambang batas kualitas olahan lindi yang diperkenankan dibuang menuju badan air penerima telah diatur dalam peraturan di Indonesia. Kualitas hasil olahan lindi yang diharapkan menurut peraturan yang berlaku di Indonesia sebagai berikut:

Tabel 4.6 Baku Mutu Lindi di Indonesia

Komponen	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6-9	-
BOD	150	mg/L
COD	300	mg/L
TSS	100	mg/L
Total N	60	mg/L

Sumber: PERMENLHK Nomor 59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016

Oksidasi elektrokimia dengan menggunakan anoda *Boron Doped Diamond* (BDD) diharapkan mampu dalam menurunkan polutan organik serta nitrogen pada lindi, sehingga air lindi yang akan dibuang ke alam bebas diharapkan tidak mencemari lingkungan. Hasil analisis untuk parameter COD, Total-N, dan  $\text{BOD}_5$  sebagai parameter dalam pemenuhan baku mutu, sebagai berikut:

##### 1) Baku Mutu Parameter COD

Tingginya konsentrasi COD pada badan air dapat menyebabkan kandungan oksigen terlarut dalam air menjadi

rendah, hal tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem air (Rahmawati *et al.*, 2013). Tabel 4.7 merupakan penurunan konsentrasi COD pada densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>.

Tabel 4.7 Penurunan Konsentrasi COD pada Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>]

t (jam)	Ah/L	COD (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	1379,06	814,78	921,92	750,7	1843,36
2	0,21	700,49	736,2	686,2	429,28	1586,21
4	0,42	471,92	600,49	636,2	472,13	1407,64
6	0,65	<b>271,92</b>	571,92	286,2	307,85	1207,64
8	0,89	<b>156,3</b>	<b>171,92</b>	<b>229,06</b>	<b>236,42</b>	993,36
<b>Massa tersisihkan (g)</b>		<b>2,35</b>	<b>1,33</b>	<b>1,44</b>	<b>1,08</b>	<b>2,23</b>
<b>% Removal</b>		<b>84%</b>	<b>81%</b>	<b>78%</b>	<b>72%</b>	<b>60%</b>

Tabel 4.7 menunjukkan penurunan konsentrasi COD pada densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>. Pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1 dan 1:4 pada jam ke-6 telah mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD sebesar 271,92 mg/L dan 286,20 mg/L dan mengalami penurunan pada jam ke-8 hingga mencapai konsentrasi COD sebesar 156,30 mg/L dan 229,06 mg/L. Sedangkan variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:2 dan 1:8 pada jam ke-8 baru mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD sebesar 171,92 mg/L dan 236,42 mg/L. Namun, pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10 belum mampu memenuhi baku mutu hingga waktu akhir operasi, yaitu konsentrasi COD akhir sebesar 993,36 mg/L. Pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10 merupakan variasi kontrol atau lindi asli.

Tabel 4.8 Penurunan Konsentrasi COD pada Densitas Arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>]

t (jam)	Ah/L	COD (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	1235	1278,09	1172,13	879,06	1843,36
2	0,31	600,49	879,2	514,99	536,2	1543,36
4	0,63	371,67	565,29	464,99	500,49	1450,5

t (jam)	Ah/L	COD (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
6	0,97	<b>177,79</b>	364,99	<b>286,42</b>	430,2	1250,5
8	1,33	<b>93,99</b>	<b>100,19</b>	<b>92,02</b>	<b>256,99</b>	936,21
<b>Massa tersisihkan (g)</b>		<b>2,32</b>	<b>2,40</b>	<b>2,20</b>	<b>1,32</b>	<b>2,06</b>
<b>% Removal</b>		<b>93%</b>	<b>93%</b>	<b>93%</b>	<b>74%</b>	<b>56%</b>

Tabel 4.8 menunjukkan penurunan konsentrasi COD pada densitas arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup>. Pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] = 1:1 dan 1:4 pada jam ke-6 telah mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD sebesar 177,79 mg/L dan 286,42 mg/L dan mengalami penurunan pada jam ke-8 hingga mencapai konsentrasi COD sebesar 93,99 mg/L dan 92,02 mg/L. Sedangkan molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:2 dan 1:8 pada jam ke-8 baru mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD sebesar 100,19 mg/L dan 256,99 mg/L. Namun, variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10 belum mampu memenuhi baku mutu hingga waktu akhir operasi, yaitu konsentrasi COD akhir sebesar 936,21 mg/L.

Tabel 4.9 Penurunan Konsentrasi COD pada Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>]

t (jam)	Ah/L	COD (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	1021,67	935,87	736,42	1171,93	1843,36
2	0,41	585,72	804,92	464,99	893	1586,21
4	0,84	<b>285,29</b>	640,63	322,13	789,2	1407,64
6	1,3	<b>184,99</b>	<b>257,49</b>	<b>129,28</b>	496,5	1207,64
8	1,78	<b>75,99</b>	<b>88,99</b>	<b>36,42</b>	<b>221,93</b>	836,21
<b>Massa tersisihkan (g)</b>		<b>1,92</b>	<b>1,73</b>	<b>1,42</b>	<b>1,97</b>	<b>2,24</b>
<b>% Removal</b>		<b>93%</b>	<b>92%</b>	<b>96%</b>	<b>83%</b>	<b>60%</b>

Tabel 4.9 menunjukkan penurunan konsentrasi COD pada densitas arus 50 mA cm<sup>-2</sup>. Pada variasi molar rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]:[Cl<sup>-</sup>] = 1:1 pada jam ke-4 telah mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD sebesar 285,29 mg/L dan terus mengalami

penurunan hingga jam ke-8 dengan konsentrasi akhir COD sebesar 75,99 mg/L. Molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$  dan  $1:4$  pada jam ke-6 telah mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD sebesar 257,49 mg/L dan 129,28 mg/L dan mengalami penurunan pada jam ke-8 hingga mencapai konsentrasi COD sebesar 88,99 mg/L dan 36,42 mg/L. Sedangkan molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$  pada jam ke-8 baru mampu mencapai baku mutu dengan konsentrasi COD sebesar 221,93 mg/L. Namun, pada variasi molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  belum mampu memenuhi baku mutu hingga waktu akhir operasi, yaitu konsentrasi COD akhir sebesar 836,21 mg/L.

## 2) Baku Mutu Parameter Total-N

Pada Tabel 4.10, Tabel 4.11, dan Tabel 4.12 menunjukkan penurunan konsentrasi Total-N pada setiap densitas arus (25 mA  $\text{cm}^{-2}$ , 37,5 mA  $\text{cm}^{-2}$ , dan 50 mA  $\text{cm}^{-2}$ ).

Tabel 4.10 Penurunan Konsentrasi Total-N Pada Densitas Arus 25 mA  $\text{cm}^{-2}$  untuk Setiap Variasi Molar Rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$

Waktu (jam)	Ah/L	Konsentrasi Total-N (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0 (Awal)	0,00	651	655	582	735	857
8 (Akhir)	0,89	<b>537</b>	<b>511</b>	<b>453,23</b>	<b>437</b>	<b>730</b>
<b>Baku Mutu Total-N</b>		<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>

Tabel 4.11 Penurunan Konsentrasi Total-N Pada Densitas Arus 37,5 mA  $\text{cm}^{-2}$  untuk Setiap Variasi Molar Rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-]$

Waktu (jam)	Ah/L	Konsentrasi Total-N (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0 (Awal)	0,00	1190	608	633	617	857
8 (Akhir)	1,33	<b>539</b>	<b>500</b>	<b>511,77</b>	<b>405</b>	<b>770</b>
<b>Baku Mutu Total-N</b>		<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>

Tabel 4.12 Penurunan Konsentrasi Total-N Pada Densitas Arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup> untuk Setiap Variasi Molar Rasio [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>]

Waktu (jam)	Ah/L	Konsentrasi Total-N (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0 (Awal)	0,00	1160	1084	610	1137	857
8 (Akhir)	0,18	<b>929</b>	<b>1006</b>	<b>620</b>	<b>853</b>	<b>738</b>
<b>Baku Mutu Total-N</b>		<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>

Pada seluruh percobaan variasi, konsentrasi total nitrogen pada lindi belum mencapai baku mutu lindi yang ditetapkan yaitu sebesar 60 mg/L. Namun ion Cl<sup>-</sup> pada lindi sangat berperan penting dalam menurunkan nitrogen pada lindi. Berdasarkan Mandal *et al.* (2017) ammonium nitrogen yang terkandung dalam lindi dapat dihilangkan melalui pembentukan klorin (Cl<sup>-</sup>)/hipoklorit (OCl<sup>-</sup>) selama proses elektrooksidasi berlangsung.

### 3) Baku Mutu Parameter BOD<sub>5</sub>

Tabel 4.13 merupakan konsentrasi nilai BOD awal dan akhir pada lindi.

Tabel 4.13 Konsentrasi Nilai BOD Awal dan Akhir Pada Lindi

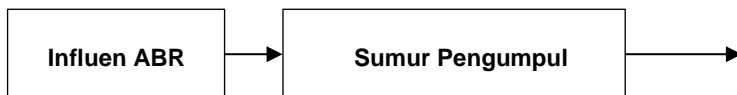
Densitas Arus Listrik (mA cm <sup>-2</sup> )	BOD <sub>5</sub> (mg/L) 1:10	
	0 (awal)	8 (akhir)
25	500	596,15
37,5	500,0	580,00
50	500,0	183,33

Sedangkan pada BOD<sub>5</sub> lindi, pada perbandingan molar rasio 1:10 dengan 3 macam densitas arus listrik (25 mA cm<sup>-2</sup>, 37,5 mA cm<sup>-2</sup>, dan 50 mA cm<sup>-2</sup>) yaitu sebesar 596,154 mg/L, 580 mg/L, dan 183,33 mg/L. Variasi densitas arus listrik yang mendekati baku mutu untuk parameter BOD yaitu 50 mA cm<sup>-2</sup>.

Pada seluruh variasi pengolahan, konsentrasi nitrogen pada akhir proses elektrooksidasi belum memenuhi baku mutu sehingga dapat mencemari badan penerima. Sedangkan, nilai COD akhir proses elektrooksidasi telah memenuhi baku mutu. Nilai TDS pada

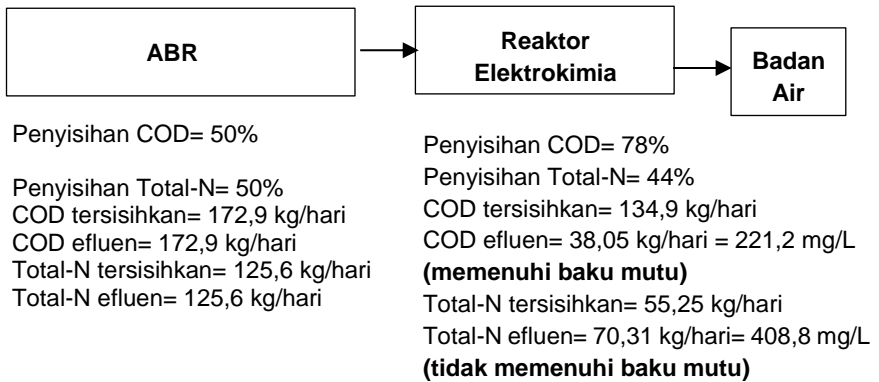
akhir proses elektrooksidasi mengalami penurunan, hal ini terjadi karena adanya membran CEM dan membran AEM. Nilai TDS turun disebabkan oleh ion-ion yang bergerak menuju kompartemen tengah (larutan buffer fosfat). Nilai total-N yang tinggi dapat diturunkan dengan pengolahan biologis yang mampu menurunkan senyawa nitrogen yang cukup tinggi.

Setelah 8 jam proses elektrooksidasi pada setiap parameter, nilai total-N cenderung mengalami penurunan yang cukup rendah. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Retnoningsih dan Murdianti (2010) bahwa semakin lama waktu operasi elektrolisa, konsentrasi  $\text{NH}_3$  akan semakin berkurang. Namun, apabila konsentrasi awal  $\text{NH}_3$  tinggi, maka jumlah  $\text{NH}_3$  yang dihilangkan akan semakin kecil. Hal ini disebabkan karena adanya senyawa intermediet yang menghalangi adsorpsi  $\text{NH}_3$ . Pada Gambar 4.24 merupakan diagram alir proses pengolahan lindi yang menunjukkan nilai awal dan akhir pada COD dan total-N. Debit lindi rata-rata TPA Ngipik Gresik adalah  $172 \text{ m}^3/\text{hari}$  (Agustina, 2018). Pada penelitian ini lindi yang digunakan adalah influen lindi dengan pengenceran dua kali, sehingga debit lindi rata-rata TPA Ngipik Gresik disimulasikan menjadi  $344 \text{ m}^3/\text{hari}$ . Berikut ini merupakan diagram alir proses pengolahan lindi, sebagai berikut:



$Q_{in} = 344.000 \text{ L/hari}$   
 Karakteristik Lindi:  
 COD=  $2011 \text{ mg/L}$   
 Total-N=  $1460 \text{ mg/L}$

$\text{COD}_{in} = 34589200 \text{ mg/hari}$   
 $= 345,892 \text{ kg/hari}$   
 Total-N awal=  $25112000 \text{ mg/hari}$   
 $= 251,12 \text{ kg/hari}$



Gambar 4.26 Diagram Alir Pengolahan Lindi

Pada penelitian ini memiliki keunggulan dalam menurunkan senyawa organik karbon berupa COD. Namun pada penelitian ini tidak mampu menurunkan nitrogen hingga mencapai baku mutu. Pada kondisi eksisting ABR pada TPA Ngipik, Gresik belum mampu dalam menyisihkan nitrogen dalam jumlah yang tinggi, hal tersebut terjadi karena lindi menjadi terakumulasi akibat lumpur yang dihasilkan cukup tinggi. Perlu adanya pengolahan biologis dalam menyisihkan senyawa nitrogen yang cukup tinggi pada lindi. Pengolahan biologis yang mampu menurunkan senyawa nitrogen pada lindi menggunakan proses biofilter anaerob-aerob dengan denitrifikasi dan *Moving Bed Biofilm Bioreactor* (MBBR). Berdasarkan penelitian Said dan Hartaja (2015), pengolahan lindi dengan menggunakan proses biofilter anaerob-aerob dan denitrifikasi mampu menyisihkan ammonia dan nitrat sebesar 97,56% dan 86,4%. Selain itu dalam penelitian oleh Imania (2018), proses biologis sebagai *pre-treatment* dengan menggunakan MBBR+ozon mampu menurunkan zat organik dan nitrogen dalam lindi dengan nilai penyisihan masing-masing 53,85% untuk COD, 52, 10% untuk ammonium-nitrogen, dan 5,51% untuk nitrat-nitrogen.

Dalam penelitian Miao *et al.* (2019), juga mengolah lindi menggunakan sistem *Sequencing Batch Reactor* (SBR), dengan menggunakan modifikasi anaerobik-aerobik-anoxic untuk



mengolah lindi berusia muda dapat menyisihkan Total-N sebesar 98,3% dan 89,8% untuk COD. Secara keseluruhan aplikasi lapangan yang dapat digunakan adalah dengan variasi molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{Cl}^-] = 1:1$  pada densitas arus listrik  $25 \text{ mA cm}^{-2}$  dan  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ . Hal tersebut dengan mempertimbangkan penggunaan kebutuhan energi spesifik yang paling kecil dalam menyisihkan nilai COD dan total nitrogen pada lindi. Selain itu, juga mempertimbangkan penyisihan massa COD dan total nitrogen yang tinggi pula. Namun penggunaan bahan kimia berupa  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  cukup tinggi. Alternatif lain dalam aplikasi lapangan yaitu tanpa penambahan bahan kimia, sehingga terpilih rasio molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{Cl}^-] = 1:10$ . Pemilihan densitas arus listrik juga mempertimbangkan kebutuhan energi yang paling kecil serta penyisihan massa COD dan total nitrogen yang tinggi. Pada Tabel 4.5, didapatkan penyisihan massa COD terbesar pada variasi densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ . Sedangkan pada Tabel 4.6, penyisihan total nitrogen terbesar juga terdapat pada densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ .

#### **4.5 Perubahan Nilai Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dan Klorida ( $\text{Cl}^-$ ) pada Lindi**

Sulfat merupakan salah satu ion dari sekian banyak anion-anion utama yang terdapat di dalam perairan alam. Hal ini menjadi sangat penting dalam persediaan air publik, karena jika kandungan sulfat dalam perairan dalam konsentrasi yang tinggi maka akan menyebabkan gangguan pada manusia yang mengkonsumsinya. (Sawyer, 1978). Sedangkan klorin dalam bentuk produk kimia buatan menimbulkan dampak terhadap lingkungan, seperti penipisan lapisan ozon dan pemanasan global. Selain berdampak pada kesehatan, senyawa klorin juga menimbulkan dampak terhadap lingkungan, baik berupa produk maupun limbah yang dihasilkan (Hasan, 2006).

Pada penelitian ini menggunakan penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , penambahan tersebut memiliki dampak positif dan negatif. Dampak positif dari penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  adalah dapat menyisihkan senyawa polutan organik cukup tinggi. Sedangkan dampak negatif dari penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  adalah menyebabkan korosi, berbau, bersifat toksik, dan mengganggu kesehatan

apabila terdapat pada badan air. Selain itu, lindi juga mengandung ion-ion berupa klorida ( $\text{Cl}^-$ ). Pada Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 merupakan kandungan awal dan akhir pada ion Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dan Klorida ( $\text{Cl}^-$ ).

Tabel 4.14 Hasil Analisis Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pada Lindi

Variasi	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	
	Awal	Akhir
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (25 mA $\text{cm}^{-2}$ )	652,38	726,19
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (25 mA $\text{cm}^{-2}$ )	664,29	845,24
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (25 mA $\text{cm}^{-2}$ )	664,29	373,81
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (25 mA $\text{cm}^{-2}$ )	652,38	152,38
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (25 mA $\text{cm}^{-2}$ )	940,48	773,81
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (37,5 mA $\text{cm}^{-2}$ )	654,76	1616,67
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (37,5 mA $\text{cm}^{-2}$ )	661,90	500,00
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (37,5 mA $\text{cm}^{-2}$ )	657,14	402,38
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (37,5 mA $\text{cm}^{-2}$ )	657,14	123,81
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (37,5 mA $\text{cm}^{-2}$ )	940,48	497,62
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (50 mA $\text{cm}^{-2}$ )	659,52	1642,86
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (50 mA $\text{cm}^{-2}$ )	664,29	688,10
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (50 mA $\text{cm}^{-2}$ )	659,52	504,76
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (50 mA $\text{cm}^{-2}$ )	659,52	659,52
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (50 mA $\text{cm}^{-2}$ )	940,48	104,76

Pada Tabel 4.15 menunjukkan bahwa seluruh variasi konsentrasi akhir pada sulfat mengalami penurunan. Namun terdapat beberapa variasi yang mengalami kenaikan. Variasi molar rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$  selalu mengalami kenaikan, hal tersebut karena sulfat yang ditambahkan pada variasi tersebut merupakan penambahan yang paling besar dibandingkan variasi lainnya yaitu hingga mencapai 15 g penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Tingginya kandungan sulfat pada lindi menyebabkan efek negatif apabila lindi

yang telah diolah dibuang ke badan penerima. Menurut PP No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, konsentrasi sulfat yang diperbolehkan adalah 400 mg/L (Kelas 1). Pada penelitian ini, kandungan sulfat yang dapat memenuhi baku mutu terdapat pada variasi  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$  (25 mA cm<sup>-2</sup>),  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$  (25 mA cm<sup>-2</sup>),  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$  (37,5 mA cm<sup>-2</sup>), dan  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$  (50 mA cm<sup>-2</sup>) dengan nilai sebesar 373,81 mg/L, 152,38 mg/L, 123,81 mg/L, dan 104,76 mg/L.

Tabel 4.15 Hasil Analisis Klorida (Cl<sup>-</sup>) pada Lindi

Variasi	Kadar Cl <sup>-</sup> (mg/L)	
	Awal	Akhir
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	2499,23
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	1999,38
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	1399,57
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	2899,10
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4598,57	1299,60
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	2299,29
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	1399,57
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	1699,47
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	1399,57
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4598,57	1699,47
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	2699,16
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	499,85
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	1999,38
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	1299,60
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	4598,57	1999,38

Pada Tabel 4.16 menunjukkan bahwa seluruh variasi konsentrasi akhir pada klorida mengalami penurunan. Menurut PP No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian

Pencemaran Air, konsentrasi klorida yang diperbolehkan adalah 600 mg/L (Kelas 1). Pada penelitian ini kandungan klorida yang memenuhi baku mutu terdapat pada variasi  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$  (50 mA cm<sup>-2</sup>).

Berdasarkan hasil analisis percobaan sulfat dan klorida, maka dapat ditentukan pula variasi optimum dengan mempertimbangkan nilai akhir pada sulfat dan klorida. Dalam sisi kebutuhan energi, kebutuhan bahan kimia, dan pemenuhan baku mutu didapatkan nilai variasi optimum yaitu  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$  dengan densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup>. Pada variasi tersebut, efluen sulfat telah memenuhi baku mutu. Namun pada klorida belum memenuhi baku mutu.

#### 4.6 Perhitungan Beban COD pada Influen dan Kebutuhan Biaya COD Total

Pada penelitian ini juga perlu mengetahui kapasitas beban COD pada influen yang diperlukan dalam perhitungan OLR. Tujuan perhitungan tersebut untuk mengetahui beban massa COD yang dapat ditampung pada reaktor elektrokimia. Perhitungan OLR pada variasi optimum yaitu densitas arus 25 mA cm<sup>-2</sup> dan perbandingan molar rasio 1:4, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= Q \times [\text{COD}] \\ \text{OLR} &= 7 \text{ mL/detik} \times 1188,447 \text{ mg/L} \times 3600 \\ &\quad \text{detik/jam} \times 10^{-6} \text{ kg/mg} \times 10^{-3} \text{ L/mL} \\ &= 0,051 \text{ kg COD/jam} = 0,203 \text{ kg COD/m}^3.\text{hari} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut beban influen COD yang dapat ditampung pada reaktor elektrokimia sebesar 0,051 kg COD/jam atau 0,203 kg COD/m<sup>3</sup>.hari. Berdasarkan penelitian Pramono *et al.* (2015), beban organik yang dapat ditampung pada reaktor akrilik dengan skala laboratorium yaitu sebesar 0,23 – 0,51 kg COD/m<sup>3</sup>.hari dengan volume limbah sebesar 3,47 L. Penelitian tersebut menggunakan anoda dengan luas permukaan 1,4778 x 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup> dan katoda dengan luas permukaan 4,926 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup> serta HRT 48 jam. Pada penelitian ini menggunakan reaktor elektrokimia dengan volume limbah yang diolah sebesar 2 L serta menggunakan katoda dan anoda dengan luas permukaan 0,8 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup> serta HRT 8 jam dapat menampung beban organik sebesar 0,203 kg COD/m<sup>3</sup>.hari. Pada penelitian yang dilakukan oleh

Pramono *et al.* (2015), beban organik yang ditampung oleh reaktor lebih besar dibandingkan dengan menggunakan reaktor elektrokimia.

Selanjutnya adalah analisis kebutuhan biaya pengolahan lindi menggunakan proses elektooksidasi pada variasi optimum yaitu  $[SO_4^{2-}] : [Cl^-] = 1:4$  dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ . Pada variasi tersebut menambahkan asam nitrat sebanyak 4,2 mL dan menambahkan  $Na_2SO_4$  sebanyak 2,5095 g. Selain itu, konsumsi energi listrik yang dibutuhkan sebesar 0,0058649 kWh/g. Kemudian mencari nilai harga asam nitrat (/liter),  $Na_2SO_4$  teknis (/kg), dan listrik (/kWh).

Tabel 4.16 Harga Bahan Kimia

Bahan Kimia	Harga	Satuan
Asam Nitrat 65%	Rp 1.075.000	/liter
Natrium Sulfat Teknis	Rp 39.000	/kg

Setelah mendapatkan harga bahan kimia, kemudian dihitung kebutuhan biaya lindi pada variasi optimum. Diketahui harga listrik /kWh sebesar Rp 1.467 /kWh (industri). Berikut ini merupakan perhitungan biaya pada variasi optimum:

$$\text{Harga Asam Nitrat} = 4,2 \text{ mL} \times 10^{-3} \text{ L/mL} \times \text{Rp } 1.075.000/\text{L} \\ = \text{Rp } 4.515$$

$$\text{Harga Natrium Sulfat Teknis} = 2,5095 \text{ g} \times 10^{-3} \text{ kg/g} \times \text{Rp } 39.000 \\ = \text{Rp } 98$$

$$\text{Harga Listrik} = 0,0058649 \text{ /kWh} \times \text{Rp } 1.467 = \text{Rp } 8,61$$

$$\text{Total Kebutuhan Biaya} = \text{Rp } 4.515 + \text{Rp } 98 + \text{Rp } 8,61 = \text{Rp } 4.621$$

Pada proses oksidasi elektrokimia menggunakan anoda BDD, variasi optimum dicapai pada perbandingan molar  $[SO_4^{2-}] : [Cl^-] = 1:4$  dengan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ . Biaya yang dikeluarkan pada variasi tersebut adalah sebesar Rp 4.621 dapat menyisihkan COD sebesar 1,440 g atau Rp 3200 /g COD. Beban COD rata-rata sebesar 51 g COD/jam. Biaya untuk menyisihkan COD total pada proses oksidasi elektrokimia/8 jam adalah sebagai berikut:

$$= 51 \text{ g COD/jam} \times 8 \text{ jam} \times \text{Rp } 3.200 /\text{g COD} = \text{Rp } 1.305.600,00$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka di dapatkan total kebutuhan biaya dalam menyisihkan COD total pada variasi optimum yaitu sebesar Rp 1.305.600,00.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini yaitu:

1. Penambahan ion sulfat sangat berperan penting dalam pembentukan senyawa radikal yang berperan dalam oksidasi tidak langsung. Semakin tinggi penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  maka penyisihan polutan organik yang dihasilkan juga semakin besar, sedangkan penyisihan nitrogen yang dihasilkan semakin kecil.
2. Penggunaan densitas arus yang berbeda juga dapat berpengaruh pada penurunan senyawa organik dan nitrogen. Pada penelitian ini menggunakan densitas arus  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ ,  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ , dan  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ . Semakin tinggi densitas arus yang digunakan maka penyisihan polutan organik yang dihasilkan juga semakin tinggi, sedangkan nilai densitas arus tertinggi hingga terendah dalam penyisihan nitrogen dicapai pada nilai  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$ ,  $50 \text{ mA cm}^{-2}$ , dan,  $25 \text{ mA cm}^{-2}$ .
3. Penyisihan COD dan total nitrogen paling optimum dalam pemenuhan baku mutu dicapai pada variasi perbandingan molar  $[\text{SO}_4^{2-}]:[\text{Cl}^-] = 1:4$  (penambahan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebesar  $1,195 \text{ g/L}$ ) dengan densitas arus  $25 \text{ mA/cm}^{-2}$ . Pada kondisi tersebut konsentrasi COD sebesar  $229,06 \text{ mg L}^{-1}$  dan penyisihan massa sebesar  $1,440 \text{ g}$  (78%) dengan kebutuhan energi spesifik sebesar  $0,00579 \text{ kWh/g}$ . Konsentrasi total nitrogen sebesar  $453,23$  dan penyisihan massa sebesar  $1,422 \text{ g}$  (47%) dengan kebutuhan energi spesifik sebesar  $0,0059 \text{ kWh/g}$ . Kebutuhan energi spesifik rata-rata pada seluruh percobaan berkisar antara  $0,00579$  hingga  $0,2209 \text{ kWh/g}$ .

Saran yang diperoleh pada penelitian ini yaitu:

1. Dalam penelitian selanjutnya sebaiknya perlu analisis *Total Organic Carbon* (TOC) untuk mengetahui kadar organik yang tersisihkan.
2. Penggunaan anoda BDD belum mampu menyisihkan nitrogen hingga memenuhi baku mutu, sehingga dibutuhkan anoda yang dapat menyisihkan nitrogen cukup tinggi.

3. Penggunaan proses elektrooksidasi sebagai *post-treatment* diperlukan *pre-treatment* yang dapat menurunkan senyawa nitrogen yang cukup tinggi agar dapat memenuhi baku mutu yang berlaku di Indonesia.
4. Penelitian selanjutnya sebaiknya mencoba menggunakan lindi pada daerah yang tidak terpengaruh oleh infiltrasi air laut.



## DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, F. 2018. **Proses Oksidasi Elektrokimia pada Lindi Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) dengan Penambahan Ion Klorida dan Sulfat**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan ITS, Surabaya.
- Alamsjah, A.A. 2016. **Revitalisasi Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) TPA Ngipik Gresik**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan ITS, Surabaya.
- Ali, M. 2011. **Rembesan Air Lindi (Leachate) Dampak Pada Tanaman Pangan dan Kesehatan**. Surabaya: UPN Press.
- Anglada, A., Ane, U., dan Inmaculada, O. 2009. **Contributions of Electrochemical Oxidation to Waste-water Treatment: Fundamentals and Review of Applications**. Society of Chemical Industry Vol. 84, hal. 1747-1755.
- Anglada, A., Ortiz, Urriaga, A. M., Ortiz, I., Mantzavinos, D. 2011. **Boron-doped Diamond Anodic Treatment of Landfill Leachate: Evaluation of Operating Variables and Formation of Oxidation By-products**. Water Research, Vol. 45, hal: 828-838.
- APHA-AWWA-WEF. 2012. **Standard Methods for the Examination Of Water And Wastewater**. American Public Health Association, Washington DC.
- Avsar, Y. 2007. **Comparison of Classical Chemical and Electrochemical Processes for Treating Rose Processing Wastewater**. Journal of Hazardous materials, Vol. 343, hal: 341-342.
- Alvarez-Vazquez, H., Bruce, J., Simon, J. 2004. **Membrane bioreactors vs conventional biological treatment of landfill leachate: A brief review**. Vol. 79.
- Aziz, H.A., Mohd, S.Y., Mohd, N.A., Nurul, H.A., Salina, A. 2004. **Physico-chemical Removal of Iron From Semi-aerobic Landfill Leachate by Limestone Filter**. Waste Manage. Vol. 24, hal: 353-358
- Bagastyo, A. Y., Damien, J.B., Ina, K., Escher, Beate, I., Cynthia, J., Jelena, R. 2014. **Electrochemical Treatment of Reverse Osmosis Concentrate on Boron-Doped**

- Electrodes Undivided and Divided Cell Configurations.** Journal of Hazardous Materials, Vol.279 , hal: 111-116.
- Bagastyo, A.Y., Damien, J.B., Komeel, R., Jelena, R. 2013. **Electrochemical Oxidation of Electrolysed Reverse Osmosis Concentrate on Ti/Pt-IrO<sub>2</sub>, Ti/SnO<sub>2</sub>Sb and Boron-Doped Diamond Electrodes.** Water Research, Vol.47, hal:242-250.
- Bashir, M. J. K., Isa, M. H., Kutty, S. R. M., Awang, Z. B., Aziz, H. A., Mohajeri, S., Farooqi, I. H. 2009. **Landfill Leachate Treatment By Electrochemical Oxidation.** Waste Management, Vol.29(9), hal: 2534–2541.
- Bakraouy, H., Souabi, S., Digua, K., Dkhissi, O., Sabar, M., Fadil, M. 2017. **Optimization of the Treatment of an Anaerobic Pretreated Landfill Leachate by a Coagulation–Flocculation Process Using Experimental Design Methodology.** Process Safety and Environmental Protection, Vol.109, hal: 621–630.
- Cabeza, A., Urtiaga, A. M., Ortiz, I. 2007. **Electrochemical treatment of landfill leachates using a Boron-Doped Diamond Anode.** Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol.46(5),hal: 1439–1446.
- Chiang, L.C., Chang, J.E., Wen, T.C. 1995. **Indirect Oxidation Effect in Electrochemical Oxidation Treatment of Landfill Leachate.** Water Research, Vol.29 (2),hal: 671–678.
- Chu, Y., Qinhuai, Z., Dimin, X. 2008. **Advanced Treatment of Landfill Leachate From a Sequencing Batch Reactor (SBR) By Electrochemical Oxidation Process.**Journal of Environmental Engineering Sciences, Vol. 7(6), hal: 627–633.
- Comninellis, C. 1994. **Electrocatalysis in the Electrochemical Conversion/Combustion of Organic Pollutants for Waste Water Treatment.** Electrochimica Acta, Vol. 39(11), hal: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 Prozesse.** Waste Management, 29(9), hal:2534–2541.
- Deng, Y dan James, D.E. 2007. **Electrochemical Oxidation for Landfill Leachate Treatment.** Waste Management, Vol. 27(3), hal: 380-388.
- Ding, J., Kun, W., Sining, W., Qingliang, Z., Liangliang, W., Huibin, H., Yixing, Y., Dionysios, D.D. 2018. **Electrochemical Treatment of Bio-Treated Landfill Leachate: Influence of Electrode Arrangement, Potential, and Characteristics.** Chemical Engineering Journal.
- Farhat, A., Keller, J., Tait, S., Radjenovic, J. 2017. **Assessment of The Impact Of Chloride on the Formation of Chlorinated By-Products InThe Presence and Absence of Electrochemically Activated Sulfate.** Chemical Engineering Journal, Vol. 330 (Supplement C), hal:1265–1271.
- Feki,F., Fathi, A., Mongi, F, Sami, S. 2008. **Chemosphere Electrochemical Oxidation Post-Treatment of Landfill Leachates Treated with Membrane Bioreactor.** Chemosphere, Vol. 75(2), hal :256-260.
- Fernandes, A., Spranger, P., Fonseca, A.D., Pacheco, M.J., Cricaco, L., Lopes, A. 2014. **Effect of Electrochemical Treatments oh the Biodegradability of Sanitary Landfill Leachates.** Apllied Catalysis B: Environmental, Vol.144, hal: 514- 520.
- Feng., Yujie., Lisha, Y., Junfeng, L., Bruce, E.L. 2016. **Electrochemical Technologies for Wastewater Treatment and Resource Reclamation.** Crit. Rev. Environ. Sci. Water Res.Technol. Vol. 2, hal : 800-831.
- Fitrianti, S.P. 2011. **Penggunaan Elektrokoagulasi dengan Elektroda Aluminium pada Optimasi Pengolahan Air Lindi.**Jurnal Sains dan Teknologi Kimia, Vol. 3(2), hal: 142-150.
- Friadi, Y., Marsudi., Winardi, Y. 2015. **Desain Instalasi Pengolahan Leachate (IPL) di TPA Entikong Kabupaten Sanggau.** Program Studi Teknik Lingkungan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura, Pontianak. Vol. 1(1).

- Harahap, M.R. 2016. **Sel Elektrokimia: Karakteristik dan Aplikasi**. *Circuit*, Vol.2 (1), hal: 177.
- Hasan, A. 2006. **Dampak Penggunaan Klorin**. *Jurnal Teknik Lingkungan*, Vol. 7(1), hal: 90-96.
- Husada, I.W. 2016. **Proses-proses Berbasis Membran Penukar Ion dalam Industri Kimia**. Teknik Kimia ITB, Bandung.
- Hutagalung, S.S., Anto, T.S., Veny, L.2010. **Aplikasi Metode Advanced Oxidation Processes (AOP) untuk Mengolah Limbah Resin Cair**. *Journal of Waste Management Technology*, Vol. 13(2), hal: 1410-9565
- Imania, A.W. 2018. **Pengolahan Lindi menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) dengan Pre-Treatment Kimiawi untuk Menurunkan Konsentrasi Organik dan Nitrogen**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan ITS, Surabaya.
- Kargi, F., Pamukoglu, M. Y. 2004. **Adsorbent Supplemented Biological Treatment of Pre-Treated Landfill Leachate by Fed-Batch Opeartion**. *Biosource Technology*, Vol. 94 (3), hal: 285-291.
- Khamis, D., Mahe, E., Dadoize, F., Devilliers, D. 2010. **Peroxodisulfate Generation on Boron-Doped Diamond Microelectrodes Array and detection by scanning Electrochemical Microscopy**. *Journal of Apllied Electrochemistry*, Vol.40, hal: 1829-1838.
- Kim, D., Ryu, H.D., Kim, M.S., Kim, J., dan Lee, S.I. 2006. **Enhancing Struvite Precipitation Potential for Ammonia Nitrogen Removal in Municipal Landfill Leacheate**. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 19, hal: 409-415.
- 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.* Vol. 32, hal : 297-336.
- Kurniawan, T.A., Lo, W., Chan, G.Y. 2006. **Physico-chemical Treatments for Removal of Recalcitrant Contaminants from Landfill Leachate**. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 129(1), hal: 80-100.
- Laitinen, N., Antero, L., Jari, V. 2005. **Landfill Leachate Treatment with Sequencing Batch Reactor and Membrane Bioreactor**. *Desalination*, Vol. 191, hal 86-91.

- Lan, Y., Clemence, C., Christel, C., Karine, G.S. 2018. **An Experimental and Modelling Study of the Electrochemical Oxidation Pharmaceuticals Using a Boron-Doped Diamond Anode.** *Chemical Engineering Journal*, Vol. 333, hal: 486-494.
- Lee, A.H., Nikraz, H., dan Hung, Y.T. 2010. **Influence of Waste Age on Landfill Leachate Quality.** *International Journal of Environmental Science and Development* Vol. 1 (4), hal 347-349.
- Li, X., Cassidy, J.J., Reinke, C.A., Fischboeck, S., Carthew, R.W. 2009. **A Microrna Imparts Robustness Against Environmental Fluctuation During Development.** *Elsevier*, Vol. 137(2), hal: 273-282.
- Mandal, P., Dubey, B. K., Gupta, A.K. 2017. **Review on Landfill Leachate Treatment by Electrochemical Oxidation: Drawbacks, Challenges and Future Scope.** *Waste Management, (Supplement C)* Vol. 69, hal: 250-273.
- Mao, X., Lin, W., Song, H., Hua, Z., An, L., Fuxing, G. 2008. **Enhanced Electrochemical Oxidation of Phenol by Introducing Ferric Ions And UV Radiation.** *Journal of Environmental Sciences*, Vol.20 (11),hal: 1386–1391.
- Marselli, B., Garcia-Gomez, J., Michaud, P.A., Rodrigo, M.A., Comninellis, C. 2003. **Electrogeneration of Hydroxyl Radicals on Boron-Doped Diamond Electrodes.** *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 150, hal: 79–D83.
- Mehmood, M.K., Adetutu, E., Nedwell, D.B., Ball, A.S. 2009. **In Situ Microbial Treatment of Landfill Leachate Using Aerated Lagoons.** *Bioresource Technology*, Vol. 100, hal: 2741-2744.
- Membranes International Inc. CMI-7000 Cation Exchange Membrane Technical Specification and AMI-7001 Anion Exchange Membrane Technical Specification. USA.
- Metcalf dan Eddy. 2003. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th Edition.** Mc. Graw-Hill, New York.
- Miao, L., Gangqing, Y., Tao, T., Yongzhen, P. 2019. **Recent Advances in Nitrogen Removal from Landfill Leachate Using Biological Treatment – A review.** *Journal of Environmental Management*, Vol. 235(2019), hal: 178-185.

- Moro, G.D., L. Prieto-Rodriguez, M. De Sanctis, C. Di Iaconi, S. Malato, G. Mascolo. 2016. **Landfill Leachate Treatment: Comparison Of Standalone Electrochemical Degradation And Combined With A Novel Biofilter.** *Chemical Engineering Journal*, Vol.288, hal: 87-89.
- Mu'minah. 2008. **Aplikasi Kitosan Sebagai Koagulan untuk Penjernihan Air Keruh.** Tesis Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam: Institut Teknologi Bandung.
- Mussa, Z.H., Othman, M.R., Abdullah, M.P. 2015. **Electrochemical Oxidation of Landfill Leachate: Investigation of Operational Parameters and Kinetics Using Graphite-PVC Composite Electrode As Anode.** *Journal of Brazil Chemistry Social*, Vol. 26(5), hal: 939–948.
- Ozcan, A Sahin, Y., Koparal, A.S., Oturan, M.A., 2008. **Prophammineralization in Aqueous Medium by Anodic Oxidation Usingboron-Doped Diamond Anode: Influence of Experimentalparameters on Degradation Kinetics And Mineralizationefficiency.** *Water Research*, Vol.42, hal: 2889-2898.
- Ozturk, I., Mahmut, A., Ismail, K., Osman, A., Cigdem, G.Y. 2003. **Advanced Physico-Chemical Treatment Experiences on Young Municipal Landfill Leachates.** *Waste Management*, Vol. 23(5), hal: 441–446.
- Panizza, M., Kapalka, A., Comninellis, C. 2008. **Oxidation of Organic Pollutants on BDD Anodes Using Modulated Current Electrolysis.** *Electrochimica Acta*, Vol. 53(5), hal: 2289-2295.
- Panizza, M., Giacomo, M. 2009. **Direct and Mediated Anodic Oxidation of Organic Pollutants.** *Chemistry Review*, Vol.109 (12), hal: 6541–6569.
- Panizza, Marco, Marina, D., Ignasi, S. 2010. **Electrochemical Process for the Treatment of Landfill Leachate.** *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 40(10), hal :1721–1727.
- 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.

- Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.
- Pérez, G., Saiz, J., Ibañez, R., Urtiaga, A. M., Ortiz, I. 2012. **Assessment of the formation of inorganic oxidation byproducts during the electrocatalytic treatment of ammonium from landfill leachates.** *Water Research*, Vol. 46 (8), hal: 2579–2590.
- Pramono, K.J., Krisna, A.W., Prima, B.A., Saepulloh. 2015. **Biokonversi Bahan Organik pada Pengolahan Air Limbah Industri Pulp dan Kertas menjadi Energi Listrik menggunakan Membrane-Less Microbial Fuel Cell (ML-MFC).** *Jurnal Selulosa*, Vol 5(01). Hal: 39-46.
- Purwanta, W dan Joko, P.S. 2017. **Laju Produksi Karakterisasi Polutan Organik Lindi dari TPA Kaliwengi, Kabupaten Brebes.** *Jurnal Teknologi Lingkungan*, Vol. 18(02), hal:157-164.
- 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*, Vol. 25(10), hal: 2023-2030.
- Radjenovic, J., Beate, I.E., Korneel, R. 2011. **Electrochemical Degradation of the  $\beta$ -blocker Metoprolol by Ti/Ru<sub>0.7</sub> Ir<sub>0.3</sub>O<sub>2</sub> nad Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb Electrodes.** *Journal of Water Research*, Vol. 45 (10), hal: 3205-3214.
- Rajkumar, D., Kim, J.G. dan Palanivelu, K. 2005. **Indirect Oxidation of Phenol in The Presence of Chloride for Wastewater Treatment.** *Journal of Chemical Engineering Technology*, Vol. 28(1), hal. 98-105.
- Rao, N.N., Misra, R., Gedam, N., P.N Parameswaran., J.K. Astik. 2009. **Kinetics of Electrooxidation of Landfill Leachate in a Three-dimensional Carbon Bed Electrochemical Reactor.** *Journal of Chemosphere*, Vol. 76, hal: 1206-1212.
- Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. 2008. **Landfill Leachate.** *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol.40 (10), hal: 1721- 1727.
- Retnoningsih, M dan Yulia, M. 2010. **Pengaruh pH, Konsentrasi Awal Ammonia dan Waktu Operasi pada Elektrolisa**

- Ammonia.** Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- Ristanto. 2011. **Uji Pengaruh Amonium ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) dan Salinitas Terhadap Pengolahan Lindi Secara Anaerobik (*Studi Kasus : TPA Ngipik*).** Tugas Akhir Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Riyanto. 2013. **Elektrokimia dan Aplikasinya.** Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Romero, A., Santos, A., Vicente, F., González, C., 2010. **Diuronabatement Using Activated Persulphate: Effect of Ph, Fe(II) and Oxidant Dosage.** Chemical Engineering Journal, Vol:162, hal:257-265.
- Rozendal, R.A., H.V.M. Hamelers, R.J. Molenkamp, C.J.N. Buisman. 2007. **Performance Of Single Chamber Biocatalyzed Electrolysis With Different Types Of Ion Exchange Membranes.** Water Research, Vol.41, hal: 1984 – 1994.
- Said, N.I dan Hartaja, D.R.K. 2015. **Pengolahan Air Lindi dengan Proses Biofilter Anaerob-Aerob dan Denitrifikasi.** Jurnal Air Indonesia, Vol.8 (1), hal: 1-20.
- Saleh, C dan Hendro, P. 2014. **Analisis Efektifitas Instalasi Pengolahan Limbah Lindi di TPA Supit Urang Kota Malang.** Jurnal Teknik Pengairan, Vol.5 (1), hal 103-109.
- Särkkä, H., Bhatnagar, A., Sillanpää, M. 2015. **Recent Developments of Electro-oxidation in Water Treatment- a Review.** Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol.754, hal: 46-56.
- Sari, P.P.I. 2017. **Kombinasi Proses Elektrodialisis dan Oksidasi Elektrokimia Sebagai Alternatif Pra-Pengolahan Lindi.** Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan ITS, Surabaya.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L. 1978. **Chemistry for Environmental Engineering (3rd ed.).** New York: McGraw-Hill Book Co.
- Silveira, J.E., Juan, A.Z., Gema, P., Ederio, D.B., Peterson, B.M. 2014. **Electrochemical Oxidation of Landfill Leachate in a Flow Reactor: Optimization Using Response Surface Methodology.** Environmental Science and Pollutan Research, Vol. 22(8), hal: 5831-5841.



- Silva, A.C., Dezotti, M., dan Sant A.J. 2004. **Treatment and Detoxification of a Sanitary Landfill Leachate**. *Chemosphere*, Vol. 55, hal: 207-214.
- Susanto, D., Arya, R., Sudarno. 2017. **Pengolahan Limbah Cair Menggunakan Metode Kombinasi Koagulasi-Flokulasi ( $\text{FeCl}_3$ ) dan AOPs ( $\text{Fe-H}_2\text{O}_2$ )**. *Jurnal Teknik Lingkungan*, Vol. 6(2)
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A. 1993. **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues**. New York : Mc-Graw Hill.
- Thompson Brewster, E. *et al.* 2016. **A Mechanistic Model for Electrochemical Nutrient Recovery Systems**. *Water Research*. Elsevier Ltd, Vol. 94, hal: 176–186.
- Torobi, P.M.I., Christina, N.M., Jubhar, C. 2015. **Lindi TPA Melalui Sistem Sinambung Anaerob dan Aerob Cultur-Alga**. hal: 873–877.
- Tsai, C.T., S. T. Lin, Y. C. Shue, and P. L. Su. 1997. **Electrolysis of Soluble Organic Matter in Leachate from Landfills**. *Water Research* Vol. 17(4), hal: 773–778.
- Turro, E., Apostolos, G., Raffaello, C., Evangelos, G., Dionissios, M., Alexandros, K. 2012. **Reprint of: Electrochemical Oxidation of Stabilized Landfill Leachate on DSA Electrodes**. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 207–208, hal: 73–78.
- Uygur, A., Kargi., dan Fikret. 2004. **Biological Nutrient Removal from Pretreated Landfill Leachate in a Sequencing Batch Reactor**. *Journal of Environmental Management*, Vol. 71, hal: 9-14.
- Valero, F., Barcelo, A., dan Arbs, R. 2011. **Electrodialysis Technology Theory and Applications Desalination Trends and Technology**. Croatia :In Tech.
- Vlyssides, A., Karlis, P., Loizidou, M., Zorpas, A., Arapoglou, D. 2001. **Treatment of Leachate From a Domestic Solid Waste Sanitary Landfill By An Electrolysis System**. *Environmental Technology*, Vol. 22 (12), hal: 1467–1476.
- Wang, B dan Y. Shen. 2000. **Performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) as a Hydrolysis- acidogenesis Unit in Treating Landfill Leachate Mixed with Municipal**

- Sewage.** Water Science and Technology, Vol. 42(12), hal: 115-121.
- Weber-Scanell, P.K. dan Duffy, L.K. 2007. **Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms: American.** Journal of Environmental Sciences, Vol. 3 (1), hal: 1-6.
- White G. C. 1986. **The Handbook of Chlorination.** 2<sup>nd</sup> edition, al. 172. New York USA: Van Nostrand Reinhold.
- Zhou, B., Yu, Z., Wei, Q., Long, H., Xie, Y., Wang, Y. 2016. **Electrochemical Oxidation of Biological Pretreated and Membrane Separated Landfill Leachate Concentrates on Boron Doped Diamond Anode.** Applied Surface Science, Vol. 377,hal:406– 415.
- Zouboulis, A., Chai, X., dan Katsoyiannis, I. 2004. **The Application of Bioflocculant for The Removal of Humic Acid on Stabilized Landfill Leachate.** Journal of Environmental Management, Vol. 70, hal: 35- 41.

## LAMPIRAN A PERHITUNGAN KEKUATAN IONIK

Kekuatan ionik ( $\mu$ ) merupakan perhitungan konsentrasi ion total di dalam larutan. Ion dengan muatan yang lebih besar dapat menyebabkan rekasi elektrostatik yang lebih besar. Rumus kekuatan ion adalah sebagai berikut.

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_i c_i z_i^2$$

Dimana:

$\mu$  = kekuatan ionik (M)

$c_i$  = konsentrasi ion (M)

$z_i$  = jumlah muatan ion

**"Halaman ini sengaja dikosongkan"**

## LAMPIRAN B PROSEDUR PERCOBAAN

### 1. Analisis pH

#### a. Peralatan dan Bahan

Alat : pH meter, *beaker glass*, *magnetic stirrer*, erlenmeyer 100 mL, gelas ukur 50 mL

Bahan : Sampel dan *aquadest*

#### b. Prinsip Kerja

Potensiometri merupakan cara analisis pH berdasarkan pengukuran pada beda potensial.

#### c. Prosedur Analisis

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

(SNI 06-6989. 11-2004)

### 2. Analisis Nitrat

#### a. Peralatan dan Bahan

Alat : neraca analitik, gelas ukur 100 mL, labu pengencer 1000 mL, erlenmeyer 100 mL, spektrofotometer

Bahan : Sampel, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat, *brucin asetat* 0,05 N

#### b. Prosedur Kerja Pembuatan Reagen

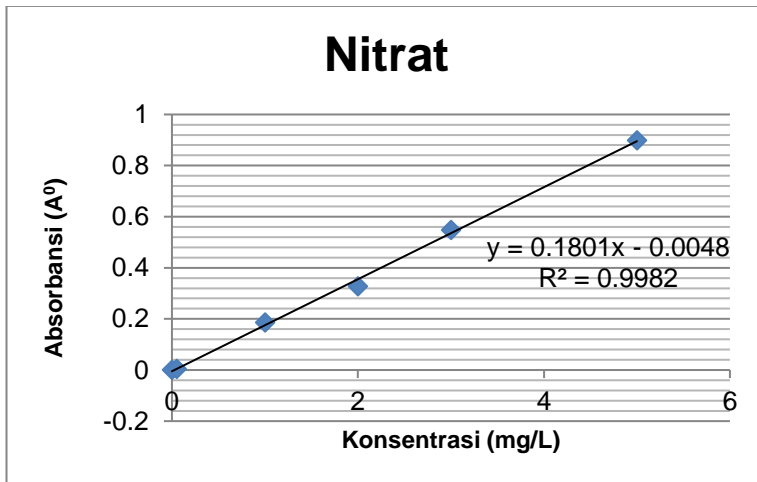
- Brucin asetat 0,5 %  
Melarutkan 0,5 g serbuk brucine dengan 100 mL *acetic glacial* (CH<sub>3</sub>COOH) di dalam labu pengencer 100 mL, kocok hingga larut sempurna.
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat  
Menggunakan langsung dari botol tanpa di tuang dalam *beaker glass*.
- Larutan standart nitrat (100 mg/L atau 100 ppm)

Menimbang dengan ketelitian 721,8 mg  $\text{KNO}_3$  (yang sebelumnya telah dikeringkan menggunakan oven dengan suhu  $105^\circ\text{C}$  selama 2 jam) kemudian melarutkan ke dalam *aquadest* sebanyak 1 L di dalam labu pengencer 1 L.

**c. Prosedur Analisis**

1. Mengambil 2 mL sampel dan memasukkan ke dalam erlenmeyer 100 mL.
2. Menambahkan 2 mL *brucin acetat*, aduk diamkan selama 2 menit.
3. Menambahkan 4 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pekat.
4. Mengaduk dan mendinginkan selama 10 menit.
5. Membaca dengan spektrofotometer pada panjang gelombang optimum 404 nm.
6. Menghitung nilai nitrat dengan rumus dari kurva kalibrasi.

(SNI 6989.79:2011)



Gambar B. 1 Kurva Kalibrasi Nitrat

### 3. Analisis Nitrit

#### a. Peralatan dan Bahan

Alat: Spektrofotometer, labu ukur (50 mL, 250 mL, 500 mL, 1000 mL), pipet ukur, *beaker glass* 100 mL, erlenmeyer, neraca analitik

Bahan: Air suling bebas nitrit, *glass wool*, kertas saring bebas nitrit ukuran pori 0,45  $\mu\text{m}$ , larutan sulfanilamida ( $\text{H}_2\text{NC}_6\text{H}_4\text{SO}_2\text{NH}_2$ ), larutan NED Dihidroklorida, larutan natrium oksalat ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  0,05 N), larutan FAS 0,05 N, larutan induk nitrit 250 mg/L, larutan kalium permanganat ( $\text{KMnO}_4$  0,05 N)

#### b. Prinsip Percobaan

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

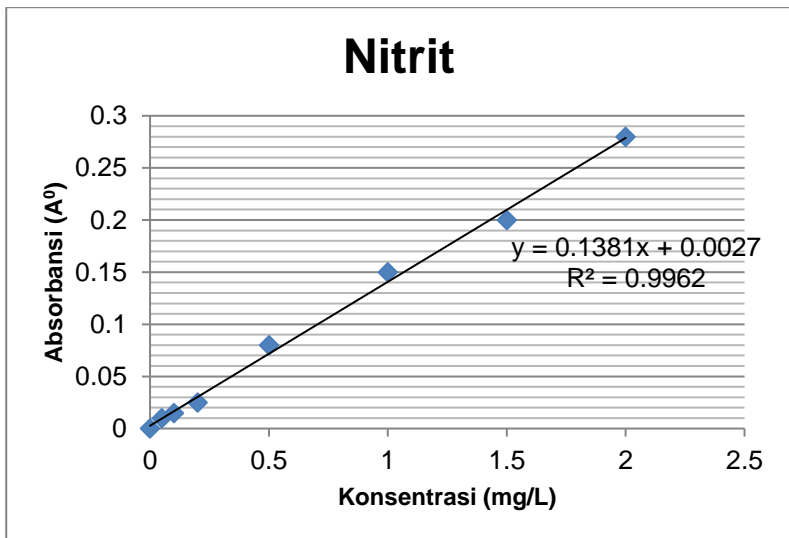
#### c. Prosedur Kerja Pembuatan Reagen

- 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 air suling dan 50 mL HCl pekat. Kemudian mengencerkan dengan *aquadest* hingga 500 mL.
- 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.
- 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  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pekat hingga 1000 mL.
- Larutan Standar Nitrit, 250 mg/L  $\text{NO}_2\text{-N}$   
Melarutkan 1,232 g  $\text{NaNO}_2$  dalam 1000 mL *aquadest*. Membiarkan sedikitnya 1 minggu, lalu saring dengan *glass wool* dan simpan dalam botol berwarna coklat.

**d. Prosedur Analisis**

1. Memasukkan sampel sebanyak 50 mL kedalam *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. Baca absorbansinya dengan spektrofotometer menggunakan panjang gelombang 546 nm.

(SNI 06-6989.9-2004)



Gambar B. 2 Kurva Kalibrasi Nitrit



#### 4. Analisis Amonium

##### a. Peralatan dan bahan

Alat : Neraca analitik, gelas ukur 100 mL, labu pengencer 1000 mL, erlenmeyer 100 mL, spektrofotometer

Bahan : Sampel, NaOH 4 N, garam signet, larutan nessler

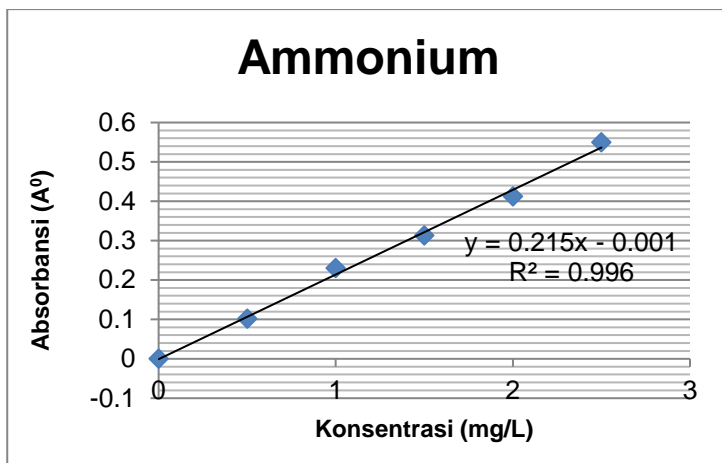
##### b. Prosedur kerja pembuatan reagen

- Nessler  
Mencampur dan menghaluskan 50 gram serbuk  $HgI_2$  dan 35 gram KI kemudian dilarutkan dengan 80 gram NaOH yang sudah dilarutkan dengan aquades hingga 500 mL. Biarkan mengendap dan diambil supernatnya.
- Garam signet  
Melarutkan 50 gram K.Na.Tatrat ke dalam 500 mL aquades, kemudian ditambahkan 5 mL larutan nessler sebagai pengawet.
- Larutan standart Amonium (100 ppm atau 100 mg/L)  
Menimbang dengan ketelitian 382,14 mg  $NH_4Cl$  kemudian melarutkan ke dalam *aqudest* sebanyak 1 L di dalam labu pengencer 1 L. Menambahkan 3 tetes toluen sebagai pengawet.

##### c. Prosedur kerja analisis

1. Menuangkan 12,5 mL sampel pada erlenmeyer 100 mL
2. Menambahkan 0,6 mL garam signet dan 0,5 mL nessler.
3. Mengaduk dan mendinginkan selama 10 menit.
4. Melakukan langkah sebelumnya pada *aqudest* sebagai blanko.
5. Membaca spektrofotometer, dengan panjang gelombang 410 nm.
6. Menghitung nilai ammonia nitrogen dengan rumus dari kurva kalibrasi.

(SNI 06-6989.30-2005)



Gambar B. 3 Kurva Kalibrasi Amonium

## 5. Analisis COD dengan Metode *Closed Reflux and Colorimetric*

### a. Alat dan Bahan

Alat : *Vial* atau tabung COD, *digester*, *spektroquant*

Bahan : *Digestion solution*, *sulfuric acid reagent*, larutan standar *Potassium Hydrogen Phthalate* (KHP)

### b. Prinsip Kerja

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

### c. Prosedur Kerja Pembuatan Reagen

#### – *Digestion Solution*

Mengeringkan serbuk  $K_2Cr_2O_7$  sebanyak 10,216 g ke dalam oven pada suhu  $105^{\circ}C$  selama 2 jam. Kemudian melarutkan 10,216 g  $K_2Cr_2O_7$  ke dalam 500 mL *aquadest*, lalu menambahkan  $H_2SO_4$  pekat sebanyak 167 mL dan menambahkan 33,3 g  $HgSO_4$ . Menunggu hingga dingin lalu mengencerkan hingga volume 1000 mL.

#### – *Sulfuric Acid Reagent*

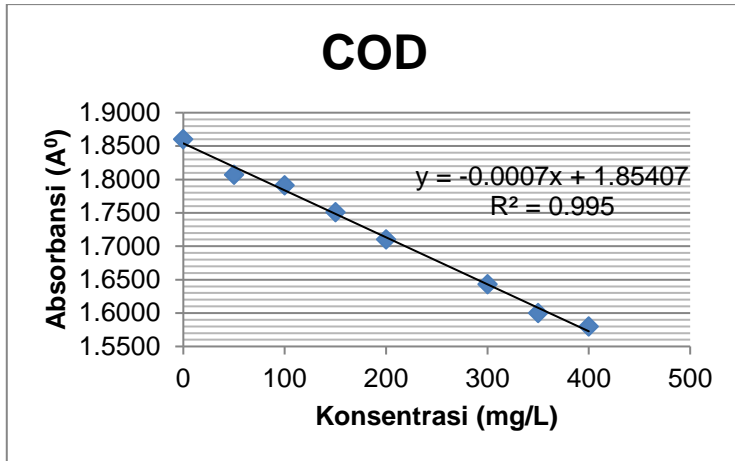
Menambahkan  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  ke dalam  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pekat dengan komposisi 5,5 gr  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  / Kg  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Mendinginkan selama 1-2 hari hingga larut sempurna.

- Larutan Standar *Potassium Hydrogen Phthalate* (KHP) melarutkan 425 mg KHP ke dalam 500 mL *aquadest*. Larutan ini memiliki nilai COD sebesar 1000 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ .

**d. Prosedur Analisis**

1. Menyiapkan *vial* dalam keadaan bersih. Cara membersihkan *vial* adalah membilas dan kocok dengan air kran 1 kali, *aquadest* 2 kali lalu dikeringkan.
2. Menambahkan 1,5 mL *digestion solution* (larutan dikromat) ke dalam *vial*.
3. Menambahkan 2,5 mL *sulphuric acid reagent* (larutan  $\text{Ag}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ) ke dalam *vial*.
4. Menambahkan 1 mL sampel, tutup dengan rapat lalu dikocok hingga homogen. Setelah dikocok, pastikan tutup *vial* tetap dalam keadaan rapat.
5. Menghidupkan *digester*, kemudian atur suhunya hingga  $148^\circ\text{C}$ .
6. Masukkan *vial* ke dalam *digester*, lalu tekan tombol run/enter.
7. Setelah 2 jam, turunkan suhu *digester* dan tunggu hingga 15-20 menit. Lalu angkat *vial* dari *digester*, kemudian dikocok hingga homogen, lalu diamkan hingga suhunya turun seperti suhu ruang, dan seluruh suspensi dalam larutan telah mengendap.
8. Menghidupkan *spectroquant* dengan panjang gelombang  $500\ \mu\text{m}$ , lalu atur metode untuk mengukur COD dengan memasukkan angka 023. Baca pada *spectroquant* dengan panjang optimum yang telah didapatkan.
9. Masukkan hasil pembacaan absorbansi ke dalam persamaan regresi untuk mendapatkan konsentrasi COD.

(APHA, 2012)



Gambar B. 4 Kurva Kalibrasi COD

## 6. Analisis TDS

### b. Alat dan Bahan

Alat : *Beaker glass* 100 mL dan pH ion lab

Bahan : Sampel dan *aquadest*

### c. Prinsip Kerja

Potensiometri merupakan cara analisis TDS berdasarkan pengukuran beda potensial.

### d. Prosedur Analisis

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

(SNI 06- 6989.1-2004)

## 7. Analisis Cl<sup>-</sup> dengan Metode Argentometri (Mohr)

### a. Alat dan Bahan

Alat : Labu erlenmeyer 100 mL, pipet volumetrik, *beaker glass* 100 mL, pipet tetes, sendok spatula, propipet

Bahan : Larutan perak nitrat (AgNO<sub>3</sub>) 0,0141 N, larutan kalium dikromat 5%, serbuk NaCl, HNO<sub>3</sub> pekat, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 10%, serbuk ZnO, *aquadest*

### b. Prinsip Kerja

Larutan indikator kalium kromat berfungsi dalam menitrasi larutan perak nitrat pada pH 7-10 untuk mengetahui kandungan senyawa klorida. Perak klorida diendapkan secara kuantitatif sebelum terjadinya titik akhir titrasi dengan terbentuknya endapan perak kromat yang berwarna merah kecoklatan.

### c. Prosedur Kerja Pembuatan Reagen

- Larutan Perak Nitrat (AgNO<sub>3</sub>) 0,0141 N  
Melarutkan AgNO<sub>3</sub> sebanyak 2,39725 g ke dalam labu pengencer berisi 1 L larutan *aquadest*.
- Larutan Kalium Dikromat 5%
- Standarisasi untuk Faktor Koreksi AgNO<sub>3</sub>  
Melarutkan 1,6485 g NaCl dengan larutan *aquadest* ke dalam labu ukur hingga tanda batas pengenceran. Kemudian mengambil 10 mL larutan NaCl dengan pipet volumetrik ke dalam *beaker glass* 100 mL. Setelah itu, menambahkan 3 tetes HNO<sub>3</sub> pekat, 3 tetes K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 10% dan 1 sendok spatula ZnO. Menitrasi dengan larutan AgNO<sub>3</sub> 0,0141 N hingga warna kuning berubah menjadi merah bata.

### d. Prosedur Analisis

1. Mengambil sampel sebanyak 12,5 mL ke dalam labu erlenmeyer 100 mL.
2. Menambahkan 0,5 mL K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.
3. Menambahkan 1 sendok spatula bubuk ZnO.
4. Menitrasi dengan AgNO<sub>3</sub> hingga berubah warna menjadi merah bata.
5. Menghitung nilai Cl<sup>-</sup> dengan persamaan, sebagai berikut:

$$\text{Kadar Cl}^- \text{ (mg/L)} = \frac{(A-B) \times N \times 35,45 \times 1000}{V}$$

Keterangan :

A : Volume larutan baku AgNO<sub>3</sub> untuk titrasi contoh uji (mL)

B : Volume larutan baku AgNO<sub>3</sub> untuk titrasi blanko (mL)

N : Normalitas larutan baku AgNO<sub>3</sub> (mgrek/mL)

V : Volume contoh uji (mL)

(SNI 06-6989.19-2004)

## 8. Analisis SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

### a. Alat dan Bahan

Alat : Labu erlenmeyer 100 mL, pipet ukur, *beaker glass* 100 mL, spektrofotometer, sendok spatula, propipet

Bahan : Air suling bebas sulfat, barium klorida (BaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O), natrium sulfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), larutan *salt acid*

### b. Prinsip Kerja

Metode ini digunakan sebagai penentuan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dalam air dan air limbah secara turbidimeter dengan kisaran 1 mg/L hingga 40 mg/L.

### c. Prosedur Kerja Pembuatan Reagen

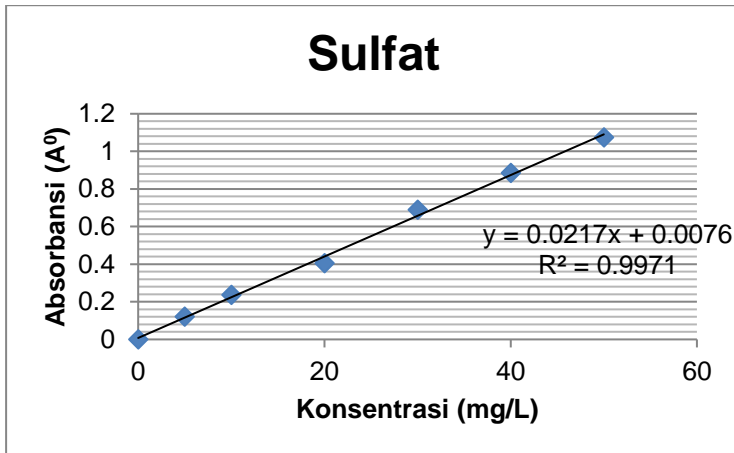
- Pembuatan larutan standar SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 100 mg/L  
Meringkakan serbuk Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sebanyak 1,479 g ke dalam oven selama 24 jam pada suhu 105°C. Kemudian mendinginkan ke dalam desikator selama 15 menit, lalu melarutkan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,479 g hingga 1000 mL dengan *aquadest*.
- Larutan *Salt Acid*  
Melarutkan 24 g NaCl dengan *aquadest* + 2 mL HCl pekat. Kemudian mengencerkan hingga 100 mL.

### d. Prosedur Analisis

1. Mengisi 2 buah labu erlenmeyer 100 mL dengan 10 mL sampel pada masing-masing labu.
2. Menambahkan 2 mL larutan *salt acid* ke dalam masing-masing erlenmeyer 100 mL sambil diaduk hingga homogen.

3. Menambahkan 1 spatula  $\text{BaCl}_2$  pada salah satu erlenmeyer, kemudian kocok hingga homogen, lalu mendinginkan selama 10 menit.
4. Melakukan langkah sebelumnya pada *aquadest* sebagai blanko.
5. Membaca absorbansi larutan yang telah ditambahkan dengan  $\text{BaCl}_2$  pada spektrofotometer dengan blanko. Panjang gelombang optimum yang digunakan adalah 420 nm.

(APHA, 2012)



Gambar B. 5 Grafik Kurva Kalibrasi Sulfat

**"Halaman ini sengaja dikosongkan"**



## LAMPIRAN C DATA HASIL ANALISIS

Tabel LC. 1 Penyisihan Massa COD pada Penelitian Pendahuluan

Waktu (jam)	Densitas Arus (mA cm <sup>-2</sup> )	COD (mg/L)	COD (g)	[COD/COD <sub>0</sub> ]
0	75	2400,5	4,801	1,00
3	75	2150,5	419,3475	87,35
6	81,875	2036,214	3,970618	0,83
9	46,5	1679,071	3,190236	0,66
12	29,25	1607,643	2,974139	0,62
15	16,875	1593,357	2,868043	0,60
18	14,25	1264,786	2,213375	0,46
21	14,75	1000,5	1,70085	0,35
24	13,375	1043,357	1,721539	0,36

Tabel LC. 2 pH dan TDS Lindi pada Penelitian Pendahuluan

Waktu (jam)	Densitas Arus (mA cm <sup>-2</sup> )	pH	TDS (g)
0	75	8,72	14,54
3	75	6,91	13,12
6	81,875	3,08	11,54
9	46,5	1,99	15,18
12	29,25	1,93	16,16
15	16,875	1,89	16,58
18	14,25	1,83	17,52
21	14,75	1,83	18,42
24	13,375	1,76	18,96

Tabel LC. 3 pH dan TDS Buffer Fosfat pada Penelitian Pendahuluan

Waktu (jam)	Densitas Arus (mA cm <sup>-2</sup> )	pH	TDS (g)
0	75	7	0
3	75	11,81	4,46
6	81,875	12,28	10,62
9	46,5	12,36	11,62
12	29,25	12,36	12,52
15	16,875	12,37	11,18

<b>Waktu (jam)</b>	<b>Densitas Arus (mA cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>pH</b>	<b>TDS (g)</b>
18	14,25	12,38	12,86
21	14,75	12,3	14,34
24	13,375	12,34	14,86

Tabel LC. 4 Massa TDS Lindi pada variasi Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]									
		TDS (g/l)					massa TDS (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	7,74	5,77	5,31	4,52	6,76	15,60	11,63	10,70	9,11	13,62
2	0,2	7,05	5,42	4,94	4,28	5,75	13,50	10,38	9,46	8,20	11,01
4	0,42	6,95	5,01	4,54	3,98	5,51	12,96	9,34	8,47	7,42	10,28
6	0,64	6,55	3,62	4,38	3,62	5,34	11,89	6,57	7,95	6,57	9,69
8	0,89	6,29	4,76	4,16	3,1	5,02	11,10	8,40	7,34	5,47	8,86

Tabel LC. 5 Nilai pH Lindi pada variasi Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
		0	0	5,78	5,15	5,16
2	0,2	5,32	5,87	5,53	5,61	4,77
4	0,42	5,23	6,09	5,32	5,2	4,17
6	0,64	4,32	4,47	4,2	4,47	3,72
8	0,89	3,9	6,62	3,93	3,9	3,15

Tabel LC.6 Massa TDS Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]									
		TDS (g/l)					massa TDS (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,2	0,662	0,651	0,461	0,801	1,2	1,27	1,25	0,88	1,53	2,30
4	0,42	0,872	0,927	0,718	0,925	1,006	1,63	1,73	1,34	1,73	1,88
6	0,64	0,058	1,199	1,438	1,119	1,399	0,11	2,18	2,61	2,03	2,54
8	0,89	0,04	1,552	1,373	1,221	1,578	0,07	2,74	2,42	2,16	2,79

Tabel LC.7 Nilai pH Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
		0	0	7	7	7
2	0,2	7,74	7,32	7,97	7,42	7,76
4	0,42	8,01	7,11	10,72	7,77	9,74
6	0,64	8,9	8,59	12,07	8,59	10,58
8	0,89	9,2	7,17	11,04	9,23	10,85

Tabel LC.8 Massa TDS Lindi pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]									
		TDS (g/l)					massa TDS (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	7,73	5,8	5,84	4,56	6,76	15,58	11,69	11,77	9,19	13,62
2	0,3	6,88	5,2	4,93	4	5,83	13,18	9,96	9,44	7,66	11,16
4	0,63	6,85	5,01	4,17	3,61	5,49	12,78	9,34	7,78	6,73	10,24
6	0,97	6,4	4,8	3,29	3,32	5,13	11,62	8,71	5,97	6,03	9,31
8	1,33	6,29	4,65	3,38	3,12	4,84	11,10	8,21	5,97	5,51	8,54

Tabel LC.9 Nilai pH Lindi pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	5,69	5,44	5,15	5,97	5,03
2	0,3	5,94	4,98	6,25	6,03	4,65
4	0,63	5,51	4,15	6,28	6,3	4,03
6	0,97	4,58	3,24	6,31	4,17	3,65
8	1,33	3,61	2,82	6,12	3,9	2,98

Tabel LC.10 Massa TDS Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]									
		TDS (g/l)					massa TDS (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,2	0,041	0,949	0,932	0,82	0,982	0,08	1,82	1,78	1,57	1,88
4	0,42	0,036	1,171	1,186	1,254	1,245	0,07	2,18	2,21	2,34	2,32
6	0,64	0,078	1,594	1,583	0,061	1,672	0,14	2,89	2,87	0,11	3,03
8	0,89	0,062	2,05	2,02	0,043	2	0,11	3,62	3,57	0,08	3,53

Tabel LC.11 Nilai pH Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 37,5 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	7	7	7	7	7
2	0,2	7,62	7,76	7,48	7,57	8,21
4	0,42	7,65	10,33	7,39	8,36	10,23
6	0,64	8,2	11,06	7,58	7,85	11,01
8	0,89	9,23	11,27	7,71	8,26	11,21

Tabel LC.12 Massa TDS Lindi pada variasi Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]									
		TDS (g/l)					massa TDS (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	7,77	5,78	5,19	4,8	6,76	15,66	11,65	10,46	9,67	13,62
2	0,41	7,43	5,12	4,49	4,18	6,06	14,23	9,80	8,60	8,00	11,60
4	0,84	6,99	4,98	4,12	3,98	5,47	13,04	9,29	7,68	7,42	10,20
6	1,29	6,53	3,98	3,31	3,12	4,9	11,85	7,22	6,01	5,66	8,89
8	1,78	6,24	3,54	2,87	2,8	4,68	11,01	6,25	5,07	4,94	8,26

Tabel LC.13 Nilai pH Lindi pada variasi Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	5,69	5,85	5,57	5,17	5,03
2	0,41	5,04	4,35	6,28	5,32	5,46
4	0,84	3,54	3,03	6,54	6,01	4,89
6	1,29	3,07	2,83	6,08	4,75	3,63
8	1,78	2,77	2,65	5,13	3,43	2,88

Tabel LC.14 Massa TDS Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]									
		TDS (g/l)					massa TDS (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,2	0,132	0,132	3,73	0,81	1,127	0,25	0,25	7,14	1,55	2,16
4	0,42	0,064	0,133	1,507	0,932	1,66	0,12	0,25	2,81	1,74	3,10
6	0,64	0,059	0,064	1,726	1,121	2,48	0,11	0,12	3,13	2,03	4,50
8	0,89	0,032	0,064	1,986	1,251	2,99	0,06	0,11	3,51	2,21	5,28

Tabel LC.15 Nilai pH Buffer Fosfat pada variasi Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup>

Waktu (jam)	Ah/L	Perbandingan Molar [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0	7	7	7	7	7
2	0,2	9,48	9,98	7,1	7,23	8,49
4	0,42	10,13	10,02	7,39	8,45	10,59
6	0,64	11,08	10,5	7,92	8,78	11,06
8	0,89	11,35	10,92	9,39	9,12	11,47

Tabel LC.16 Penurunan Nilai COD pada Variasi Densitas Arus 25 mA cm<sup>-2</sup>

t (jam)	Ah/L	COD (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	1379,06	814,78	921,92	750,70	1843,36
2	0,21	700,49	736,20	686,20	429,28	1586,21
4	0,42	471,92	600,49	636,20	472,13	1407,64
6	0,65	271,92	571,92	286,20	307,85	1207,64
8	0,89	156,30	171,92	229,06	236,42	993,36
t (jam)	Ah/L	massa COD (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	2,78	1,64	1,86	1,51	3,71
2	0,21	1,34	1,45	1,35	0,84	3,12
4	0,42	0,88	1,15	1,22	0,90	2,67
6	0,65	0,66	1,07	0,53	0,57	2,23
8	0,89	0,43	0,31	0,42	0,43	1,48
t (jam)	Ah/L	[COD/COD <sub>0</sub> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,21	0,48	0,88	0,73	0,56	0,84
4	0,42	0,32	0,70	0,66	0,60	0,72
6	0,65	0,24	0,65	0,29	0,38	0,60
8	0,89	0,16	0,19	0,22	0,28	0,40

Tabel LC.17 Penurunan Nilai COD pada Variasi Densitas Arus  
37,5 mA cm<sup>-2</sup>

t (jam)	Ah/L	COD (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	1235,00	1278,09	1172,13	879,06	1843,36
2	0,31	600,49	879,20	514,99	536,20	1543,36
4	0,63	371,67	565,29	464,99	500,49	1450,50
6	0,97	177,79	364,99	286,42	430,20	1250,50
8	1,33	93,99	100,19	92,02	256,99	936,21
t (jam)	Ah/L	massa COD (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	2,49	2,58	2,36	1,77	3,71
2	0,31	1,15	1,68	0,99	1,03	2,96
4	0,63	0,69	1,05	0,87	0,93	2,71
6	0,97	0,32	0,66	0,52	0,78	2,27
8	1,33	0,17	0,18	0,16	0,45	1,65
t (jam)	Ah/L	[COD/COD <sub>0</sub> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,31	0,46	0,65	0,42	0,58	0,80
4	0,63	0,28	0,41	0,37	0,53	0,73
6	0,97	0,13	0,26	0,22	0,44	0,61
8	1,33	0,07	0,07	0,07	0,26	0,44

Tabel LC.18 Penurunan Nilai COD pada Variasi Densitas Arus 50 mA cm<sup>-2</sup>

t (jam)	Ah/L	COD (mg/L)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	1021,67	935,87	736,42	1171,93	1843,36
2	0,41	585,72	804,92	464,99	893,00	1586,21
4	0,84	285,29	640,63	322,13	789,20	1407,64
6	1,30	184,99	257,49	129,28	496,50	1207,64
8	1,78	75,99	88,99	36,42	221,93	836,21
t (jam)	Ah/L	massa COD (g)				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	2,06	1,89	1,48	2,36	3,71
2	0,41	1,12	1,54	0,89	1,71	3,04
4	0,84	0,53	1,19	0,60	1,47	2,63
6	1,30	0,34	0,47	0,23	0,90	2,19
8	1,78	0,13	0,16	0,06	0,39	1,48
t (jam)	Ah/L	[COD/COD <sub>0</sub> ]				
		1:1	1:2	1:4	1:8	1:10
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,41	0,54	0,82	0,60	0,72	0,82
4	0,84	0,26	0,63	0,40	0,62	0,71
6	1,30	0,16	0,25	0,16	0,38	0,59
8	1,78	0,07	0,08	0,04	0,17	0,40



Tabel LC.19 Nilai Total - N pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 25 mA/cm<sup>2</sup>

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)				Satuan (g)				Normalisasi			
		Konsentrasi TKN	Konsentrasi Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Konsentrasi Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Total-N	Massa TKN	Massa Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Massa Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Total-N (g)	TKN/TKN <sub>0</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /NO <sub>30</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /NO <sub>20</sub> <sup>-</sup>	Total-N
		Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1			
0	0	295	204	153	651	0,594	0,411	0,307	1,313	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,89	320	212	5	537	0,565	0,375	0,009	0,948	0,950	0,912	0,028	1,890
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:2</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:2</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:2</b>			
0	0	295	214	146	655	0,594	0,432	0,294	1,320	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,89	300	204	7	511	0,530	0,361	0,013	0,903	0,891	0,835	0,043	1,768
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:4</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:4</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:4</b>			
0	0	295,00	222,22	64,67	582	0,594	0,448	0,130	1,173	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,89	230,00	221,67	1,56	453	0,406	0,391	0,003	0,800	0,683	0,874	0,021	1,578
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:8</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:8</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:8</b>			
0	0	295	213,89	225,72	735	0,594	0,431	0,455	1,480	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,89	230	205,42	1,52	437	0,406	0,363	0,003	0,771	0,683	0,841	0,006	1,530
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:10</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:10</b>				<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl] = 1:10</b>			
0	0	766,98	44,42	45,25	857	1,545	0,089	0,091	1,726	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,89	684,09	44,44	1,27	730	1,207	0,078	0,002	1,288	0,781	0,876	0,025	1,682

Tabel LC.20 Nilai Total - N pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 37,5 mA/cm<sup>2</sup>

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)				Satuan (g)				Normalisasi			
		Konsentras i TKN	Konsentras i Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Konsentrasi Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Total-N	Massa TKN	Massa Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Massa Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Total-N (g)	TKN/TKN <sub>0</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / NO <sub>3</sub> <sub>0</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> / NO <sub>2</sub> <sub>0</sub> <sup>-</sup>	Total-N
		Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1			
0	0	767	222	200,725	1190	1,545	0,447	0,404	2,397	1,000	1,000	1,000	3,000
8	1,33	320	218	0,620	539	0,565	0,385	0,001	0,951	0,365	0,861	0,003	1,229
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:2				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:2				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:2			
0	0	295	203	110,688	608	0,594	0,408	0,223	1,226	1,000	1,000	1,000	3,000
8	1,33	310	190	0,065	500	0,547	0,336	0,000	0,883	0,920	0,822	0,001	1,743
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:4				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:4				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:4			
0	0	295	224	114,312	633	0,594	0,451	0,230	1,276	1,000	1,000	1,000	3,000
8	1,33	300	207	4,964	512	0,530	0,365	0,009	0,903	0,891	0,809	0,038	1,737
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:8				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:8				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:8			
0	0	295	206	116,486	617	0,594	0,414	0,235	1,243	1,000	1,000	1,000	3,000
8	1,33	230	172	3,080	405	0,406	0,304	0,005	0,715	0,683	0,733	0,023	1,439
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:10				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:10				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:10			
0	0	767	44,42	45,254	857	1,545	0,089	0,091	1,726	1,000	1,000	1,000	3,000
8	1,33	724	44,39	1,490	770	1,277	0,078	0,003	1,358	0,827	0,875	0,029	1,731

Tabel LC.21 Nilai Total - N pada Lindi dengan Variasi Densitas Arus 50 mA/cm<sup>2</sup>

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)				Satuan (g)				Normalisasi			
		Konsentrasi TKN	Konsentrasi Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Konsentrasi Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Total-N	Massa TKN	Massa Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Massa Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Total-N (g)	TKN/TKN <sub>0</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /NO <sub>30</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /NO <sub>20</sub> <sup>-</sup>	Total-N
		Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:1			
0	0	767	218	175,543	1160	1,545	0,439	0,354	2,338	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,178	714	215	0,435	929	1,260	0,379	0,001	1,640	0,815	0,864	0,002	1,682
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:2				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:2				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:2			
0	0	767	208	109,652	1084	1,545	0,418	0,221	2,185	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,178	803	203	0,030	1006	1,417	0,357	0,000	1,775	0,917	0,855	0,00024	1,772
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:4				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:4				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:4			
0	0	295	222	93,297	610	0,594	0,447	0,188	1,230	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,178	410	208	2,029	620	0,724	0,367	0,004	1,094	1,217	0,820	0,019	2,056
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:8				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:8				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:8			
0	0	767	212	157,971	1137	1,545	0,428	0,318	2,292	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,178	670	183	0,054	853	1,182	0,323	0,000	1,505	0,765	0,754	0,000	1,519
t (jam)	Ah/L	Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:10				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:10				Perbandingan [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl] = 1:10			
0	0	767	44	45,254	857	1,545	0,089	0,091	1,726	1,000	1,000	1,000	3,000
8	0,178	690	45	2,899	738	1,219	0,079	0,005	1,303	0,789	0,880	0,056	1,724

Tabel LC.22 Total Anorganik Nitrogen sebagai  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  pada Lindi dengan Densitas Arus 25 mA  $\text{cm}^{-2}$

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)			Satuan (g)			Total Massa Anorganik-N
		Konsentrasi $\text{NH}_4^+$	Konsentrasi $\text{NO}_3^-$	Konsentrasi $\text{NO}_2^-$	Massa $\text{NH}_4^+$	Massa $\text{NO}_3^-$	Massa $\text{NO}_2^-$	
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1</math></b>								
0	0	44,07	203,89	152,54	0,09	0,41	0,31	0,80
4	0,42	34,07	160,56	24,09	0,07	0,31	0,05	0,43
8	0,89	48,60	212,22	4,89	0,09	0,41	0,01	0,51
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	63,60	214,44	145,83	0,13	0,43	0,29	0,85
4	0,42	57,79	215,69	89,13	0,11	0,42	0,17	0,71
8	0,89	67,21	204,31	7,17	0,13	0,39	0,01	0,54
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	49,77	222,22	64,67	0,10	0,44	0,13	0,67
4	0,42	43,95	221,25	5,80	0,09	0,43	0,01	0,53
8	0,89	44,19	221,67	1,56	0,08	0,43	0,00	0,51
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	49,77	222,22	64,67	0,08	0,43	0,45	0,96
4	0,42	43,95	221,25	5,80	0,09	0,42	0,04	0,55
8	0,89	44,19	221,67	1,56	0,08	0,39	0,00	0,48
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	13,26	44,42	45,25	0,03	0,09	0,09	0,21
4	0,42	22,44	44,47	14,93	0,04	0,09	0,03	0,16
8	0,89	31,63	44,44	1,27	0,06	0,09	0,00	0,15

Tabel LC.23 Total Anorganik Nitrogen sebagai  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  pada Lindi dengan Densitas Arus  $37,5 \text{ mA cm}^{-2}$

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)			Satuan (g)			Total Massa Anorganik-N
		Konsentrasi $\text{NO}_3^-$	Konsentrasi $\text{NO}_2^-$	Massa $\text{NH}_4^+$	Massa $\text{NO}_3^-$	Massa $\text{NO}_2^-$	Massa $\text{NO}_2^-$	
		Perbandingan $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$						
0	0	63,11	221,81	200,72	0,13	0,44	0,40	0,97
4	0,42	59,11	220,00	1,27	0,12	0,43	0,0025	0,55
8	0,89	65,11	217,92	0,62	0,13	0,42	0,0012	0,54
t (jam)	Ah/L	Perbandingan $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$						Total Massa Anorganik-N
0	0	61,28	202,64	110,69	0,12	0,41	0,22	0,75
4	0,42	57,09	179,44	2,54	0,11	0,35	0,0050	0,47
8	0,89	67,33	190,14	0,07	0,13	0,37	0,0001	0,49
t (jam)	Ah/L	Perbandingan $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$						Total Massa Anorganik-N
0	0	51,40	224,03	114,31	0,10	0,45	0,23	0,78
4	0,42	48,95	215,28	24,46	0,10	0,42	0,05	0,57
8	0,89	62,79	206,81	4,96	0,12	0,40	0,01	0,53
t (jam)	Ah/L	Perbandingan $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$						Total Massa Anorganik-N
0	0	49,19	205,56	116,49	0,10	0,41	0,23	0,74
4	0,42	36,40	188,47	13,59	0,07	0,37	0,03	0,47
8	0,89	40,35	172,08	3,08	0,08	0,33	0,01	0,41
t (jam)	Ah/L	Perbandingan $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$						Total Massa Anorganik-N
0	0	13,26	44,42	226,27	0,03	0,09	0,45	0,57
4	0,42	33,49	44,50	38,04	0,07	0,09	0,07	0,23
8	0,89	27,44	44,39	1,49	0,05	0,09	0,0029	0,14

Tabel LC.24 Total Anorganik Nitrogen sebagai  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  pada Lindi dengan Densitas Arus  $50 \text{ mA cm}^{-2}$

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)			Satuan (g)			Total Massa Anorganik-N
		Konsentrasi $\text{NH}_4^+$	Konsentrasi $\text{NO}_3^-$	Konsentrasi $\text{NO}_2^-$	Massa $\text{NH}_4^+$	Massa $\text{NO}_3^-$	Massa $\text{NO}_2^-$	
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1</math></b>								
0	0	61,11	217,92	175,54	0,12	0,44	0,35	0,91
4	0,84	57,11	216,53	0,54	0,11	0,42	0,0011	0,54
8	1,78	63,61	215,00	0,43	0,12	0,41	0,0008	0,54
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	60,61	207,50	109,65	0,12	0,42	0,22	0,76
4	0,84	57,11	199,03	0,65	0,11	0,39	0,0013	0,50
8	1,78	65,61	202,53	0,03	0,13	0,39	0,0001	0,51
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	46,28	221,94	93,30	0,09	0,44	0,19	0,72
4	0,84	44,19	218,61	5,62	0,09	0,43	0,01	0,53
8	1,78	44,42	207,78	2,03	0,09	0,40	0,00	0,49
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	49,23	212,36	157,97	0,10	0,42	0,32	0,84
4	0,84	35,23	197,92	0,54	0,07	0,39	0,0011	0,46
8	1,78	39,32	182,78	0,05	0,08	0,35	0,0001	0,43
<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10</math></b>								
t (jam)	Ah/L							<b>Total Massa Anorganik-N</b>
0	0	13,26	44,42	45,25	0,03	0,09	0,09	0,21
4	0,84	31,74	44,56	2,75	0,06	0,09	0,0054	0,15
8	1,78	25,12	44,61	2,90	0,05	0,09	0,0056	0,14

Tabel LC.25 Hasil Analisis Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dengan Variasi Densitas Arus 25 mA/cm<sup>2</sup>

<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>					
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Lindi</b>		<b>Buffer Fosfat</b>	
		<b>mg/L</b>	<b>massa (g)</b>	<b>mg/L</b>	<b>massa (g)</b>
		<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:1</b>			
0	0	44,070	0,089	0	0
4	0,42	34,070	0,064	5,279	0,010
8	0,89	48,605	0,086	4,395	0,008
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:2</b>			
0	0	63,605	0,128	0	0
4	0,42	57,791	0,108	8,349	0,016
8	0,89	67,209	0,119	12,116	0,023
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:4</b>			
0	0	49,767	0,100	0	0
4	0,42	43,953	0,082	7,884	0,015
8	0,89	44,186	0,078	8,140	0,015
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:8</b>			
0	0	39,651	0,080	0	0
4	0,42	46,279	0,086	11,977	0,023
8	0,89	44,186	0,078	2,767	0,005
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10</b>			
0	0	13,256	0,027	0	0
4	0,42	22,442	0,042	0,047	0,0001
8	0,89	31,628	0,056	0,156	0,0003

Tabel LC.26 Hasil Analisis Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dengan Variasi Densitas Arus  $37,5 \text{ mA/cm}^2$

<b><math>\text{NH}_4^+</math></b>					
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Lindi</b>		<b>Buffer Fosfat</b>	
		<b>mg/L</b>	<b>massa (g)</b>	<b>mg/L</b>	<b>massa (g)</b>
		<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1</math></b>			
0	0,00	63,112	0,127	0	0
4	0,63	59,112	0,110	3,00	0,006
8	1,33	65,112	0,115	7,49	0,014
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2</math></b>			
0	0	61,279	0,123	0	0
4	0,63	57,093	0,106	3,488	0,007
8	1,33	67,326	0,119	2,791	0,005
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4</math></b>			
0	0	51,395	0,104	0	0
4	0,63	48,953	0,091	6,674	0,013
8	1,33	62,791	0,111	8,907	0,017
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8</math></b>			
0	0	49,186	0,099	0	0
4	0,63	36,395	0,068	8,884	0,017
8	1,33	40,349	0,071	11,093	0,021
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10</math></b>			
0	0	13,256	0,027	0	0
4	0,63	33,488	0,062	0,047	0,00009
8	1,33	27,442	0,048	0,326	0,00061



Tabel LC.27 Hasil Analisis Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dengan Variasi Densitas Arus  $50 \text{ mA/cm}^2$

<b><math>\text{NH}_4^+</math></b>					
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Lindi</b>		<b>Buffer Fosfat</b>	
		<b>mg/L</b>	<b>massa (g)</b>	<b>mg/L</b>	<b>massa (g)</b>
		<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1</math></b>			
0	0	61,112	0,123	0	0
4	0,84	57,112	0,107	7,698	0,015
8	1,78	63,612	0,112	10,023	0,019
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2</math></b>			
0	0	60,612	0,122	0	0
4	0,84	57,112	0,107	7,698	0,015
8	1,78	65,612	0,116	10,023	0,019
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4</math></b>			
0	0	46,279	0,093	0	0
4	0,84	44,186	0,082	8,093	0,016
8	1,78	44,419	0,078	8,977	0,017
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8</math></b>			
0	0	49,232	0,099	0	0
4	0,84	35,232	0,066	8,907	0,017
8	1,78	39,322	0,069	9,860	0,019
<b>t (jam)</b>	<b>Ah/L</b>	<b>Perbandingan <math>[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10</math></b>			
0	0	13,256	0,027	0	0
4	0,84	31,744	0,062	0,023	0,000046
8	1,78	25,116	0,047	0,372	0,0007

Tabel LC.28 Keseimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 25 mA/cm<sup>2</sup> dengan Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)			Satuan (g)		
		Konsentrasi amonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Konsentrasi Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Konsentrasi Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Massa amonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Massa Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Massa Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )
<b>LINDI</b>							
0	0	13,26	44,42	45,254	0,027	0,089	0,091
4	0,42	22,44	44,47	14,928	0,044	0,087	0,029
8	0,89	31,63	44,44	1,268	0,061	0,085	0,002
<b>BUFFER FOSFAT</b>							
0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,42	0,047	43,278	12,174	0,000091	0,085	0,024
8	0,89	0,156	44,5	11,341	0,0003	0,085	0,022

Tabel LC. 29 Keseimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 37,5 mA/cm<sup>2</sup> dengan Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)			Satuan (g)		
		Konsentrasi amonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Konsentrasi Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Konsentrasi Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Massa amonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Massa Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Massa Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )
<b>LINDI</b>							
0	0	13,26	44,42	45,25	0,03	0,09	0,09
4	0,63	33,49	44,50	7,61	0,07	0,09	0,01
8	1,33	27,44	44,39	1,49	0,05	0,09	0,00
<b>BUFFER FOSFAT</b>							
0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,63	0,036	43,582	10,386	0,000070	0,085	0,020
8	1,33	0,265	44,580	9,564	0,000509	0,086	0,018

Tabel LC.30 Keseimbangan Massa Penyisihan Amonium, Nitrat, Nitrit pada Lindi dan Buffer Fosfat 50 mA/cm<sup>2</sup> dengan Perbandingan [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] : [Cl<sup>-</sup>] = 1:10

t (jam)	Ah/L	Satuan (mg/L)			Satuan (g)		
		Konsentrasi amonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Konsentrasi Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Konsentrasi Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Massa amonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Massa Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Massa Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )
<b>LINDI</b>							
0	0	13,256	44,417	45,254	0,027	0,089	0,091
4	0,84	31,744	44,556	2,754	0,062	0,087	0,005
8	1,78	25,116	44,611	2,899	0,048	0,086	0,006
<b>BUFFER FOSFAT</b>							
0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,84	0,023	44,361	5,906	0,000046	0,087	0,012
8	1,78	0,372	44,472	6,449	0,000714	0,085	0,012

Tabel LC.31 Perubahan BOD Variasi Molar Rasio  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$

Waktu	25 mA cm <sup>-2</sup>	BOD	37,5 mA cm <sup>-2</sup>	BOD	50 mA cm <sup>-2</sup>	BOD
	Muatan Energi Spesifik		Muatan Energi Spesifik		Muatan Energi Spesifik	
(jam)	(Ah L <sup>-1</sup> )	(g)	(Ah L <sup>-1</sup> )	(g)	(Ah L <sup>-1</sup> )	(g)
0	0	1,0075	0	1,0075	0	1,0075
4	0,42	1,67916667	0,63	1,460875	0,84	1,360125
8	0,89	1,20125	1,33	1,1687	1,78	0,3694167

Tabel LC.32 Hasil Analisis Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pada Lindi

Variasi	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	
	Influen	Efluen
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	652,38	726,19
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	664,29	845,24
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	664,29	373,81
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	652,38	152,38
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (25 mA cm <sup>-2</sup> )	940,48	773,81
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	654,76	1616,67
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	661,90	500,00
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	657,14	402,38
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	657,14	123,81
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	940,48	497,62
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:1$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	659,52	1642,86
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:2$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	664,29	688,10
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:4$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	659,52	504,76
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:8$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	659,52	659,52
$[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] = 1:10$ (50 mA cm <sup>-2</sup> )	940,48	104,76

Tabel LC. 33 Hasil Analisis Ion Klorida (Cl<sup>-</sup>) pada Lindi

Variasi	Kadar Cl <sup>-</sup> (mg/L)	
	Awal	Akhir
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:1 (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	2499,23
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:2 (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	1999,38
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:4 (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	1399,57
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:8 (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4398,64	2899,10
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 (25 mA cm <sup>-2</sup> )	4598,57	1299,60
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:1 (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	2299,29
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:2 (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	1399,57
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:4 (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	1699,47
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:8 (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	1399,57
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 (37,5 mA cm <sup>-2</sup> )	4598,57	1699,47
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:1 (50 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	2699,16
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:2 (50 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	499,85
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:4 (50 mA cm <sup>-2</sup> )	4198,70	1999,38
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:8 (50 mA cm <sup>-2</sup> )	3998,76	1299,60
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : [Cl <sup>-</sup> ] = 1:10 (50 mA cm <sup>-2</sup> )	4598,57	1999,38



Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur  
**LABORATORIUM PENGLIJIAN TERPADU**

Jl. Raya Rungkut Madya Gunung Anyar, Surabaya 60294. Telp. 031-8708286. E-Mail: [iptupnjatim@gmail.com](mailto:iptupnjatim@gmail.com)



**LAPORAN HASIL PENGLIJIAN**

Nomor : P/017/XII/2018

**Customer**

Nama : Dian Novitasari  
Alamat / Telp : Medayu Selatan IV /91 Rungkut Surabaya

**Sampel**

Jenis : Air Lindi (Dian Novitasari Tek Lingkungan ITS)  
Diterima Tanggal : 7 November 2018  
Diskripsi : Air lindi  
Tanggal Pengujian : 8 November 2018

**Hasil Pengujian**

No.	Kode Sampel	Parameter Uji	Satuan	Hasil	Metode / Alat
1.	R5t0	TKN	%	0.030	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
2.	R6t0	TKN	%	0.029	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
3.	R1t8	TKN	%	0.023	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
4.	R2t8	TKN	%	0.041	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
5.	R3t8	TKN	%	0.030	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
6.	R4t8	TKN	%	0.023	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
7.	R5t8	TKN	%	0.030	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
8.	R6t8	TKN	%	0.031	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
9.	R7t8	TKN	%	0.032	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)
10.	R8t8	TKN	%	0.023	LPT/No.20-02.8/IKP (Spectrofotometri)

TKN = Total Kandungan Nn

Diterbitkan di Surabaya  
Tanggal: 27 November 2018  
Reputi: Bidang Pengujian Hara dan Bioteknologi



Dr. Ir. Bekti Wisna Widjajani, M.P.  
NIP. 196310051987032001

Gambar LC.1 Hasil Analisis *Total Kjedral Nitrogen* (TKN) I



**LAPORAN HASIL PENGUJIAN**

Nomor : P/DIS/W/2019

**Customer**

Nama : DIAN NOVITASARI  
Alamat / Telp : MEDAYU SELATAN IV/SH RUNGKUT SURABAYA

**Sampel**

Jenis : TANAH  
Diterima Tanggal : 05 MARET 2019  
Diskripsi : SAMPEL DALAM KONDISI BAIK  
Tanggal Pengujian : 06 MARET 2019

**Hasil Pengujian**

No.	Kode Sampel	Parameter Uji	Hasil satuan (%) (ppm)		Metode Alat
1.	Kontrol TD	Total Kjeldhal Nitrogen	0,077	766,994	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)
2.	R9	Total Kjeldhal Nitrogen	0,070	701,347	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)
3.	R10	Total Kjeldhal Nitrogen	0,071	713,963	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)
4.	R11	Total Kjeldhal Nitrogen	0,080	803,006	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)
5.	R12	Total Kjeldhal Nitrogen	0,067	669,756	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)
6.	R13	Total Kjeldhal Nitrogen	0,068	684,085	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)
7.	R14	Total Kjeldhal Nitrogen	0,072	723,778	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)
8.	R15	Total Kjeldhal Nitrogen	0,069	690,459	LPT/No:20-02.3/KP (Kjeldhal Spectrofotometri)

Diterbitkan di Surabaya  
Tanggal : 26 APRIL 2019  
Deputi Bidang Pengujian Haras dan  
Bioteknologi



**Keterangan:**

1. Laboratorium tidak melakukan pengambilan sampel
2. Hasil uji hanya berlaku untuk sampel tersebut diatas
3. \*) di luar ruang lingkup akreditasi KAN

Gambar LC.2 Hasil Analisis *Total Kjeldhal Nitrogen* (TKN) II



## LAMPIRAN D

### PERHITUNGAN KEBUTUHAN PENAMBAHAN $\text{Na}_2\text{SO}_4$

- $\text{Cl}^-$  = 1999,375 mg/L
- $\text{SO}_4^{2-}$  = 539,2857 mg/L
- Mol  $\text{Cl}^-$  =  $\frac{1999,375 \times 10^{-2}}{35,5}$  = 0,05632 mol/L
- Mol  $\text{SO}_4^{2-}$  =  $\frac{539,2867 \times 10^{-2}}{96}$  = 0,0056175 mol/L
- **Perbandingan  $[\text{SO}_4^{2-}] : [\text{Cl}^-] \rightarrow 1:10$  (lindi asli)**

	Lindi asli (1:10)	1:1	1:2	1:4	1:8
$\text{SO}_4^{2-}$	1	10	5	2,5	1,25
$\text{Cl}^-$	10	10	10	10	10

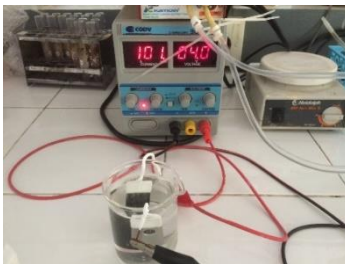
- **Mol  $\text{SO}_4^{2-}$  berdasarkan perbandingan:**
  - 1:1  $\rightarrow 10 \times 0,0056175 = 0,056175$  mol/L
  - 1:2  $\rightarrow 5 \times 0,0056175 = 0,0280375$  mol/L
  - 1:4  $\rightarrow 2,5 \times 0,0056175 = 0,01404$  mol/L
  - 1:8  $\rightarrow 1,25 \times 0,0056175 = 0,007821$  mol/L
  - 1:10  $\rightarrow 1 \times 0,0056175 = 0,0056175$  mol/L
- **Kebutuhan  $\text{SO}_4^{2-}$  untuk menentukan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ :**
  - 1:1  $\rightarrow 0,056175$  mol/L -  $0,0056175$  mol/L =  $0,0505$  mol/L
  - 1:2  $\rightarrow 0,0280375$  mol/L -  $0,0056175$  mol =  $0,02242$  mol/L
  - 1:4  $\rightarrow 0,01404$  mol/L -  $0,0056175$  mol =  $0,0084225$  mol/L
  - 1:8  $\rightarrow 0,007821$  mol/L -  $0,0056175$  mol/L =  $0,0014035$  mol/L
  - 1:10  $\rightarrow 0,0056175$  mol/L -  $0,0056175$  mol/L =  $0$  mol/L (tidak ada penambahan)
- **Kebutuhan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  untuk 1 Liter:**
  - 1:1  $\rightarrow 0,0505$  mol/L x 142 =  $7,171$  g/L
  - 1:2  $\rightarrow 0,02242$  mol/L x 142 =  $3,183$  g/L
  - 1:4  $\rightarrow 0,0084225$  mol/L x 142 =  $1,195$  g/L
  - 1:8  $\rightarrow 0,0014035$  mol/L x 142 =  $0,199$  g/L
  - 1:10  $\rightarrow 0$  mol/L x 142 =  $0$  g/L
- **Kebutuhan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  untuk 2,1 Liter:**
  - 1:1  $\rightarrow 7,171$  g/L x 2,1 L =  $15,05$  g
  - 1:2  $\rightarrow 3,183$  g/L x 2,1 L =  $6,684$  g
  - 1:4  $\rightarrow 1,195$  g/L x 2,1 L =  $2,5095$  g
  - 1:8  $\rightarrow 0,199$  g/L x 2,1 L =  $0,418$  g
  - 1:10  $\rightarrow 0$  g/L x 2,1 L =  $0$  g (tidak ada penambahan)

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## LAMPIRAN E DOKUMENTASI PENELITIAN



Gambar LD.1 Pengambilan Sampel di TPA Ngipik, Gresik



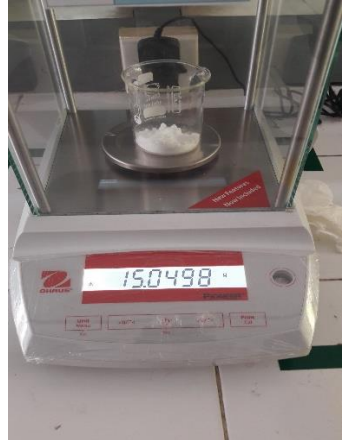
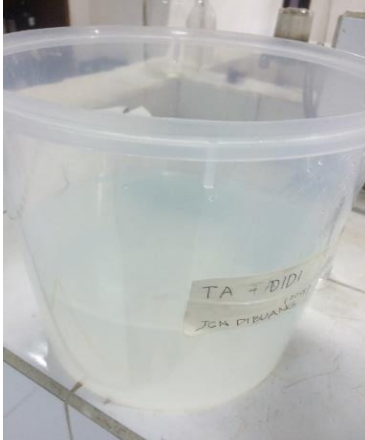
Gambar LD.2 Polarisasi Elektroda



Gambar LD.3 Preconditioning Membran



Gambar LD.4 Operasi Reaktor Elektrokimia



Gambar LD.5 Pembuatan Larutan Buffer Fosfat



Gambar LD.6 Sampel Sebelum dan Setelah Pengolahan Elektrokimia



(a)



(b)

Gambar LD.7 (a) Pengukuran TDS dan (b) Pengukuran pH



Gambar LD.8 Analisis COD



Gambar LD.9 Analisis Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ )



Gambar LD.10 Analisis Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ )



Gambar LD.11 Analisis  $\text{Cl}^-$



Gambar LD. 12 Analisis Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ )



Gambar LD.13 Analisis TKN

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## BIODATA PENULIS



Dian Novitasari dilahirkan di Surabaya pada tanggal 31 Desember 1996. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Al-Muslim, Sidoarjo pada Tahun 2003-2004, SDN Medokan Ayu II Surabaya pada Tahun 2004-2009, SMPN 17 Surabaya pada Tahun 2009-2012 dan SMAN 15 Surabaya pada Tahun 2012-2015. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 03211540000038.

Selama masa perkuliahan, penulis pernah aktif sebagai anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) pada tahun 2016-2018 sebagai Ketua Bidang Departemen Kesejahteraan Mahasiswa. Penulis juga pernah aktif di organisasi tingkat kampus sebagai anggota Paduan Suara Mahasiswa (PSM) pada tahun 2015. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Kimia Lingkungan I pada tahun 2017. Pada Tahun 2018, penulis mengikuti kerja praktik mengenai "Studi Pengelolaan Limbah B3" di PT. Pertamina Hulu *Energy West Madura Offshore*, Gresik. Apabila ingin mengetahui lebih dalam mengenai penelitian ini, dapat dihubungi via email [Diannovitasari98@gmail.com](mailto:Diannovitasari98@gmail.com).



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


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

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


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

Hari, tanggal : Selasa, 2 Juli 2019  
Pukul : 09.30-11.30  
Lokasi : TL-102  
Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) pad Lindi Terolah Secara Biologis  
Nama : Dian Novitasari  
NRP. : 03211540000038  
Topik : Penelitian

Nilai TOEFL 457

Tanda Tangan  
  
DIAN

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1	Highlight warna dijawab saja (pakek warna #)
2	Komposisi Cl dan SO <sub>4</sub> berlaku untuk lindi spt-apa?
3	Penjelasan & jam yg. dipkth? Hal. 57.
4	Bayueran → lqwan ABR alami 50% efisiensi removal
5	kalimat kesimpulan

 24/7

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 : Selasa, 2 Juli 2019  
Pukul : 09.30-11.30  
Lokasi : TL-102  
Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) pad Lindi Terolah Secara Biologis  
Nama : Dian Novitasari  
NRP. : 0321154000038  
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1 hal 93-95	Persepsi N lebih tinggi teroksidasi? Apa upaya yg. sudah hrs. dilakukan?
2	PH terus menurun dgn. waktu. Apa penyebab? Padahal buffer fosfat?
4	Apakah ada lisis $CO_2^-$ : $CO_2^-$ menyikat, resonansi $CO_2^-$ ?
5	Apakah ada penurunan radikal?
6	$Al^{3+}$ mana teroksidasi $\rightarrow CO_2$ ?
6	presipitat pd membran $\rightarrow$ fide maintenance.
*	Saran $\rightarrow$ lakukan dgn. rekomendasi. faktorial secara 2 arah?

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 asistansi kepada Dosen Penguji  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

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

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

(Handwritten signatures and initials)



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 : Selasa, 02 Juli 2019

Pukul : 09.00-10.30 WIB

Lokasi : TL-102

Judul :

Nama : Dian Novitasari

NRP. : 32111540000038

Topik :

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	Perbaiki kesimpulan agar lebih mudah dibaca.
2	Perbaiki kesimpulan baru sesuai dengan kontes disain yg harus misal
3	Waktu operasi dan waktu arus. Perbandingan $SO_4^{2-} : Cl^-$
4	Perhit utk debit pengenceran atau tdk? Berapa liter
5	Pemilihan nilai ga dan 75 perhari.
6	Berikan post treatment ini utk pengolah limbah dari TPA yg di deket pantai.

(1:9)  
- 25  
ncc  
16/7/19

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 S Pandebesie, MT.

Dosen Pembimbing Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, M.Phil, Ph.D.

*Almanis*

*(Ane)*



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

UTA-S1-TL-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 : Selasa, 2 Juli 2019  
Pukul : 09.30-11.30  
Lokasi : TL-102  
Judul : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) pad Lindi Terolah Secara Biologis  
Nama : Dian Novitasari  
NRP. : 0321154000038  
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Biaya yang dikeluarkan
2.	Elektro kinin, Elektrokatalisis, Elektro lisis & Elektrodialisis ✓
3.	Fungsi $Cl^-$ & $SO_4^{2-}$ dalam proses → sama ✓

↓  
27/7 2019  
AS

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 Alfan Purnomo, S.T., M.T

(  )

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

(  )



**FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR**

Nama : Dian Novitasari  
NRP : 0321154000038  
Judul Tugas Akhir : Oksidasi Elektrokimia dengan Menggunakan Anoda Beron-Doped Diamond (BDD) pada Lindi Terolah Secara Biologis

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1	Highlight warna dijelaskan saja	- Highlight warna sudah dihilangkan dan dijelaskan di keterangan bawah Tabel (hal. 95-98)
2	Komposisi Cl dan SO <sub>4</sub> berlaku untuk lindi seperti apa?	- Berlaku untuk lindi yang bersalinitas dan dekat dengan daerah pantai (hal-3)
3	Penjelasan 8 jam yang dipilih?	- Sudah dicantumkan % removal COD yang dihasilkan (hal-57)
4	Pengenceran → efluen ABR asumsi 50% efisiensi removal	- Disebutkan kandungan COD <sub>in</sub> dan COD <sub>ef</sub> setelah pengolahan biologis. (hal-55)
5	Kalimat kesimpulan	- Lebih diringkas dan telah ditambah nilai konsentrasi COD (hal-107)

Dosen Pembimbing,

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

Mahasiswa Ybs.,

Dian Novitasari

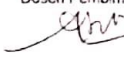


KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : DIAN NOVITASARI  
NRP : 03211540000038  
Judul Tugas Akhir : OKSIDASI ELEKTROKIMIA DENGAN MENGGUNAKAN ANODA BORON-DOPED DIAMOND(BDD) PADA LINDI TEROLAH SECARA BIOLOGIS

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	29 Oktober 2018	Diskusi penelitian pendahuluan, hasil uji karakteristik awal lindi	Ag
2	<del>29</del> 29 Februari 2019	Pembahasan COD, total anorganik-N.	Ag
2	29 Januari 2019	Pembahasan hasil penelitian pendahuluan dan utama (COD dan total anorganik-N), penulisan laporan diperbaiki	Ag
3	07 Januari 2019	Diskusi penulisan laporan tugas akhir, pembagian subab pembahasan	Ag
4	12 Maret 2019	Diskusi grafik $\text{HHA}^+$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_2^-$ , dan total-N. Pembahasan di tambah jurnal	Ag
5	22 Mei 2019	Diskusi Hasil revisi sidang progress	Ag
6	25 Juni 2019	Diskusi Hasil revisi Tugas Akhir. Pembahasan diagram alir, kebutuhan biaya	Ag
7	28 Juli 2019	Asistensi Tugas Akhir Lisan	Ag
8	24 Juli 2019	Asistensi Tugas Akhir (final)	Ag

Surabaya 29 Oktober 2018.  
Dosen Pembimbing

  
(Aneto Yekti Bogastya, S.T., M.T., M. Phil, Ph.D.)