



TUGAS AKHIR - RE 184804

**PROSES ELEKTROOKSIDASI MENGGUNAKAN ANODA
BORON DOPED DIAMOND (BDD) DAN DIMENSIONALLY
STABLE ANODE (DSA) UNTUK MENINGKATKAN INDEKS
BIODEGRADABILITAS LINDI**

**DEVIANI DWI HARTATIK
0321154000010**

**DOSEN PEMBIMBING:
ARSETO YEKTI BAGASTYO, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.**

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



TUGAS AKHIR - RE 184804

**PROSES ELEKTROOKSIDASI MENGGUNAKAN ANODA
BORON DOPED DIAMOND (BDD) DAN *DIMENSIONALLY
STABLE ANODE (DSA)* UNTUK MENINGKATKAN INDEKS
BIODEGRADABILITAS LINDI**

**DEVIANI DWI HARTATIK
0321154000010**

**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

**ELECTROOXIDATION PROCESS USING BORON-DOPED
DIAMOND (BDD) AND DIMENSIONALLY STABLE ANODE
(DSA) TO INCREASE BIODEGRADABILITY INDEX OF
LANDFILL LEACHATE**

DEVIANI DWI HARTATIK
0321154000010

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

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

LEMBAR PENGESAHAN

**PROSES ELEKTROOKSIDASI MENGGUNAKAN ANODA
BORON DOPED DIAMOND (BDD) DAN DIMENSIONALLY
STABLE ANODE (DSA) UNTUK MENINGKATKAN INDEKS
BIODEGRADABILITAS LINDI**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh:

DEVIANI DWI HARTATIK
NRP. 0321154000010

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



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



PROSES ELEKTROOKSIDASI MENGGUNAKAN ANODA *BORON DOPED DIAMOND* (BDD) DAN *DIMENSIONALLY STABLE ANODE* (DSA) UNTUK MENINGKATKAN INDEKS BIODEGRADABILITAS LINDI

Nama : Deviani Dwi Hartatik
NRP : 0321 540 000 010
Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M. Phil., Ph.D.

ABSTRAK

Pengolahan lindi TPA Ngipik dengan proses biologis berupa *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) sulit menurunkan polutan organik *recalcitrant*. Akibatnya effluen yang dihasilkan masih belum memenuhi baku mutu. Oleh karena itu, diperlukan *pre-treatment* untuk menurunkan polutan organik tersebut. Metode fisik-kimia berupa elektrooksidasi merupakan alternatif pengolahan awal yang tepat karena memiliki efisiensi tinggi. Proses elektrooksidasi dipengaruhi oleh kerapatan arus, pH serta jenis elektroda. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi kerapatan arus dan volume efektif reaktor terhadap efisiensi proses elektrooksidasi lindi dengan anoda *boron-doped diamond* (BDD) dan *dimensionally stable anode* (DSA). Efisiensi dari proses ini dinilai berdasarkan peningkatan rasio konsentrasi BOD₅/COD (indeks biodegradabilitas) dan konsumsi energi spesifik.

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan reaktor elektrooksidasi yang terbuat dari akrilik dengan volume efektif 80 mL. Anoda yang digunakan yaitu *boron-doped diamond* (8 cm²) dan *dimensionally stable anode* (6 cm²) serta katoda *stainless steel* dengan luas yang sama. Sistem yang digunakan yaitu sistem *batch recirculation*, waktu operasi 4 jam dengan pengkondisian pH 3 dan penambahan 0,05 M NaCl. Penelitian ini terdiri dari penelitian pendahuluan dan penelitian utama. Pada penelitian pendahuluan dilakukan uji karakteristik awal lindi dan penentuan debit operasional reaktor. Pada penelitian utama dilakukan variasi volume efektif reaktor (1/12,5, 1/18,75 dan 1/25) dan variasi kerapatan arus (10 mA cm⁻², 30 mA cm⁻² dan 50 mA cm⁻²). Parameter yang dianalisis meliputi

COD, BOD₅, rasio BOD₅/COD serta dilakukan monitoring terhadap pH, TDS dan Cl⁻.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa target peningkatan indeks biodegradabilitas telah tercapai. Indeks biodegradabilitas sebesar 0,5792 (8 kali lipat) dicapai oleh anoda *boron-doped diamond* (BDD) pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dan rasio volume efektif 1/12,5. Pada kerapatan arus dan rasio volume efektif yang sama setelah 15 menit operasional reaktor tercapai penyisihan massa COD sebesar 48% (0,72 g) dengan konsumsi energi spesifik 0,0004 kWh g⁻¹.

Kata Kunci: Biodegradabilitas, *boron-doped diamond*, *dimensionally stable anode*, elektrooksidasi, lindi

ELECTROOXIDATION PROCESS USING *BORON DOPED DIAMOND (BDD) ANODE AND DIMENSIONALLY STABLE ANODE (DSA)* TO INCREASE BIODEGRADABILITY INDEX

Name : Deviani Dwi Hartatik
Register Number : 0321 540 000 010
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M. Phil., Ph.D.

ABSTRACT

Leachate treatment at Ngipik Landfill with the biological process of Anaerobic Baffled Reactor (ABR) is difficult to reduce recalcitrant organic pollutants. As a result, the effluent produced does not comply with the quality standard. Therefore, a pre-treatment is required. The physico-chemical method such as electrooxidation is an appropriate pre-treatment alternative because it has high efficiency in removing such pollutants. The efficiency of electrooxidation process is influenced by pH, electrode type, and current density. The purpose of this study was to examine the effect of current density and reactor effective volume ratio on the efficiency of leachate electrooxidation process using boron-doped diamond (BDD) anodes and dimensionally stable anode (DSA). The efficiency of the process is assessed based on the enhancement of BOD₅/COD ratio (biodegradability index) and the specific energy consumption.

This research was carried out on a laboratory scale using an electrooxidation reactor made of acrylic with an effective volume of 80 mL. The anodes used were BDD (8 cm²) and DSA (6 cm²) while the cathode was stainless steel with the same area. The system was run in a batch recirculation mode with 4 hour-operation time. The initial pH was set to 3, and 0.05 M NaCl was added as the supporting electrolyte. This research consists of preliminary research and main research. In the preliminary step, the initial leachate characteristics were analyzed and the operational flow rate was determined. The main study evaluate the effect of effective volume ratio (1/12.5, 1 / 18.75, and 1/25) and current density (10, 30, and 50 mA cm⁻²). The parameters analyzed were

COD, BOD₅, and BOD₅/COD ratio. Besides, pH, TDS, and Cl⁻ were monitored.

The results showed that the highest increase in the biodegradability index of leachate (up to 0.5792 or 8 times higher) was achieved by BDD anode at current density of 30 mA cm⁻² with an effective volume ratio of 1/12.5. Under the same operational condition the best removal efficiency of COD was also achieved (48%, 0.72 g) with specific energy consumption 0.0004 kWh g⁻¹ after 15 minutes operation.

Keywords: Biodegradability, boron-doped diamond, dimensionally stable anode, electrooxidation, leachate

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Proses Elektrooksidasi Menggunakan Anoda Boron-Doped Diamond (BDD) dan Dimensionally Stable Anode (DSA) untuk Meningkatkan Indeks Biodegradabilitas Lindi”**. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan pada program Strata 1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan laporan ini dapat terlaksana dengan baik berkat dukungan dari banyak pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo S.T.,MT.,M.Phil.,Ph.D. selaku dosen pembimbing dan ibu Ervin Nurhayati, ST.,MT.,Ph.D, selaku dosen co-pembimbing tugas akhir, terima kasih atas arahan, bimbingan, ilmu dan motivasi yang diberikan selama ini.
2. Ibu Dr.Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, M.T., Ibu Prof.Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc. dan Bapak Alfan Purnomo, ST.,MT. Selaku dosen pengarah, terima kasih atas saran, arahan dan bimbingan yang telah diberikan.
3. Bapak Welly Herumurti, ST., M.Sc selaku dosen koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Lingkungan FTSLK.
4. Bapak Hadi, Bapak Ashari, ibu lin dan ibu Mery selaku laboran Laboratorium Departemen Teknik Lingkungan FTSLK, terima kasih atas ilmu, arahan kerja dan bantuan yang diberikan selama berada di laboratorium.
5. Pemerintah Kabupaten Gresik dan pengelola Tempat Pemrosesan Akhir Ngipik, Gresik, Jawa Timur.
6. Ibu dan saudara penulis, atas segala dukungan doa, motivasi yang diberikan selama ini.
7. Teman-teman angkatan 2015 Teknik Lingkungan ITS atas dukungan dan motivasi yang telah diberikan selama ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga penulis dapat menjadi lebih baik. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2019
Penulis

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 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pengertian Lindi.....	5
2.2 Karakteristik Lindi	5
2.2.1 Karakteristik Lindi Secara Umum	5
2.2.2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik.....	6
2.2.3 Karakteristik Lindi di Indonesia.....	6
2.2.4 Baku Mutu Lindi di Indonesia	7
2.3 Dampak Lindi Terhadap Lingkungan.....	7
2.4 Pengolahan Biologis	8
2.5 Pengolahan Fisik Kimia	9
2.6 Teknologi Elektrooksidasi.....	11
2.6.1 Oksidasi Langsung	13
2.6.2 Oksidasi Tidak Langsung	14

2.7	Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrooksidasi	15
2.7.1	Jenis Elektroda	15
2.7.2	pH.....	19
2.7.3	Kerapatan Arus.....	20
2.7.4	Debit Aliran	23
2.7.5	Penambahan Elektrolit	23
2.8	Penelitian Terdahulu.....	24
BAB 3 METODE PENELITIAN		27
3.1	Deskripsi Umum	27
3.2	Kerangka Penelitian	27
3.2.1	Ide Penelitian	27
3.2.2	Penentuan Variabel dan Parameter	30
3.2.3	Studi Literatur	32
3.2.4	Persiapan Penelitian.....	33
3.2.5	Penelitian Pendahuluan.....	37
3.2.6	Penelitian Utama	38
3.2.7	Analisis dan Pembahasan	39
3.2.8	Kesimpulan dan Saran	39
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Penelitian Pendahuluan.....	41
4.2	Penelitian Utama	49
4.2.1	Penyisihan COD pada Anoda BDD	51
4.2.2	Penyisihan COD pada Anoda DSA	56
4.2.3	Perubahan BOD pada Anoda BDD	61
4.2.4	Perubahan BOD pada Anoda DSA	66
4.2.5	Perubahan Rasio BOD ₅ /COD.....	70
4.2.6	Hubungan Perubahan COD dan BOD	82

4.2.7 Kondisi pH,TDS dan Ion Klorida Selama Penelitian...	89
4.2.8 Aplikasi Proses Elektrooksidasi pada Pengolahan Lindi Sebelum Pengolahan Biologis.....	92
4.3 Kebutuhan Energi Spesifik Selama Proses Elektrooksidasi.....	97
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	103
5.1 Kesimpulan	103
5.2 Saran	103
DAFTAR PUSTAKA.....	105
LAMPIRAN A	115
LAMPIRAN B	117
LAMPIRAN C	125
LAMPIRAN D	143
BIODATA PENULIS.....	149

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.3 Karakteristik Lindi dari Berbagai Wilayah TPA di Indonesia	6
Tabel 2.4 Baku Mutu Lindi di Indonesia	7
Tabel 2.5 Kelebihan dan Kekurangan Pengolahan Lindi Secara Biologis	8
Tabel 2.6 Kelebihan dan Kekurangan Pengolahan Lindi Secara Fisik Kimia	10
Tabel 2.7 Kekuatan Oksidasi Anoda pada Media Asam	16
Tabel 2.8 Kelebihan dan Kekurangan Anoda BDD dan Anoda DSA (Ti/IrO ₂)	18
Tabel 2. 9 Penelitian Terdahulu.....	24
Tabel 3. 1 Metode Analisis Setiap Parameter.....	31
Tabel 3. 2 Kebutuhan, Titik dan Pengambilan Sampel	32
Tabel 3. 3 Matriks Variasi Bahan uji Penelitian	38
Tabel 4. 1 Hasil Uji Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik.....	41
Tabel 4. 2 Rasio BOD ₅ /COD Terbesar Anoda BDD.....	78
Tabel 4. 3 Rasio BOD ₅ /COD Terbesar Anoda DSA.....	79
Tabel 4. 4 Peningkatan Rasio BOD ₅ /COD Tertinggi terhadap Rasio BOD ₅ /COD Awal Anoda DSA	80
Tabel 4. 5 Peningkatan Rasio BOD ₅ /COD Tertinggi terhadap Rasio BOD ₅ /COD awal Anoda BDD	80
Tabel 4. 6 Konsumsi Energi Spesifik Anoda DSA.....	97
Tabel 4. 7 Konsumsi Energi Spesifik Anoda BDD.....	98
Tabel 4. 8 Analisis Kebutuhan Bahan Kimia Anoda BDD dan DSA pada Penyisihan massa COD terbesar	101
Tabel 4. 10 Harga Bahan Kimia	101
Tabel 4. 11 Kebutuhan Biaya Elektrooksidasi Anoda BDD dan DSA pada penyisihan massa COD terbesar.....	101
Tabel LC. 1 Penyisihan Massa COD Debit 5 mL s ⁻¹	125
Tabel LC. 2 Penyisihan Massa COD Debit 5 mL s ⁻¹	125
Tabel LC.3 Pengaruh Debit Operasional terhadap Perubahan BOD ₅ Anoda DSA	126
Tabel LC.4 Pengaruh Debit Operasional terhadap Perubahan BOD ₅ Anoda BDD	126

Tabel LC. 5 Perubahan BOD ₅ /COD selama proses elektroosidasi anoda DSA	127
Tabel LC. 6 Perubahan BOD ₅ /COD selama proses elektroosidasi anoda BDD	127
Tabel LC. 7 Penyisihan TDS pada Penelitian Pendahuluan....	128
Tabel LC. 8 Perubahan pH pada Penelitian Pendahuluan	128
Tabel LC. 9 Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)	129
Tabel LC. 10 Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)	129
Tabel LC. 11 Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)	130
Tabel LC. 12 Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)	130
Tabel LC. 13 Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)	131
Tabel LC. 14 Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)	131
Tabel LC. 15 Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)	132
Tabel LC. 16 Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)	132
Tabel LC. 17 Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)	133
Tabel LC. 18 Penyisihan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)	133
Tabel LC. 19 Penyisihan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)	134
Tabel LC. 20 Penyisihan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)	134
Tabel LC. 21 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)	135
Tabel LC. 22 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75(80 mL/1500 mL)	135
Tabel LC. 23 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25(80 mL/2000 mL)	136

Tabel LC. 24 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5(80 mL/1000 mL)	136
Tabel LC. 25 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75(80 mL/1500 mL)	137
Tabel LC. 26 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL).....	137
Tabel LC. 27 Selisih Massa COD dan BOD Anoda DSA	138
Tabel LC. 28 Selisih Massa COD dan BOD Anoda BDD.....	139
Tabel LC. 29 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL).....	140
Tabel LC. 30 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL).....	140
Tabel LC. 31 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL).....	141
Tabel LC. 32 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL).....	141
Tabel LC. 33 Kondisi pH dan TDS Selama Proses Elektrolisis Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)	142
Tabel LC. 34 Kondisi pH dan TDS Selama Proses Elektrolisis Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)	142

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Proses Elektrolisis	11
Gambar 2.2 Oksidasi langsung dan tidak langsung	13
Gambar 2.3 (a) Anoda Aktif dan (b) Anoda Non Aktif	14
Gambar 2.4 Pengaruh pH selama Elektrooksidasi	19
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	29
Gambar 3. 2 Reaktor Elektrokimia	34
Gambar 3. 3 Skema operasional Reaktor Elektrokimia	34
Gambar 4. 1 Pengaruh Debit Operasional terhadap Penurunan [COD/COD ₀]Anoda DSA.....	43
Gambar 4.2 Pengaruh Debit Operasional terhadap Penurunan [COD/COD ₀] Anoda BDD	44
Gambar 4.3 Pengaruh Debit Operasional terhadap Perubahan BOD ₅ Anoda DSA	45
Gambar 4.4 Pengaruh Debit Operasional terhadap Penyisihan BOD ₅ Anoda BDD	46
Gambar 4.5 Perubahan BOD ₅ /COD selama proses elektrooksidasi	47
Gambar 4.6 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5	51
Gambar 4.7 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75	52
Gambar 4.8 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25	53
Gambar 4.9 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5	56
Gambar 4.10 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75	57
Gambar 4.11 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25	58
Gambar 4.12 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5	61
Gambar 4.13 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75	63
Gambar 4.14 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25	64

Gambar 4.15 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5	66
Gambar 4.16 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75	67
Gambar 4.17 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25	68
Gambar 4.18 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5	71
Gambar 4.19 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75	72
Gambar 4.20 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25	73
Gambar 4.21 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5	75
Gambar 4.22 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75	76
Gambar 4.23 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25	77
Gambar 4.24 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda BDD Rasio 1/12,5 Kerapatan arus optimum 30 mA cm ⁻²	82
Gambar 4.25 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda BDD Rasio 1/18,75 Kerapatan arus optimum 30 mA cm ⁻²	84
Gambar 4.26 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda BDD Rasio 1/25 Kerapatan arus optimum 30 mA cm ⁻²	85
Gambar 4.27 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda DSA Rasio 1/12,5 Kerapatan arus optimum 30 mA cm ⁻²	86
Gambar 4.28 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda DSA Rasio 1/18,75 Kerapatan arus optimum 30 mA cm ⁻²	87
Gambar 4.29 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda DSA Rasio 1/25 Kerapatan arus optimum 30 mA cm ⁻²	88
Gambar 4. 30 Diagram Alir Pengolahan Lindi.....	95

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengolahan lindi secara biologis banyak dipilih karena sistemnya mudah diterapkan dan tidak membutuhkan biaya yang besar (Renou *et al.*, 2008). Pengolahan secara biologis merupakan proses biodegradasi polutan oleh mikroorganisme. Proses ini terbagi menjadi proses aerobik dan proses anaerobik (Wu *et al.*, 2004). Pada proses aerobik polutan dalam lindi diubah menjadi CO₂ dan lumpur sedangkan pada proses anaerobik diubah menjadi biogas (Renou *et al.*, 2008). Pengolahan secara biologis sangat efektif untuk menghilangkan komponen organik dan zat nitrogen pada lindi ketika rasio BOD₅/COD > 0,5 (Vilar *et al.*, 2011). Menurut Alvarez-Vazquez *et al.* (2004), klasifikasi lindi terbagi atas lindi muda dengan usia kurang dari 5 tahun, lindi *intermediate* usia 5-10 tahun dan lindi terstabilisasi berusia lebih dari 10 tahun. Rasio BOD₅/COD pada lindi muda yaitu 0,5-1 sedangkan pada lindi *intermediate* dan lindi terstabilisasi memiliki rasio BOD₅/COD kurang dari 0,5. Rasio BOD₅/COD yang rendah menunjukkan tingginya molekul organik *recalcitrant* dalam lindi (Renou *et al.*, 2008). Rendahnya rasio BOD₅/COD menandakan pengolahan secara biologis kurang efektif untuk mendegradasi polutan dalam lindi *intermediate* dan terstabilisasi. Maka, perlu adanya pengolahan pendahuluan dalam memecah senyawa *recalcitrant* menjadi senyawa yang lebih sederhana dan *biodegradable*. Hal ini akan meningkatkan efisiensi dari pengolahan biologis (Rezagama dan Notodarmojo, 2012).

Pengolahan lindi secara fisik-kimia merupakan salah satu alternatif yang dapat dipilih untuk mengolah lindi tua. Pengolahan ini mampu menyisihkan senyawa *recalcitrant* dalam lindi (Kurniawan *et al.*, 2006). Proses fisik kimia mampu menyisihkan bahan organik tersuspensi, partikel koloid, ataupun material terlarut dalam lindi. Contoh pengolahan lindi secara fisik-kimia yang sering diterapkan yaitu flotasi, koagulasi dan flokulasi, adsorpsi, oksidasi kimia dan *air stripping*. Proses oksidasi kimia contohnya yaitu pengolahan secara elektrokodisasi, Fenton dan ozonasi. Pengolahan dengan ozonasi pada proses *tertiary treatment* efektif untuk menyisihkan COD sebesar 45 % (Amaral-

silva., 2016). Sedangkan proses Fenton mampu menyisihkan COD pada lindi hingga 89% (Renou *et al.*, 2008). Proses pengolahan lindi secara elektrok oksidasi memanfaatkan proses reaksi reduksi-oksidas i (redoks) dalam suatu larutan dengan memanfaatkan sumber energi listrik untuk melangsungkan reaksi kimia tersebut (Harahap, 2016). Keuntungan dari proses elektrok oksidasi mampu menurunkan kandungan organik, menghilangkan warna, serta meningkatkan biodegradabilitas lindi (Fernandes *et al.*, 2015). Selain itu proses ini mampu untuk menghilangkan polutan terutama komponen senyawa *recalcitrant* dengan penyisihan yang tinggi (Cabeza *et al.*, 2007). Elektrok oksidasi banyak digunakan untuk oksidasi beragam polutan *recalcitrant* seperti fenol, surfaktan, limbah tekstil serta lindi. Sehingga proses elektrok oksidasi berpotensi digunakan untuk pra pengolahan lindi sebelum diolah secara biologis.

Efektivitas proses elektrok oksidasi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain jenis anoda, pH, kerapatan arus, volume efektif reaktor, debit operasional, jarak antar elektroda serta penambahan elektrolit. Menurut Fernandes *et al.* (2014 b), elektrok oksidasi dengan anoda *boron doped diamond* dan katoda *stainless steel* pada kondisi kerapatan arus 30 mA cm⁻² pH 3, volume reaktor 200 mL, debit operasional 1-1,5 mL/detik serta jarak elektroda 2 cm mampu menyisihkan COD sebesar 56%. Selain itu menurut penelitian oleh Agustina (2018), proses elektrok oksidasi dengan anoda BDD dan katoda silver pada penambahan 0,05 M NaCl dan pH 3, kerapatan arus 50 mA cm⁻² terjadi penyisihan COD tertinggi serta peningkatan rasio BOD₅/COD dari 0,372 menjadi 0,483. Melalui kombinasi proses elektrok oksidasi dan elektrodialisis pada kerapatan arus 25 mA cm⁻² dan penambahan 2 gram NaCl mampu meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,0411 menjadi 0,2 (Sari, 2017). Proses elektrok oksidasi sebagai *pre-treatment* sebelum pengolahan biologis efektif untuk meningkatkan penyisihan COD (nilai COD 500 mg/l) hingga 99% dengan waktu pengoperasian 1 jam pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² (Garcia-Morales *et al.*, 2013). Pada penelitian ini digunakan pH 3 dan penambahan 0,05 M NaCl dengan variasi terhadap kerapatan arus dan rasio volume efektif reaktor.

Jenis anoda menjadi pertimbangan penting untuk keberlangsungan proses elektrok oksidasi. Berbagai macam jenis anoda baik yang bersifat aktif (grafit, platinum, IrO₂, RuO₂, PbO₂, DSA) maupun non aktif (PbO₂, SnO₂ dan *boron –doped diamond*) telah banyak digunakan (Li *et al.*, 2016). Anoda aktif (DSA) memiliki kemampuan oksidasi organik lebih rendah dibandingkan anoda non aktif (BDD). Hal ini karena di permukaan anoda aktif oksigen bersifat aktif terbentuk akan terserap secara kimiawi. Sedangkan di permukaan anoda non aktif akan terserap secara fisika. Oksigen aktif ini berfungsi sebagai oksidan untuk memecah senyawa kompleks menjadi senyawa lebih sederhana. Oksigen aktif yang terserap secara fisika akan lebih reaktif dibandingkan yang terserap secara kimiawi (Garcia-Segura *et al.*, 2018). Studi ini akan meneliti pengaruh jenis anoda yang digunakan dalam proses elektrok oksidasi untuk meningkatkan bioderabilitas lindi.

Tempat pemrosesan akhir Ngipik Gresik merupakan salah satu TPA yang menghasilkan lindi terstabilisasi yang disebut juga sebagai lindi tua. Karakteristik utama lindi yang telah berusia tua yaitu memiliki konsentrasi amonia yang tinggi dan mengandung senyawa organik dan amonium dengan konsentrasi tinggi (Yu *et al.*, 2014). Selain itu lindi juga mengandung logam berat dan garam anorganik (Renou *et al.*, 2008). Karakteristik lindi yang memiliki konsentrasi amonium tinggi bersifat toksik terhadap pengolahan biologis (Tatsi *et al.*, 2003). Pengolahan lindi secara biologis pada TPA Ngipik Gresik menggunakan anaerobik baffled reactor (ABR). Waktu pengolahan yang diperlukan minimal 1 hari, kurang efektif dalam removal COD (5-20%) terutama senyawa *recalcitrant* (Wang dan Shen, 2000).

Melalui penelitian proses elektrok oksidasi dengan anoda *boron doped diamond* (BDD) dan *dimensionally stable anode* (DSA) digunakan sebagai pra-pengolahan lindi untuk meningkatkan indeks biodegradabilitas lindi. Lindi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan lindi yang ditampung sebelum pengolahan biologis TPA Ngipik Gresik. Katoda yang digunakan yaitu *stainless steel*. Diharapkan melalui penelitian ini dapat memberikan rekomendasi alternatif pra-pengolahan lindi untuk TPA Ngipik Gresik maupun TPA lain dengan karakteristik lindi yang sama.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi operasional proses elektooksidasi yang optimum terhadap peningkatan biodegradabilitas lindi ?
2. Bagaimana pengaruh jenis elektroda terhadap proses elektooksidasi ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menentukan pengaruh variasi kerapatan arus dan rasio volume efektif terhadap peningkatan indeks biodegradabilitas lindi.
2. Menentukan pengaruh jenis elektroda terhadap penyisihan COD pada proses elektooksidasi.

1.4 Ruang Lingkup

1. Sampel yang digunakan yaitu lindi dari TPA Ngipik Gresik
2. Penelitian ini menggunakan anoda *boron-doped diamond* (BDD), *dimensionally stable anode* (DSA) dan katoda *stainless steel*.
3. Variabel dalam penelitian ini adalah kerapatan arus dan rasio volume efektif reaktor.
4. Parameter yang diukur adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD₅), rasio BOD₅/COD, TDS, pH serta Cl⁻.
5. Pembuatan reaktor penelitian dilakukan dalam skala laboratorium.
6. Reaktor yang digunakan adalah reaktor satu kompartemen (*undivided cell*) dengan sistem *batch recirculation*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Sebagai informasi mengenai efektifitas proses elektooksidasi dengan menggunakan anoda *boron-doped diamond* (BDD) dan *dimensionally stable anode* (DSA) untuk pengolahan lindi.
2. Sebagai informasi mengenai alternatif pra- pengolahan lindi di TPA Ngipik Gresik

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Lindi

Lindi merupakan cairan yang terbentuk dari meresapnya air kedalam timbunan sampah kemudian membilas dan melarutkan materi kimiawi maupun biologis yang terdapat dalam timbunan sampah (Alfiandy, 2003). Air yang meresap dalam lindi berasal dari air hujan, infiltrasi air tanah maupun air dari saluran drainase (Wu *et al.*, 2004). Air lindi pada umumnya memiliki ciri berupa cairan berwarna hitam, berbau menyengat dan mengandung zat organik dan anorganik tinggi. Air lindi memiliki sifat toksik sehingga berpotensi dapat menimbulkan pencemaran lingkungan terutama pencemaran air tanah (Mahardika *et al.*, 2010).

2.2 Karakteristik Lindi

2.2.1 Karakteristik Lindi Secara Umum

Landfill memiliki sifat yang kompleks sesuai dengan kandungan kimia dan biologi didalamnya. Selain itu *landfill* dipengaruhi dengan tipe *landfill*, kondisi lingkungan, musim, umur *landfill*, operasional *landfill* serta proses biodegradasi oleh mikroorganisme yang terdapat dalam *landfill* (El-Fadel *et al.*, 2002). Karena setiap *landfill* memiliki karakteristik yang berbeda-beda maka diperlukan pembagian *landfill* sesuai parameter yang ada didalamnya. Berikut klasifikasi lindi berdasarkan umur *landfill* dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Klasifikasi Lindi Berdasarkan Umur *Landfill*

karakteristik	<i>young</i>	<i>intermediate</i>	<i>Stabilized</i>
Umur (tahun)	Kurang dari 5	5 – 10	lebih dari 10
pH	Kurang dari 6,5	6,5-7,5	Lebih dari 7,5
<i>Biodegradability</i>	Tinggi	Sedang	rendah
Ammonia nitrogen(mg L ⁻¹)	Kurang dari 400	-	Lebih dari 400
Logam Berat	Rendah - sedang	Rendah	rendah
BOD ₅ /COD	0,5-1	0,1-0,5	Kurang dari 0,1
COD (mg L ⁻¹)	Lebih dari 10.000	4.000-10.000	Kurang dari 4000

Sumber : Alvarez-Vazquez *et al.*, (2004)

Lindi yang berumur muda pada umumnya memiliki kadar BOD yang tinggi ($4000-13000 \text{ mg L}^{-1}$) dan COD yang tinggi pula ($30.000-60.000 \text{ mg L}^{-1}$), rasio BOD_5/COD antara $0,4-0,7$ dan pH serendah-rendahnya 4 (Wu *et al.*, 2004). kandungan senyawa *recalcitrant* yang tinggi sebanding dengan tingginya kandungan ammonia nitrogen ($2000-5000 \text{ mg L}^{-1}$) dalam *landfill* disertai rendahnya rasio BOD_5/COD kurang dari 1 (Li *et al.*,1999).

2.2.2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik

Lindi yang dihasilkan dari TPA Ngipik Gresik merupakan jenis lindi usia tua karena TPA Ngipik Gresik sudah beroperasi lebih dari 10 tahun (Sari, 2017). Karakteristik lindi TPA Ngipik Gresik dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik

Parameter	Unit	Konsentrasi
pH		8,5
TDS	mS cm^{-1}	10,74
COD	$\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$	2040
Cl^-	Mg L^{-1}	1400
NH_4^+	Mg L^{-1}	535
SO_4^{2-}	Mg L^{-1}	40,58
BOD_5	$\text{Mg O}_2 \text{ L}^{-1}$	350
BOD_5/COD		0,171

Sumber: Fatmawati, (2018)

2.2.3 Karakteristik Lindi di Indonesia

Karakteristik lindi dari berbagai wilayah Indonesia cenderung memiliki nilai pH yang netral (tidak asam) dengan kadar COD dan BOD tinggi. Karakteristik lindi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Karakteristik Lindi dari Berbagai Wilayah TPA di Indonesia

Parameter	TPA Sarimukti [1]	TPA Air Dingin [2]	TPA Kaliwringli [3]	TPA Ngipik [4]	TPA Benowo [5]
pH	8,1	7,4	7,6	8,36	6,38
COD (mg/l)	1983	345,8	9679,7	7062	2000
BOD (mg/l)	303	173,6	90,7	601	900

Lanjutan Tabel 2.3

Parameter	TPA Sarimukti [1]	TPA Air Dingin [2]	TPA Kaliwingsi [3]	TPA Ngipik [4]	TPA Benowo [5]
Rasio BOD/COD	0,153	0,502	0,01	0,085	0,45
N-NH ₃ (mg/l)	591,5	-	134,4	-	-
TKN (mg/l)	1316	-	672,5	-	-

Sumber : [1] Rezagama *et al.*, 2012

[2] Sari dan Afdal, 2017

[3] Purwanta dan Susanto, 2017

[4] Sari, 2017 [5] Azizah, 2010

2.2.4 Baku Mutu Lindi di Indonesia

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 setiap usaha dan atau kegiatan TPA wajib melakukan pengelolaan lindi. Pengelolaan lindi tersebut dilakukan sesuai baku mutu dalam Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Baku Mutu Lindi di Indonesia

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

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

2.3 Dampak Lindi Terhadap Lingkungan

Polutan yang bersifat toksik seperti halogen organik bersifat adsorptif (AOX), logam berat dan senyawa xenobiotik, ammonia nitrogen hasil dekomposisi nitrogen organik merupakan polutan

yang membutuhkan waktu lama untuk didegradasi (Ernst *et al.*, 1999). Ammonia nitrogen merupakan senyawa utama yang menyebabkan tingginya kandungan toksisitas dalam lindi, hal ini terjadi karena ammonia nitrogen memiliki sifat stabil dalam kondisi anaerobik didalam landfill sehingga mudah terakumulasi dalam lindi (Baun *et al.*, 1999). Konsentrasi ammonium nitrogen yang lebih besar dari 100 mg L⁻¹ sangat toksik terhadap organisme air (Ernst *et al.*, 1999). Air lindi yang meresap kedalam tanah maupun air tanah dapat menyebar luas dan menimbulkan pencemaran terhadap lingkungan (Kurniawan *et al.*, 2006).

2.4 Pengolahan Biologis

Pengolahan secara biologis merupakan proses biodegradasi polutan oleh mikroorganisme. Proses ini terbagi atas proses aerobik dan proses anaerobik (Wu *et al.*, 2004). Pada saat proses aerobik polutan lindi diubah menjadi CO₂ dan lumpur sedangkan pada proses anaerobik polutan lindi diubah menjadi biogas. Proses biologis banyak dipilih karena sistemnya mudah diterapkan dan tidak membutuhkan biaya yang besar. Tetapi proses ini juga memiliki kerugian yaitu sulit untuk menghilangkan senyawa *recalcitrant* yang terdiri dari asam fulvat dan asam humat (Renou *et al.*, 2008). Kandungan senyawa tersebut mengakibatkan tingkat biodegradabilitas pada lindi menjadi rendah sehingga kurang efektif untuk diolah secara biologis (Yu *et al.*, 2014). Pada Tabel 2.5 disajikan kelebihan dan kekurangan dari beberapa pengolahan lindi secara biologis.

Tabel 2.5 Kelebihan dan Kekurangan Pengolahan Lindi Secara Biologis

Proses	Keunggulan	Kelemahan	sumber
<i>Moving Bed Reactor</i> (MBBR)	meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,33 menjadi 0,45	waktu operasional minimal 2 hari , removal COD rendah yaitu 31,2 %,kurang efektif sebagai single pre-treatment	EI-Gohary & kamel 2016
<i>Aerated Lagoon</i>	Removal COD mencapai 90%	membutuhkan area yang luas	Frasdari <i>et al.</i> , 2004

Lanjutan Tabel 2.5

Proses	Keunggulan	Kelemahan	sumber
Anaerobik Baffled Reactor(ABR)	meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,15-0,3 menjadi 0,4-0,6 dari lindi <i>medium-old</i> dengan penambahan lumpur aktif pada tiap kompartemen	waktu pengolahan minimal 1 hari, kurang efektif dalam removal COD (5-20%) terutama senyawa <i>recalcitrant</i>	Wang dan Shen, 2000
Anaerobik dan Aerobik Biofilter	menurunkan COD sebesar 90,16%	membutuhkan waktu tinggal yang lama yaitu 8 hari untuk reaktor anaerobik dan 3 hari untuk reaktor aerobik, membutuhkan banyak energi untuk <i>suplay</i> oksigen dan biaya operasional tinggi, kurang efektif untuk menyisihkan BOD dengan konsentrasi tinggi >3000 mg/l	Said dan Hartaja, 2015

2.5 Pengolahan Fisik Kimia

Pengolahan secara fisik kimia dapat digunakan pada proses pra- pengolahan lindi, pasca-pengolahan lindi ataupun untuk menyisihkan polutan khusus seperti ammonia. Proses fisik kimia terdiri atas reduksi bahan organik tersuspensi, partikel koloid, warna ataupun material yang bersifat toksik dalam lindi (Renou *et al.*, 2008). Pengolahan secara fisik-kimia terbagi atas koagulasi-flokulasi (Zouboulis *et al.*, 2004), Fenton (Tamas, 2017), *electrooxidation* process (Fernandes *et al.*, 2014 b), ozonisasi (Amaral-Siva, 2016), *air stripping* (Kewu dan Wengi, 2018). Pada

Tabel 2.6 disajikan kelebihan dan kekurangan dari beberapa pengolahan lindi secara fisik kimia.

Tabel 2.6 Kelebihan dan Kekurangan Pengolahan Lindi Secara Fisik Kimia

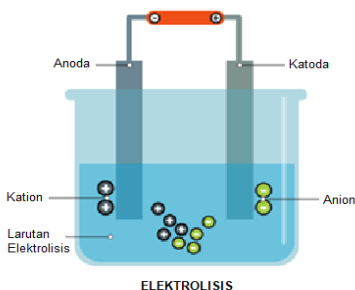
Proses	Keunggulan	Kelemahan	sumber
Ozonisasi	Peningkatan rasio BOD5/COD dari 0,05 menjadi 0,29, removal COD sebesar 45 %	pengolahan efektif terbatas pada lindi muda, serta sensitif terhadap pH	Amaral-Silva, 2016
<i>Air Stripping</i>	Meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,049 menjadi 0,311 , Efektif menyisihkan ammonia hingga 88,6%	sensitif terhadap pH, Kurang efektif menyisihkan COD	Kewu dan Wengi, 2018
Elektrooksidasi	oksidasi dengan anoda DSA mampu meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,12 menjadi 0,38, Oksidasi dengan anoda BDD meningkatkan rasioBOD/COD dari 0,3 menjadi 0,88, tidak menghasilkan lumpur, efektif menyisihkan COD hingga 70%	membutuhkan energi listrik, jenis elektroda tertentu dapat korosi sehingga perlu diganti	Li <i>et al.</i> , 2016; Fernandes <i>et al.</i> , 2014 a ; Anglada <i>et al.</i> , 2009

Lanjutan Tabel 2.6

Proses	Keunggulan	Kelemahan	sumber
Fenton	mampu meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,13 menjadi 0,33	diperlukan penyaringan agar tidak terbentuk suspensi yang dapat mengganggu proses	Tamas, 2017
Koagulasi-Flokulasi	Efektif dalam menurunkan SS hingga 90 % karena adanya koagulan, peningkatan rasio BOD/COD sebesar 0,08	Mebutuhkan koagulan, menghasilkan lumpur, sensitif terhadap pH, Penyisihan COD hanya 25-38%	Zouboulis <i>et al.</i> , 2004

2.6 Teknologi Elektrooksidasi

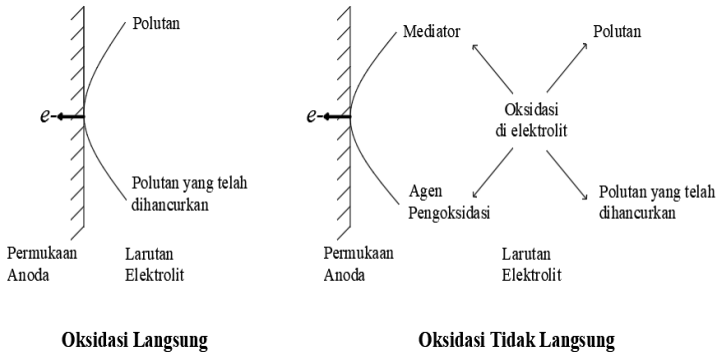
Elektrolisis merupakan sel elektrokimia dengan dua elektroda (anoda dan katoda) yang dicelupkan dalam elektrolit yang kemudian disebut reaksi reduksi-oksidasi (redoks) dengan memanfaatkan sumber energi listrik untuk melangsungkan reaksi kimia tersebut (Harahap, 2016). Prinsip proses elektrolisis tersebut kemudian diterapkan pada berbagai metode pengolahan limbah seperti elektrooksidasi, elektoreduksi, elektrodialisis dan elektrokoagulasi (Sillanpää and Shestakova, 2017).



Gambar 2.1 Ilustrasi Proses Elektrolisis
Sumber : Sopiah, 2008

Metode elektrooksidasi adalah reaksi kimia, yang melibatkan hilangnya satu atau lebih elektron oleh atom atau molekul pada permukaan anoda selama aliran arus listrik langsung melalui sistem elektrolisis (anoda, katoda, dan larutan elektrolit) (Sillanpää and Shestakova, 2017). Proses elektrooksidasi merupakan salah satu alternatif pengolahan yang dapat menjadi pilihan untuk mengatasi pengolahan lindi, karena kemampuannya untuk menghilangkan polutan terutama komponen senyawa *recalcitrant* (cabeza *et al.*, 2007).

Penggunaan metode elektrooksidasi bertujuan untuk mengoksidasi substansi organik menjadi bentuk paling stabil dari proses oksidasinya kedalam bentuk karbondioksida dan air selain itu juga bertujuan untuk meningkatkan biodegradabilitas polutan *recalcitrant*, agar sesuai dengan rasio BOD₅/COD yang mampu diolah dalam proses pengolahan biologis (Renou *et al.*, 2008). Keuntungan lain proses elektrooksidasi sebagai alternatif pengolahan lindi yaitu tidak membutuhkan waktu operasional yang lama dibandingkan pengolahan biologis seperti MBBR yang membutuhkan waktu 2 hari (Wang dan Shen, 2000), selain itu proses elektrooksidasi tidak menghasilkan lumpur (Fernandes *et al.*, 2015). Sehingga tidak memerlukan unit tambahan untuk mengolah lumpur. Komponen utama dalam proses oksidasi elektrooksidasi yaitu adanya komponen (DC) *Power supply*, katoda dengan muatan negatif, anoda yang bermuatan positif dan larutan elektrolit sebagai media terjadinya reaksi antara anoda dan katoda (Deng dan Englehardt, 2007). Proses elektrooksidasi terbagi menjadi dua mekanisme yang berbeda yaitu oksidasi anodik secara langsung dan oksidasi secara tidak langsung terhadap polutan.



Gambar 2.2 Oksidasi langsung dan tidak langsung
 Sumber : Deng dan Englehardt., 2007

2.6.1 Oksidasi Langsung

Pada proses oksidasi langsung, polutan dihancurkan pada permukaan anoda (Deng dan Englehardt, 2007). Oksidasi langsung terdiri dari dua tahap yaitu difusi polutan dari elektrolit menuju permukaan anoda dan oksidasi polutan di permukaan anoda melalui transfer elektron (Mandal *et al.*, 2017). Berikut reaksinya :



Keterangan:

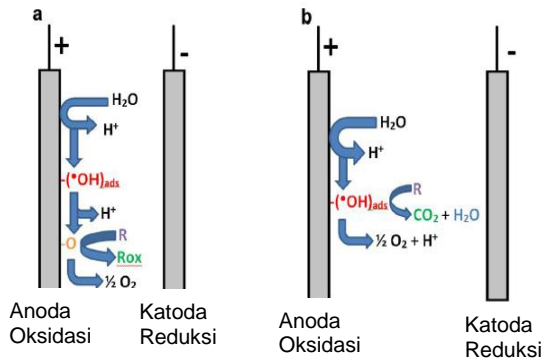
R = polutan organik yang menjadi target

R= polutan organik yang telah mengalami oksidasi

Kecepatan perpindahan elektron bergantung pada aktivitas elektroda dan kuat arus listrik (Anglada, 2010). Proses oksidasi secara langsung kurang efektif dalam mendegradasi polutan organik karena adanya pembentukan lapisan polimer pada permukaan anoda (Fernandes *et al.*, 2015). Sehingga pemilihan anoda merupakan bagian penting dalam proses oksidasi secara langsung (Mandal *et al.*, 2017).

2.6.2 Oksidasi Tidak Langsung

Oksidasi tidak langsung terjadi pada permukaan anoda melalui mediator berupa hidroksil radikal yang terbentuk melalui *water discharge* atau *bulk solution*, agen pengoksidasi yang umumnya terbentuk berupa klorin dan hidrogen peroksida. Oksidasi organik dengan hidroksil radikal ($\cdot\text{OH}$) terbagi menjadi dua anoda yaitu anoda aktif dan anoda tidak aktif. Contoh anoda aktif seperti *Dimensionally stable anode* (DSA) yang terdiri dari Pt, IrO_2 , dan RuO_2 . Sedangkan anoda non aktif berupa PbO_2 , SnO_2 dan *boron doped diamond* (Fernandes *et al.*, 2014 b). Perbedaan anoda aktif dan non aktif dapat dilihat pada Gambar 2.3.

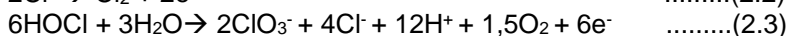


Gambar 2.3 (a) Anoda Aktif dan (b) Anoda Non Aktif
Sumber : Garcia-Segura *et al.*, 2018

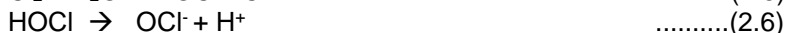
Perbedaan mekanisme oksidasi antara anoda aktif dan anoda tidak aktif terdapat pada proses oksidasi yang terbagi atas *electrochemical conversion* dan *electrochemical combustion*. Proses *electrochemical conversion* terjadi pada anoda aktif dengan pembentukan *chemisorbed active oxygen* ($\cdot\text{OH}$) pada permukaan anoda DSA, *active oxygen* tersebut kemudian akan mengkonversi polutan kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti asam karboksilat sehingga dapat meningkatkan biodegradabilitas. Namun, proses ini tidak dapat mengoksidasi polutan menjadi karbon dioksida sehingga memerlukan pengolahan lanjutan. Sedangkan pada proses *electrochemical*

combustion yang terjadi pada anoda non aktif melalui aktivasi air akan membentuk *physisorbed active oxygen* seperti hidroksil radikal (*OH) pada permukaan anoda BDD. *Physisorbed active oxygen* akan mengoksidasi polutan organik kompleks hingga mengubahnya menjadi senyawa lain yang disertai pembentukan oksigen (Garcia-Segura *et al.*, 2018). Efisiensi dari proses oksidasi secara tidak langsung sangat ditentukan pada bahan elektroda serta percobaan yang dilakukan. Berdasarkan Deng dan Englehardt (2007), rangkaian reaksi pembentukan klorin dan hipoklorit selama proses oksidasi tidak langsung dapat dilihat pada persamaan 2 sampai 8. Hidroksil radikal yang terbentuk pada proses elektrooksidasi tidak langsung akan teradsorpsi ke permukaan anoda (persamaan 2.9) dan membantu proses oksidasi senyawa organik (persamaan 2.10) (Mandal *et al.*, 2017).

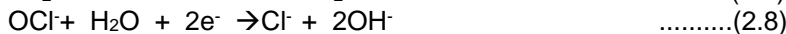
Reaksi pada anoda



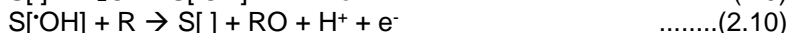
Reaksi pada larutan *bulk*



Reaksi pada katoda



Reaksi oksidasi pada permukaan anoda:



2.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrooksidasi

2.7.1 Jenis Elektroda

Pemilihan jenis elektroda yang terdiri dari anoda dan katoda sangat mempengaruhi selektifitas dan efisiensi dari proses elektrooksidasi. Kompetisi antara reaksi oksidasi organik pada anoda dengan reaksi sampingan (evolusi oksigen) yang terjadi menjadi salah satu pertimbangan yang harus diperhatikan (Fernandes *et al.*, 2015). Jenis elektroda yang saat ini banyak

digunakan adalah Iridium oksida (IrO_2), Ruthenium (Ru), Titanium (Ti), Timah Oksida (SnO_2), Timbal (IV) Oksida (PbO_2), Karbon dan Grafit, Platinum (Pt) dan *Boron-Doped Diamond (BDD)*. Anoda dengan kemampuan degradasi tinggi seperti platinum, paladium, iridium dioksida, ruthenium titanium dioksid, iridium titanium dioksida. Proses oksidasi air menjadi oksigen terjadi pada 1,2 V normal hydrogen electrode (NHE). Anoda dengan evolusi oksigen yang rendah seperti iridium dioksida, ruthenium dioksida. Sedangkan anoda yang memiliki kemampuan evolusi oksigen tinggi seperti tin-dioxide, *boron doped diamond* yang mampu memineralisasi bahan polutan organik (Mandal *et al.*, 2017). Elektroda DSA baik digunakan pada oksidasi tidak langsung, memiliki efisiensi listrik yang bagus, potensial O_2 tinggi, harga lebih murah, tapi elektroda ini memiliki kekurangan yaitu *lifetime* yang singkat serta kurang stabil saat digunakan untuk proses elektrooksidasi (Sarkka *et al.*, 2015). Sehingga anoda *boron-doped diamond* (BDD) paling banyak digunakan saat ini karena memiliki beberapa kelebihan yaitu mampu mengoksidasi polutan pada air limbah yang kompleks, *high conductivity*, tidak korosif, relatif stabil, bersifat inert, kemampuan evolusi oksigen tinggi, efisiensi listrik tinggi (Mandal *et al.*, 2017). Tetapi anoda BDD memiliki harga yang mahal (Sarkka *et al.*, 2015) serta kurang efektif untuk meningkatkan biodegradabilitas lindi karena proses oksidasi dengan BDD mengubah polutan organik menjadi karbondioksida dan air. Melalui Tabel 2.7 anoda BDD merupakan anoda yang memiliki kekuatan oksidasi paling tinggi dibandingkan anoda yang lain.

Tabel 2.7 Kekuatan Oksidasi Anoda pada Media Asam

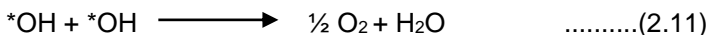
anoda	Potensial Oksidasi	Kondisi
RuO₂	1,47	0,5 M H ₂ SO ₄
IrO₂	1,52	0,5 M H ₂ SO ₄
Pt	1,6	0,5 M H ₂ SO ₄
Grafite	1,7	0,5 M H ₂ SO ₄
SnO₂	1,9	0,05 M H ₂ SO ₄
PbO₂	1,9	1 M H ₂ SO ₄
BDD	2,3	0,5 M H ₂ SO ₄

Sumber : Panizza *et al.*, 2008

Menurut data dalam Tabel 2.7 potensial oksidasi anoda BDD merupakan yang terbesar dibandingkan dengan anoda lainnya. Potensial oksidasi yang tinggi memiliki keuntungan dalam pembentukan hidroksil radikal yang cepat sehingga semakin banyak *active spesies* yang akan terbentuk selama proses elektrooksidasi.

Anoda *Dimensional Stable Anode* (DSA) adalah jenis elektroda yang dibuat dengan pelapisan terhadap logam. Pelapisan dilakukan dengan bahan Ti dan Ru. Efisiensi pelapisan yang menggunakan larutan Ti lebih tinggi dibandingkan rata-rata efisiensi pelapisan lainnya. Anoda yang termasuk jenis DSA antara lain TiO₂/RuO₂, TiO₂/IrO₂, PbO₂/SnO₂, Ti/Pt, SPR PbO₂/Ti. Elektroda ini memiliki kelebihan dalam proses oksidasi secara tidak langsung, memiliki efisiensi listrik yang bagus, harga yang lebih murah dan mudah didapatkan. Kekurangan dari DSA yaitu memiliki jangka waktu penggunaan yang singkat (Sarkka *et al.*, 2015). DSA merupakan elektroda yang memiliki tingkat kestabilan tinggi serta tidak menghasilkan polutan sampingan. Elektroda ini telah banyak digunakan dalam beragam pengolahan air limbah. Ti/IrO₂ merupakan jenis elektroda yang sangat stabil yang dapat bekerja pada kondisi asam yang tinggi. Elektroda jenis ini dapat digunakan berulang kali dalam percobaan skala besar. Aktif DSA mampu mengadsorpsi senyawa radikal dan mendegradasinya dengan baik melalui permukaannya (Goyal *et al.*, 2017).

Boron doped diamond (BDD) merupakan salah satu elektroda yang memiliki efektifitas tinggi untuk mendegradasi senyawa organik karena adanya O₂ yang tinggi yang dapat meningkatkan oksidasi bahan organik. Proses reaksi pembentukan radikal hidroksil dalam elektroda BDD :



Pada sistem oksidasi dengan *Boron Doped Diamond* setiap molekul organik yang ada pada permukaan BDD akan di oksidasi oleh *OH radikal. Konsentrasi radikal hidroksil (*OH) non selektif yang dihasilkan oleh elektroda BDD tergantung pada level tingkat doping boron. Selain menghasilkan radikal hidroksil anoda BDD

juga memiliki sifat tahan terhadap korosi dan pelarutan pada kondisi asam (Fudala-ksiazek *et al.*, 2017).

Berikut kekurangan dan kelebihan penggunaan anoda *boron doped diamond* (BDD) dan *dimensionally stable anode* (DSA) sebagai anoda dalam proses elektrooksidasi dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Kelebihan dan Kekurangan Anoda BDD dan Anoda DSA (Ti/IrO₂)

Elektroda	Kelebihan	Kekurangan
<i>Boron Doped Diamond</i> (anoda non aktif)	Bersifat inert pada kondisi , apapun, potensial O ₂ tinggi, stabilitas elektrooksidasi tinggi, efisiensi listrik tinggi, tidak korosif, memiliki konduktifitas yang baik	harga mahal, Proses oksidasi oleh anoda non aktif dominan pada mineralisasi senyawa organik menjadi CO ₂ dan H ₂ O sehingga kurang efektif untuk meningkatkan biodegradabilitas lindi
<i>Dimensionally Stable Anode</i> (anoda aktif)	efisiensi listrik bagus, efektif dalam proses oksidasi untuk meningkatkan biodegradabilitas karena membentuk <i>chemisorbed active oxygen</i> dari aktivitas anoda aktif yang bekerja dengan baik untuk memecah senyawa <i>non-biodegradable</i> menjadi senyawa <i>biodegradable</i> , harga lebih murah, potensial O ₂ tinggi	<i>lifetime</i> lebih singkat

Sumber : Sarkka *et al.*, 2015 ; Agustina, 2018

Peningkatan indeks biodegradabilitas pada lindi ketika menggunakan anoda DSA yaitu 0,12 menjadi 0,38 (Li *et al.*, 2016).

Sedangkan pada proses oksidasi dengan anoda BDD dalam penelitian Fernandes *et al.* (2014 a), mampu meningkatkan biodegradabilitas pada lindi dari 0,33 menjad 0,88. Hal ini berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh agustina (2018) yang menunjukkan hasil penurunan biodegradabilitas pada lindi dari 0,411 menjadi 0,155. Pada oksidasi dengan anoda BDD sangat dipengaruhi oleh agen pengoksidasi yang dihasilkan dari anoda non aktif yang untuk melangsungkan proses *electrochemical combustion*. Melalui *electrochemical combustion* senyawa organik akan mengalami pembakaran dan mineralisasi menjadi CO₂ dan H₂O. Sehingga pada penelitian ini dilakukan perbandingan oksidasi dengan anoda BDD dan DSA untuk menentukan efektifitas antara keduanya dalam peningkatan indeks biodegradabilitas pada lindi.

2.7.2 pH



Gambar 2.4 Pengaruh pH selama Proses Elektrooksidasi

Sumber: [1] (Cossu *et al.*, 1998), [2] (Vlyssides *et al.*, 2001), [3] (Chu *et al.*, 2008), [4] (Anglada *et al.*, 2010), [5] (Panizza *et al.*, 2010), [6] (Mussa *et al.*, 2015) dengan modifikasi

Berdasarkan Gambar 2.2 diatas nampak bahwa penyisihan COD paling baik terjadi pada pH asam yaitu 3. Kondisi pH berpengaruh pada pembentukan klorin dan hipoklorin pada *range* 4-10 pada percobaan air yang bersifat salin. Sedangkan pada penyisihan COD penerapan pH asam (pH 3) menghasilkan penyisihan 20% lebih tinggi dibandingkan penyisihan COD pada pH basa (pH 8)

pada percobaan elektrokseidasi selama 4 jam (Li et al., 2001). Pembentukan oksigen (*oxygen evolution*), yang merupakan reaksi samping selama proses elektrokseidasi juga sangat tergantung pada pH. Pada pH basa, kuat arus lebih banyak digunakan untuk proses pembentukan oksigen dibandingkan dengan proses oksidasi senyawa organik. Hal ini dikarenakan pada pH basa, energi yang dibutuhkan untuk pembentukan oksigen (*potensial O₂*) lebih kecil dari pada saat pH asam (0,42 V pada suasana basa dan 1,229 V pada suasana asam) (Chu et al., 2008).

pH merupakan parameter kontroling paling penting dalam elektrokseidasi lindi dibandingkan dengan konsentrasi Cl⁻, suhu, Konsentrasi SO₄²⁻. Pada pH 5,5 -7,5 oksidasi menghasilkan penyisihan COD tinggi disertai hanya membutuhkan konsumsi energi yang rendah (Vlyssides et al., 2003). Penyisihan polutan paling efisien pada pH 3 (Mussa., 2015). pH asam dapat mereduksi konsentrasi ion karbonat (CO₃²⁻) dan bikarbonat (HCO₃⁻), sehingga laju penyisihan COD meningkat. Ion CO₃²⁻ dan HCO₃⁻ ini diketahui sebagai perusak radikal hidroksida (Li et al., 2001). Pada pH asam (pH 3) terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD dari 0,372 menjadi 0,483 (Agustina, 2018).

2.7.3 Kerapatan Arus

Kerapatan arus berperan penting dalam efisiensi proses elektrokseidasi. Kerapatan arus minimum yang diperlukan untuk mencapai oksidasi yang efektif terjadi pada 5 mA cm⁻². Apabila kerapatan arus yang digunakan rendah maka lindi akan berwarna semakin gelap dan membentuk endapan berwarna coklat pada permukaan anoda (Fernandes et al., 2015). Oksidasi efektif terjadi ditandai dengan potensial *oxygen evolution* menghasilkan radikal hidroksil (*OH) yang tinggi. Penyisihan COD tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan ketika kerapatan arus mencapai 100 mA cm⁻² (Zhou et al., 2016). Quan et al. (2013), mengatakan bahwa peningkatan penyisihan BOD dan ammonium yang efektif terjadi pada nilai kerapatan arus hingga 65 mA cm² (pada kisaran penelitian antara 13 hingga 78 mA cm⁻²). Sedangkan, ketika kerapatan arus ditingkatkan lebih dari 65 mA cm⁻² tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada penyisihan COD. Peningkatan kerapatan arus dari 500-1500 A m⁻² menunjukkan peningkatan

perlahan pada penyisihan COD dan penyisihan AN yang meningkat secara tajam melalui proses oksidasi tidak langsung (Chiang *et al.*, 1995). Penggunaan kerapatan arus 75 m A cm⁻² justru menurunkan rasio BOD₅/COD yang menunjukkan penurunan biodegradabilitas pada lindi. Sedangkan peningkatan indeks biodegradabilitas pada lindi efektif ketika kerapatan arus 25 m A cm⁻² (Sari, 2017). Proses oksidasi dengan anoda BDD efektif untuk meningkatkan biodegradabilitas ketika kerapatan arus berada pada rentang 25-65 mA cm⁻² (Kurniawan., 2010). Proses elektrooksidasi sebagai *pre-treatment* sebelum pengolahan biologis efektif untuk meningkatkan penyisihan COD (nilai COD 500 mg/l) hingga 99% dengan waktu pengoperasian 1 jam pada kerapatan arus 30 m A cm⁻² (Garcia-Morales *et al.*, 2013). Penggunaan anoda DSA (Ti/irO₂) memiliki keuntungan dapat meningkatkan penyisihan polutan organik pada kerapatan arus yang kecil. Anoda DSA (Ti/irO₂) melalui proses oksidasi dapat menyisihkan COD hingga 96,7% dengan penggunaan kerapatan arus sebesar 50 m A cm⁻², ketika kerapatan arus ditingkatkan pada 100 m A cm⁻² ataupun 200 m A cm⁻² penurunan tingkat COD justru semakin kecil. Hal ini berbeda dengan jenis anoda lainnya seperti Ti/Pt yang membutuhkan energi yang lebih besar untuk menyisihkan polutan organik (Markou *et al.*, 2017).

Perhitungan terhadap efisiensi proses dilakukan dengan menentukan berat massa zat yang dihasilkan di elektroda dihitung menggunakan pendekatan kuat arus dengan Hukum Faraday I dan II. (Topayung, 2011)

- Hukum Faraday I: “Massa zat yang terjadi akibat reaksi kimia pada elektroda berbanding lurus dengan jumlah muatan listrik yang mengalir pada larutan elektrolit selama elektrolisis” .:

	$m = \frac{e x i x t}{96500}$(2.12)
--	-------------------------------	-------------

- Hukum Faraday II: “Massa berbagai zat yang terjadi selama elektrolisis, berbanding lurus dengan berat ekivalennya”.

	$Q = i x t$ (2.13)
	$m = \frac{e x Q}{96500}$ (2.14)

Keterangan :

- m= massa zat yang dihasilkan (gram)
- e= berat ekivalen
- i= kuat arus (A)
- t= waktu (s)
- q= muatan listrik (Coloumb)

Kelayakan proses dalam aplikasi elektrooksidasi dapat dievaluasi dari efisiensi penurunan polutan dan dari aspek ekonomi kelayakan ditentukan oleh konsumsi energi spesifik. Penurunan konsentrasi polutan selama proses elektrooksidasi dapat dinyatakan dengan fungsi dari muatan listrik spesifik.

$$Q = \frac{J x A x t}{v} \quad \text{.....(2.15)}$$

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

$$Q = \frac{i}{A} \quad \text{.....(2.16)}$$

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

$$Q = \frac{i x t}{V} \quad \text{.....(2.17)}$$

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

$$W = Q x V \quad \text{.....(2.18)}$$

Dimana:

W : konsumsi energi spesifik (kWh /m³)

Q : muatan listrik spesifik (kAh/m³)

I : kuat arus listrik (A)

J : kerapatan arus (A/m²)

V : tegangan listrik (V)

A : luas elektroda (m²)

t : waktu operasi (s)

V : volume elektrolit (L)

(Anglada *et al.*, 2009).

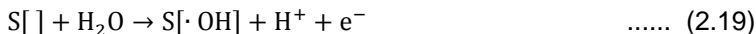
2.7.4 Debit Aliran

Debit operasional merupakan salah satu faktor penting dalam penyisihan polutan organik. Debit aliran pada proses oksidasi elektrokatalisis dapat meningkatkan transfer massa dan mengurangi difusi ke permukaan anoda (Zhou *et al.*, 2016). Akibat berkurangnya difusi air ke permukaan anoda akan menyebabkan proses pembentukan agen pengoksidasi seperti hidroksil radikal kurang optimal. Namun, penggunaan debit yang terlalu rendah tidak baik pula terhadap proses elektrokatalisis. Hal ini karena semakin lama waktu tinggal elektrolit di dalam reaktor akan meningkatkan temperatur, bahkan dapat memanaskan larutan di dalam reaktor. Penggunaan debit 1 mL/detik dan 1,5 mL/detik dapat menyisihkan COD 56 dan 64 % (Fernandes *et al.*, 2014 b). Selain itu dalam Zhou *et al.* (2016), disebutkan bahwa penggunaan debit 0,55 mL/dtk; 1,1 mL/dtk, dan 1,67 mL/dtk menunjukkan penyisihan COD 84,98%; 81,38%, dan 87,5%.

2.7.5 Penambahan Elektrolit

Klorida radikal (Cl[•], Cl₂^{•-}), karbonat radikal (CO₃^{•-}), fosfat radikal (H₂PO₄[•], PO₄^{•2-}) dan sulfat radikal (SO₄^{•-}) (Farhat *et al.*, 2017) merupakan agen pengoksidasi (*active species*) yang terbentuk saat proses oksidasi secara tidak langsung (Deng dan Englehardt, 2007). Agen pengoksidasi ini bermanfaat untuk meningkatkan laju oksidasi. *Active species* tersebut terbentuk karena adanya

hidroksil radikal hasil dari aktivasi air dalam larutan elektrolit. Hidroksil radikal tersebut akan berikatan dengan ion-ion yang ada seperti klorida (Cl^-) dan hipoklorit (OCl^-) yang kemudian membentuk *active species* melalui reaksi berikut :



(Deng *et al.*, 2019)

Selain itu menurut Li *et al.* (2001), pembentukan agen pengoksidasi tersebut dapat dipercepat dengan adanya penambahan ion klorida. Penambahan ion klorida tersebut mampu meningkatkan penyisihan COD pada konsentrasi ion klorida 2500 hingga 5000 mg/L, namun menjadi lambat pada 5000 mg/L hingga 10.000 mg/L. Penambahan elektrolit NaCl 0,05 M mampu meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,372 menjadi 0,483 (Agustina, 2018).

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan acuan dalam penelitian yang menggunakan elektrooksidasi dalam meningkatkan indeks biodegradabilitas lindi. Berikut merupakan hasil penelitian terdahulu yang terdapat pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Penelitian Terdahulu

Penulis	Hasil	Efisiensi
(Zhu <i>et al.</i>, 2009)	Oksidasi elektrokimia menggunakan BDD pada <i>coking wastewater</i> menghasilkan removal $\text{NH}_3\text{-N}$ yang tinggi. Oksidasi secara langsung dan tidak langsung dapat terjadi dengan baik karena adanya mediator aktif klorin.	Konsumsi energi dapat berkurang sampai 40% dibandingkan penggunaan anoda SnO_2 dan PbO_2

Lanjutan Tabel 2.9

Penulis	Hasil	Efisiensi
(Goyal et al., 2017)	Proses elektrokimia untuk degradasi air limbah dengan kandungan asam tinggi menggunakan DSA tuthenium oxide (Ti/RuO ₂) terjadi pada kondisi <i>current density</i> optimum 750 A/m ² dengan waktu efisien 150 menit .	Jarak elektroda 1 cm mampu menurunkan COD sebesar 41,83% tanpa H ₂ O ₂ serta dengan penambahan H ₂ O ₂ sebesar 48,83%
(hilles et al., 2015)	Penambahan persulfat serta gabungan persulfat/peroksida mampu meningkatkan biodegradabilitas lindi ditandai dengan kenaikan rasio BOD/COD dari 0,09 menjadi 0,1	Efisiensi penyisihan terhadap COD meningkat dari 36 % menjadi 57% setelah penambahan persulfat meningkatkan penyisihan hingga 68%
(Sari., 2017)	Kombinasi proses elektrodialisis dan elektrolisis dengan anoda karbon mampu meningkatkan rasio BOD/COD 0,0411 menjadi 0,2 dengan perlakuan tanpa penambahan NaCl dan 0,02 menjadi 0,17 ketika dilakukan penambahan NaCl 1 g/L	Efisiensi penyisihan tergantung pada perlakuan penambahan NaCl dan variasi pH

LanjutanTabel 2.9

Penulis	Hasil	Efisiensi
(Yulianto et al., 2009)	Jarak elektroda 1,5 cm dan 3 cm berpengaruh besar terhadap efisiensi elektrolisis.	Jarak elektroda 3 cm menghasilkan efisiensi sebesar 30% sementara 1,5 cm menghasilkan efisiensi sebesar 88%.
Li et al., 2016	oksidasi dengan anoda DSA mampu meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,12 menjadi 0,38,	Efektif menyisihkan COD hingga 68 %.
Agustina, 2018	Proses penelitian dengan elektrokimia menggunakan anoda BDD pada beberapa variasi penambahan elektrolit. Mampu meningkatkan rasio BOD5/COD pada kondisi pH 3 dan penambahan 0,05 M NaCl	Efektif menyisihkan COD hingga 59% dengan konsumsi energi spesifik 0,0277 g/Wh

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Deskripsi Umum

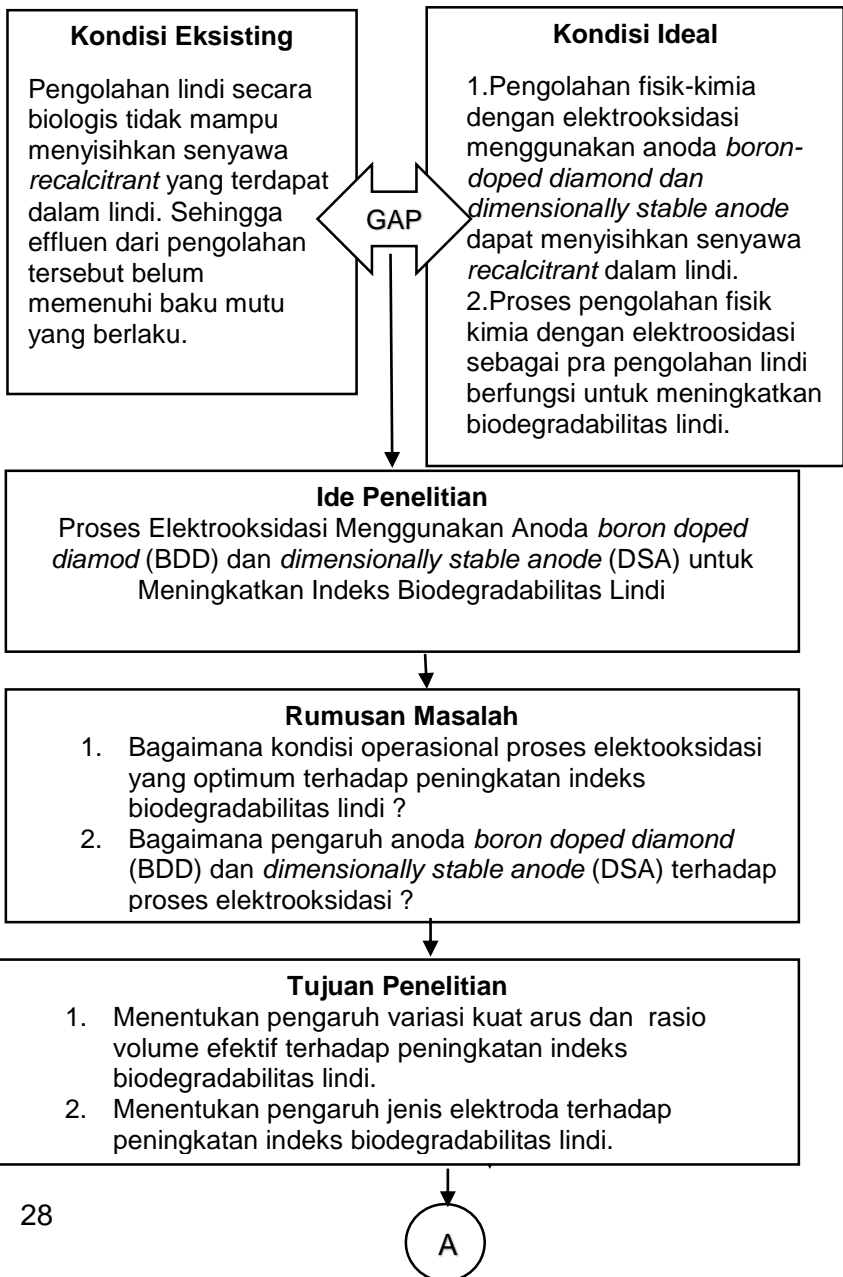
Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi kuat arus dan rasio volume efektif terhadap peningkatan biodegradabilitas lindi pada proses elektrooksidasi menggunakan anoda *boron doped diamod* (BDD) dan *dimensionally stable anode* (DSA). Pada penelitian ini, dilakukan penelitian pendahuluan untuk mengetahui karakteristik awal lindi dan penentuan debit operasional. Kemudian dilakukan penelitian utama yaitu dengan variasi kuat arus dan rasio volume efektif dalam reaktor. Bahan uji yang digunakan berasal dari Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) Ngipik Gresik. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Teknik Lingkungan ITS.

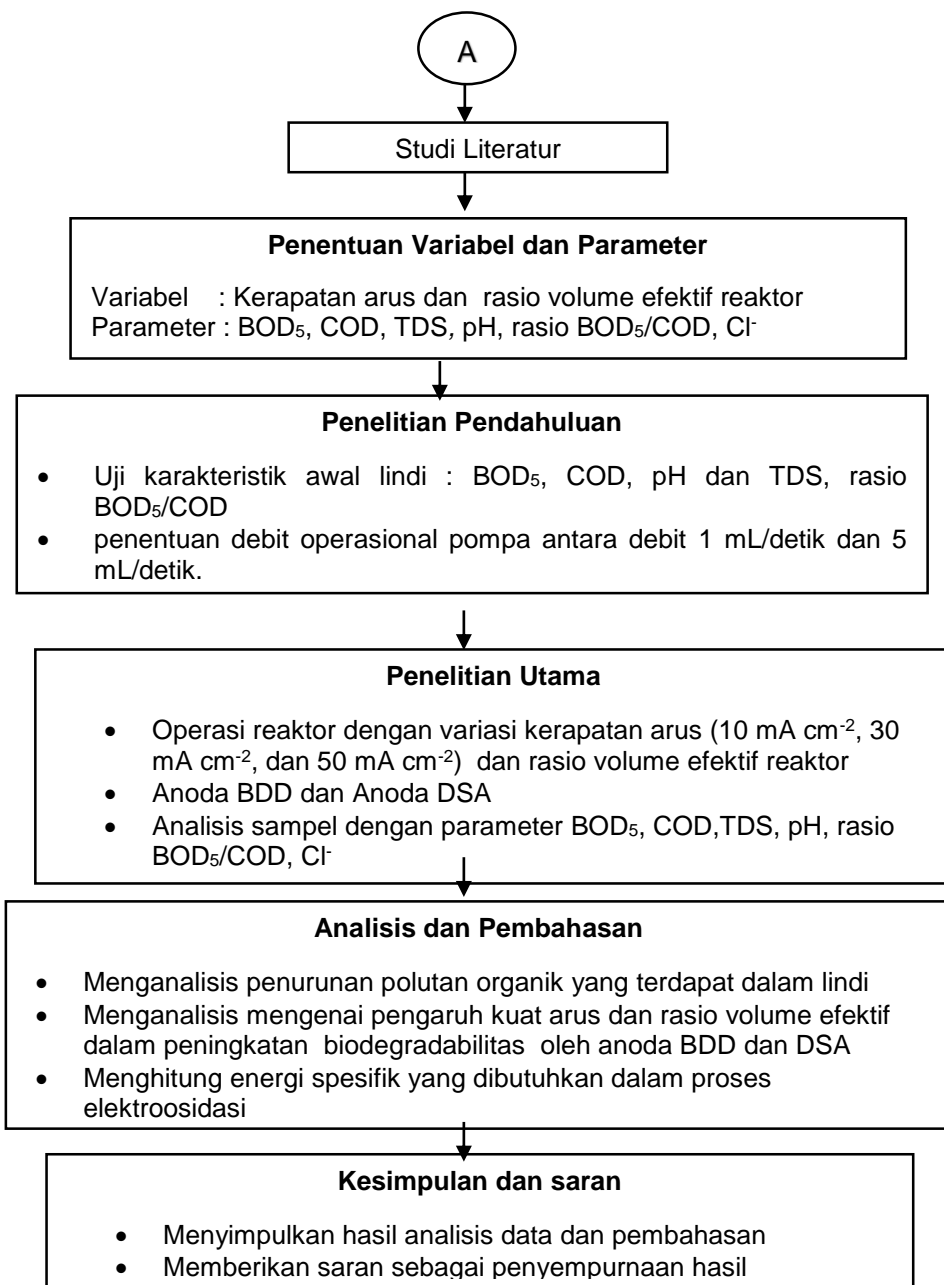
3.2 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian ini meliputi ide penelitian, perumusan masalah, penentuan variabel dan parameter, pelaksanaan penelitian pendahuluan dan utama hingga analisis pembahasan dan kesimpulan. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.

3.2.1 Ide Penelitian

Pengolahan lindi di Indonesia fokus pada pengolahan lindi secara biologis. Namun pengolahan secara biologis kurang efisien dalam penyisihan polutan apabila digunakan sebagai *single treatment*. Hal tersebut yang mendasari ide penelitian ini yaitu kebutuhan alternatif pengolahan fisik kimia untuk meningkatkan efisiensi pengolahan lindi sebelum dilakukan pengolahan secara biologis. Proses elektrooksidasi dengan menggunakan anoda *boron doped diamod* (BDD) dan *dimensionally stable anode* (DSA) saat ini sedang menjadi perhatian karena sangat efektif untuk menyisihkan polutan organik pada lindi. Anoda BDD dan anoda DSA dapat menghasilkan senyawa radikal yang dapat meningkatkan laju oksidasi senyawa organik.





Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.2.2 Penentuan Variabel dan Parameter

Variasi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1) Kerapatan Arus

Proses elektrooksidasi dengan pembentukan radikal hidroksil dan oksidan lainnya tergantung pula pada kerapatan arus. Degradasi terhadap COD dan ammonium dilakukan pada kerapatan arus $12,5 \text{ mA cm}^{-2}$, 25 mA cm^{-2} dan 50 mA cm^{-2} . Penyisihan COD semakin tinggi terjadi pada kerapatan arus $12,5 \text{ mA cm}^{-2}$ sebesar 62,49% sedangkan pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} sebesar 39% (Fudala-ksiazek *et al.*, 2017). Berdasarkan Mandal *et al.* (2017), kerapatan arus minimal yang dibutuhkan adalah 5 mA cm^{-2} agar oksidasi senyawa organik dapat berjalan secara efektif. Peningkatan nilai kerapatan arus juga meningkatkan pembentukan klorin, yang dapat meningkatkan penyisihan polutan. Berdasarkan Zhou *et al.* (2016), peningkatan kerapatan arus dari 20 hingga 50 mA cm^{-2} meningkatkan oksidasi senyawa organik. Penggunaan kerapatan arus 75 mA cm^{-2} justru menurunkan rasio BOD_5/COD yang menunjukkan penurunan biodegradabilitas pada lindi. Sedangkan peningkatan indeks biodegradabilitas pada lindi efektif ketika kerapatan arus 25 mA cm^{-2} (Sari, 2017). Proses oksidasi dengan anoda BDD efektif untuk meningkatkan biodegradabilitas ketika kerapatan arus berada pada rentang $25\text{-}65 \text{ mA cm}^{-2}$ (Kurniawan., 2010). Proses elektrooksidasi sebagai pre-treatment sebelum pengolahan biologis efektif untuk meningkatkan penyisihan COD (nilai COD 500 mg/l) hingga 99% dengan waktu pengoperasian 1 jam pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} (Garcia-Morales *et al.*, 2013). Penggunaan anoda DSA (Ti/IrO_2) memiliki keuntungan dapat meningkatkan penyisihan polutan organik pada kerapatan arus yang kecil. Anoda DSA (Ti/IrO_2) melalui proses oksidasi dapat menyisihkan COD hingga 96,7% dengan penggunaan kerapatan arus sebesar 50 mA cm^{-2} , ketika kerapatan arus ditingkatkan pada 100 mA cm^{-2} ataupun 200 mA cm^{-2} penurunan tingkat COD justru semakin kecil (Markou *et al.*, 2017). Maka dalam penelitian kali ini digunakan variasi kerapatan arus 10 mA cm^{-2} , 30 mA cm^{-2} dan 50 mA cm^{-2} .

2) Rasio Volume efektif pada Reaktor

Penggunaan volume reaktor 200 mL pada proses elektrooksidasi dengan anoda BDD mampu menyisihkan COD sebesar 56% disertai peningkatan BOD₅/COD dari 0,3 menjadi 0,88 dengan kerapatan arus 30 mA cm⁻² (Fernandes *et al.*, 2014 a). Rasio 80 mL/ 2000 mL mampu menurunkan nilai COD sebesar 26,86% dengan kerapatan arus 50 mA cm⁻² (Agustina, 2018). Sehingga volume reaktor yang digunakan yaitu 80 mL dengan *feed tank* 2000 mL, 1500 mL dan 1000 mL yang akan divariasikan dengan perbandingan volume efektif reaktor terhadap volume *feed tank* dalam percobaan ini terbagi atas rasio 80 mL/2000 mL = 1/25, 80mL/1500mL = 1/12,5, dan 80mL/1000mL = 1/18,75. Parameter yang diuji pada penelitian ini antara lain BOD₅, COD, TDS, warna dan pH. Metode analisis setiap parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Metode Analisis Setiap Parameter

No	Parameter	Tujuan	Metode	Sumber
1.	BOD ₅	Mengetahui tingkat biodegradabilitas lindi (BOD ₅ /COD)	DO-meter	SNI 6989.72:2009
2.	COD	Mengetahui tingkat penyisihan polutan organik dalam lindi.	Closed Reflux and colorimetric	SNI 6989.73:2009
3.	TDS	Mengetahui daya hantar listrik bahan uji	Metode Konduktimeter	SNI 06-6989.1.2004
4	pH	Mengetahui pH sampel	pH meter	SNI 06-6989.11-2004
5	Cl ⁻	Mengetahui nilai konsentrasi Cl ⁻ pada lindi dan pengaruh terhadap proses elektrooksidasi	Argentrometrik Mohr	SNI 06-6989.19-2004

Sebelum diuji, sampel di saring terlebih dahulu dengan *syringe* filter berbahan PTFE 0,45 μ m.

Pengambilan sampel untuk analisis sesuai parameter pada Tabel 3.1 terdapat pada tabel 3.2 berikut :

Tabel 3. 2 Kebutuhan, Titik dan Pengambilan Sampel

Parameter	Kebutuhan Sampel (mL)	Titik Pengambilan Sampel	Waktu Pengambilan Sampel
BOD ₅	5	outlet reaktor	t ₀ , t ₁ ,t ₂ ,t ₃ ,t ₄ ,t ₅
COD	5	outlet reaktor	t ₀ , t ₁ ,t ₂ ,t ₃ ,t ₄ ,t ₅
pH	5	outlet reaktor	t ₀ , t ₁ ,t ₂ ,t ₃ ,t ₄ ,t ₅
TDS	5	outlet reaktor	t ₀ , t ₁ ,t ₂ ,t ₃ ,t ₄ ,t ₅
Cl ⁻	5	outlet reaktor	t ₀ , t ₃ ,t ₅

Keterangan :

t₀ = 0 menit

t₁ = 15 menit

t₂ = 30 menit

t₃ = 60 menit

t₄ = 120 menit

t₅ = 240 menit

3.2.3 Studi Literatur

Studi literatur digunakan untuk mendapatkan Informasi dan teori yang menunjang dalam pelaksanaan penelitian. Literatur dapat diperoleh melalui buku, jurnal penelitian, artikel, laporan tugas akhir, *thesis*, asistensi dengan dosen pembimbing, dan sebagainya. Literatur yang dapat menunjang penelitian ini adalah mengenai hal-hal berikut ini:

- Karakteristik lindi
- Alternatif pengolahan lindi
- Mekanisme proses elektrooksidasi dalam menurunkan polutan organik dan senyawa *recalcitrant* pada lindi
- Hubungan antar parameter uji dan variasi penelitian
- Faktor-faktor yang mempengaruhi proses elektrooksidasi
- Anoda *boron-doped diamond* (BDD) dan *dimensionally stable anode* (DSA)

3.2.4 Persiapan Penelitian

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

A. Alat

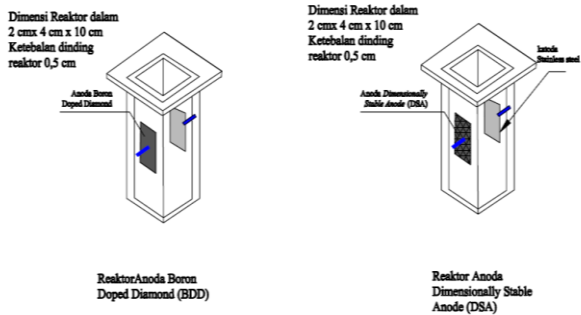
Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Reaktor Elektrokimia

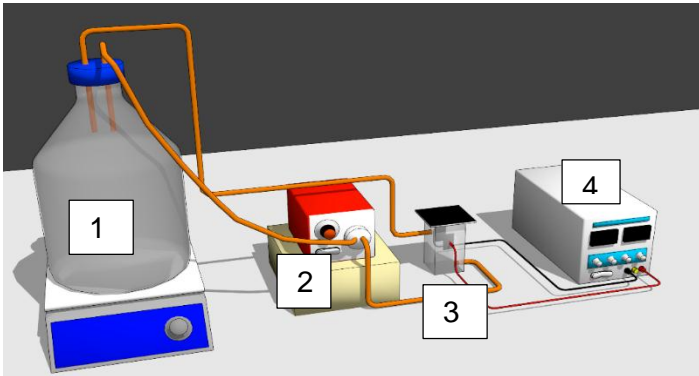
Reaktor yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari bahan akrilik dengan tebal dinding 0,5 cm. Ukuran reaktor yang digunakan adalah 2 cm x 4 cm x 10 cm (dimensi dalam, volume efektif 80 mL). Pemilihan ukuran reaktor tersebut berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh fernandes *et al.* (2014 a), dengan volume reaktor 200 mL. Pada penelitian oleh fernandes *et al.* (2014 a), mampu meningkatkan penyisihan COD sebesar 95% serta peningkatan rasio BOD/COD dari 0,3 menjadi 0,88. Penggunaan volume efektif 200 mL mempengaruhi oksidasi pada anoda. Ukuran reaktor berperan untuk proses oksidasi (kontak antara permukaan anoda dengan air) untuk membentuk agen pengoksidasi yang akan bereaksi untuk menyisihkan COD (Garcia-Segura *et al.*, 2018). Sehingga dalam penelitian ini digunakan ukuran reaktor yang lebih kecil dengan harapan mampu meningkatkan penyisihan karena mempercepat kontak antara permukaan anoda dengan air lindi. Pada penelitian ini dipilihlah ukuran reaktor 2 cm x 4 cm x 10 cm dengan volume efektif 80 mL.

Reaktor ini memiliki lubang sebagai inlet di bagian bawah dan outlet di bagian atas. Inlet dan outlet ini terletak pada sisi yang berseberangan. Reaktor terdiri dari satu kompartemen dimana anoda dan katoda diletakkan di dalam kompartemen yang sama. Pertimbangan untuk menggunakan satu kompartemen (*undivided cell*) ini adalah berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Bagastyo *et al.* (2014), bahwa penyisihan COD pada konfigurasi reaktor *undivided cell* dan *membrane-devided cell* menunjukkan hasil yang sama. Namun, energi yang dibutuhkan pada sistem *undivided cell* lebih efisien (0,24 kWh/g COD) dibandingkan pada sistem *membrane-devided cell* (0,34 kWh/g COD). Aliran dalam

reaktor ini adalah *batch recirculation*. Lindi akan dialirkan dari *feed tank* ke reaktor dengan bantuan pompa peristaltik. Setelah lindi dalam reaktor penuh, lindi akan terdorong keluar melalui outlet dan dialirkan kembali ke *feed tank*. Skema reaktor elektrokimia dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2. serta skema operasional penelitian terdapat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 2 Reaktor Elektrokimia



Gambar 3. 3 Skema operasional Reaktor Elektrokimia

Keterangan :

1. Feed Tank
2. Pompa Peristaltik
3. Reaktor Elektrokodisasi
4. DC Power Supply

1. Elektroda

Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah BDD dan DSA sebagai anoda dan *Stainless Steel* sebagai katoda. Ukuran elektroda yang digunakan yaitu 2 cm x 4 cm . Dengan masing-masing luas anoda 8 cm² sedangkan pada anoda DSA luasnya 6 cm² hal ini terjadi karena ukuran anoda DSA tidak sepenuhnya tertutup tetapi memiliki zona-zona berlubang. Jarak antara kedua elektroda yang digunakan adalah 2 cm. Pemilihan jarak sebesar 2 cm dilakukan karena untuk mengurangi hambatan yang ada sehingga energi yang dibutuhkan dalam proses elektrokodisasi bisa menurun. Selain itu dalam penelitian yang dilakukan oleh Yulianto *et al.* (2009), saat menggunakan jarak elektroda sebesar 1,5 cm mampu meningkatkan penyisihan polutan organik hingga 88 %. Namun karena memperhatikan pembentukan agen pengoksidasi yang kuat disekitar anoda, apabila jaraknya terlalu dekat akan menyebabkan agen pengoksidasi yang terbentuk tidak maksimal mengoksidasi karena mengalami reduksi kembali. Penggunaan jarak antar elektroda 2 cm mampu meningkatkan penyisihan COD hingga 95% dan meningkatkan rasio BOD5/COD dari 0,3 menjadi 0,88 (Fernandes *et al.*, 2014 a). Sehingga dipilihlah jarak 2 cm dalam penelitian ini. Sebelum digunakan untuk mengelektrokodisasi lindi, elektroda ini harus dipolarisasi terlebih dahulu dalam larutan asam kuat.

2. Pompa peristaltik

Pompa digunakan untuk mengalirkan lindi dari *feed tank* ke reaktor elektrokimia. Debit yang akan digunakan dalam penelitian ini akan ditentukan melalui percobaan pendahuluan dengan menggunakan debit 1 mL/detik dan 5 mL/detik.

3. DC Power Supply

DC power supply ini berfungsi sebagai sumber listrik pada proses elektooksidasi lindi. Spesifikasi DC power supply yang digunakan adalah Cody 3005DT dengan kuat arus 0-5A dan tegangan 0-30 V. Dalam penelitian ini, DC *Power Supply* akan di setting *constant current*, yang artinya kuat arus yang digunakan selama operasi reaktor dibuat constant, sehingga yang berubah adalah tegangannya.

4. Selang dengan diameter 0,5 cm

Selang digunakan untuk mengalirkan lindi dari *feed tank* ke reaktor dan sebaliknya. Selang yang digunakan adalah selang *chemical resistant* dengan pertimbangan bahwa lindi yang akan digunakan dalam beberapa perlakuan dikondisikan pada pH asam.

5. Kabel

Kabel digunakan untuk mengalirkan arus listrik dari DC *power supply* ke elektroda.

6. *Copper tape* dan kawat tembaga

Copper tape dan kawat tembaga ini digunakan untuk menghubungkan antara elektroda dengan DC *power supply*.

7. *Feed tank* dan *magnetic Strirrer*

Feed tank digunakan sebagai tempat untuk menampung lindi. *Feed tank* yang digunakan adalah botol duran dengan ukuran 2 L yang akan diisi 1L, 1,5 L dan 2 Liter sampel lindi. Sedangkan, *magnetic stirrer* digunakan untuk menghomogenkan lindi di dalam *feed tank*.

B. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Lindi

Lindi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari TPA Ngipik Gresik. Volume lindi yang digunakan dalam sekali perlakuan (eksperimen) bervariasi 1 Liter, 2 liter dan 1,5 Liter. Sebelum diolah lindi terlebih dahulu disaring dengan kertas saring yang memiliki diameter pori 10 μ (10 mikron). Hal ini dilakukan untuk mengurangi padatan tersuspensi yang dapat

mengganggu proses elektrooksidasi. Uji karakteristik awal lindi dilakukan sebelum dilakukan penelitian utama. Uji karakteristik awal dilakukan pada parameter COD, BOD₅, BOD₅/COD, SO₄²⁻, pH, TDS, Cl⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺.

2. Reagen

Reagen yang digunakan untuk analisis parameter BOD₅ dan COD.

3. NaCl

Penambahan NaCl dengan konsentrasi 0,05 M.

3.2.5 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan pada penelitian ini bertujuan untuk:

- Uji karakteristik awal lindi
Parameter yang diuji pada penelitian pendahuluan ini yaitu COD, BOD₅, BOD₅/COD, SO₄²⁻, pH, TDS, Cl⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺.
- Penentuan debit
Dilakukan penentuan debit operasional pompa antara debit 1 mL/detik dan 5 mL/detik. Penggunaan debit 1 mL/detik dan 1,5 mL/detik dapat menyisihkan COD 56 % dan 64 % (Fernandes *et al.*, 2014 a). Sedangkan variasi debit lain yang akan digunakan yaitu debit 5 mL/detik.
- Waktu operasional
Waktu operasional yang digunakan dalam penelitian ini yaitu selama 4 jam dengan pengambilan sampel pada titik 0 menit, 15 menit, 30 menit, 1 jam, 2 jam dan 4 jam. Pemilihan waktu operasional selama 4 jam karena penurunan terhadap COD dapat terjadi secara optimum dan stabil sebesar 25% (Agustina, 2018). Sedangkan pengambilan sampel dilakukan pada waktu 15 menit dan 30 menit karena pada waktu tersebut terjadi fluktuasi kenaikan dan penurunan penyisihan senyawa organik yang menunjukkan adanya aktivitas pemecahan senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana (Nurhayati *et al.*, 2017).

3.2.6 Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan dengan variasi terhadap kerapatan arus dan volume efektif reaktor. Variasi dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Matriks Variasi Bahan uji Penelitian

Kerapatan arus (mA cm ⁻²)	Rasio Volume Efektif					
	BDD			DSA		
	1/12,5 (A)	1/18,75 (B)	1/25 (C)	1/12,5 (D)	1/18,75 (E)	1/25 (F)
10 (A)	AA	AB	AC	AD	AE	AF
30 (B)	BA	BB	BC	BD	BE	BF
50 (C)	CA	CB	CC	CD	CE	CF

Keterangan:

AA : perlakuan anoda BDD kuat arus (10 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/12,5

AB: perlakuan anoda BDD kuat arus (10 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/18,75

AC: perlakuan anoda BDD kuat arus (10 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/ 25

BA: perlakuan anoda BDD kuat arus (30 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/12,5

BB: perlakuan anoda BDD kuat arus (30 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/18,75

BC: perlakuan anoda BDD kuat arus (30 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/ 25

CA: perlakuan anoda BDD kuat arus (50 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/12,5

CB: perlakuan anoda BDD kuat arus (50 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/18,75

CC: perlakuan anoda BDD kuat arus (50 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/25

AD : perlakuan anoda DSA kuat arus (10 mA cm⁻²) dengan rasio volume efektif 1/12,5

AE: perlakuan anoda DSA kuat arus (10 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/18,75

AF: perlakuan anoda DSA kuat arus (10 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/25

BD: perlakuan anoda DSA kuat arus (30 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/12,5

BE: perlakuan anoda DSA kuat arus (30 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/18,75

BF: perlakuan anoda DSA kuat arus (30 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/25

CD: perlakuan anoda DSA kuat arus (50 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/12,5

CE: perlakuan anoda DSA kuat arus (50 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/18,75

CF: perlakuan anoda DSA kuat arus (50 mA cm^{-2}) dengan rasio volume efektif 1/25

Rasio volume efektif 1/12,5 = 80 mL volume reaktor/ 1000 mL volume *holding tank*

Rasio volume efektif 1/18,75 = 80 mL volume reaktor/ 1500 mL volume *holding tank*

Rasio volume efektif 1/25 = 80 mL volume reaktor/ 2000 mL volume *holding tank*

3.2.7 Analisis dan Pembahasan

Analisis dan pembahasan dilakukan terhadap kualitas efluen yang dihasilkan berdasarkan parameter COD, BOD₅, BOD₅/COD, pH, TDS, Cl⁻. Kemudian dianalisis dan dibahas mengenai pengaruh kuat arus dan rasio volume efektif terhadap penyisihan polutan organik lindi untuk peningkatan indeks biodegradabilitas lindi. Penyajian data hasil analisis ini dalam bentuk tabel dan grafik.

3.2.8 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran merupakan tahapan terakhir dalam penelitian. Pada tahap ini, penulis menyimpulkan hasil analisis data dan pembahasan dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan ditulis sesuai hasil penelitian dan menjawab tujuan. Saran merupakan rekomendasi untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya. Tujuan dari saran ini adalah untuk menyempurnakan dan memperbaiki penelitian sebelumnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan dengan tujuan untuk melakukan uji karakteristik awal lindi serta menentukan debit operasional pompa yang akan digunakan dalam penelitian utama.

4.1.1 Karakteristik Awal Lindi

Lindi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari TPA Ngipik, Gresik. Lindi diambil dari sumur pengumpul sebelum dialirkan menuju inlet *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR). Karakteristik lindi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Uji Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik

Parameter	Unit	Konsentrasi
pH		8,58
TDS	g L ⁻¹	7,93
COD	mg O ₂ L ⁻¹	2011
Cl ⁻	mg L ⁻¹	5198
NO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	14,77
NO ₂ ⁻	mg L ⁻¹	7,601
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	173,776
SO ₄ ²⁻	mg L ⁻¹	1033,33
BOD ₅	mg O ₂ L ⁻¹	133,33
BOD ₅ /COD		0,066

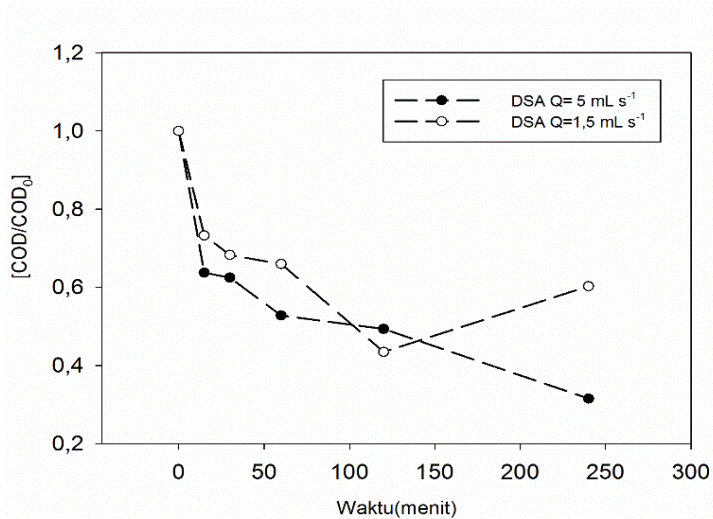
Melalui Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa karakteristik awal lindi TPA Ngipik Gresik memiliki kandungan bahan organik (terukur sebagai COD) sebesar yaitu 2011 mg L⁻¹, serta nilai BOD sebesar 133,33 mg L⁻¹. Rasio dari BOD₅/COD menunjukkan nilai yang sangat rendah yaitu 0,066. Rasio BOD₅/COD yang rendah tersebut menandakan tingginya senyawa organik *recalcitrant* yang terkandung dalam lindi (Renou *et al.*, 2008). Berdasarkan Alvarez-Vazquez *et al.* (2004) yang mengklasifikasikan lindi sesuai umur *landfill*, lindi dengan nilai rasio kurang dari 0,1 dan konsentrasi COD kurang dari 4000 mg L⁻¹ termasuk dalam lindi *stabilized*

(terstabilisasi). Sehingga lindi TPA Ngipik Gresik termasuk lindi *stabilized* yang dihasilkan dari *landfill* yang berumur lebih dari 10 tahun. Lindi terstabilisasi sulit diolah oleh pengolahan biologis karena tingginya polutan senyawa organik non *biodegradable* dalam lindi. Menurut Renou *et al.* (2008), pengolahan biologis efektif menghilangkan polutan organik pada rasio $BOD_5/COD > 0,5$. Maka dari itu dibutuhkan *pre-treatment* untuk meningkatkan biodegradabilitas lindi sebelum diolah secara biologis. *Pre-treatment* dapat dilakukan dengan pengolahan fisik-kimia. Keuntungan dari proses fisik-kimia mampu memecah polutan organik kompleks (senyawa *recalcitrant*) dalam lindi (Kurniawan *et al.*, 2006). Dalam penelitian ini, proses pengolahan fisik-kimia yang digunakan adalah proses elektooksidasi. Selain itu, kandungan klorida lindi TPA Ngipik Gresik tergolong tinggi yaitu 5198 mg L^{-1} . Kadar klorida dalam lindi yang tinggi dapat menjadi keuntungan dalam proses elektooksidasi, karena hambatan listrik yang ditimbulkan semakin kecil sehingga energi listrik yang dibutuhkan semakin rendah (Bagastyo *et al.*, 2014).

4.1.2 Penentuan Debit Proses Elektooksidasi

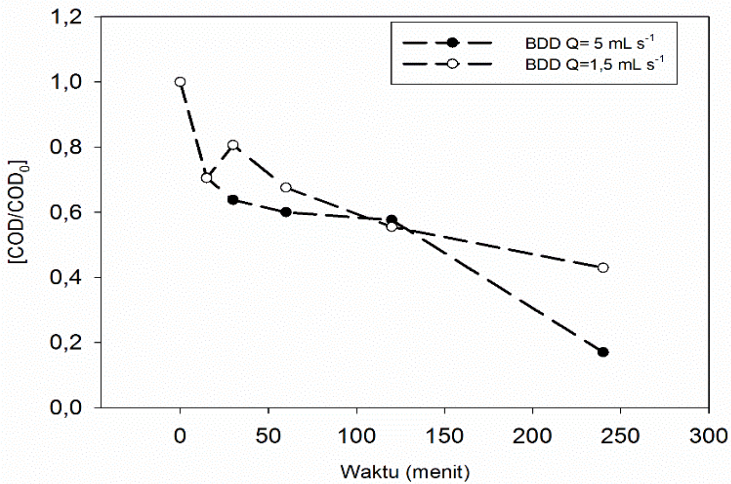
Debit proses elektooksidasi merupakan debit pompa yang akan digunakan selama proses pengolahan lindi. Debit yang digunakan dalam penelitian pendahuluan yaitu $1,5 \text{ mL s}^{-1}$ dan 5 mL s^{-1} dengan waktu tinggal lindi dalam reaktor masing-masing 53,3 dan 16 detik. Durasi proses oksidasi dalam penelitian pendahuluan yaitu 4 jam dengan 6 titik sampel yaitu t_0 (awal), t_1 (15 menit), t_2 (30 menit), t_3 (60 menit), t_4 (120 menit) dan t_5 (240 menit). Volume lindi yang digunakan pada penelitian pendahuluan yaitu 1 Liter dan kerapatan arus 30 mA cm^{-2} . Anoda yang digunakan adalah *dimensionally stable anode* (DSA) dan *boron-doped diamod* (BDD). Parameter yang dianalisis pada penelitian pendahuluan meliputi BOD_5 , COD, pH, TDS, Cl^- dan rasio BOD_5/COD .

Hasil penelitian pendahuluan berupa pengaruh debit terhadap penurunan $[COD/COD_0]$ dapat dilihat pada Gambar 4.1. (menggunakan anoda DSA) dan Gambar 4.2. (menggunakan anoda BDD). Tabel data hasil analisis terdapat pada Lampiran C Tabel LC.1 sampai Tabel LC.2.



Gambar 4. 1 Pengaruh Debit Operasional terhadap Penurunan [COD/COD₀] Anoda DSA

Berdasarkan Gambar 4.1 saat proses elektrooksidasi menggunakan anoda DSA menunjukkan penurunan [COD/COD₀] cukup tinggi. Penurunan [COD/COD₀] untuk debit 1,5 mL s⁻¹ berurut-turut saat menit ke 0, 15, 30, 60, 120 dan 240 adalah 27% (0,47 g); 32 % (0,57 g); 34 % (0,63 g); 57% (0,99 g); 40% (0,76 g). Kemudian untuk debit 5 mL s⁻¹ terjadi penurunan [COD/COD₀] berurut-turut saat menit ke 0, 15, 30, 60, 120 dan 240 adalah 36% (0,76 g); 38% (0,81 g); 47% (1,02 g); 51% (1,10 g); 68% (1,45 g). Hal ini menunjukkan bahwa penyisihan massa COD anoda DSA lebih cepat terjadi saat operasional reaktor dengan debit 5 mL s⁻¹.

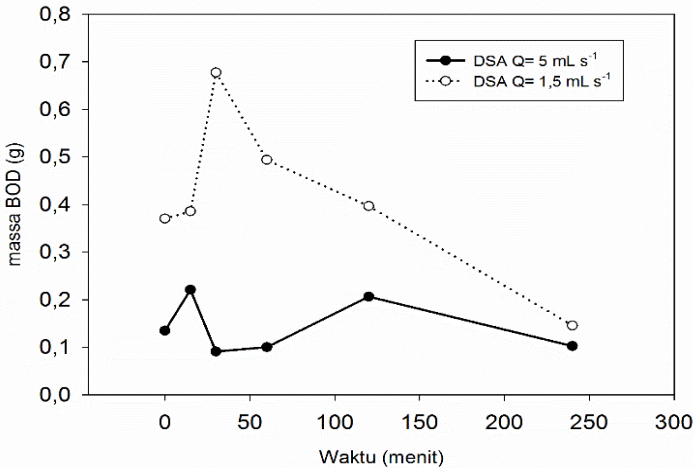


Gambar 4.2 Pengaruh Debit Operasional terhadap Penurunan [COD/COD₀] Anoda BDD

Penurunan [COD/COD₀] pada anoda BDD Gambar 4.2 untuk debit 1,5 mL s⁻¹ berurut-turut saat menit ke 0, 15, 30, 60, 120 dan 240 adalah 29% (0,40 g); 19% (0,29 g); 32% (0,48 g); 44% (0,64 g); 57% (0,80 g). Kemudian untuk debit 5 mL s⁻¹ berurut-turut saat menit ke 0, 15, 30, 60, 120 dan 240 adalah 29% (0,57 g); 36% (0,72 g); 40% (0,80 g); 42% (0,87 g); 83% (1,57g). Hal ini menunjukkan bahwa penurunan [COD/COD₀] pada saat menggunakan anoda BDD lebih cepat ketika debit pompa 5 mL s⁻¹. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penurunan nilai [COD/COD₀] pada kedua variasi anoda (BDD dan DSA) lebih cepat dengan operasi reaktor menggunakan pompa debit 5 mL s⁻¹.

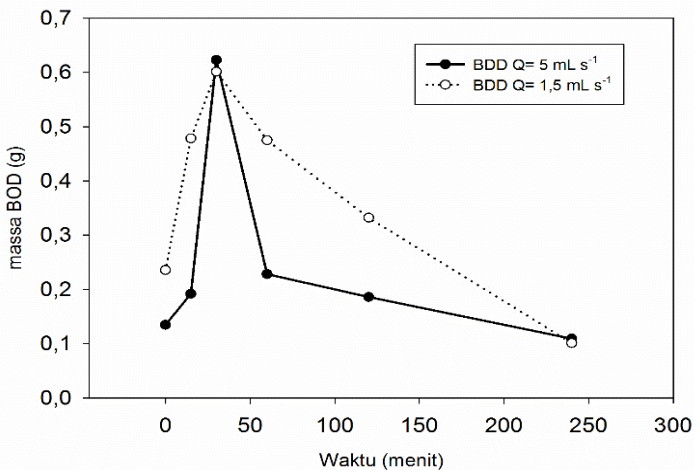
Selanjutnya parameter BOD₅ diukur pada semua titik sampel yaitu t₀ (awal), t₁ (15 menit), t₂ (30 menit), t₃ (60 menit), t₄ (120 menit) dan t₅ (240 menit). Perubahan BOD₅ selama penelitian pendahuluan dapat dilihat pada Gambar 4.3. (menggunakan anoda DSA) dan Gambar 4.4. (menggunakan anoda BDD). Tabel

Data hasil analisis BOD₅ terdapat pada Lampiran C Tabel LC.3 dan Tabel LC.4.



Gambar 4.3 Pengaruh Debit Operasional terhadap Perubahan BOD₅ Anoda DSA

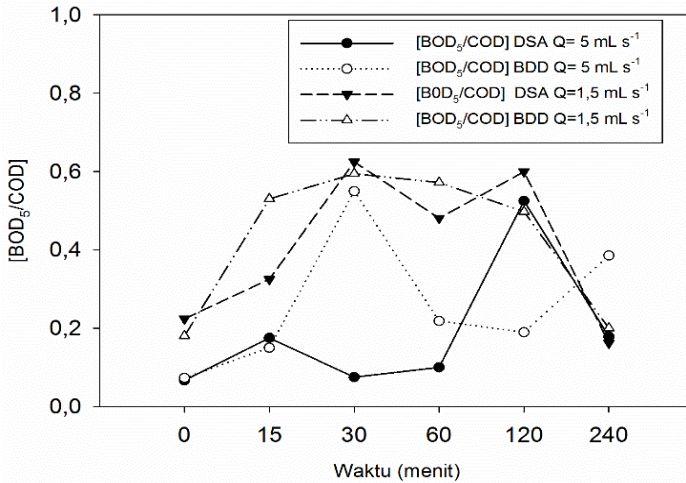
Hasil analisis BOD₅ untuk debit 5 mL s⁻¹ menunjukkan terjadinya peningkatan massa BOD (g) saat menit ke 15 dan 30 berturut-turut adalah 70% (0,09 g), 68% (0,08 g) dari masa BOD (g) sebelumnya. Sedangkan pada saat menit ke 60, 120 dan 240 terjadi penurunan massa BOD berturut-turut yaitu 20% (0,04 g), 25% (0,03 g), 25% (0,03 g). Kemudian untuk debit 1,5 mL s⁻¹ saat menit ke 15 dan 30 terjadi peningkatan massa BOD (g) berturut-turut yaitu 7% (0,02 g), 85% (0,31 g). Kemudian pada menit 60, 120 dan 240 terjadi penurunan massa BOD dari massa sebelumnya. Massa BOD saat menit terakhir (240 menit) menunjukkan penurunan massa BOD 60% (0,22 g) dari massa awal BOD (0,37 g). Melalui hasil penyisihan diatas, nampak bahwa penyisihan massa BOD (g) paling besar terjadi pada operasional reaktor dengan debit 1,5 mL s⁻¹ mampu menyisihkan massa BOD (g) hingga 60 % dari massa BOD awal. Sedangkan saat penggunaan 5 mL s⁻¹ hanya 25% dari massa BOD awal.



Gambar 4.4 Pengaruh Debit Operasional terhadap Penyisihan BOD₅ Anoda BDD

Pada anoda BDD untuk debit 5 mL s⁻¹ menunjukkan terjadinya peningkatan massa BOD saat menit ke 15 dan 30 berturut-turut yaitu 1/5 kali (0,06 g), 4 kali (0,49 g) dari massa BOD awal. Kemudian massa BOD tersebut mengalami penurunan dari massa sebelumnya. Massa BOD pada t₅ (240 menit) menunjukkan penurunan sebesar 15 % dari massa BOD awal. Kemudian untuk debit 1,5 mL s⁻¹ saat menit ke 15 dan 30 terjadi peningkatan massa BOD berturut-turut yaitu 2 kali (0,24 g), 2,5 kali (0,36 g) dari massa awal. Selanjutnya pada menit 60, 120 dan 240 terjadi penurunan massa BOD dari massa sebelumnya. Massa BOD saat menit terakhir t₅ (240 menit) menunjukkan penurunan massa BOD 48% (0,14 g) dari massa awal (0,24 g). Dari hasil diatas, menunjukkan peningkatan massa BOD (g) terbesar terjadi saat operasional reaktor dengan debit 5 mL s⁻¹ yaitu 4 kali (0,49 g) massa awal BOD (g). Sedangkan penyisihan massa BOD (g) hingga akhir operasional terbesar terjadi saat operasional dengan debit 1,5 mL s⁻¹ dengan penyisihan 48% (0,14 g) dari massa BOD (g) awal (0,24 g).

Selanjutnya dilihat perubahan rasio BOD₅/COD diukur pada semua titik sampel yaitu t₀ (awal), t₁ (15 menit), t₂ (30 menit), t₃ (60 menit), t₄ (120 menit) dan t₅ (240 menit). Perubahan rasio BOD₅/COD selama penelitian pendahuluan dapat dilihat pada Gambar 4.5. Data lengkap rasio BOD₅/COD terdapat pada Lampiran C Tabel LC.5 dan LC.6.



Gambar 4.5 Perubahan BOD₅/COD selama proses elektroosidasi

Perubahan biodegradabilitas pada lindi dinyatakan dengan rasio BOD₅/COD. Pada saat operasional dengan debit 5 mL s⁻¹ terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD saat t₁ (15 menit) pada kedua jenis anoda (BDD dan DSA) berturut-turut yaitu 2 kali (0,077) dan 2,6 kali (0,108) rasio BOD₅/COD awal. Kemudian saat t₂ (30 menit) pada anoda DSA terjadi penurunan rasio BOD₅/COD dari 0,175 menjadi 0,075. Sedangkan pada anoda BDD mengalami kenaikan rasio dari 0,15 menjadi 0,55. Selanjutnya terjadi penurunan rasio pada anoda BDD hingga akhir operasional. Namun hal ini berbeda dengan anoda DSA justru terjadi kenaikan rasio BOD₅/COD 2 kali

dari 0,1 menjadi 0,22 saat t_4 (120 menit), kemudian rasio BOD₅/COD mengalami penurunan hingga akhir waktu operasional.

Pada operasional reaktor anoda BDD dengan debit 1,5 mL s⁻¹ terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD 3 kali lipat (0,35) dari rasio BOD₅/COD awal. Kemudian pada t_2 (30 menit) peningkatan hanya sebesar 0,05 dari rasio sebelumnya. Saat t_3 (60 menit), t_4 (120 menit) dan t_5 (240 menit) terjadi penurunan rasio BOD₅/COD berturut-turut sebesar 0,02, 0,08 dan 0,29.

Sedangkan untuk anoda DSA dengan debit yang sama terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD berturut-turut dari t_1 (15 menit) dan t_2 (30 menit) sebesar ½ kali lipat (0,115) dan 2 kali lipat (0,3) dari rasio BOD₅/COD sebelumnya. Kemudian saat t_3 (60 menit) terjadi penurunan rasio BOD₅/COD sebesar 35% (0,14) dari rasio sebelumnya. Selanjutnya pada saat t_4 (120 menit) terjadi peningkatan sebesar 0,11. Rasio BOD₅/COD tersebut kemudian mengalami penurunan hingga 4 kali (0,44) rasio sebelumnya.

Hasil perubahan rasio BOD₅/COD menunjukkan bahwa peningkatan rasio yang signifikan antara kedua debit memberikan hasil yang hampir sama yaitu berkisar pada peningkatan 2 kali lipat dari rasio awal.

Hasil penelitian pendahuluan dengan debit 5 mL s⁻¹ memiliki efisiensi penyisihan COD sebesar 68% untuk anoda DSA dan 83% untuk anoda BDD. Penyisihan BOD sebesar 25% untuk anoda DSA dan 15% untuk anoda BDD. Kemudian peningkatan rasio BOD₅/COD 2,6 kali untuk anoda DSA dan 5,5 kali untuk anoda BDD dari rasio awal. Sedangkan saat debit 1,5 mL s⁻¹ memiliki efisiensi penyisihan COD sebesar 40 % untuk anoda DSA dan 57% untuk anoda BDD. Penyisihan BOD sebesar 50% untuk anoda DSA dan 48% untuk anoda BDD. Serta rasio BOD₅/COD untuk anoda DSA mengalami penurunan 25 % dari rasio awal dan peningkatan 10% rasio BOD₅/COD untuk anoda BDD.

Selain itu dilakukan pengukuran pH dan TDS selama proses elektrooksidasi tersebut. Hasil pengukuran pH dan TDS menunjukkan kedua parameter tersebut secara keseluruhan tidak terjadi perubahan yang signifikan baik pada operasional debit 5

mL s⁻¹ maupun debit 1,5 mL s⁻¹. Hasil data pengukuran pH dan TDS dapat dilihat pada Lampiran C. Tabel LC.7 dan LC.8. Melalui analisis data diatas diperoleh efisiensi yang lebih besar pada operasional reaktor dengan debit 5 mL s⁻¹ selain itu terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD pada debit ini sebesar 2,6 kali lipat untuk anoda DSA dan 5,5 kali lipat untuk anoda BDD. Maka, dapat disimpulkan pada penelitian utama debit yang digunakan yaitu 5 mL s⁻¹. Debit aliran yang tinggi meningkatkan turbulensi dan difusi aliran dalam reaktor sehingga mempercepat perpindahan massa dalam reaktor (anglada *et al.*, 2010). Selain itu, menurut Zhou *et al.* (2016), proses elektrok oksidasi dengan debit yang rendah harus dihindari, karena debit yang rendah dapat menyebabkan elektrolit akan berada dalam reaktor untuk waktu yang lama, akibatnya menimbulkan peningkatan suhu dalam reaktor dan peningkatan pembentukan gas yang dapat mempengaruhi transportasi massa dalam reaktor. Hal ini dapat menurunkan efisiensi penyisihan polutan organik dalam lindi.

4.2 Penelitian Utama

Penelitian utama bertujuan mengetahui pengaruh variasi kerapatan arus dan rasio volume efektif reaktor terhadap peningkatan indeks biodegradabilitas lindi. Selain itu penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh jenis elektroda (anoda *boron-doped diamond* dan *dimensionally stable anode*) terhadap proses elektrok oksidasi. Variasi yang digunakan adalah variasi kerapatan arus yaitu 10 mA cm⁻², 30 mA cm⁻² dan 50 mA cm⁻² serta variasi volume efektif reaktor yaitu 1/12,5, 1/18,75 dan 1/25. Tujuan dari variasi kerapatan arus yang digunakan yaitu untuk menentukan pengaruh kerapatan arus dalam penyisihan polutan organik. Proses oksidasi dengan anoda *boron-doped diamond* efektif dalam peningkatan biodegradabilitas lindi pada kerapatan arus 25-65 mA cm⁻² (Kur niawan *et al.*, 2010). Sedangkan pada anoda *dimensionally stable anode* jenis Ti/IrO₂ memiliki keuntungan penyisihan polutan organik pada kerapatan arus yang rendah (50 mA cm⁻²) apabila kerapatan arus ditingkatkan menjadi 100 mA cm⁻² maka penyisihan COD hanya meningkat 7% dari 82,4 % menjadi 89 % (Markou *et al.*, 2017). Selain itu menurut Li *et al.*, (2016) anoda DSA mampu meningkatkan rasio BOD/COD dari 0,12 menjadi 0,38. Pemilihan variasi volume efektif reaktor

bertujuan untuk menentukan efektivitas reaktor dalam mengolah lindi.

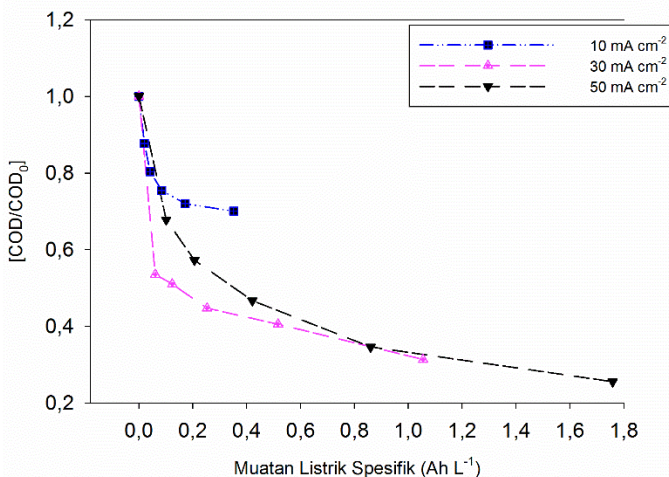
Pelaksanaan penelitian utama ini mengacu pada hasil penelitian pendahuluan. Berdasarkan penelitian pendahuluan debit operasional pompa yang akan digunakan yaitu 5 mL s^{-1} . Pengambilan sampel dilakukan sebanyak 6 kali yaitu t_0 sampai t_5 dengan rincian t_0 (awal), t_1 (15 menit), t_2 (30 menit), t_3 (60 menit), t_4 (120 menit) dan t_5 (240 menit). Proses elektrooksidasi lindi dikondisikan pada pH awal 3 dan penambahan elektrolit 0,05 M NaCl (Agustina, 2018).

Pengondisian pH awal 3 bertujuan untuk meningkatkan penyisihan senyawa organik. Berdasarkan Li *et al.*, (2001) pada penyisihan COD penerapan pH asam (pH 3) menghasilkan penyisihan 20% lebih tinggi dibandingkan penyisihan COD pada pH basa (pH 8). Sedangkan tujuan penambahan NaCl untuk mendukung pembentukan *active species* selama proses elektrooksidasi. Musa *et al.*, (2013) menyatakan bahwa penambahan NaCl dapat meningkatkan konduktivitas atau daya hantar listrik (DHL) pada elektrolit. Semakin besar DHL, maka semakin sedikit energi konsumsi listrik yang dibutuhkan selama proses elektrolisis. Selain itu menurut penelitian Agustina (2018) dengan reaktor yang sama, pada beberapa variasi yang berbeda menyatakan bahwa pada penambahan 0,05 M NaCl dan pH 3 terjadi peningkatan rasio $[\text{BOD}_5/\text{COD}]$ dari 0,37 menjadi 0,48. Sedangkan pada variasi lain seperti penambahan 0,05 M Na_2SO_4 , 0,025 NaCl + 0,025 M Na_2SO_4 serta tanpa penambahan elektrolit (kontrol) menunjukkan hasil justru terjadi penurunan rasio $[\text{BOD}_5/\text{COD}]$. Selain itu, penggunaan elektrolit NaCl memiliki kemampuan oksidasi COD yang tinggi karena pembentukan HClO , ClO^- maupun Cl_2 yang akan semakin meningkatkan kehadiran *active species*. Selain peningkatan indeks biodegradabilitas, pada pH 3 dan penambahan 0,05 M NaCl mampu menyisihkan COD hingga 68% sedangkan pada variasi tanpa penambahan elektrolit menunjukkan penyisihan COD yang paling rendah yaitu 37%. Sehingga dalam penelitian ini tidak digunakan variasi tanpa penambahan elektrolit.

Parameter yang akan dianalisis pada penelitian utama yaitu COD, BOD₅ serta perubahan rasio BOD₅/COD. Selain itu diukur pula Cl⁻, pH dan TDS selama proses elektrooksidasi. Penyajian data COD dilakukan dalam grafik hubungan sumbu x dan y. Penyajian data COD dilakukan 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 muatan listrik spesifik (Ah L⁻¹). Muatan listrik spesifik merupakan hubungan antara kuat arus, waktu dan jumlah lindi yang diolah selama proses elektrooksidasi.

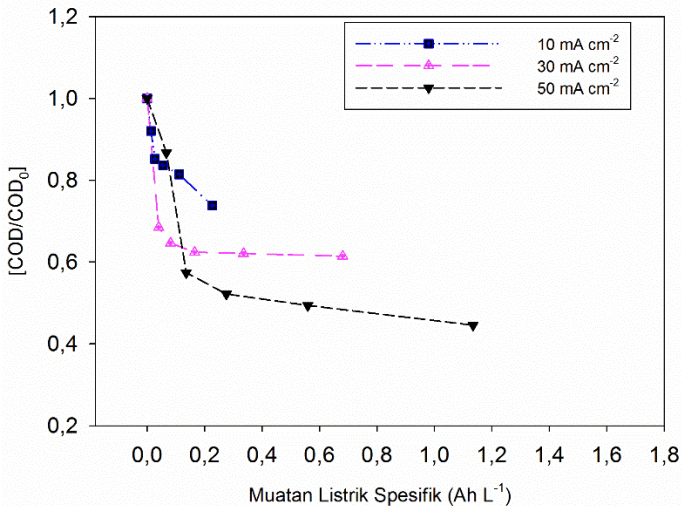
4.2.1 Penyisihan COD pada Anoda BDD

Penurunan nilai COD dinyatakan dalam rasio massa COD pada waktu (t) dengan massa COD₀. Hasil analisis pengaruh kerapatan arus terhadap penurunan COD menggunakan anoda BDD dapat dilihat pada Gambar 4.6 (rasio volume efektif 1/12,5), Gambar 4.7 (rasio volume efektif 1/18,75) dan Gambar 4.8 (rasio volume efektif 1/25). Sedangkan data hasil analisis COD terdapat pada Lampiran C Tabel LB.9 hingga Tabel LB.11.



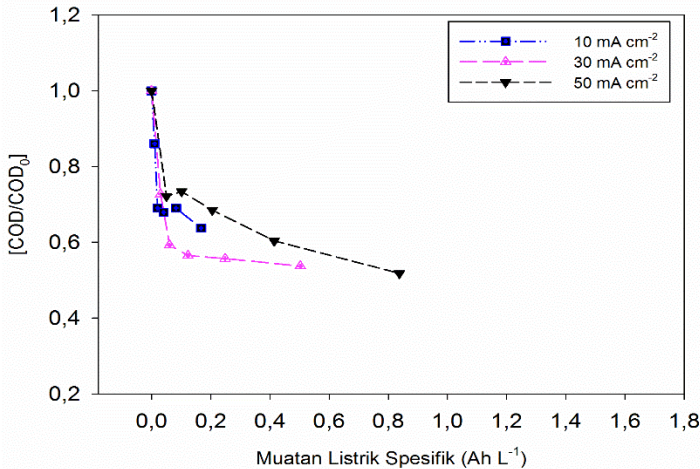
Gambar 4.6 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5

Proses elektrooksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/12,5 (80 mL volume sel elektrooksidasi/1000 mL lindi yang diolah) menunjukkan terjadinya penyisihan nilai COD. Penyisihan tersebut terjadi pada semua variasi kerapatan arus (10 mA cm^{-2} , 30 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2}). Penyisihan nilai COD dengan durasi waktu proses yang sama (240 menit) menunjukkan bahwa pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} menghasilkan penyisihan yang paling tinggi yaitu 74%. Kemudian diikuti oleh kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dan 10 mA cm^{-2} dengan persen penyisihan 69% dan 30%. Selain itu dari hasil data analisis diperoleh pula titik optimum penyisihan COD. Titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,065 \text{ Ah L}^{-1}$ menghasilkan penyisihan massa COD sebesar $0,67 \text{ g}$. Sedangkan pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dan 50 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik yang sama hanya menghasilkan penyisihan COD berturut-turut sebesar $0,28 \text{ g}$ dan $0,27 \text{ g}$.



Gambar 4.7 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75

Proses elektrooksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/18,75 (80 mL/1500 mL) menunjukkan terjadinya penyisihan nilai COD. Penyisihan tersebut terjadi pada semua variasi kerapatan arus (10 mA cm⁻², 30 mA cm⁻², 50 mA cm⁻²). Penyisihan nilai COD dengan durasi waktu proses yang sama (240 menit) menunjukkan bahwa pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² menghasilkan penyisihan yang paling tinggi yaitu 55%. Kemudian diikuti oleh kerapatan arus 30 mA cm⁻² dan 10 mA cm⁻² dengan persen penyisihan 39% dan 27%. Selain itu dari hasil data analisis di peroleh pula titik optimum penyisihan massa COD. Titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan muatan listrik spesifik 0,046 Ah L⁻¹ menghasilkan penyisihan massa COD sebesar 0,95 g. Sedangkan pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² dan 50 mA cm⁻² dengan muatan listrik spesifik yang sama hanya menghasilkan penyisihan COD berturut-turut sebesar 0,38 g dan 0,23 g.

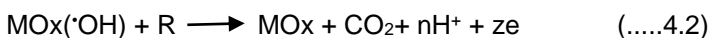
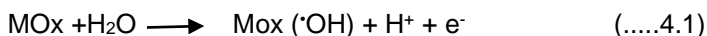


Gambar 4.8 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25

Proses elektrooksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/25 (80 mL/2000 mL) menunjukkan terjadinya penyisihan nilai COD.

Penyisihan tersebut terjadi pada semua variasi kerapatan arus (10 mA cm⁻²; 30 mA cm⁻² ; 50 mA cm⁻²). Penyisihan nilai COD dengan durasi waktu proses yang sama (240 menit) menunjukkan bahwa pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² dan kerapatan 30 mA cm⁻² menghasilkan penyisihan yang hampir sama yaitu 49% dan 47%. Kemudian diikuti oleh kerapatan arus 10 mA cm⁻² dengan persen penyisihan 37%. Selain itu dari hasil data analisis diperoleh pula titik optimum penyisihan massa COD. Titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan muatan listrik spesifik 0,031 Ah L⁻¹ menghasilkan penyisihan massa COD sebesar 0,89 g. Sedangkan pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² dan 10 mA cm⁻² dengan muatan listrik spesifik yang sama hanya menghasilkan penyisihan COD berturut-turut sebesar 0,54 g dan 1,03 g. Pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² menghasilkan penyisihan yang besar, namun penyisihan tersebut bukanlah titik optimum karena massa COD yang tersisihkan tersebut merupakan massa saat operasional reaktor sudah berlangsung 30 menit. Sedangkan pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dan 50 mA cm⁻² berlangsung selama 15 menit operasional reaktor.

Sesuai hasil analisis COD menunjukkan bahwa persen penyisihan COD semakin besar seiring dengan peningkatan kerapatan arus. Fernandes *et al.* (2016) menyebutkan bahwa peningkatan kerapatan arus listrik mampu meningkatkan penyisihan senyawa organik. Semakin tinggi kerapatan arus maka semakin banyak *active species* yang terbentuk. *Active species* tersebut akan mengoksidasi polutan organik dalam lindi. Menurut Ukundimana *et al.* (2018) anoda BDD menghasilkan *physiosorbed hydroxyl radicals* yang mengoksidasi senyawa organik menjadi CO₂ dan ion anorganik melalui proses *electrochemical combustion* (Reaksi (4.1) dan (4.2)). Sehingga meningkatkan penyisihan COD selama proses elektooksidasi.



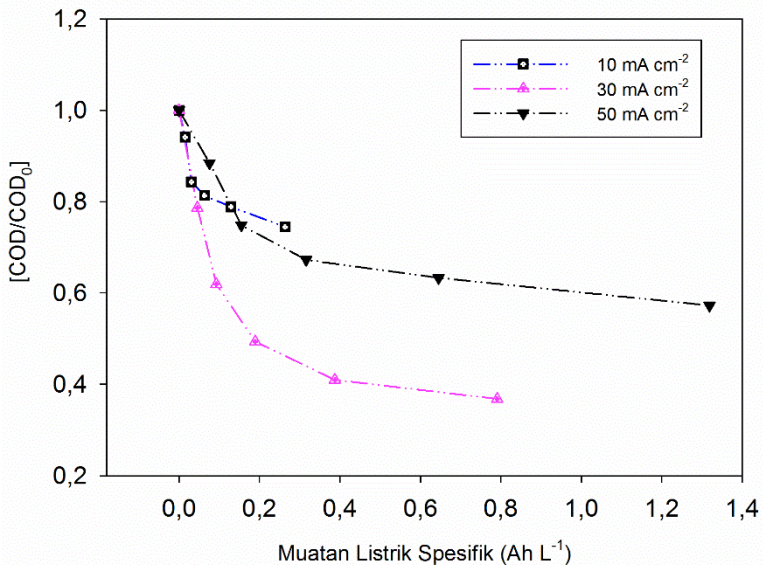
Maka dalam waktu operasional yang sama (240 menit) persen penyisihan COD paling besar terjadi pada operasional reaktor dengan kerapatan arus 50 mA cm⁻². Hal ini sesuai pula dalam

penelitian oleh Zhou *et al.*, (2016) yang menyatakan bahwa penyisihan COD saat operasional reaktor elektrok oksidasi dengan kerapatan arus 50 mA cm^{-2} menghasilkan penyisihan lebih besar dibandingkan kerapatan arus 20 mA cm^{-2} masing-masing 87,5 % dan 75% setelah operasional 6 jam.

Peningkatan persen penyisihan COD tersebut diimbangi dengan peningkatan muatan listrik spesifik yang digunakan. Sehingga apabila digunakan kerapatan arus listrik yang paling tinggi yaitu 50 mA cm^{-2} maka, diperlukan energi listrik yang lebih besar pula. Untuk memperoleh penyisihan yang tinggi namun dengan muatan listrik spesifik yang rendah diperlukan penentuan titik optimum pada setiap hasil analisis. Berdasarkan hasil analisis pada variasi volume efektif reaktor 1/12,5, 1/18,75 dan 1/25 menunjukkan bahwa titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} . Penyisihan massa COD dan muatan listrik spesifik pada masing-masing rasio volume efektif reaktor berturut-turut yaitu 0,67 g ($0,065 \text{ Ah L}^{-1}$), 0,95 g ($0,046 \text{ Ah L}^{-1}$), 0,89 g ($0,031 \text{ Ah L}^{-1}$). Menurut penelitian oleh Hege *et al.* (2004), menggunakan anoda BDD dengan kerapatan arus yang sama pada rasio volume efektif reaktor 1/5 (200 mL/1000 mL) mampu mendegradasi COD 56 % pada muatan listrik spesifik 1 Ah L^{-1} dan $2,5 \text{ Ah L}^{-1}$ untuk mencapai penyisihan paling besar. Sedangkan pada penelitian oleh Bagastyo *et al.* (2014), yang menggunakan rasio volume efektif reaktor 1/26 (190 mL/5000 mL) mencapai penyisihan COD titik optimum diperoleh pada muatan listrik spesifik $2,2 \text{ Ah L}^{-1}$ sedangkan penyisihan COD paling besar (habis) pada muatan listrik spesifik 5 Ah L^{-1} . Melalui hasil diatas nampak bahwa penyisihan massa COD pada titik optimum setiap variasi membutuhkan muatan listrik spesifik yang relatif kecil. Semakin kecil rasio volume efektif reaktor membutuhkan muatan listrik spesifik lebih kecil. Nampak bahwa variasi 1/12,5 kurang efisien dalam menyisihkan massa COD, karena memerlukan muatan listrik spesifik yang relatif besar bila dibandingkan dengan variasi lainnya. Sedangkan penyisihan terbesar dapat dicapai dengan muatan listrik spesifik yang lebih kecil dengan menggunakan variasi 1/18,75. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penyisihan massa COD saat titik optimum tertinggi terjadi pada proses elektrok oksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/18,75.

4.2.2 Penyisihan COD pada Anoda DSA

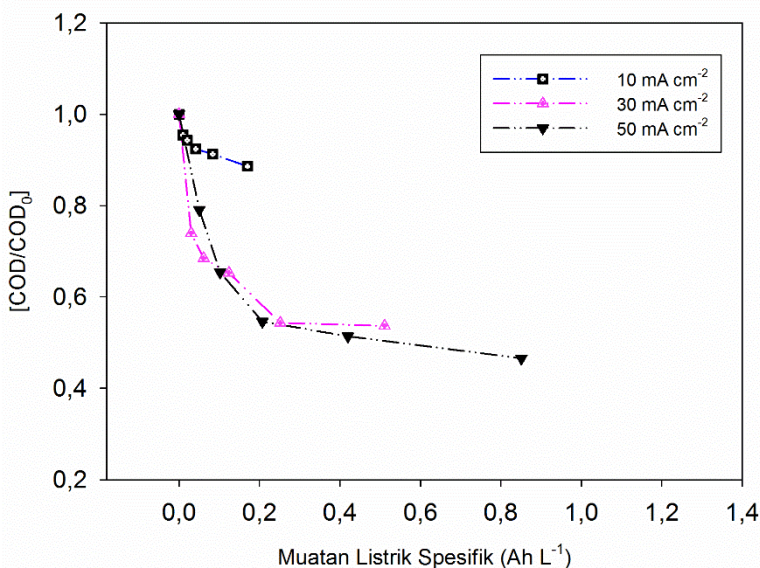
Penurunan nilai COD dinyatakan dalam rasio massa COD pada waktu (t) dengan massa COD pada awal proses. Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 4.9 hingga Gambar 4.11. Data hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran C LC.12 sampai 14. Nilai COD/COD_0 juga menunjukkan persentase nilai COD yang masih tersisa dalam lindi.



Gambar 4.9 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5

Proses elektrooksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/12,5 (80 mL/1000 mL) menunjukkan terjadinya penyisihan nilai COD. Penyisihan tersebut terjadi pada semua variasi kerapatan arus (10 $mA cm^{-2}$, 30 $mA cm^{-2}$, 50 $mA cm^{-2}$). Penyisihan nilai COD dengan durasi waktu proses yang sama (240 menit) menunjukkan bahwa pada kerapatan arus 30 $mA cm^{-2}$ menghasilkan penyisihan yang paling besar yaitu 64%. Kemudian diikuti oleh kerapatan arus 50

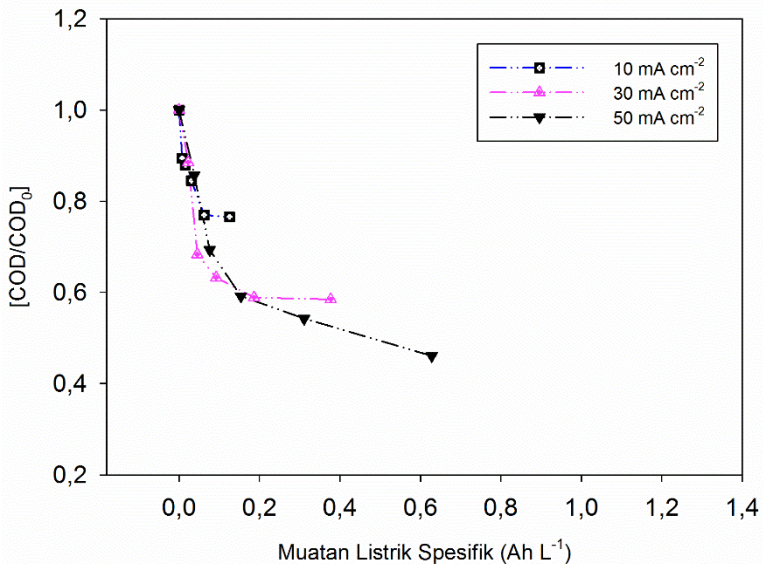
mA cm⁻² dan kerapatan arus 10 mA cm⁻² dengan persen penyisihan berturut-turut 43%, 26%. Selain itu dari hasil data analisis diperoleh pula titik optimum penyisihan massa COD. Titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan muatan listrik spesifik 0,093 Ah L⁻¹ menghasilkan penyisihan massa COD sebesar 0,54 g. Sedangkan pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² dan 10 mA cm⁻² dengan muatan listrik spesifik yang sama hanya menghasilkan penyisihan COD berturut-turut sebesar 0,18 g dan 0,24 g.



Gambar 4.10 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75

Proses elektrooksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/18,75 (80 mL/1500 mL) anoda DSA menunjukkan terjadinya penyisihan nilai COD. Penyisihan tersebut terjadi pada semua variasi kerapatan arus (10 mA cm⁻², 30 mA cm⁻², 50 mA cm⁻²). Penyisihan nilai COD dengan durasi waktu proses yang sama (240 menit)

menunjukkan bahwa pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} menghasilkan penyisihan yang paling tinggi yaitu 54%. Kemudian diikuti oleh kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dan 10 mA cm^{-2} dengan persen penyisihan 47% dan 12%. Selain itu dari hasil data analisis diperoleh pula titik optimum penyisihan massa COD. Titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,033 \text{ Ah L}^{-1}$ menghasilkan penyisihan massa COD sebesar $0,74 \text{ g}$. Sedangkan pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dan 50 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik yang sama hanya menghasilkan penyisihan COD berturut-turut sebesar $0,14 \text{ g}$ dan $0,32 \text{ g}$.

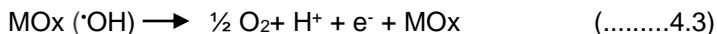


Gambar 4.11 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25

Proses elektrooksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/25 ($80 \text{ mL}/2000 \text{ mL}$) anoda DSA menunjukkan terjadinya penyisihan nilai COD. Penyisihan tersebut terjadi pada semua variasi

kerapatan arus (10 mA cm^{-2} ; 30 mA cm^{-2} ; 50 mA cm^{-2}). Penyisihan nilai COD dengan durasi waktu proses yang sama (240 menit) menunjukkan bahwa pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} menghasilkan penyisihan yang paling tinggi yaitu 55 %. Kemudian diikuti oleh kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dan 10 mA cm^{-2} dengan persen penyisihan 42% dan 24%. Selain itu dari hasil data analisis diperoleh pula titik optimum penyisihan massa COD. Titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,073 \text{ Ah L}^{-1}$ menghasilkan penyisihan massa COD sebesar 1,12 g. Sedangkan pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dan 50 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik yang sama hanya menghasilkan penyisihan COD berturut-turut sebesar 0,76 g dan 0,93 g.

Berdasarkan hasil analisis data COD diatas, pada variasi rasio volume efektif reaktor $1/18,75$ dan $1/25$ menghasilkan persen penyisihan terbesar saat operasional reaktor dengan kerapatan arus 50 mA cm^{-2} . Menurut Markou *et al.*, (2017) semakin tinggi kerapatan arus yang digunakan maka semakin banyak active species yang terbentuk (*hydroxyl radicals* dan *hypochlorite*) sehingga semakin mempercepat proses oksidasi terhadap polutan organik. Namun, pada variasi rasio volume efektif $1/12,5$ persen penyisihan terbesar justru terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} . Berdasarkan Zhou *et al.*,(2016) pada kondisi tertentu kerapatan arus yang relatif tinggi dapat mengakibatkan percepatan polarisasi anodik yang berlebihan, sehingga senyawa hidroksil radikal ($\cdot\text{OH}$) yang ada lebih banyak bereaksi terhadap reaksi sampingan seperti evolusi oksigen yang mengakibatkan senyawa hidroksil radikal tidak mengoksidasi senyawa organik secara maksimal (.....4.3).



Selama proses elektrok oksidasi dengan anoda DSA diperoleh pula titik optimum penyisihan massa COD. Tujuan penentuan titik optimum yaitu untuk memperoleh penyisihan yang tinggi namun dengan muatan listrik spesifik yang rendah. Berdasarkan hasil analisis pada variasi volume efektif reaktor $1/12,5$, $1/18,75$ dan $1/25$ menunjukkan bahwa titik optimum penyisihan massa COD terletak pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} . Penyisihan massa COD dan muatan listrik spesifik pada masing-masing variasi berturut-

turut yaitu 0,55 g (0,093 Ah L⁻¹), 0,74 g (0,033 Ah L⁻¹), 1,12 g (0,073 Ah L⁻¹). Berdasarkan hasil penyisihan massa COD pada titik optimum masing-masing variasi, nampak bahwa penyisihan massa COD saat titik optimum tertinggi terjadi pada proses elektrooksidasi dengan rasio volume efektif reaktor 1/25.

Hasil analisis penyisihan massa COD antara anoda BDD dan DSA menunjukkan bahwa pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² merupakan titik optimum penyisihan massa COD. Namun, titik optimum tersebut berada pada rasio volume efektif yang berbeda. Anoda BDD pada rasio 1/18,75 sedangkan anoda DSA pada rasio 1/25. Hasil penyisihan antara anoda BDD dan DSA berturut-turut sebesar 0,92 g (0,046 Ah L⁻¹), 1,12 g (0,073 Ah L⁻¹). Penyisihan tersebut bila dinyatakan dalam g COD per muatan listrik spesifik sebesar 20,65 g COD/Ah L⁻¹ untuk anoda BDD dan 15,34 g COD/Ah L⁻¹ anoda DSA. Hal ini menunjukkan bahwa penyisihan massa COD oleh anoda BDD lebih besar dibandingkan anoda DSA. Sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Ukundimana *et al.*, (2018) yang menyatakan bahwa penyisihan massa COD oleh anoda BDD lebih besar dibandingkan anoda DSA dengan hasil penyisihan berturut-turut 0,272 g COD/Ah L⁻¹ dan 0,210 g COD/Ah L⁻¹. Hal ini dapat terjadi karena sifat *unselective* anoda BDD dalam mengoksidasi polutan organik hingga pembakaran habis (*complete oxidation*) terhadap polutan organik.

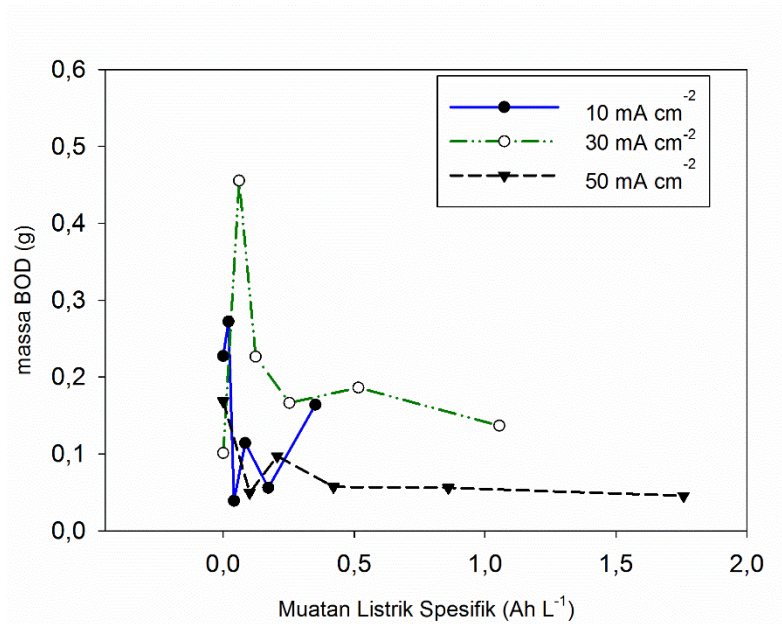
Degradasi senyawa organik menggunakan proses elektrooksidasi bisa terjadi melalui dua proses yaitu *electrochemical conversion* dan *electrochemical combustion*. Pada anoda BDD berlangsung proses *electrochemical combustion* yang merupakan proses degradasi senyawa organik oleh senyawa hidroksil radikal *physisorbed species* (oksidasi kuat) yang mampu mendegradasi senyawa organik menjadi CO₂ dan H₂O. Sedangkan pada anoda DSA terbatas hanya proses *electrochemical conversion* (Garcia-Segura *et al.*, 2018). *Electrochemical conversion* merupakan tahap degradasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa lebih sederhana yang kemungkinan lebih *biodegradable*.

Selain itu, penurunan massa COD dipengaruhi pula oleh adanya penambahan NaCl. Penambahan NaCl sebagai *supporting*

electrolyte mampu meningkatkan penyisihan polutan organik (terukur sebagai COD) (Farid *et al.*, 2012).

4.2.3 Perubahan BOD pada Anoda BDD

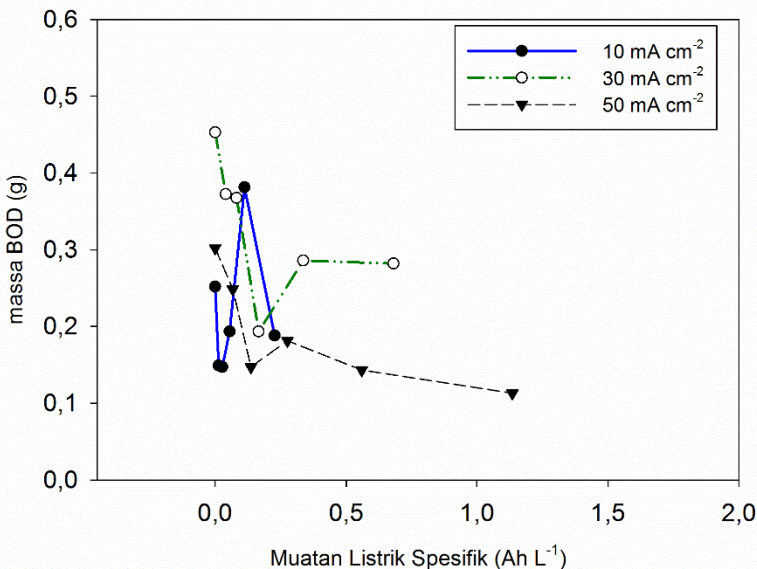
Biochemical Oxygen Demand (BOD) menggambarkan jumlah senyawa organik yang dapat didegradasi secara biologis. Analisis BOD dilakukan dengan menentukan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa organik. Pada penelitian ini analisis parameter BOD dilakukan pada semua titik pengambilan sampel ($t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$). Hasil analisis terhadap parameter BOD dapat dilihat pada Gambar 4.12 hingga Gambar 4.14. Data hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran C Tabel LC.15 hingga Tabel LC.17.



Gambar 4.12 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5

Pada Gambar 4.12 merupakan proses elektrok oksidasi anoda BDD variasi rasio volume efektif 1/12,5 dengan 3 kerapatan arus (10 mA cm^{-2} , 30 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2}). Perubahan massa BOD pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} menunjukkan terjadinya peningkatan 0,05 g dari massa BOD awal (g) pada muatan listrik spesifik $0,025 \text{ Ah L}^{-1}$. Kemudian pada muatan listrik spesifik $0,041 \text{ Ah L}^{-1}$ massa BOD (g) turun sebesar 0,23 g. Saat muatan listrik spesifik $0,09 \text{ Ah L}^{-1}$ terjadi peningkatan massa BOD sebesar 0,071 g. Kemudian massa BOD (g) turun kembali hingga akhirnya mengalami peningkatan sebesar 0,11 g pada akhir operasional reaktor dengan muatan listrik spesifik $0,33 \text{ Ah L}^{-1}$ peningkatan massa BOD (g). Perubahan massa BOD (g) pada kerapatan 30 mA cm^{-2} menunjukkan bahwa peningkatan massa BOD (g) paling signifikan hanya terjadi pada muatan listrik spesifik $0,053 \text{ Ah L}^{-1}$ sebesar 0,35 g dari massa BOD (g) awal. Perubahan massa BOD (g) pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} menunjukkan bahwa cenderung terjadi penurunan massa BOD (g) selama proses elektrok oksidasi, peningkatan yang terjadi hanya pada muatan listrik spesifik $0,2 \text{ Ah L}^{-1}$ sebesar 0,044 g.

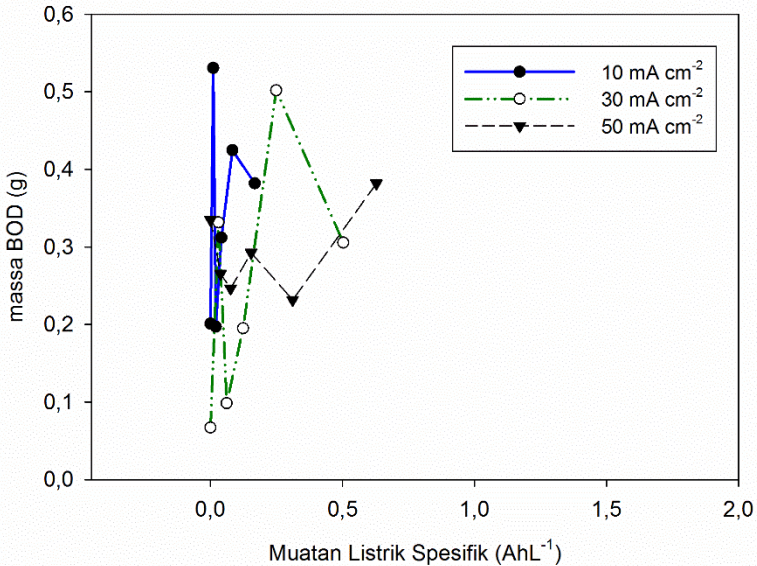
Berdasarkan hasil perubahan massa BOD (g) diatas, selama proses elektrok oksidasi anoda BDD dengan rasio volume efektif 1/12,5 cenderung terjadi penurunan massa BOD (g) pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dan 50 mA cm^{-2} . Sedangkan pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} terjadi peningkatan massa BOD (g) pada awal tengah dan akhir proses elektrok oksidasi. Peningkatan massa BOD (g) paling signifikan hanya terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,053 \text{ Ah L}^{-1}$ peningkatan sebesar 0,35 g dari massa BOD (g) awal.



Gambar 4.13 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75

Gambar 4.13 merupakan proses elektrooksidasi anoda BDD pada rasio volume efektif 1/18,75 dengan 3 variasi kerapatan arus (10 mA cm^{-2} , 30 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2}). Hasil analisis menunjukkan penurunan massa BOD (g) pada hampir seluruh variasi kerapatan arus. Penurunan massa BOD (g) terbesar terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,16 \text{ Ah L}^{-1}$ sebesar $0,166 \text{ g}$. Sedangkan peningkatan massa BOD (g) hanya terjadi pada titik kerapatan arus tertentu. Peningkatan massa BOD (g) pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,11 \text{ Ah L}^{-1}$ sebesar $0,18 \text{ g}$. Kemudian pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,34 \text{ Ah L}^{-1}$ peningkatan massa BOD (g) sebesar $0,09 \text{ g}$. Sedangkan pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} peningkatan yang terjadi sangatlah kecil yaitu $0,02 \text{ g}$ pada muatan listrik spesifik $0,27 \text{ Ah L}^{-1}$. Berdasarkan hasil analisis diatas, peningkatan massa BOD (g) paling signifikan hanya terjadi

pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} muatan listrik spesifik $0,11 \text{ Ah L}^{-1}$ sebesar $0,18 \text{ g}$.



Gambar 4.14 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25

Pada Gambar 4.14 merupakan variasi rasio volume efektif $1/25$ dengan 3 kerapatan arus (10 mA cm^{-2} , 30 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2}). Proses elektrooksidasi dengan kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dan 30 mA cm^{-2} menunjukkan grafik perubahan yang hampir sama. Peningkatan pada kedua kerapatan tersebut terjadi pada t_1 (15 menit) dan t_5 (120 menit). Peningkatan massa BOD (g) kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dan 30 mA cm^{-2} saat t_1 (15 menit) berturut-turut $0,33 \text{ g}$ dengan muatan listrik spesifik $0,006 \text{ Ah L}^{-1}$ dan $0,261 \text{ g}$ dengan muatan listrik spesifik $0,029 \text{ Ah L}^{-1}$. Kemudian massa BOD (g) mengalami penurunan hingga t_2 (30 menit) operasional reaktor. Hingga pada t_5 (120 menit) terjadi peningkatan massa BOD (g) antara kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dan 30 mA cm^{-2} , dengan

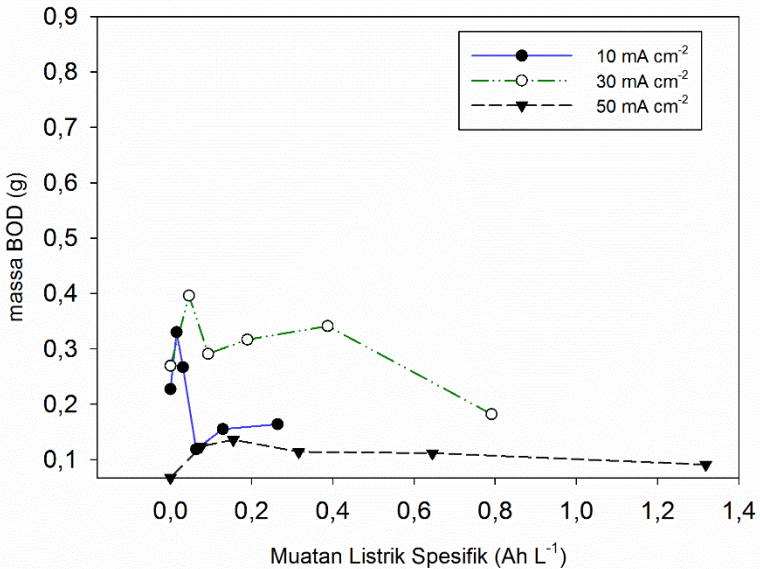
peningkatan massa BOD (g) berturut- turut yaitu 0,113 g muatan listrik spesifik 0,085 Ah L⁻¹ dan 0,308 g muatan listrik spesifik 0,24 Ah L⁻¹. Namun massa BOD (g) tersebut kemudian mengalami penurunan pada akhir proses elektrooksidasi. Hasil analisis pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² menunjukkan hasil yang berbeda dibandingkan pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² dan 30 mA cm⁻², selama proses elektrooksidasi cenderung terjadi penurunan massa BOD (g) pada awal operasional hingga t₅ (120 menit). Namun justru terjadi peningkatan massa BOD (g) pada akhir proses elektrooksidasi t₆ (240 menit). Peningkatan yang terjadi sebesar 0,15 g dengan muatan listrik spesifik 0,63 Ah L⁻¹. Melalui hasil diatas, nampak bahwa peningkatan massa BOD (g) terbesar terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² saat muatan listrik spesifik 0,308 g dengan muatan listrik spesifik 0,240 Ah L⁻¹.

Melalui hasil analisis data masss BOD (g) selama proses elektrooksidasi dengan anoda BDD menunjukkan hasil bahwa selama proses elektrooksidasi cenderung terjadi penurunan massa BOD (g). Sedangkan peningkatan massa BOD (g) hanya terjadi pada titik-titik tertentu. Peningkatan massa BOD (g) terbesar pada variasi rasio volume efektif reaktor 1/12,5 terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² sebesar 0,35 g dengan muatan listrik spesifik 0,053 Ah L⁻¹. Kemudian pada rasio volume efektif reaktor 1/8,75 peningkatan massa BOD (g) pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² sebesar 0,118 g dengan muatan listrik spesifik 0,11 Ah L⁻¹. Selanjutnya pada variasi rasio volume efektif reaktor 1/25 peningkatan massa BOD (g) terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² sebesar 0,308 g dengan muatan listrik spesifik 0,024 Ah L⁻¹.

Melalui hasil peningkatan massa BOD (g) terbesar pada masing-masing variasi rasio volume efektif peningkatan mass BOD (g) dari rasio terkecil (1/12,5) hingga terbesar (1/25) berturut- turut 4 kali lipat; 1,5 kali lipat; 7 kali lipat massa BOD (g) awal. Berdasarkan hasil tersebut maka, dapat disimpulkan peningkatan massa BOD (g) terbesar terjadi pada variasi rasio volume efektif reaktor 1/25 pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² pada muatan listrik spesifik 0,24 Ah L⁻¹ dengan peningkatan 7 kali lipat (0,308 g) massa BOD (g) awal.

4.2.4 Perubahan BOD pada Anoda DSA

Hasil analisis terhadap parameter BOD pada proses elektrooksidasi dengan anoda DSA dapat dilihat pada Gambar 4.15 hingga Gambar 4.17. Data hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran C Tabel LC.18 hingga Tabel LC.20.

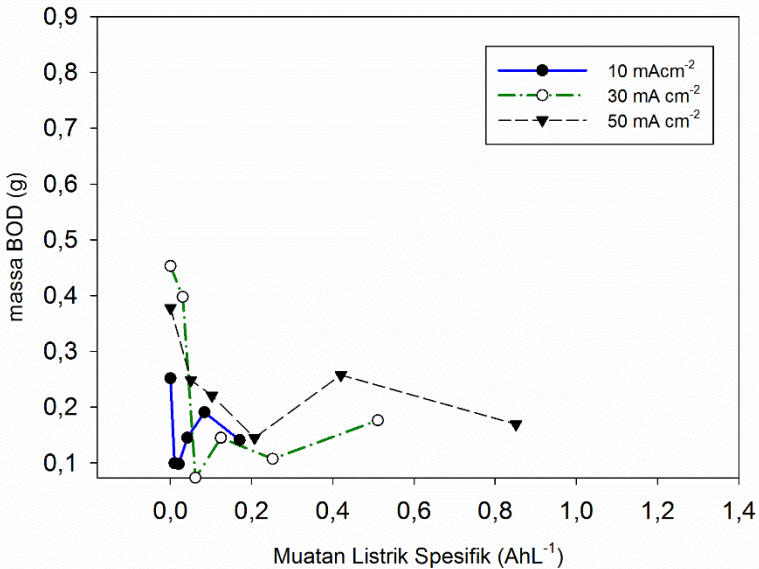


Gambar 4.15 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5

Hasil analisis data pada Gambar 4.15 menunjukkan bahwa selama proses elektrooksidasi anoda DSA rasio volume efektif 1/12,5 dengan 3 kerapatan arus (10 mA cm^{-2} , 30 mA cm^{-2} , 50 mA cm^{-2}) menunjukkan hasil cenderung terjadinya penurunan massa BOD (g). Namun sebelum terjadi penurunan massa BOD (g) diawali dengan peningkatan massa BOD (g). Peningkatan tersebut terjadi pada 15 menit awal operasional proses elektrooksidasi. Peningkatan massa BOD (g) pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,16 \text{ Ah L}^{-1}$ sebesar $0,11 \text{ g}$.

Selanjutnya pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,049 \text{ Ah L}^{-1}$ peningkatan massa BOD (g) sebesar $0,12 \text{ g}$. Kemudian pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} dengan muatan listrik spesifik $0,082 \text{ Ah L}^{-1}$ peningkatan massa BOD (g) sebesar $0,06 \text{ g}$.

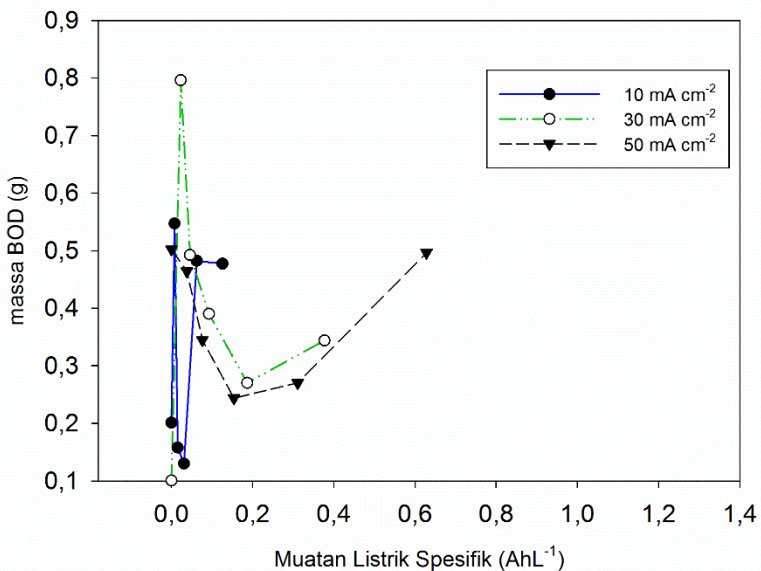
Setelah peningkatan tersebut, pada keseluruhan variasi cenderung terjadi penurunan massa BOD (g) hingga akhir proses elektrooksidasi. Berdasarkan hasil analisis data diatas, peningkatan massa BOD (g) paling signifikan hanya terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} muatan listrik spesifik $0,049 \text{ Ah L}^{-1}$ sebesar $0,12 \text{ g}$.



Gambar 4.16 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75

Hasil analisis data pada Gambar 4.16 menunjukkan bahwa penyisihan BOD terjadi hampir pada seluruh titik sampling. Pada kerapatan arus 10 mA cm^{-2} , 30 mA cm^{-2} dan 50 mA cm^{-2} berturut-

turut yaitu 0,11 g (25%); 0,27 g (60%) dan 0,21 g (55%). Sedangkan peningkatan massa BOD (g) hanya terjadi pada beberapa titik-titik sampling. Peningkatan massa BOD pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² terjadi pada muatan listrik spesifik 0,08 Ah L⁻¹ dengan peningkatan sebesar 0,088 g massa BOD (g) sebelumnya. Selanjutnya pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² terjadi peningkatan massa BOD (g) pada muatan listrik spesifik 0,12 Ah L⁻¹ sebesar 0,067 g massa BOD (g) sebelumnya. Pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² Peningkatan massa BOD terjadi pada muatan listrik spesifik 0,42 Ah L⁻¹ dengan peningkatan sebesar 0,11 g dari massa sebelumnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa selama proses elektrooksidasi, peningkatan massa BOD (g) paling besar terjadi pada kerapatan arus 50 mA cm⁻².



Gambar 4.17 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25

Hasil analisis data pada Gambar 4.17 menunjukkan terjadinya peningkatan massa BOD (g) pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² dan 30 mA cm⁻² diawal proses elektooksidasi. Peningkatan yang terjadi berturut-turut 0,28 g (2 kali lipat) dengan muatan listrik spesifik 0,02 Ah L⁻¹ dan 0,69 g (8 kali lipat) dengan muatan listrik spesifik 0,05 Ah L⁻¹. Kemudian massa BOD (g) tersebut turun hingga akhir proses elektooksidasi. Sedangkan pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² memberikan hasil terjadinya penurunan massa BOD (g) selama proses elektooksidasi. Peningkatan yang terjadi pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² hanya terjadi pada akhir proses yaitu, saat muatan listrik spesifik 0,60 Ah L⁻¹ sebesar 0,23 g massa BOD (g) sebelumnya. Berdasarkan hasil tersebut, peningkatan massa BOD (g) terbesar terjadi pada variasi kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan peningkatan massa BOD (g) 8 kali lipat massa BOD (g) awal saat muatan listrik spesifik 0,05 Ah L⁻¹.

Melalui hasil analisis data massa BOD (g) selama proses elektooksidasi dengan anoda DSA menunjukkan hasil bahwa selama proses elektooksidasi cenderung terjadi penurunan massa BOD (g). Sedangkan peningkatan massa BOD (g) hanya terjadi pada titik-titik tertentu. Peningkatan massa BOD (g) terbesar pada variasi rasio volume efektif reaktor 1/12,5 terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² sebesar 0,12 g dengan muatan listrik spesifik 0,049 Ah L⁻¹. Kemudian pada rasio volume efektif reaktor 1/18,75 peningkatan massa BOD (g) pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² sebesar 0,11 g dengan muatan listrik spesifik 0,42 Ah L⁻¹. Selanjutnya pada variasi rasio volume efektif reaktor 1/25 peningkatan massa BOD (g) terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² sebesar 0,69 g dengan muatan listrik spesifik 0,05 Ah L⁻¹.

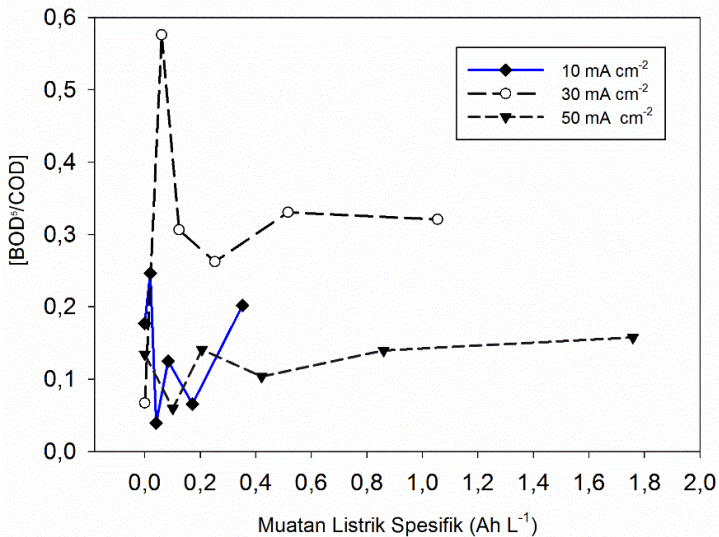
Hasil peningkatan massa BOD (g) terbesar pada masing-masing variasi rasio volume efektif menunjukkan bahwa peningkatan massa BOD (g) terbesar terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² sebesar 0,69 g (8 kali lipat) massa BOD (g) awal dengan muatan listrik spesifik 0,05 Ah L⁻¹. Berdasarkan hasil tersebut maka, dapat disimpulkan peningkatan massa BOD (g) terbesar melalui proses elektooksidasi dengan anoda DSA terjadi pada variasi rasio volume efektif reaktor 1/25 pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² pada muatan listrik spesifik 0,05 Ah L⁻¹ dengan peningkatan 8 kali lipat (0,690 g) massa BOD (g) awal.

Berdasarkan peningkatan massa BOD (g) terbesar yang dihasilkan melalui proses elektrok oksidasi diatas, Memiliki keterkaitan dengan penyisihan massa COD (g), penyisihan paling optimum saat operasional dengan anoda BDD rasio volume efektif 1/18,75 sebesar 0,92 g dengan muatan listrik spesifik 0,046 Ah L⁻¹. Sedangkan pada anoda DSA dengan rasio volume efektif reaktor 1/25 dan kerapatan arus 30 cm⁻² mampu menyisihkan massa COD (g) sebesar 0,69 g dengan muatan listrik spesifik 0,05 Ah L⁻¹.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² merupakan kerapatan arus paling efektif dalam penyisihan massa COD (g) serta meningkatkan massa BOD (g) pada kedua variasi anoda (anoda BDD dan DSA). Sedangkan rasio volume efektif 1/25 (80 mL/2000 mL) merupakan variasi yang paling efektif dalam pemecahan senyawa organik *recalcitrant* (non-biodegradable) menjadi senyawa *biodegradable* yang terukur sebagai BOD (g). Melalui peningkatan tersebut diharapkan dapat meningkatkan senyawa organik *biodegradable* yang dapat diolah dengan pengolahan biologis.

4.2.5 Perubahan Rasio BOD₅/COD

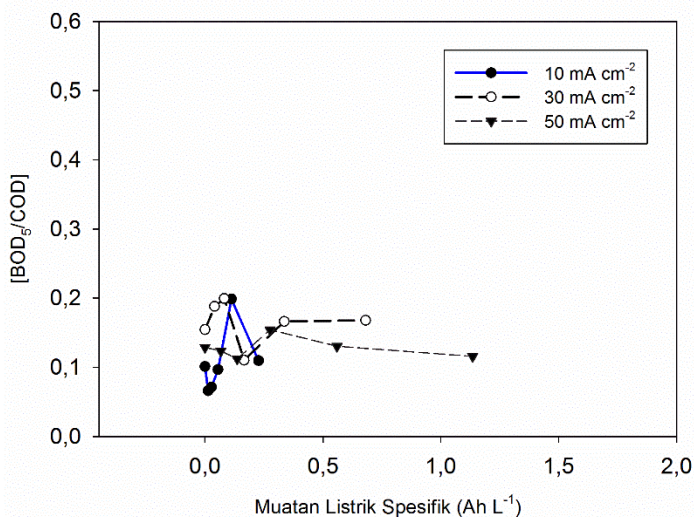
Bahan *biodegradable* merupakan bahan yang mampu diuraikan secara biologis. Tingkat biodegradabilitas ditunjukkan dengan rasio BOD₅/COD (Azizah, 2010). Menurut pengertian KBBI, indeks merupakan rasio antara dua unsur kebahasaan yang menjadi ukuran suatu ciri tertentu. Sehingga dalam penelitian ini digunakan istilah indeks biodegradabilitas untuk menunjukkan perubahan rasio antara nilai BOD₅/COD selama proses penelitian. Berikut Gambar 4.18 hingga Gambar 4.23 merupakan hasil BOD₅/COD. Data hasil analisis dapat dilihat pada Lampiran C Tabel L.C 21 sampai L.C 26.



Gambar 4.18 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5

Hasil analisis pada Gambar 4.18 diatas menunjukkan bahwa selama proses elektrooksidasi terjadi perubahan terhadap biodegradabilitas pada lindi. Perubahan biodegradabilitas ditandai dengan perubahan rasio BOD₅/COD. Perubahan rasio BOD₅/COD pada awal proses elektrooksidasi atau t₁ (15 menit) menunjukkan terjadinya peningkatan rasio pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² & 30 mA cm⁻². Peningkatan tersebut berturut-turut 0,066 dengan muatan listrik spesifik 0,026 Ah L⁻¹ dan 0,511 dengan muatan listrik spesifik 0,013 Ah L⁻¹. Kemudian rasio BOD₅/COD tersebut mengalami penurunan saat t₂ (30 menit) berurutan pada kerapatan 10 mA cm⁻² & 30 mA cm⁻² sebesar 0,206 pada muatan listrik spesifik 0,036 Ah L⁻¹ dan 0,27 pada muatan listrik spesifik 0,12 Ah L⁻¹. Perubahan rasio BOD₅/COD tersebut terus mengalami kenaikan dan penurunan hingga akhir operasional reaktor. Pada kerapatan yang lebih kecil dari kerapatan arus 50 mA cm⁻² saat t₁ (15 menit) mengalami peningkatan rasio BOD₅/COD, sedangkan

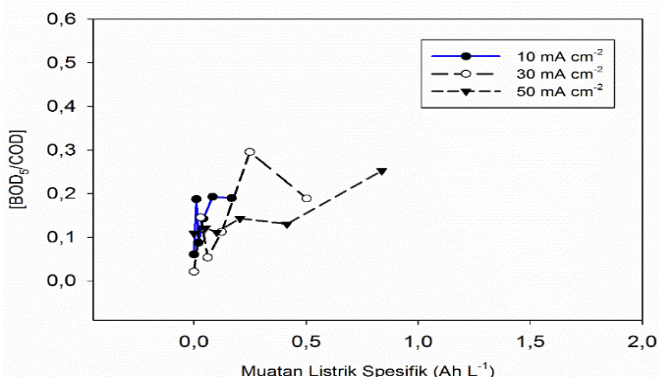
pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} menunjukkan terjadinya penurunan rasio BOD_5/COD sebesar 0,07 pada muatan listrik spesifik $0,21 \text{ Ah L}^{-1}$. Selanjutnya pada t_2 (30menit) terjadi peningkatan rasio BOD_5/COD sebesar 0,092 pada muatan listrik spesifik $0,092 \text{ Ah L}^{-1}$. Rasio BOD_5/COD tersebut kemudian mengalami perubahan baik penurunan maupun peningkatan hingga akhir operasional reaktor. Berdasarkan hasil analisis data diatas, peningkatan rasio BOD_5/COD paling signifikan terjadi pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} dengan peningkatan sebesar 0,511 dari rasio sebelumnya 0,068 menjadi 0,5759 pada muatan listrik spesifik $0,013 \text{ Ah L}^{-1}$.



Gambar 4.19 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75

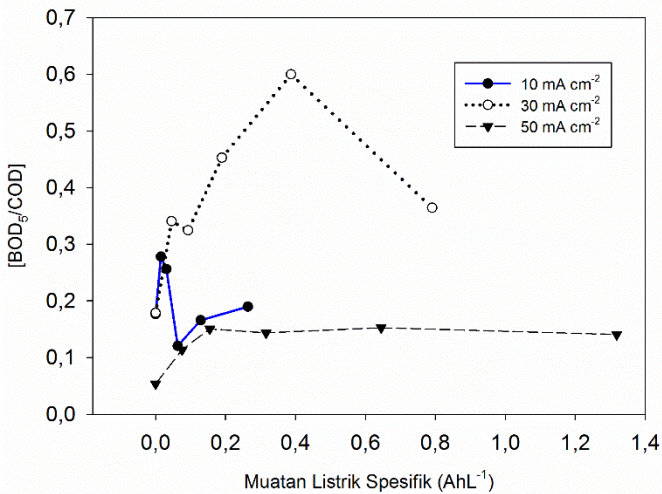
Hasil analisis pada Gambar 4.19 diatas menunjukkan bahwa selama proses elektrooksidasi terjadi perubahan terhadap biodegradabilitas pada lindi. Perubahan biodegradabilitas ditandai dengan perubahan rasio BOD_5/COD . Perubahan rasio BOD_5/COD pada t_1 (15 menit) dan t_2 (30 menit) menunjukkan terjadinya

peningkatan rasio pada kerapatan arus 30 mA cm⁻². Peningkatan tersebut berturut-turut sebesar 0,036 pada muatan listrik spesifik 0,037 Ah L⁻¹ dan 0,01 pada muatan listrik spesifik 0,076 Ah L⁻¹. Sedangkan pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² & 50 mA cm⁻² justru terjadi penurunan rasio BOD₅/COD. Penurunan rasio BOD₅/COD pada t₁ (15 menit) berturut-turut sebesar 0,034 pada muatan listrik spesifik 0,0182 Ah L⁻¹ dan 0,0005 pada muatan listrik spesifik 0,071 Ah L⁻¹. Penurunan rasio BOD₅/COD tersebut terus terjadi hingga t₂ (30 menit) pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² sedangkan pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² mengalami peningkatan rasio BOD₅/COD dari t₂ (30menit) hingga t₅ (120 menit). Peningkatan terbesar pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² terjadi pada t₅ (120menit) sebesar 0,063 dengan muatan listrik spesifik 0,198 Ah L⁻¹. Peningkatan rasio BOD₅/COD pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² terjadi kembali pada t₃ (60menit) dengan peningkatan rasio BOD₅/COD sebesar 0,136 dengan muatan listrik spesifik 0,278 Ah L⁻¹. Selanjutnya pada kedua kerapatan arus tersebut terjadi penurunan rasio BOD₅/COD hingga akhir operasional reaktor. Berdasarkan hasil analisis data diatas, peningkatan rasio BOD₅/COD paling signifikan terjadi pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² dengan peningkatan sebesar 0,063 dengan muatan listrik spesifik 0,198 Ah L⁻¹.



Gambar 4.20 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25

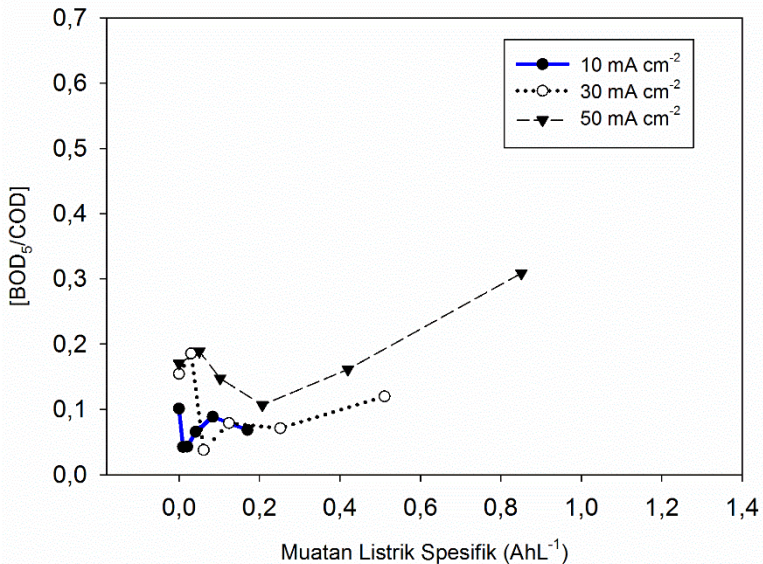
Hasil analisis pada Gambar 4.20 diatas menunjukkan bahwa selama proses elektrokodisasi terjadi perubahan terhadap rasio BOD₅/COD. Perubahan rasio BOD₅/COD pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² menunjukkan peningkatan rasio BOD₅/COD dari t₁ (15 menit) sebesar 0,125 pada muatan listrik spesifik 0,01 Ah L⁻¹ kemudian mengalami penurunan pada t₂ (30 menit) sebesar 0,1 pada muatan listrik spesifik 0,02 0,01 Ah L⁻¹. Nilai rasio tersebut kemudian mengalami peningkatan hingga akhir operasional reaktor. Sama halnya dengan kerapatan arus 10 mA cm⁻² pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dan 50 mA cm⁻² terjadi pula perubahan rasio BOD₅/COD selama proses elektrokodisasi. Pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD pada t₁ (15 menit) sebesar 0,124 dengan muatan listrik spesifik sebesar 0,030 Ah L⁻¹. Kemudian rasio tersebut mengalami penurunan pada t₂ (30 menit) sebesar 0,095 pada muatan listrik spesifik 0,06 Ah L⁻¹. Selanjutnya terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD hingga t₅ (120 menit). Peningkatan tersebut merupakan peningkatan rasio BOD₅/COD terbesar yang terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² sebesar 0,136 dengan muatan listrik spesifik 0,248 Ah L⁻¹. Kemudian nilai rasio tersebut mengalami penurunan pada akhir operasional reaktor, dengan penurunan sebesar 0,107 dengan muatan listrik spesifik 0,50 Ah L⁻¹. Kemudian pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² memberikan hasil cenderung terjadinya peningkatan rasio BOD₅/COD selama proses elektrokodisasi. Peningkatan terbesar pada kerapatan arus tersebut yaitu sebesar 0,127 dengan muatan listrik spesifik 0,837 Ah L⁻¹. Sedangkan penurunan yang terjadi hanya pada t₃ (60 menit) dan t₅ (120 menit) berturut-turut sebesar 0,01 dengan muatan listrik spesifik 0,108 Ah L⁻¹ dan 0,014 dengan muatan listrik spesifik 0,41 Ah L⁻¹. Berdasarkan hasil analisis data diatas, peningkatan rasio BOD₅/COD paling signifikan terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan peningkatan sebesar 0,136 dengan muatan listrik spesifik 0,248 Ah L⁻¹.



Gambar 4.21 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5

Hasil analisis pada Gambar 4.21 terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD pada sebagian besar variasi kerapatan arus yang digunakan. Pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² terjadi peningkatan pada t₁ (15 menit) sebesar 0,094 dengan muatan listrik spesifik sebesar 0,015 Ah L⁻¹, kemudian nilai rasio tersebut mengalami penurunan hingga t₃ (60 menit) sebesar 0,158 dengan muatan listrik spesifik sebesar 0,063 Ah L⁻¹. Setelah itu, terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD hingga akhir operasional reaktor. Selanjutnya untuk variasi kerapatan arus 30 mA cm⁻² menunjukkan terjadinya peningkatan rasio BOD₅/COD dari t₁ (15 menit) hingga t₄ (120 menit). Peningkatan terbesar terjadi pada t₄ (120 menit) yaitu 0,147 dengan muatan listrik spesifik sebesar 0,387 Ah L⁻¹. Rasio BOD₅/COD tersebut mengalami penurunan pada akhir operasional reaktor dengan penurunan sebesar 0,235 pada muatan listrik spesifik 0,791 Ah L⁻¹. Sedangkan pada variasi kerapatan arus 50 mA cm⁻² terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD diawal operasional reaktor, kemudian nilai rasio BOD₅/COD tersebut stabil hingga

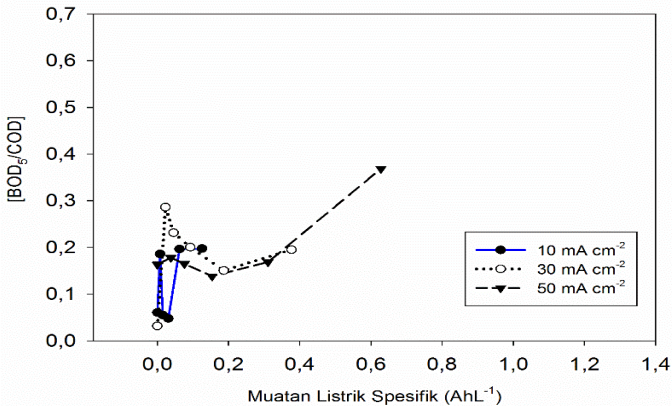
akhir operasional reaktor. Peningkatan rasio BOD₅/COD paling besar pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² terjadi pada t₁ (15 menit) dengan peningkatan sebesar 0,06 pada muatan listrik spesifik 0,075 Ah L⁻¹. Berdasarkan hasil analisis data diatas, peningkatan rasio BOD₅/COD paling signifikan terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan peningkatan sebesar 0,147 dengan muatan listrik spesifik 0,387Ah L⁻¹.



Gambar 4.22 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75

Hasil analisis pada Gambar 4.22 terjadi perubahan rasio BOD₅/COD pada seluruh variasi kerapatan arus yang digunakan. Pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² cenderung terjadi penurunan rasio BOD₅/COD selama proses elektrooksidasi. Meskipun terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD saat titik t₄ (120 menit) sebesar 0,023 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,0839 Ah L⁻¹, nilai rasio tersebut tetap lebih rendah dibandingkan dengan nilai rasio

BOD₅/COD awal reaktor. Hal yang sama terjadi pula pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² rasio BOD₅/COD mengalami sedikit peningkatan saat titik t₁ (15 menit) sebesar 0,031 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,031 Ah L⁻¹. Kemudian mengalami penurunan drastis pada saat titik t₂ (30 menit) sebesar 0,148 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,061 Ah L⁻¹. Selanjutnya nilai rasio BOD₅/COD mengalami peningkatan hingga akhir operasional reaktor. Namun walaupun mengalami peningkatan nilai rasio tersebut tetapi lebih rendah dibandingkan dengan nilai rasio BOD₅/COD awal reaktor. Selanjutnya perubahan rasio BOD₅/COD pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² memberikan hasil yang berbeda, bila dibandingkan dengan variasi kerapatan arus yang lainnya. Pada saat t₄ (120 menit) terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD sebesar 0,055 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,419 Ah L⁻¹. Kemudian nilai rasio BOD₅/COD tersebut mengalami peningkatan yang signifikan pada akhir operasional reaktor t₅ (240 menit) sebesar 0,147 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,851 Ah L⁻¹. Berdasarkan hasil analisis data diatas, peningkatan rasio BOD₅/COD paling signifikan terjadi pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² dengan peningkatan sebesar 0,147 dengan muatan listrik spesifik 0,851 Ah L⁻¹.



Gambar 4.23 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25

Hasil analisis pada Gambar 4.23 terjadi perubahan rasio BOD₅/COD pada seluruh variasi kerapatan arus yang digunakan. Pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² terjadi peningkatan rasio BOD₅/COD saat titik t₁ (15 menit) sebesar 0,125 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,0075 Ah L⁻¹. Kemudian nilai tersebut mengalami penurunan saat titik t₂ (30 menit) dan t₃ (60 menit) berturut-turut sebesar 0,130 pada muatan listrik spesifik 0,0152 Ah L⁻¹ dan 0,0079 muatan listrik spesifik 0,030 Ah L⁻¹. Nilai rasio BOD₅/COD tersebut kemudian mengalami peningkatan yang signifikan pada t₄ (120 menit) sebesar 0,149 pada muatan listrik spesifik 0,0621 Ah L⁻¹. Pada variasi selanjutnya yaitu kerapatan arus 30 mA cm⁻² peningkatan paling signifikan terjadi saat t₁ (15 menit) sebesar 0,254 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,022 Ah L⁻¹. Kemudian nilai rasio tersebut mengalami penurunan hingga akhir operasional reaktor. Hal berbeda terjadi pada variasi kerapatan arus 50 mA cm⁻² yang menunjukkan hasil peningkatan paling signifikan pada t₅ (240 menit) dengan peningkatan sebesar 0,20 pada muatan listrik spesifik sebesar 0,628 Ah L⁻¹. Peningkatan rasio BOD₅/COD pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² memberikan hasil peningkatan paling besar dibandingkan dengan variasi kerapatan arus yang lainnya. Rangkuman hasil rasio BOD₅/COD terbesar pada setiap variasi anoda BDD terdapat pada Tabel 4.2 sampai 4.3.

Tabel 4. 2 Rasio BOD₅/COD Terbesar Anoda BDD

Kerapatan Arus (mA cm-2)	Parameter	BDD		
		Volume Efektif Reaktor		
		(1/12,5)	(1/18,75)	(1/25)
10	[BOD ₅ /COD]Δ	0,0694	0,0975	0,1321
	[BOD ₅ /COD]tx	0,2461	0,1986	0,1926
	tx (menit)	15	120	120
30	[BOD ₅ /COD]Δ	0,5089	0,0448	0,2744
	[BOD ₅ /COD]tx	0,5759	0,1992	0,2955
	tx (menit)	15	30	120
50	[BOD ₅ /COD]Δ	0,0233	0,0255	0,1434
	[BOD ₅ /COD]tx	0,1575	0,1101	0,2524
	tx (menit)	240	60	240

Tabel 4. 3 Rasio BOD₅/COD Terbesar Anoda DSA

Kerapatan Arus (mA cm ⁻²)	Parameter	DSA		
		Volume Efektif		
		(1/12,5)	(1/18,75)	(1/25)
10	[BOD ₅ /COD]Δ	0,1014	Tidak terjadi peningkatan	0,1368
	[BOD ₅ /COD]tx	0,2781		0,1963
	tx (menit)	15		120
30	[BOD ₅ /COD]Δ	0,4212	0,0312	0,2543
	[BOD ₅ /COD]tx	0,5999	0,19	0,2860
	tx (menit)	120	15	15
50	[BOD ₅ /COD]Δ	0,0990	0,06	0,21
	[BOD ₅ /COD]tx	0,4527	0,23	0,37
	tx (menit)	60	120	240

Berdasarkan data pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 diatas nilai rasio terbesar baik anoda BDD maupun DSA dicapai pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² dan rasio volume efektif 1/12,5. Pada anoda BDD sebesar 0,5759 dengan peningkatan 8 kali lipat rasio BOD₅/COD. Sedangkan pada anoda DSA Nilai rasio sebesar 0,5999 dengan peningkatan 3 kali lipat rasio BOD₅/COD. Nilai rasio tersebut telah memenuhi syarat lindi sebelum diolah secara biologis yang dijelaskan oleh Renou *et al.* (2008) bahwa pengolahan biologis efektif menghilangkan polutan organik pada rasio BOD₅/COD diatas 0,5. Sehingga dapat disimpulkan variasi kerapatan arus 30 mA cm⁻² dan rasio volume efektif 1/12,5 pada kedua anoda baik BDD maupun DSA mampu menghasilkan peningkatan indeks biodegradabilitas yang tinggi.

Hasil rasio BOD₅/COD terbesar diatas bila disajikan berdasarkan kelipatan peningkatan terhadap rasio BOD₅/COD awal dapat dilihat pada Tabel 4.4 (anoda BDD) dan Tabel 4.5 (anoda DSA).

Tabel 4. 4 Peningkatan Rasio BOD₅/COD Tertinggi terhadap Rasio BOD₅/COD Awal Anoda DSA

Kerapatan arus	DSA		
	(1/12,5)	(1/18,75)	(1/25)
10	1,5 x (15 menit; 0,02 Ah/L)	tidak terjadi kenaikan	3,3 x (120 menit; 0,06 Ah/L)
30	3,3 x (120 menit; 0,39 Ah/L)	1,2 x (15 menit; 0,03 Ah/L)	9,6 x (15 menit; 0,02 Ah/L)
50	2,8 x (30 menit; 0,15 Ah/L)	1,4 x (120 menit; 0,42 Ah/L)	2,3 x (240 menit; 0,63 Ah/L)

Tabel 4. 5 Peningkatan Rasio BOD₅/COD Tertinggi terhadap Rasio BOD₅/COD awal Anoda BDD

Kerapatan arus	BDD		
	(1/12,5)	(1/18,75)	(1/25)
10	1,4 x (15 menit; 0,02 Ah/L)	2x (120 menit; 0,11 Ah/L)	3,1x (15 menit; 0,01 Ah/L)
30	8,2 x (15 menit; 0,06Ah/L)	1,3 x (30 menit; 0,08 Ah/L)	15x (120 menit; 0,25 Ah/L)
50	1,2x (30 menit; 0,21 Ah/L)	0,9x (60 menit; 0,28Ah/L)	2x (240 menit; 0,63 Ah/L)

Berdasarkan Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 diatas nampak bahwa peningkatan rasio BOD₅/COD terbesar yang diperoleh pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² saat rasio volume efektif 1/12,5 telah memenuhi kriteria rasio BOD₅/COD untuk diolah secara biologis dengan peningkatan masing-masing anoda BDD 8 kali lipat dan anoda DSA 3 kali lipat. Nilai rasio BOD₅/COD tersebut mampu mencapai kriteria dengan peningkatan kelipatan yang tidak banyak karena memiliki nilai awal rasio BOD₅/COD yang cukup tinggi, terutama anoda DSA dengan nilai rasio awal 0,18 meningkat menjadi 0,5999.

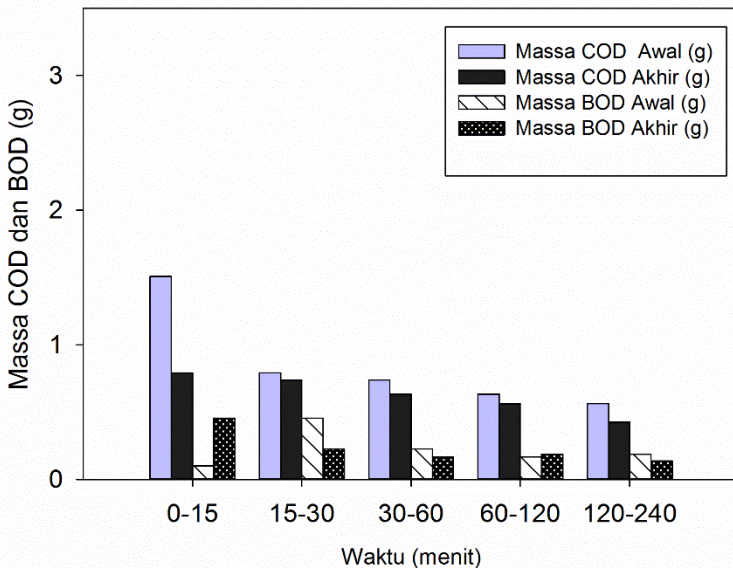
Bila dilihat dari banyaknya peningkatan rasio BOD₅/COD dibandingkan saat kondisi awal, maka peningkatan yang paling

signifikan terjadi pada rasio volume efektif 1/25 dengan kerapatan arus 30 mA cm⁻². Indeks biodegradabilitas lindi pada anoda BDD mampu meningkat drastis hingga 15 kali lipat dari rasio awal 0,02 menjadi 0,299 dan 9 kali lipat pada anoda DSA dari rasio awal 0,03 menjadi 0,288. Walaupun begitu rasio BOD₅/COD masih terbilang rendah untuk kemudian diolah secara biologis. Sehingga dapat disimpulkan variasi kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan rasio volume efektif 1/12,5 merupakan variasi terbaik yang mampu mencapai rasio BOD₅/COD terbesar pada anoda BDD (0,5759) maupun DSA (0,599). Kemudian hasilnya dapat diterima oleh pengolahan biologis. Selain itu perlu diperhatikan peningkatan rasio BOD₅/COD pada anoda DSA membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan anoda BDD. Semakin lama waktu yang diperlukan maka semakin besar muatan listrik spesifik yang digunakan, sehingga kondisi yang paling efektif yaitu saat menggunakan anoda BDD yang membutuhkan waktu relatif singkat (15 menit) untuk menghasilkan rasio BOD₅/COD terbesar. Dalam penelitian ini operasional elektrooksidasi dilakukan selama 4 jam namun, hasil peningkatan rasio BOD₅/COD banyak terjadi pada waktu kurang dari 1 jam operasional reaktor dengan pengambilan sampel 15 menit dan 30 menit pertama. Sedangkan pada sisa waktu selanjutnya nilai rasio BOD₅/COD cenderung mengalami penurunan. Sehingga kurang efektif untuk meningkatkan rasio BOD₅/COD.

Peningkatan dan penurunan rasio BOD₅/COD dapat terjadi karena perubahan konsentrasi BOD dan COD. Nilai COD dan BOD yang berubah-ubah dapat terjadi karena selama pengukuran terdapat komponen logam berat yang dapat mengganggu. Komponen logam berat yang terkandung dalam lindi dapat mengganggu proses elektrooksidasi. Komponen logam berat tersebut yaitu arsenik, kadmium, chromium, besi, merkuri serta kobalt (Kjeldsen *et al.*, 2002). Keberadaan logam berat dalam lindi ditentukan dari umur lindi yang tertimbun di landfill. Semakin tua umur lindi maka akumulasi logam berat dapat semakin meningkat (Mandal *et al.*, 2017).

4.2.6 Hubungan Perubahan COD dan BOD

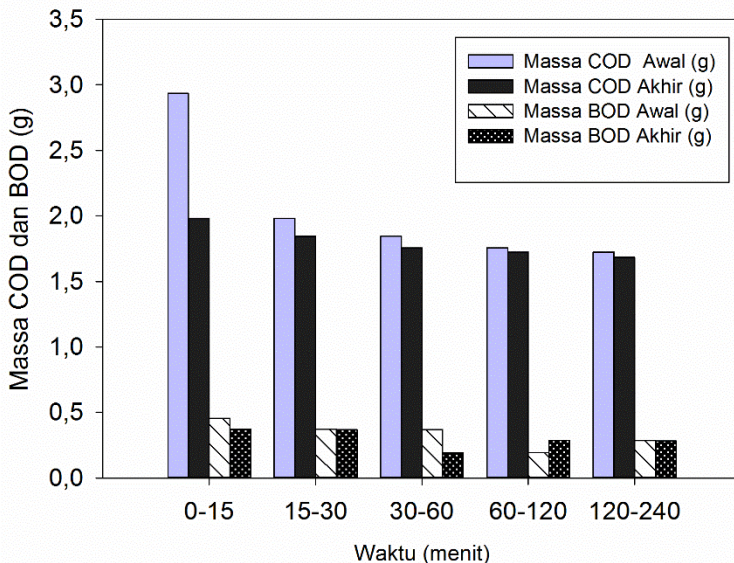
Perubahan massa COD dan BOD (g) dinyatakan dengan grafik hubungan sumbu x dan sumbu y. Sumbu x merupakan waktu (menit) proses elektrooksidasi, sedangkan sumbu y merupakan massa COD dan BOD (g) selama proses elektrooksidasi. Hasil analisis hubungan perubahan massa (g) COD dan BOD menggunakan anoda BDD dapat dilihat pada Gambar 4.24 (rasio volume efektif 1/12,5), Gambar 4.25 (rasio volume efektif 1/18,75) dan Gambar 4.26 (rasio volume efektif 1/25). Sedangkan saat menggunakan anoda DSA dapat dilihat pada Gambar 4.27 (rasio volume efektif 1/12,5), Gambar 4.28 (rasio volume efektif 1/18,75) dan Gambar 4.29 (rasio volume efektif 1/25). Data hasil analisis terdapat pada Lampiran C Tabel LC.27 hingga Tabel LC.28.



Gambar 4.24 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda BDD Rasio 1/12,5 Kerapatan arus optimum 30 mA cm^{-2}

Hasil penyajian data pada Gambar 4.24 merupakan grafik massa (g) antara parameter COD dan BOD dengan massa sebelumnya pada kondisi kerapatan arus optimum 30 mA cm^{-2} . Pada saat t_1 (15 menit) terjadi penurunan massa COD (g) yang signifikan sebesar 0,72 g dari massa sebelumnya. Saat terjadi penurunan massa COD (g) terjadi peningkatan massa BOD (g) sebesar 0,35 g. Pada kondisi inilah, peningkatan rasio BOD_5/COD paling signifikan terjadi. Peningkatan rasio BOD_5/COD 8 kali lipat (0,5792) dari rasio BOD_5/COD awal. Muatan listrik spesifik yang digunakan pada kondisi ini $\pm 0,06 \text{ Ah L}^{-1}$.

Sedangkan pada waktu operasional selanjutnya penyisihan COD rendah begitu pula dengan perubahan massa BOD. Hal ini selaras dengan perubahan rasio BOD_5/COD yang terus mengalami penurunan hingga akhir operasional reaktor. Pada saat t_2 (30 menit) terjadi penurunan massa COD (g) yang sangat rendah yaitu 0,05 g. Penurunan tersebut diiringi pula dengan penurunan massa BOD (g) sebesar 0,23 g. Selanjutnya pada saat t_3 (60 menit), t_4 (120 menit), dan t_5 (240 menit) terus terjadi penurunan massa COD (g) berturut-turut sebesar 0,10 g, 0,07 g dan 0,14 g. Selama penurunan tersebut terjadi pula penurunan massa BOD (g) pada t_3 (60 menit) dan t_5 (240 menit) sebesar 0,06 g dan 0,05 g. Penurunan rasio BOD_5/COD selama penelitian terjadi karena adanya oksidasi terhadap polutan organik baik terukur sebagai COD maupun BOD. Proses oksidasi oleh anoda BDD ini disebut pula dengan mineralisasi dimana penyisihan polutan organik hingga menjadi $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (Garcia-Segura *et al.*, 2018). Melalui data diatas dapat disimpulkan bahwa kondisi optimum penyisihan terhadap COD (g) dan peningkatan BOD (g) terjadi pada t_1 (15 menit). Karena mampu meningkatkan rasio BOD_5/COD 8 kali lipat (0,5792) sehingga memenuhi target pengolahan biologis $> 0,5$.

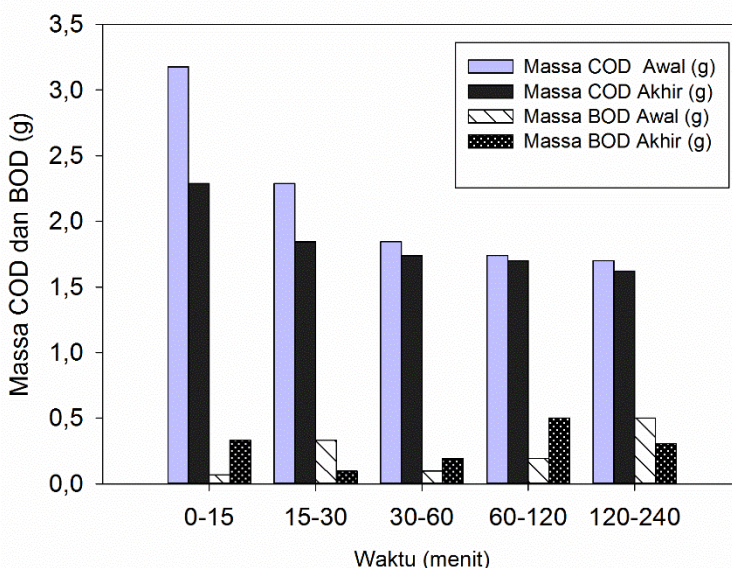


Gambar 4.25 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda BDD Rasio 1/18,75 Kerapatan arus optimum 30 mA cm⁻²

Berdasarkan Gambar 4.25 diatas terjadi penurunan massa COD (g) paling signifikan pada t_1 (15 menit) sebesar 0,95 g. Penurunan tersebut diikuti pula dengan penurunan massa BOD (g) sebesar 0,08 g. Namun, rasio BOD_5/COD tidak mengalami perubahan yang signifikan. Rasio BOD_5/COD hanya mengalami kenaikan 0,046 dari 0,153 menjadi 0,199. Perubahan massa COD dan BOD tersebut terjadi pada muatan listrik yang relatif sama yaitu $\pm 0,037$ Ah L⁻¹.

Pada waktu operasional berikutnya terjadi penyisihan terhadap COD dan BOD yang rendah. Pada t_2 (30 menit) t_3 (60 menit) terjadi penurunan massa COD (g) hanya sebesar 0,14 dan 0,09 g. Selama penurunan tersebut terjadi pula penyisihan massa BOD (g), penyisihan sebesar 0,01 dan 0,17 g. Selanjutnya pada t_4 (120 menit) terjadi penyisihan massa COD (g) sebesar 0,03 g dengan

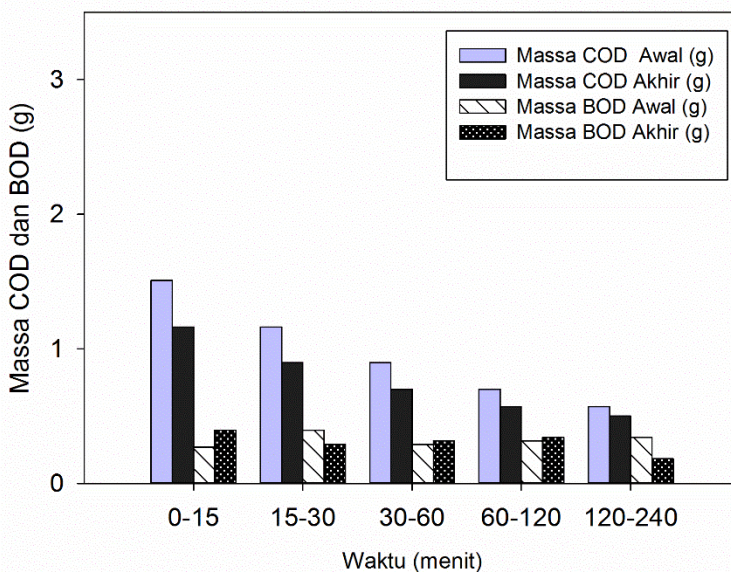
peningkatan massa BOD (g) sebesar 0,09 g. Pada akhir operasional t_5 (240 menit) terjadi penurunan COD (g) sebesar 0,04 g dan penyisihan massa BOD (g) sebesar 0,004 g. Melalui data diatas dapat disimpulkan penyisihan massa COD (g) terbesar terjadi pada t_1 (15 menit) sebesar 0,95 g. Namun tidak terjadi peningkatan massa BOD (g), justru terjadi penurunan massa BOD (g) sebesar 0,08 g. Pada variasi ini rasio BOD_5/COD tidak ada yang memenuhi target pengolahan biologis $> 0,5$.



Gambar 4.26 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda BDD Rasio 1/25 Kerapatan arus optimum 30 mA cm^{-2}

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.26 terjadi penurunan massa COD (g) paling signifikan pada t_1 (15 menit) sebesar 0,89 g. Saat penurunan tersebut diikuti dengan peningkatan massa BOD (g) sebesar 0,26 g. Rasio BOD_5/COD mengalami kenaikan 6 kali lipat dari rasio BOD_5/COD awal. Perubahan massa COD dan BOD tersebut terjadi pada muatan listrik yang relatif sama yaitu $\pm 0,031$

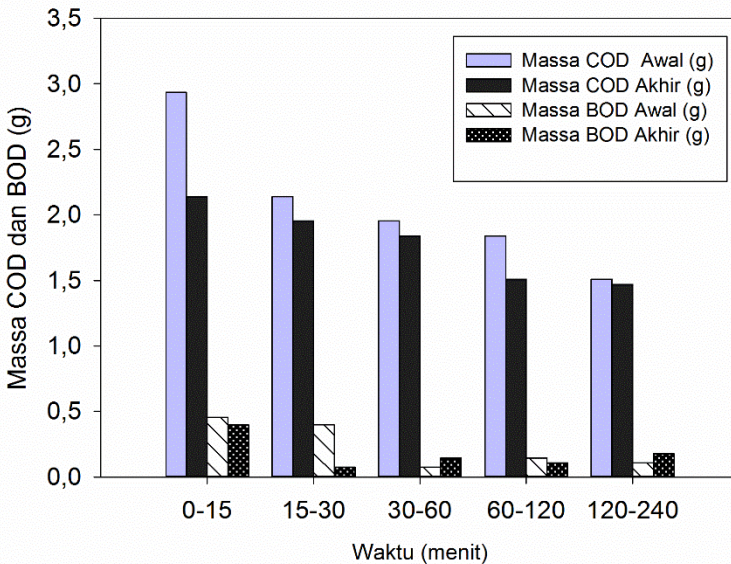
Ah L⁻¹. Pola yang sama terjadi pula pada t₄ (120 menit) dengan penyisihan massa COD (g) sebesar 0,04 g dengan peningkatan massa BOD (g) sebesar 0,31 g. Rasio BOD₅/COD mengalami kenaikan 15 kali lipat dari rasio BOD₅/COD awal. Perubahan massa COD dan BOD tersebut terjadi pada muatan listrik yang relatif sama yaitu ±0,25 Ah L⁻¹. Sedangkan pada titik sampling lain seperti t₂ (30 menit) dan t₅ (240 menit) terjadi penyisihan massa COD maupun BOD sehingga relatif terjadi penurunan rasio BOD₅/COD. Berdasarkan hasil diatas maka titik peningkatan rasio BOD₅/COD paling tinggi terjadi pada t₄ (120 menit) dengan peningkatan rasio BOD₅/COD 15 kali lipat dari rasio awal.



Gambar 4.27 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda DSA Rasio 1/12,5 Kerapatan arus optimum 30 mA cm⁻²

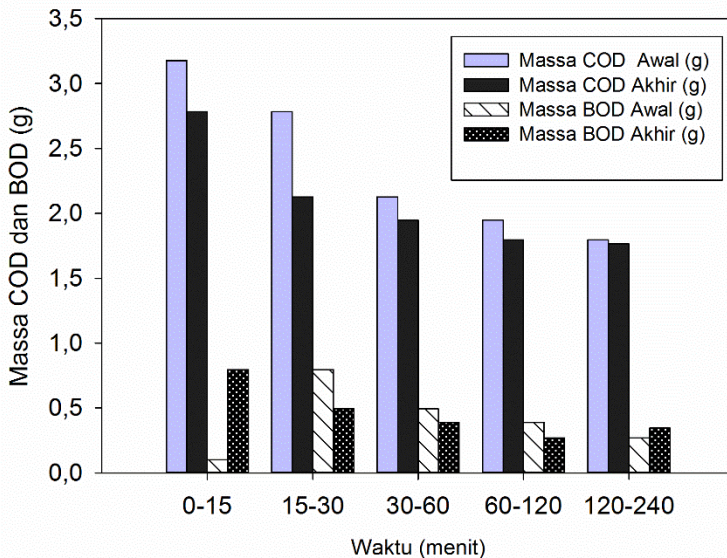
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.27 terjadi penurunan massa COD (g) paling signifikan pada t₁ (15 menit) sebesar 0,35 g. Saat penurunan tersebut terjadi pula peningkatan massa BOD (g)

sebesar 0,13 g. Rasio BOD₅/COD mengalami 2 kali lipat dari rasio BOD₅/COD awal. Sedangkan peningkatan rasio BOD₅/COD tertinggi terjadi pada t₄ (120 menit). Rasio BOD₅/COD mengalami 3 kali lipat dari rasio BOD₅/COD awal dengan perubahan massa COD dan BOD rendah. Penyisihan COD hanya 0,13 g dan peningkatan BOD hanya 0,02 g. Perubahan tersebut terjadi pada muatan listrik yang relatif sama yaitu ±0,039 Ah L⁻¹.



Gambar 4.28 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda DSA Rasio 1/18,75 Kerapatan arus optimum 30 mA cm⁻²

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.28 terjadi penurunan massa COD (g) paling signifikan pada t₁ (15 menit) sebesar 0,79 g. Saat penurunan tersebut terjadi pula penyisihan massa BOD (g) sebesar 0,06 g. Namun walaupun terjadi penyisihan COD yang tinggi rasio BOD₅/COD hanya mengalami sedikit peningkatan yaitu 0,029 dari rasio awal 0,1557 menjadi 0,185. Perubahan tersebut terjadi pada muatan listrik yang relatif sama yaitu ±0,033 Ah L⁻¹.



Gambar 4.29 Hubungan perubahan massa COD dan BOD (g) Anoda DSA Rasio 1/25 Kerapatan arus optimum 30 mA cm⁻²

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.29 terjadi penurunan massa COD (g) pada t₁ (15 menit) sebesar 0,39 g. Saat penurunan tersebut terjadi peningkatan massa BOD (g) sebesar 0,70 g. Terjadinya peningkatan massa BOD yang tinggi membuat perubahan terhadap rasio BOD₅/COD yang signifikan. Rasio BOD₅/COD mengalami peningkatan 9 kali lipat dari rasio BOD₅/COD awal. Perubahan tersebut terjadi pada muatan listrik yang relatif sama yaitu ±0,02 Ah L⁻¹.

Proses elektrooksidasi senyawa organik selama penelitian terdiri dari proses *electrochemical conversion* dan *electrochemical combustion*. Menurut Garcia-Segura *et al.* (2018), menyatakan bahwa *electrochemical conversion* merupakan proses pemecahan senyawa organik kompleks (*non-biodegradable*) dalam lindi menjadi senyawa yang lebih sederhana. Sedangkan *electrochemical combustion* merupakan proses oksidasi habis

(mineralisasi) terhadap senyawa organik hingga membentuk $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Pada penelitian ini, Proses *electrochemical combustion* dapat dilihat dengan terjadinya penurunan COD dan BOD yang signifikan. Sedangkan proses *electrochemical conversion* dapat dilihat dengan penurunan massa COD yang diikuti dengan peningkatan massa BOD. Menurut Renou *et al.* (2008), lindi yang terstabilisasi mengandung senyawa organik *recalcitrant* tinggi seperti asam humat dan asam fulvat (terukur sebagai COD) yang merupakan senyawa makromolekul kompleks. Asam humat terbentuk dari proses fisika, kimia dan biologi dari bahan-bahan tumbuhan maupun hewan. sehingga mengandung campuran organik alifatik dan aromatik. Asam humat memiliki ciri berwarna coklat pekat hingga abu-abu pekat sedangkan asam fulvat memiliki ikatan yang lebih sederhana dibandingkan asam humat dengan ciri berwarna kuning hingga coklat (Stevenson,1982). Proses oksidasi yang terjadi akan mengubah senyawa organik tersebut menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti asam amino, gula, peptida serta *volatile fatty acid* (terukur sebagai BOD) (Renou *et al.*, 2008).

4.2.7 Kondisi pH, TDS dan Ion Klorida Selama Penelitian

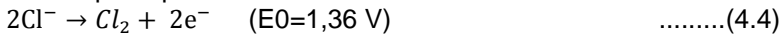
Pada penelitian ini dilakukan monitoring terhadap perubahan pH, TDS dan klorin. Pengukuran pH dan TDS dilakukan pada semua titik sampling. Sedangkan klorin hanya dilakukan pada titik awal tengah dan akhir operasional elektrooksidasi. *Potential of Hydrogen* (pH) merupakan suatu satuan ukur yang digunakan untuk menunjukkan tingkat derajat keasaman atau kadar alkali dari suatu larutan. Nilai pH dinyatakan oleh tingkat keasaman atau basa yang berkaitan dengan ion hidrogen $[\text{H}^+]$ dan ion hidroksi $[\text{OH}^-]$. Bila nilai $[\text{H}^+]$ lebih besar daripada $[\text{OH}^-]$ maka larutan bersifat asam dengan batas <7 . Sedangkan saat nilai > 7 maka suatu larutan bersifat basa. Saat $[\text{H}^+]$ dan $[\text{OH}^-]$ pada konsentrasi yang sama maka larutan tersebut bersifat netral ($\text{pH}=7$) (Purba.,1995). Dalam penelitian ini pH awal proses dikondisikan pada pH 3. Selama proses elektrooksidasi nilai pH cenderung stabil pada ± 3 baik pada anoda BDD maupun anoda DSA. Penurunan pH kurang dari 3 hanya terjadi pada 2 titik seperti pada variasi anoda BDD anoda DSA dengan kerapatan arus 10 mA cm^{-2} rasio volume efektif 1/12,5 pada akhir operasional reaktor pH mencapai 2,70

dan 2,79 . Penurunan nilai pH terjadi akibat terbentuknya ion-ion yang berkaitan dengan pembentukan klorin (klorin bebas) pada proses elektooksidasi. Selain itu hal ini dipengaruhi pula dengan bentuk reaktor yang merupakan reaktor *undivided cell*, reaktor yang tidak memiliki sekat pemisah antara anoda dan katoda. Sehingga saat reaksi oksidasi terjadi maka terjadi pula pembentukan ion-ion bebas yang memicu pembentukan produk samping tersebut Data hasil pengukuran pH dapat dilihat pada Lampiran C. Tabel LC.29 sampai LC.34

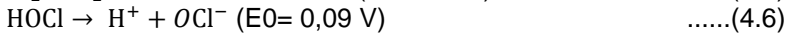
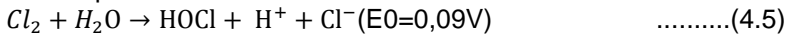
Total Dissolved Solid (TDS) merupakan kelarutan zat padat baik berupa zat organik, garam anorganik dan gas terlarut (Harahap dan Adlina, 2012). Hasil pengukuran TDS pada anoda BDD menunjukkan bahwa selama proses elektooksidasi penyisihan terhadap TDS sangat kecil. Salah satunya, pada anoda DSA penurunan TDS pada kerapatan 10 mA cm⁻² selama operasional 240 menit hanya 14 % dari TDS awal 11,6 g menjadi 10,3 g. Hal yang sama terjadi pula terhadap anoda *boron doped diamond* (BDD) yang mengalami penurunan TDS 15 % dari TDS awal 11,6 g menjadi 9,9 g. Nilai penurunan TDS yang kecil dipengaruhi oleh pengondisian pH asam dan penambahan NaCl yang mengakibatkan proses oksidasi lebih banyak mengoksidasi garam daripada TDS. Selain itu reaktor yang merupakan jenis *undivided cell* (satu kompartemen) dimana anoda dan katoda terletak dalam satu kompartemen yang sama. Sehingga dapat menyebabkan ion-ion yang telah mengalami oksidasi kemudian mengalami reduksi kembali menjadi bentuk ion semula. Nilai TDS yang tinggi dapat mengganggu selama proses elektooksidasi karena dapat meningkatkan hambatan listrik yang menyebabkan voltase cenderung mengalami Peningkatan. Penggunaan membran pada reaktor elektooksidasi dapat menjadi alternatif untuk menurunkan TDS (Agustina, 2018). Selain itu menurut Sari (2017), kombinasi dari proses elektooksidasi dan elektrodialisis dengan penggunaan membran dapat menyisihkan TDS mendekati 100%. Bukan hanya dapat menyisihkan TDS dengan efisiensi yang sangat tinggi, penggunaan membran juga dapat merecovery ammonium dan fosfat yang terdapat di dalam lindi. Data lengkap hasil analisis TDS dapat dilihat pada Lampiran C. Tabel LC.29 sampai LC.34

Selama proses elektrooksidasi dilakukan penambahan elektrolit berupa NaCl. Penambahan elektrolit berperan penting dalam pembentukan *active spesies* selama proses elektrooksidasi. Selain itu elektrolit juga berperan dalam mengurangi konsumsi energi proses (Turro *et al.*, 2012). Penambahan NaCl akan membentuk klorin dan hipoklorit selama proses elektrooksidasi melalui reaksi berikut:

Reaksi pada permukaan anoda



Reaksi pada larutan bulk



Karena peran elektrolit tersebut maka diperlukan pengukuran ion klorida selama proses elektrooksidasi. Pada penelitian ini pengambilan sampel analisis ion klorida dilakukan pada titik awal, tengah dan akhir. Kandungan ion klorida (Cl⁻) paling rendah yaitu 2,9 g/L pada variasi dengan anoda BDD dengan kerapatan arus 50 mA cm⁻². Sedangkan paling tinggi yaitu 7,6 g/L. Menurut Li *et al.* (2016) kandungan Cl⁻ pada rentang 2,5-4,5 g/L mampu meningkatkan penyisihan polutan organik terukur sebagai COD. Selain itu menurut Fernandes *et al.* (2016), peningkatan klorida dari 2,5-4,5 g/L lebih berpengaruh pada penyisihan ammonium daripada COD.

Penyisihan klorin tertinggi pada anoda DSA terjadi pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² rasio volume efektif reaktor 1/18,75 sebesar 2,23 g (24%). Sedangkan pada anoda BDD pada kerapatan arus 10 mA cm⁻² rasio volume efektif reaktor 1/12,5 sebesar 2,29 g (31%). Data lengkap hasil analisis TDS dapat dilihat pada Lampiran Lampiran C. Tabel LC.29 sampai LC.34

Selain itu, selama penelitian juga dilakukan pengamatan terhadap kondisi anoda dan katoda saat proses elektrooksidasi. Pada saat proses elektrooksidasi dengan anoda BDD dan DSA serta katoda stainless steel (SS) terjadi penggumpalan endapan pada permukaan katoda SS dan anoda DSA setelah dilakukan 2 kali *running* elektrooksidasi. Endapan yang menggumpal dapat terjadi

karena reaktor merupakan jenis *undivided cell* sehingga *suspended solid* yang masih ada sulit tersisihkan. Sedangkan pada anoda BDD tidak terjadi pengumpulan endapan pada permukaannya. Hal ini dapat terjadi karena anoda BDD merupakan anoda inert yang tidak mengabsorpsi hidroksil radikal pada permukaannya sehingga reaksi oksidasi tidak menimbulkan endapan ataupun pengotor pada permukaan anoda (Mandal *et al.*, 2017). Timbulnya endapan pada permukaan elektroda dapat menyebabkan terjadinya peningkatan hambatan listrik selama proses elektooksidasi. Hambatan listrik yang meningkat tersebut dapat menyebabkan voltase semakin meningkat sehingga kebutuhan akan energi listrik juga akan meningkat. Sehingga selama proses elektooksidasi perlu dilakukan pembersihan berkala terhadap elektroda yang digunakan.

4.2.8 Aplikasi Proses Elektooksidasi pada Pengolahan Lindi Sebelum Pengolahan Biologis

TPA Ngipik Gresik menggunakan pengolahan biologis berupa *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) dalam mengolah lindinya. Namun, hasil pengolahan lindi dengan proses tersebut masih kurang efektif dalam penyisihan polutan organik. Lindi hasil effluen pengolahan tersebut justru semakin berwarna hitam pekat yang menunjukkan akumulasi polutan organik semakin tinggi. Pengolahan lindi sistem anaerobik lebih cocok digunakan sebagai pengolahan lanjutan karena kemampuannya yang rendah dalam menyisihkan polutan organik *recalcitrant* (*non-biodegradable*) yang banyak terdapat pada lindi usia tua (Abbas *et al.*, 2009). Pada penelitian oleh Wang dan Shen. (2009), pengolahan lindi dengan ABR yang memiliki konsentrasi COD 3700 mg/L, BOD₅ 1900 mg/L, dengan rasio BOD₅/COD 0,51 memiliki efisiensi penyisihan COD hingga 70%. Hal ini sesuai dengan pernyataan Renou *et al.* (2008) yang menyatakan bahwa pengolahan biologis efektif menghilangkan polutan organik pada rasio BOD₅/COD > 0,5. Menurut hasil uji karakteristik terhadap lindi TPA Ngipik Gresik menunjukkan bahwa nilai COD 2011 mg/L, BOD₅ 133,33 mg/L dengan rasio BOD₅/COD hanya 0,066. Nilai rasio yang sangat rendah tersebut mengindikasikan bahwa tingginya polutan organik dalam lindi sehingga sulit diolah oleh ABR yang digunakan oleh TPA Ngipik Gresik saat ini. Maka dari itu, perlu dilakukan *pre-*

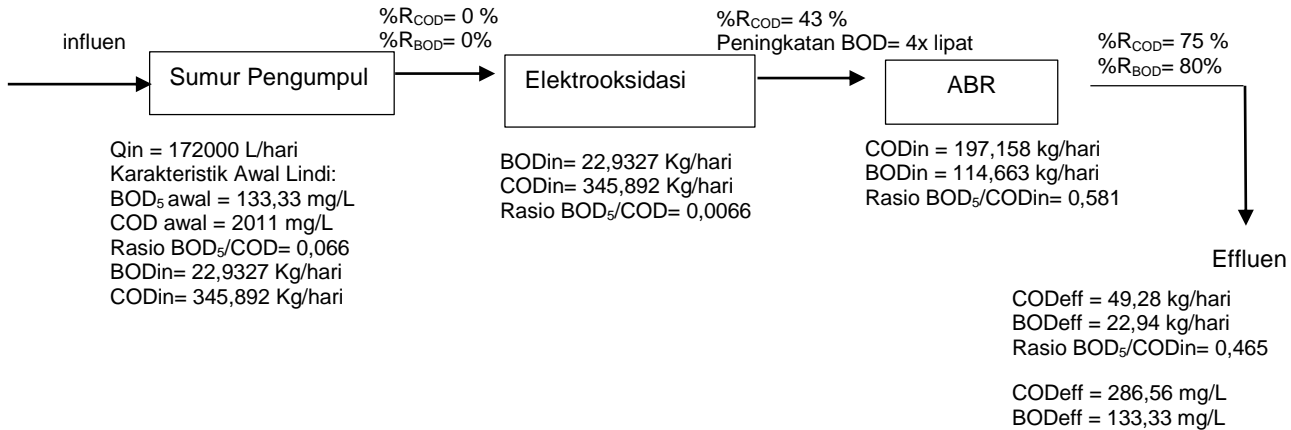
treatment untuk meningkatkan indeks biodegradabilitas lindi sebelum diolah dengan ABR.

Pengolahan fisik-kimia berupa elektrok oksidasi dapat menjadi pilihan tepat untuk menyisihkan senyawa *recalcitrant* tersebut. Melalui proses elektrok oksidasi dalam penelitian ini menunjukkan hasil terjadinya peningkatan rasio BOD₅/COD. Peningkatan rasio BOD₅/COD terbesar selama proses elektrok oksidasi dengan variasi kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan rasio volume efektif reaktor 1/12,5. Peningkatan rasio BOD₅/COD operasional anoda BDD sebesar 0,575 (8 kali lipat), penyisihan COD 69 % dan 0,599 (3 kali lipat), penyisihan COD 64 % untuk anoda DSA. Melalui hasil tersebut menunjukkan bahwa proses elektrok oksidasi mampu meningkatkan rasio BOD₅/COD hingga memenuhi kriteria > 0,5. Sehingga dapat diaplikasikan sebagai pengolahan awal (*pre-treatment*) untuk mendegradasi senyawa *recalcitrant* menjadi senyawa yang lebih sederhana yang kemudian dilanjutkan dengan pengolahan biologis.

Pada penelitian ini pH awal dikondisikan asam yaitu pH 3. Hingga akhir proses elektrok oksidasi nilai pH tersebut tidak mengalami perubahan yang berarti. Nilai pH masih berada pada kisaran ± 3. Sedangkan pengolahan lindi dengan *anaerobic baffle reactor* (ABR) dioperasikan pada pH 7,4 – 7,6 (Bame *et al.*, 2013). Disebutkan pula dalam penelitian oleh Wang dan Shen. (2009), pengolahan dengan ABR dilakukan pada pH 6,5-7. Sehingga perlu dilakukan pengondisian terhadap nilai pH asam menjadi netral. Karena pH asam dapat berdampak pada kelarutan dari senyawa yang terkandung dalam lindi. Hal ini dapat mempengaruhi kinerja mikroorganisme penerimanya (Sari, 2017). Diagram Proses pengolahan lindi dengan kombinasi elektrok oksidasi sebagai *pre-treatment* sebelum pengolahan biologis terdapat pada Gambar 4.30.

Debit rata-rata lindi TPA Ngipik Gresik yaitu 172 m³/hari (Agustina, 2018). Dengan debit lindi yang besar tersebut diperlukan sistem pengolahan yang efisien dalam menurunkan polutan organik dalam lindi. Sesuai hasil pada Gambar 4.30 Diagram alir pengolahan lindi dengan kombinasi antara proses elektrok oksidasi dan pengolahan biologis berupa ABR mampu

memhasilkan effluen yang memenuhi baku mutu. Parameter yang terpenuhi dalam baku mutu yaitu COD (mg/L) dan BOD (mg/L) dengan nilai masing-masing 286,56 mg/L dan 133,33 mg/L. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses elektrooksidasi efektif dalam menurunkan polutan organik *recalcitrant* yang ada dalam lindi. Penurunan COD hingga 43% dicapai hanya pada waktu singkat (15 menit pertama). Penurunan ini diikuti pula dengan peningkatan BOD. Perubahan BOD dan COD tersebut mampu meningkatkan indeks biodegradabilitas dalam lindi. Selain itu, waktu operasional yang singkat juga memberikan keuntungan terhadap konsumsi energi spesifik yang lebih kecil dibandingkan waktu operasional sesungguhnya (4 jam). Dalam penelitian oleh Ali *et al* (2004), memberikan hasil mampu menyisihkan COD hingga 73% dalam waktu 2 jam dengan kerapatan arus 1160 Am⁻² sehingga memerlukan konsumsi energi listrik yang besar.



Gambar 4. 30 Diagram Alir Pengolahan Lindi

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

4.3 Kebutuhan Energi Spesifik Selama Proses Elektrokodisasi

Konsumsi energi spesifik digunakan sebagai salah satu penilaian kelayakan dari proses elektrokodisasi. Perhitungan konsumsi energi spesifik proses dilakukan untuk parameter COD dengan membandingkan antara massa yang tersisihkan dengan muatan listrik spesifik. Konsumsi energi spesifik parameter COD pada variasi elektroda DSA dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 untuk anoda BDD.

Tabel 4.6 Konsumsi Energi Spesifik Anoda DSA

Variasi	Muatan Listrik Spesifik (Wh L ⁻¹)	%R COD	Massa tersisihkan (g)	Konsumsi energi spesifik kWh g ⁻¹
Anoda Dimensionally Stable Anode (DSA)				
Rasio volume efektif 1/12,5 (10 mA cm ⁻²)	1,0549	33%	0,42	0,0023
Rasio volume efektif 1/12,5 (30 mA cm ⁻²)	3,4813	67%	1,01	0,0031
Rasio volume efektif 1/12,5 (50 mA cm ⁻²)	8,4396	48%	0,61	0,0126
Rasio volume efektif 1/18,75 (10 mA cm ⁻²)	0,6298	17%	0,43	0,0021
Rasio volume efektif 1/18,75 (30 mA cm ⁻²)	2,9617	50%	1,46	0,0029
Rasio volume efektif 1/18,75 (50 mA cm ⁻²)	5,3617	57%	1,33	0,0057
Rasio volume efektif 1/25 (10 mA cm ⁻²)	0,3770	27%	0,73	0,0010
Rasio volume efektif 1/25 (30 mA cm ⁻²)	2,1864	44%	1,41	0,0030
Rasio volume efektif 1/25 (50 mA cm ⁻²)	4,2094	45%	1,34	0,0060

Hasil penyajian data pada Tabel 4.6 merupakan konsumsi energi spesifik (kWh g⁻¹) yang diperlukan hingga akhir operasional reaktor (240 menit). Berdasarkan hasil penyajian data diatas, variasi rasio volume efektif 1/25 dengan kerapatan arus 10 mA cm⁻² mampu menyisihkan massa COD sebesar 0,73 g dengan konsumsi energi spesifik paling rendah dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu 0,001 kWh g⁻¹. Sedangkan penyisihan massa COD paling besar

terjadi pada rasio volume efektif reaktor 1/18,75 kerapatan arus 30 mA cm⁻² sebesar 1,46 g membutuhkan konsumsi energi spesifik yang besar pula yaitu 0,0029 kWh g⁻¹.

Tabel 4. 7 Konsumsi Energi Spesifik Anoda BDD

Variasi	Muatan Listrik Spesifik (Wh/L)	%R COD	Massa tersisihkan (g)	Konsumsi energi spesifik kWh g ⁻¹
Anoda Boron Doped Diamond (BDD)				
Rasio volume efektif 1/12,5 (10 mA cm ⁻²)	1,4769	37%	0,47	0,0029
Rasio volume efektif 1/12,5 (30 mA cm ⁻²)	5,9077	72%	1,57	0,0034
Rasio volume efektif 1/12,5 (50 mA cm ⁻²)	10,1978	77%	0,97	0,0096
Rasio volume efektif 1/18,75 (10 mA cm ⁻²)	0,9532	26%	0,77	0,0017
Rasio volume efektif 1/18,75 (30 mA cm ⁻²)	3,1319	43%	1,25	0,0035
Rasio volume efektif 1/18,75 (50 mA cm ⁻²)	6,4681	58%	1,37	0,0067
Rasio volume efektif 1/25 (10 mA cm ⁻²)	0,6702	39%	1,31	0,001
Rasio volume efektif 1/25 (30 mA cm ⁻²)	2,1864	49%	1,55	0,0027
Rasio volume efektif 1/25 (50 mA cm ⁻²)	4,2094	51%	1,44	0,0056

Berdasarkan Tabel 4.7 variasi rasio volume efektif 1/25 kerapatan arus 10 mA cm⁻² mampu menyisihkan 1,31 g massa COD dengan konsumsi energi spesifik paling rendah dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu 0,001 kWh g⁻¹. Sedangkan penyisihan massa COD paling besar 1,57 g memerlukan konsumsi energi spesifik yang lebih besar pula yaitu 0,0034 kWh g⁻¹. Penyisihan terbesar tersebut terjadi pada variasi rasio volume efektif reaktor 1/25 dengan kerapatan arus 30 mA cm⁻².

Berdasarkan hasil diatas menunjukkan bahwa pada anoda BDD maupun anoda DSA dengan rasio volume efektif reaktor 1/25 kerapatan arus 10 mA cm⁻² mampu mencapai penyisihan massa COD yang cukup besar dengan konsumsi energi spesifik yang paling rendah dibandingkan dengan variasi lainnya.

Selain menentukan konsumsi energi spesifik selama proses elektrooksidasi, ditentukan pula konsumsi energi spesifik pada titik optimum penyisihan massa COD. Seperti hasil yang telah diperoleh sebelumnya, bahwa titik optimum penyisihan massa COD terjadi pada kerapatan arus 30 mA cm⁻² pada semua variasi rasio volume efektif yang digunakan. Konsumsi energi spesifik pada kondisi optimum dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Konsumsi Energi Spesifik Parameter COD pada Titik Optimum

Variasi	Muatan Listrik Spesifik (Wh/L)	%R COD	Massa tersisihkan (g)	Konsumsi energi spesifik kWh g ⁻¹
Anoda Dimensionally Stable Anode (DSA)				
Rasio volume efektif 1/12,5 (30 mA cm ⁻²)	0,43608	36%	0,55	0,0007
Rasio volume efektif 1/18,75 (30 mA cm ⁻²)	0,16913	27%	0,79	0,0003
Rasio volume efektif 1/25 (30 mA cm ⁻²)	0,52615	35%	1,12	0,0009
Anoda Boron Doped Diamond (BDD)				
Rasio volume efektif 1/12,5 (30 mA cm ⁻²)	0,351515	48%	0,72	0,0004
Rasio volume efektif 1/18,75 (30 mA cm ⁻²)	0,201342	32%	0,95	0,0003
Rasio volume efektif 1/25 (30 mA cm ⁻²)	0,156784	28%	0,89	0,0003

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.9 diatas nampak bahwa penyisihan massa COD pada titik optimum anoda DSA yaitu rasio volume efektif reaktor 1/18,75. Sedangkan pada anoda BDD

terletak pada rasio volume efektif 1/25. Keduanya memberikan penyisihan massa COD paling besar dengan konsumsi energi spesifik yang paling kecil dibandingkan dengan variasi lainnya. Anoda DSA mampu menyisihkan 0,79 g massa COD dengan konsumsi energi spesifik 0,0003 kWh g⁻¹. Sedangkan anoda BDD mampu menyisihkan 0,89 g massa COD dengan konsumsi energi spesifik 0,0003 kWh g⁻¹. Selain itu keduanya memerlukan muatan listrik spesifik yang hampir sama yaitu 0,16913 Wh/L dan 0,156784 Wh/L.

Proses elektrooksidasi dengan anoda DSA dalam rentang waktu setelah proses elektrooksidasi mencapai penyisihan pada titik optimum hingga akhir menunjukkan selisih konsumsi energi spesifik hingga 10 kali lipat pada akhir operasional. Pada anoda DSA saat titik optimum mampu menyisihkan 0,79 g dengan muatan listrik spesifik 0,0003 kWh g⁻¹ kemudian saat akhir operasional terjadi peningkatan massa COD yang tersisihkan sebesar 0,67 g konsumsi energi spesifik 0,003 kWh g⁻¹. Kemudian pada anoda BDD mengalami peningkatan konsumsi energi spesifik hingga 11 kali lipat pada akhir proses elektrooksidasi dengan peningkatan 0,36 g penyisihan massa COD. Konsumsi energi spesifik pada titik optimum variasi yang sama sebesar 0,0003 kWh g⁻¹ mampu menurunkan hingga 0,95 g sedangkan pada akhir operasional dengan penyisihan total 1,25 g membutuhkan konsumsi energi spesifik 0,0035 kWh g⁻¹. Namun bila dilihat dari segi konsumsi energi spesifiknya pemilihan titik optimum anoda BDD lebih tepat pada rasio volume efektif reaktor 1/25 kerapatan arus 30 mA cm⁻² memerlukan muatan listrik yang lebih rendah dengan massa penyisihan yang memiliki selisih sedikit. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin lama proses elektrooksidasi membutuhkan konsumsi energi spesifik yang semakin besar namun penyisihan massa COD tidak mengalami penyisihan yang signifikan. Penurunan massa COD hanya efektif sampai pada titik optimum (15 menit awal). Sedangkan untuk selanjutnya COD yang disisihkan sangat kecil dan membutuhkan konsumsi energi spesifik yang lebih besar.

Selanjutnya dilakukan analisis kebutuhan biaya proses elektrooksidasi pada penyisihan massa COD terbesar. Biaya yang dibutuhkan untuk setiap variasi sebagai berikut.

Tabel 4. 8 Analisis Kebutuhan Bahan Kimia Anoda BDD dan DSA pada Penyisihan massa COD terbesar

Variasi	penambaha n Asam nitrat (mL)	Penambaha n Natrium Klorida (g)	Kebutuha n Listrik (Wh/L)
Anoda BDD (1/12,5; 30 mA cm-2)	4,48	2,93	5,9077
Anoda DSA (1/18,75; 30 mA cm-2)	6,72	4,39	2,9617

Tabel 4. 9 Harga Bahan Kimia

Bahan Kimia	Harga	Satuan
Asam nitrat 65%	Rp1.075.000	/Liter
natrium klorida	Rp58.500	/Kg
Harga Listrik/ kWh	Rp1.467	/ kWh

Tabel 4. 10 Kebutuhan Biaya Elektrooksidasi Anoda BDD dan DSA pada penyisihan massa COD terbesar

Variasi	penambaha n Asam nitrat (mL)	Penambaha n Natrium Klorida (g)	Harg a Listrik	Total Harga
Anoda BDD (1/12,5; 30 mA cm-2)	Rp 4.816	Rp 171	Rp 8,67	Rp 4.995,7 8
Anoda DSA (1/18,75; 30 mA cm-2)	Rp 7.224	Rp 257	Rp 4,35	Rp 7.485,0 1

Perhitungan OLR Anoda BDD variasi kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan rasio volume efektif 1/12,5

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{Q \times \text{COD}_{in}}{\text{Volume}} \\ \text{OLR} &= \frac{5 \frac{\text{mL}}{\text{detik}} \times \frac{900 \text{ detik}}{15 \text{ menit}} \times 1942,5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1440 \text{ menit}}{\text{hari}} \times \frac{10^{-6} \text{ kg}}{\text{mg}} \times \frac{10^{-3} \text{ L}}{\text{mL}}}{10^{-3} \text{ m}^3} \\ &= 839,16 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^3 \cdot \text{hari}} \end{aligned}$$

Perhitungan OLR Anoda DSA variasi kerapatan arus 30 mA cm⁻² dengan rasio volume efektif 1/18,75

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{Q \times \text{COD}_{in}}{\text{Volume}} \\ \text{OLR} &= \frac{5 \frac{\text{mL}}{\text{detik}} \times \frac{900 \text{ detik}}{15 \text{ menit}} \times 1580 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1440 \text{ menit}}{\text{hari}} \times \frac{10^{-6} \text{ kg}}{\text{mg}} \times \frac{10^{-3} \text{ L}}{\text{mL}}}{1,5 \text{ L} \times \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{\text{L}}} \\ &= 455,04 \frac{\text{kg COD}}{\text{m}^3 \cdot \text{hari}} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil diatas proses elektrooksidasi variasi anoda BDD dengan rasio volume efektif reaktor 1/12,5 dan kerapatan arus listrik 30 mA cm⁻² dapat menyisihkan 1,57 g COD dengan biaya Rp 4.995 pada OLR 839,16 kg COD/m³.hari. Sedangkan untuk anoda DSA dengan rasio efektif reaktor 1/18,75 dan kerapatan arus listrik 30 mA cm⁻² dapat menyisihkan 1,46 g COD dengan biaya Rp 7.485 pada OLR 455,04 kg COD/m³.hari.

Berdasarkan hasil diatas, maka dapat disimpulkan bahwa proses elektrooksidasi dengan anoda BDD lebih efisien baik dari segi biaya maupun massa COD (g) yang disisihkan dibandingkan dengan anoda DSA.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini antara lain:

1. Kerapatan arus dan volume efektif reaktor berperan penting terhadap peningkatan indeks biodegradabilitas lindi. Target rasio BOD_5/COD diatas 0,5 tercapai pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dan rasio volume efektif reaktor 1/12,5 baik anoda BDD maupun DSA. Peningkatan indeks biodegradabilitas tersebut sebesar 0,5759 (8 kali lipat) dalam waktu 15 menit pada anoda BDD sedangkan anoda DSA sebesar 0,5990 (3 kali lipat) dalam waktu 120 menit.
2. Penyisihan COD tertinggi anoda BDD pada kerapatan arus 30 mA cm^{-2} dan rasio volume efektif reaktor 1/12,5 dalam waktu 15 menit sebesar 48% (0,72 g) dengan konsumsi energi spesifik $0,0004 \text{ kWh g}^{-1}$. Sedangkan pada anoda DSA dengan kerapatan arus dan rasio volume efektif yang sama sebesar 36% (0,55 g) konsumsi energi spesifik $0,0007 \text{ kWh g}^{-1}$.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dalam pengolahan lindi dengan proses elektrooksidasi adalah:

1. Dalam penelitian ini dikondisikan pada pH 3. Sehingga diperlukan penambahan bahan kimia untuk menetralkan pH sebelum dilanjutkan dengan pengolahan biologis.
2. Pada penelitian selanjutnya perlu dioptimalkan titik pengambilan sampel pada rentang waktu kurang dari 1 jam.
3. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan membran karena pada penelitian ini nilai TDS masih tinggi.

“ Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas,A.A.,Jingsong,G., Ping,Z.L.,Ya,Y.P.,Al-Rekabi,W. 2009. Review on landfill leachate treatments. Faculty of Urban and Environmental Engineering. Key Laboratory of the Georges Reservoir Region's Eco-Environment. China. 6(4): 672-684
- Alfiandi,D., 2003. Pengelolaan leachate ditempat pembuangan akhir (TPA) Tompogunung kabupaten semarang. Ilmu lingkungan. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Ali, M.A.B.,M Rakib,S Laborie, P.H. Viers. G. Durand. 2004. Coupling of bipolar membrane electro dialysis and ammonia stripping for direct treatment of wastewater containing ammonium nitrate. *Journal Science.*, 244:89-96.
- Agustina,F., 2018. Proses Oksidasi elektrokimia pada lindi menggunakan anoda boron-doped diamond (BDD) dengan penambahan ino klorida dan sulfat. Tugas Akhir Sarjana Teknik Lingkungan FTSLK ITS. Surabaya
- Alvarez-Vazquez, H., Jefferson, B., Judd, S.J., 2004. Membrane bioreactors conventional biological treatment of landfill leachate: a brief review. *Journal Of Chemical Technology and Biotechnology*, 79, 1043–1049.
- Amaral-Silva, N., Martins, R. C., Castro-Silva, S., & Quinta-Ferreira, R. M. 2016. Ozonation and perozonation on the biodegradability improvement of a landfill leachate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 527–533.
- Andriani. 2007. Pengembangan sensor voltametri n₂o dengan optimalisasi polarisasi elektroda dan konsentrasi elektrolit menggunakan elektroda kerja perak (ag). Laporan Skripsi Jurusan Kimia Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.
- Anglada, A., Urtiaga, A., Ortiz, I., dan Mantzavinos, D. 2010. Boron-doped diamond anodic treatment of landfill leachate: evaluation of operating variables and formation of oxidation by-products. *Water Research*, 45, 828-838.
- Anglada, A., Urtiaga, A., dan Ortiz, I. 2009. Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment:

- fundamentals and review of applications. Society of Chemical Industry . 84, 1747-1755.
- Azizah,L.,2010. Studi pengaruh salinitas terhadap proses degradasi sampah TPA Benowo. Tugas akhir sarjana teknik lingkungan FTSP ITS. Surabaya
- Bagastyo, A. Y., Batstone, D. J., Kristiana, I., Escher, B. I., Joll, C., Radjenovic, J. 2014. Electrochemical treatment of reverse osmosis concentrate on boron-doped electrodes in undivided and divided cell configurations. *Journal of Hazardous Materials*, 279 (Supplement C), 111–116.
- Bame,I.B., Hughes, J.C.,Titshall,L.W., Buckley,C.A. 2013. Leachate characteristics as influenced by application of anaerobic baffled reactor effluent to three soils: a soil column study. *Chemosphere*, 93(9), 2171-2179.
- Baun, L., Kløft, P.L. Bjerbg, N. Nyholm.1999.Toxicity testing of organic chemicals in groundwater polluted with landfill leachate. *Environ. Toxicol. Chem*,18, 2046–2053.
- Cabeza, A., Urtiaga, A.M.,Ortiz, I.,2007. Electrochemical treatment of landfill leachates using a boron – doped diamond anode. *Applied Chemistry*, 46(5), 1439–1446.
- Chiang, L.C., Chang, J.E., dan Wen, T.C. 1995. Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment for landfill leachate. *Water Research*, 29 (2), 671-67.
- Chu, Y., Zhang, Q., Xu, D. 2008. Advanced treatment of landfill leachate from a sequencing batch reactor (SBR) by electrochemical oxidation process. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 7(6), 627–633.
- Cossu, R, Polcaro,A.M. Lavagnolo, M.C, Mascia, M., Palmas, S, Renaldi, F., 1998. Electrochemical treatment of landfill leachate: oxidation at Ti/PbO₂ and Ti/SnO₂ anodes *Environ. Science Technology*. 32 (22), 3570-3573.
- Damanhuri, E. 2008. Diktat landfilling limbah. Bandung: Teknik Lingkungan FTSL ITB.
- Deng, Y., dan Englehardt, J. 2007. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste Management*, 27, 380-388.
- Deng, Y., Chen, N., Feng, C.,Chen, F.,Wang,H., Kuang,P., Feng, Z., Liu, T., Gao,Y., Hu,W. 2019. Treatment of organic waswater containing nitrogen and chlorine by

- combinatorial electrochemical system: Taking biologically treated landfill leachate treatment as an example. *Chemical Engineering Journal*, 364,3 349-360.
- El-Fadel, M., Bou-Zeid, E., Chahine, W., Alayli, B., 2002. Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management*, 22, 269–282
- El-Gohary, F.A., dan Kamel G., 2016. Characterization and biological treatment of pre-treated landfill leachate. *Ecological Engineering*, 1, 274.
- Ernst, W.R., Hennigar, P., Doe, K., Wade, S., Julien, G. 1999. Characterization of the chemical constituents and toxicity to aquatic organisms of a municipal landfill leachate, *Water Pollut. Res. J. Can.* 29, 89–101.
- Fatmawati, A. 2018. Proses oksidasi elektrokimia pada lindi menggunakan anoda boron-doped diamond dengan penambahan ion klorida dan sulfat. Tugas Akhir Sarjana Teknik Lingkungan FTSLK ITS. Surabaya
- Farid, M.R.R., Soehartanto, T., dan Suprpto. 2012. Perancangan dan pembuatan alat pemroduksi gas brown dengan metode elektrolisis berskala laboratorium. *Jurnal Teknik Pomits*. 1(1), 1-4.
- Fernandes, A., Spranger, P., Fonseca, A. D., Pacheco, M. J., Ciriaco, L., Lopes, A. 2014 a. Effect of electrochemical treatments on the biodegradability of sanitary landfill leachates. *Applied Catalysis B: Environmental*, 177 (Supplement C), 514–520.
- Fernandes, A., Santos, D., Pacheco, M.J., Lopes, A., 2014 b. Nitrogen and organic load removal from sanitary landfill leachates by anodic oxidation at Ti/Pt/PbO₂, Ti/PtSnO₂-Sb₂O₄ and Si/BDD. *Applied Catalysis B: Environmental*, 148-149, 288-294.
- Fernandes A., Ciriaco, L., Pacheco, M.J., Lopes, A. 2015. Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates : Present and Future. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176-177. 183-200
- Fernandes, A., Santos, D., Pacheco, M.J., Ciriaco, L., Lopes, A., 2016. Electrochemical oxidation of humic acid and sanitary landfill leachate: influence of anode material, chloride

- concentration and current density. *Science of the Total Environment*, 541, 282-291
- Fudala-ksiazek, S., Sobaszek, M., Luczkiewicz, A., Pieczynska, A., Ofiarska, A., Fiska Borzyszkowski, A., Sawczak, M., Ficek, M., Bogdanowicz, R., Siedlecka, E. M. 2017. Influence of the boron doping level on the electrochemical oxidation of raw landfill leachates: advanced pre-treatment prior to the biological nitrogen removal. *Chemical Engineering Journal*, 334, 1074-1084.
- Frascari, D., Bronzini, F., Giordano, G., Tedioli, G., Nocentini, M. 2004. Long-term characterization lagoon treatment and migration potential of landfill leachate: a case study in an active Italian landfill. *Journal of Chemosphere*, 54, 335-343.
- Garcia- Morales, M. A., Roa- Morales, G., Barrera Diaz, C., Bilyeu, B., Rodrigo, M. A., 2013. Synergy of electrochemical oxidation using boron-doped diamond electrodes and ozone in industrial wastewater treatment. *Electrochemical Commun*, 27, 34-37.
- Garcia-Segura, S., Ocon, J. D., Chong, M. N., 2018. Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents – a review. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 48-67.
- Goyal, A., Srivastava, V. C., Kushwaha, J. P., 2017. Treatment of highly acidic wastewater containing high energetic compounds using dimensionally stable anode, *Chemical Engineering Journal*.
- Harahap dan Adlina, I. 2012. Analisis total zat padat terkarut dan total zat padat tersuspensi pada air limbah industri. Jurusan Farmasi, FMIPA.USSU.
- Harahap, M. R. 2016. Sel elektrokimia: karakteristik dan aplikasi. Program studi kimia fakultas sains dan teknologi. UIN Ar-Raniry Banda Aceh. Vol. 2 (1), 177. ISSN : 2460-5476
- Hege, V. K., Verhaege, M., Verstraete, W., Electro-oxidative abatement of low-salinity reverse osmosis membrane concentrates. *Water Research*, 38, 1550-1558.
- Hilles, A. H., Abu Amr, S. S., Hussein, R. A., Arafa, A. I., & El-Sebaie, O. D. 2015. Effect of persulfate and

- persulfate/H₂O₂ on biodegradability of an anaerobic stabilized landfill leachate. *Waste Management*, 44, 172–177.
- Huda, R. 2017. Pengolahan lindi dengan proses aerobik-anoksik menggunakan moving bed biofilm reactor untuk menurunkan konsentrasi organik dan nitrogen. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Kewu, P., & Wengi, G. 2008. Biodegradability enhancement of municipal landfill leachate. *Water Science and Engineering*, 1(4), 89–98
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledina, A., Christensen, T.H., 2002. *Environ Sci Technol* 32, 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*, 129(1), 80–100.
- Li, J., Yang, Z., Xu, H., Song, P., Huang, J., Xu, R., Zhang, Y.J., Zhou, Y., 2016. Electrochemical treatment of mature landfill leachate using Ti/RuO₂-IrO₂ and Al electrode: optimization and mechanism. *RSC Adv.* 6 (53), 47509–47519.
- Li, X. M., Wang, M., Jiao, Z. K., Chen, Z. Y. 2001. Study on Electrolytic Oxidation for Landfill *Leachate Treatment* .Vol. 17.
- Li, X. Z., Zhao, Q. L. 2001. Efficiency of biological treatment affected by high strength of ammonium-nitrogen in leachate and chemical precipitation of ammonium-nitrogen as pretreatment. *ICUPCT*, 44(1), 37–43.
- Li, X.Z., Zhao, Q.L. ,Hao, X.D., 1999. Ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation, *Waste Manage*, 19, 409–415.
- Mahardika, A., Muhammad D.Z., dan Akhmad A.L.2010. Mendeteksi dampak polutan sampah terhadap air tanah permukiman di sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) dengan menggunakan metode geolistrik. Program Kreativitas Mahasiswa- Gagasan Tertulis, Universitas Negeri Malang, Malang.

- Mandal, P., Dubey, B.K., Gupta, A.K. 2017. Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: drawback challenge and future scope. *Waste Management*, 69, 250-273
- Markou, V., Kontogianni, M.C., Frontistis, Z., Tekerlekopoulou, A.G., Katsaounis, A., Vayenas, D., 2017. Electrochemical treatment of biologically pre-treated dairy wastewater using dimensionally stable anodes. *Journal of Environmental Management*, 202 part 1, 217-224.
- Mussa, H.Z., Othman, M.R., Abdullah, P., Nordin, N. 2013. Decolorization of landfill leachate using electrochemical technique. *International Journal Chemical Science*. 11(4).
- Mussa, Z., Othman, M., Abdullah, P. 2015. Electrochemical oxidation of landfill leachate: investigation of operational parameters and kinetics using graphite-pvc composite electrode as anode. Vol. 26.
- Moraes, P., dan Bertazzoli, R. 2005. "Electrodegradation of Landfill Leachate in a Flow Electrochemical Reactor". *Chemosphere*. 58, 41-46.
- Nurhayati, E., Juang, Y., Huang, C., 2017. The kinetics, current efficiency and power consumption electrochemical dye decolorization by BD-NCD electrode. *AIP Conference Proceedings*
- Panizza, M., Kapalka, A., Comninellis, C. 2008. Oxidation of organic pollutants on BDD anodes using modulated current electrolysis. *Electrochimica Acta*, 53(5), 2289–2295.
- Panizza, M., Delucchi, N., Sires, I., 2010. Electrochemical process for the treatment of landfill leachate. *Journal Application Electrochemical*. 40 (10), 172-1727.
- 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.
- Purba, M., 1995. Ilmu Kimia. Jakarta; Erlangga
- Purwanta, W., Susanto, J.K. 2017. Laju produksi dan karakterisasi polutan organik lindi dari TPA Kaliwlingi kabupaten

- brebes. PusatTeknologi Lingkungan. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(2),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*, 25(10), 2023–2030.
- Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P.,2008. Landfill leachate treatment :review and opportunity .*Journal Of Hazardous Waste*,150(3), 468–493
- Rezagama,A., Notodarmojo, S.,2012. Ketika transfer ozon dan tren kekeruhan dalam air lindi dengan pengolahan ozonisasi. Program Studi Magister Teknik Lingkungan. Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan . Institut Teknologi Bandung.
- Said,N.I.,Hartaja,D,R.,2015. Pengolahan air lindi dengan proses biofilter anaerob-aerob dan denitrifikasi. Pusat Teknologi Lingkungan,BPPT,8(1)
- Sari,P.P.I.2017. Kombinasi proses elektooksidasi dan oksidasi elektrokimia sebagai alternatif pra-pengolahan lindi. Tugas Akhir Sarjana Teknik Lingkungan FTSLK ITS. Surabaya
- Sari,R.N.,Afdal.2017. Karakteristik air lindi (leachate) di tempat pembuangan akhir sampah TPA Dingin kota Padang.*Jurnal Fisika Unand*,6(1),ISSN: 2302-8491.
- Särkkä, H., Bhatnagar, A., Sillanpää, M. 2015. Recent developments of electro-oxidation in water treatment — A review. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754(Supplement C), 46–56.
- Sillanpää, M., Shestakova, M. 2017. Equipment for electrochemical water treatment. In *Electrochemical Water Treatment Methods* (pp. 227–263). Elsevier. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128114629000049>
- Sopiah, S. 2008. *Analisis Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrolisis Larutan CuSO4 sebagai Bahan Kajian*

dalam Pembuatan dan Pembelajaran Elektronik. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

- Stevenson, F.J.1982. Humus chemistry: Genesis, composition, reacted substances. *Geochim Cosmochim Acta*,35, 471-483.
- Tamas, I.N.,2017. Proses fenton pada pengolahan lindi TPA Ngipik Gresik. Tugas akhir sarjana teknik lingkungan FTSLK ITS. Surabaya
- Tatsi, A. A., Zouboulis, A. I., Matis, K. A., Samaras, P. 2003. Coagulation–flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, 53(7), 737–744.
- Topayung, D. 2011. Pengaruh arus listrik dan waktu proses terhadap ketebalan dan massa lapisan yang terbentuk pada proses elektroplating pelat baja. *Jurnal Ilmu Sains*, 11, 97–101.
- Turro,E.,Giannis, A., Cossu,R,Gidarakos,E.,Mantzavino, D., Katsaounis,A. 2012. Reprint of: electrochemical oxidation of stabilized landfill leachate on electrodes. *Hazard Mater*, 207-208,73-78.
- Ukundimana,Z., Omwene,P.I., Gengec,E., Can, O.T., Koby, M.,2018. Electrooxidation as post treatment of ultrafiltration in a landfill leachate MBR treatment plant: Effects of BDD, Pt and DSA anode types. *Electrochimica Acta*, 252-263.
- Vilar,V.J.P.,Rocha,E.M.R.,Mota,F.S.,Fonseca,I.S.,Boacentura,R. A.R.,2011.Treatment of a sanitary landfill leachate using combined solar photo-Fenton and biological immobilized biomass reactor at a pilot scale. *Water Research*,45,2647-2658
- Vlyssides, A., Karlis, P., Loizidou, M., Zorpas, A., dan Arapoglolu, D. 2001. Treatment of leachate from a domestic solid waste by an electrolysis system. *Environmental Technology*. 22 (12). 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*,42(12), 15-121

- Wu,J.J., Wu,C.C., Ma,H.W., H.W., dan Chang, C.C. 2004.Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 54(7),997–1003.
- Yu, D., Yang,J., Teng,F., Feng,L., Fang, X., Ren.H.2014. Bioaugmentation treatment of matur landfill leachate by new isolated ammonia nitrogen and humic acid resistant microorganism. *Journal Microorganism and Biotechnology*,24(7),987-997
- Yulianto, A., Luqman Hakim, Indah Purwaningsih, Vidya Ayu Pravitasari. 2009. Pengolahan limbah cair industri batik pada skala laboratorium dengan menggunakan metode elektrokoagulasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*,5 (1), 6-11.
- Zhu, X., Ni, J., Lai, P., 2009. Advanced treatment of biologically pretreated coking wastewater by electrochemical oxidation using boron-doped diamond electrodes. *Water Research*, 43(17) , 4347–4355
- 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*. 377,406-415.
- Zouboulis, A. I., Xiao-Li Chai, Katsoyiannis, I. A. 2004. The application of bioflocculant for the removal of humic acids from stabilized landfill leachates. *Journal of Environmental Management*, 70(1), 35–41.

“Halaman ini sengaja dikosongkan “

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN KEKUATAN IONIK

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

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

Dimana:

μ = kekuatan ionik (M)

c_i = konsentrasi ion (M)

z_i = jumlah muatan ion

“Halaman ini sengaja dikosongkan “

LAMPIRAN B

PROSEDUR ANALISIS PARAMETER UJI

B.1 Analisis pH

Prinsip Kerja:

Potensiometri adalah cara analisis berdasarkan pengukuran beda potensial.

Prosedur Analisis:

1. Menyiapkan sampel sebanyak 5 mL.
2. Membilas batang silinder pH meter dengan larutan *aquadest* dan mengeringkannya menggunakan kertas tisu.
3. Menyalakan pH meter lalu mencelupkan silinder 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)

B.2 Analisis TDS

Prinsip Kerja:

Potensiometri adalah cara analisis berdasarkan pengukuran beda potensial.

Prosedur Analisis:

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

(SNI 06-6989.1-2004)

B.3 Analisis COD dengan Metode Closed Reflux and Colorimetric

Prinsip Kerja:

Ketika sampel dipanaskan, ion dikromat akan mengoksidasi COD pada sampel. Hal ini menyebabkan perubahan Cr (VI) menjadi Cr (III).

Alat:

a. *Vial* atau Tabung COD

Setiap akan digunakan, *vial* harus dalam keadaan bersih. Cara membersihkan *vial* adalah dengan cara dibilas dan dikocok dengan air kran 1 kali, kemudian dengan aquadest 2 kali, lalu dikeringkan.

b. *Digester*

Digester dioperasikan pada suhu 148°C selama 2 jam.

c. *Spektroquant*

Spektroquant digunakan untuk mengukur absorbansi larutan yang telah didigest pada panjang gelombang 500 nm.

Bahan:

a. ***Digestion solution***, larutkan 10,216 g $K_2Cr_2O_7$ (yang sebelumnya telah dikeringkan pada suhu 150°C selama 2 jam) ke dalam 500 mL aquadest, tambahkan 167 mL H_2SO_4 pekat, dan tambahkan 33,3 gr $HgSO_4$, dinginkan lalu diencerkan hingga volume 1000 mL.

b. ***Sulfuric acid reagent***, tambahkan Ag_2SO_4 ke dalam H_2SO_4 pekat dengan komposisi 5,5 gr Ag_2SO_4 /Kg H_2SO_4 . Diamkan 1 hingga 2 hari hingga terlarut.

c. **Larutan standar *Potassium hydrogen phthalate (KHP)***, larutkan 425 mg KHP ke dalam 500 mL aquadest. Larutan ini memiliki nilai COD 1000 mg O_2 /L.

Pembuatan kurva kalibrasi:

a. Buat larutan dengan konsentrasi COD 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 dan 400 mg O_2 /L dari larutan standart KHP 1000 mg O_2 /L.

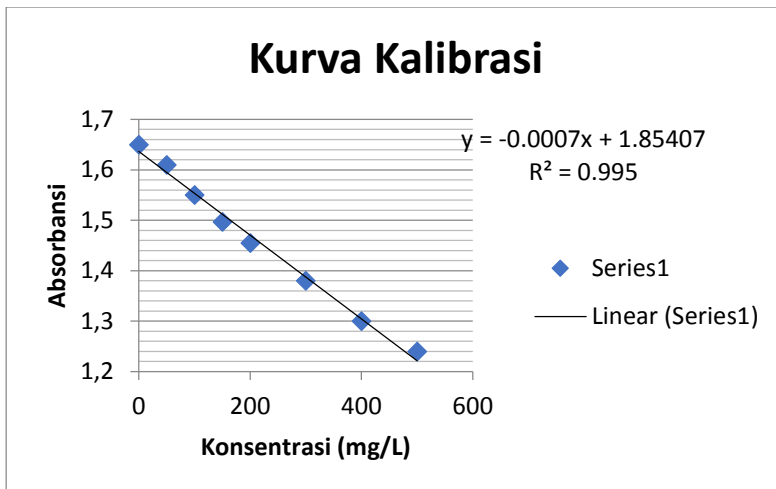
b. Siapkan *vial* yang telah dibersihkan

- c. Tambahkan 1,5 mL *digestion solution* (larutan dikromat) ke dalam *vial*.
- d. Tambahkan 2,5 mL *sulphuric acid reagent* (larutan $\text{Ag}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$) ke dalam *vial*.
- e. Tambahkan 1 mL larutan standar KHP, tutup *vial* dengan rapat lalu dikocok hingga homogen. Setelah dikocok, pastikan tutup *vial* tetap dalam keadaan rapat.
- f. Hidupkan *digester*, kemudian atur suhunya hingga 148°C.
- g. Masukkan *vial* ke dalam *digester*. Lalu tekan tombol run/enter.
- h. Setelah 2 jam, turunkan suhu *digester* dan tunggu hingga 15-20 menit. Lalu angkat *vial* dari *digester*, kemudian kocok hingga homogen, lalu diamkan hingga suhunya turun seperti suhu ruang, dan seluruh suspensi dalam larutan telah mengendap.
- i. Hidupkan *spectroquant*, lalu atur metode untuk mengukur COD dengan memasukkan angka 023.
- j. Baca absorbansi COD pada *spectroquant*. Cari panjang gelombang optimum untuk setiap variasi konsentrasi COD yang telah dibuat, lalu buat kurva kalibrasi.

Prosedur analisis:

- a. Siapkan *vial* yang telah dibersihkan
- b. Tambahkan 1,5 mL *digestion solution* (larutan dikromat) ke dalam *vial*.
- c. Tambahkan 2,5 mL *sulphuric acid reagent* (larutan $\text{Ag}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$) ke dalam *vial*.
- d. Tambahkan 1 mL sampel, tutup dengan rapat lalu dikocok hingga homogen. Setelah dikocok, pastikan tutup *vial* tetap dalam keadaan rapat.
- e. Hidupkan *digester*, kemudian atur suhunya hingga 148°C.
- f. Masukkan *vial* ke dalam *digester*, lalu tekan tombol run/enter.
- g. 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.
- h. Hidupkan *spectroquant*, lalu atur metode untuk mengukur COD dengan memasukkan angka 023. Baca pada *spektroquant* dengan panjang optimum yang telah didapatkan.

i. Masukkan hasil pembacaan absorbansi ke dalam persamaan regresi untuk mendapatkan konsentrasi COD.



Grafik A. 1 Kurva Kalibrasi COD

B.4 Analisis BOD

a. Prinsip Kerja

Metode ini digunakan untuk mengetahui tingkat biodegradabilitas pada lindi.

b. Prosedur Pembuatan Reagen

-Larutan Buffer Fosfat

Campur dan larutkan KH_2PO_4 0,85 g, K_2HPO_4 0,2175 g, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,334 g dan NH_4Cl 0,17 g ke dalam 100 mL *aquadest* dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

-Larutan MgSO_4

Larutkan 2,25 gram $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dalam 100 ml *aquadest*.

-Larutkan CaCl_2

Larutkan 2,75 gram CaCl_2 dalam 100 ml *aquadest*.

-Larutan FeCl_3

Larutkan 0,025 gram $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam 100 ml aquadest.

-Larutan benih

Aerasi larutan benih lalu diambil 1 mL per liter air.

C. Prosedur Analisis

-Pembuatan air pengencer 20 Liter. Maka penambahan nutrisi:

1. Menambahkan 20 mL buffer fosfat
2. Menambahkan 20 mL MgSO_4
3. Menambahkan 20 mL CaCl_2
4. Menambahkan 20 mL FeCl_3
5. Menambahkan larutan benih 20 mL
6. Melakukan aerasi minimal 2 jam.

-Prosedur Analisis BOD

1. Menyiapkan 1 buah labu pengencer 500 ml dan menuangkan sampel sesuai dengan perhitungan pengenceran, menambahkan air pengencer sampai batas labu.
2. Menyiapkan 2 botol winkler 300 ml
3. Menuangkan air dalam labu pengencer 500 ml kedalam botol winkler 300 ml sampai tumpah.
4. Menuangkan air pengencer pada botol winkler 300 ml sampai tumpah, sebagai blanko
5. Mengukur Dissolved Oxygen (DO) sebagai BOD_0 dengan DO-meter.
6. Memasukkan kedua botol winkler kedalam incubator 20°C selama 5 hari
7. Melakukan pengukuran Dissolved Oxygen (DO) sebagai BOD_5 dengan DO-meter.
8. Menghitung nilai BOD_5 dengan rumus berikut :

$$\text{BOD}_5^{20} (\text{mg} / \text{L}) = \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)] \times (1 - P)}{P}$$

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

Keterangan:

X_0 = Oksigen terlarut sampel pada $t = 0$

X_6 = Oksigen terlarut sampel pada $t = 5$

B_0 = Oksigen terlarut blankol pada $t = 0$

B_6 = Oksigen terlarut blankol pada $t = 5$

P = Derajat pengenceran

(SNI 6989.72:2009)

B.5 Analisis Cl⁻ 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_3) 0,0141 N, larutan kalium dikromat 5%, serbuk NaCl, HNO_3 pekat, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ 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_3) 0,0141 N
Melarutkan AgNO_3 sebanyak 2,39725 g ke dalam labu pengencer berisi 1 L larutan *aquadest*.
- Larutan Kalium Dikromat 5%
- Standarisasi untuk Faktor Koreksi AgNO_3
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_3 pekat, 3 tetes $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ 10% dan 1 sendok spatula ZnO. Menitrasi dengan larutan AgNO_3 0,0141 N hingga warna kuning berubah menjadi merah bata.

d. Prosedur Analisis

1. Mengambil sampel sebanyak 12,5 mL ke dalam labu erlenmeyer 25 mL.
2. Menambahkan 0,5 mL $K_2Cr_2O_4$.
3. Menambahkan 1 sendok spatula bubuk ZnO.
4. Menitrasi dengan $AgNO_3$ hingga berubah warna menjadi merah bata.
5. Menghitung nilai Cl^- 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 $AgNO_3$ untuk titrasi contoh uji (mL)

B: Volume larutan baku $AgNO_3$ untuk titrasi blanko (mL)

N: Normalitas larutan baku $AgNO_3$ (mgrek/mL)

V: Volume contoh uji (mL)

(SNI 06-6989.19-2004)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C

DATA HASIL ANALISIS

Tabel LC. 1 Penyisihan Massa COD Debit 5 mL s^{-1}
 Penelitian Pendahuluan

Waktu	Q = 5 mL s^{-1}					
	DSA			BDD		
(menit)	COD (mg L^{-1})	COD (g)	COD/COD ₀	COD (mg L^{-1})	COD (g)	COD/COD ₀
0	1998,75	2,02	1,00	1830	1,85	1,00
15	1273,75	1,26	0,64	1293	1,28	0,71
30	1248,75	1,21	0,62	1168	1,13	0,64
60	1055	1,00	0,53	1099	1,04	0,60
120	986,25	0,92	0,49	1055	0,98	0,58
240	630	0,57	0,32	311	0,28	0,17

Tabel LC. 2 Penyisihan Massa COD Debit 5 mL s^{-1}
 Penelitian Pendahuluan

Waktu	Q = $1,5 \text{ mL s}^{-1}$					
	DSA			BDD		
(menit)	COD (mg L^{-1})	COD (g)	COD/COD ₀	COD (mg L^{-1})	COD (g)	COD/COD ₀
0	1636,25	1,65	1,00	1292,50	1,31	1,00
15	1198,75	1,19	0,73	911,25	0,90	0,71
30	1117,50	1,08	0,68	1042,50	1,01	0,81
60	1080,00	1,03	0,66	873,75	0,83	0,68
120	711,25	0,66	0,43	717,50	0,67	0,56
240	986,25	0,90	0,60	555,00	0,51	0,43

Tabel LC.3 Pengaruh Debit Operasional terhadap Perubahan BOD₅
Anoda DSA

Waktu (menit)	Volume (L)	DSA			
		Q = 5 mL s ⁻¹		Q = 1,5 mL s ⁻¹	
		BOD (mg L ⁻¹)	Massa BOD (g)	BOD (mg L ⁻¹)	Massa BOD (g)
0	1,01	133,33	0,13	366,67	0,37
15	0,99	222,91	0,22	389,59	0,39
30	0,97	93,66	0,09	698,44	0,68
60	0,95	105,50	0,10	520,00	0,49
120	0,93	221,91	0,21	426,75	0,40
240	0,91	112,50	0,10	160,00	0,15

Tabel LC.4 Pengaruh Debit Operasional terhadap Perubahan BOD₅
Anoda BDD

Waktu (menit)	Volume (L)	BDD			
		Q = 5 mL s ⁻¹		Q = 1,5 mL s ⁻¹	
		BOD (mg L ⁻¹)	Massa BOD (g)	BOD (mg L ⁻¹)	Massa BOD (g)
0	1,01	133,33	0,13	233,33	0,24
15	0,99	193,88	0,19	483,33	0,48
30	0,97	642,13	0,62	620,00	0,60
60	0,95	240,00	0,23	500,00	0,48
120	0,93	200,00	0,19	357,14	0,33
240	0,91	120,00	0,11	111,11	0,10

Tabel LC. 5 Perubahan BOD₅/COD selama proses elektroosidasi anoda DSA

Waktu	DSA					
	Q = 5 mL s ⁻¹			Q = 1,5 mL s ⁻¹		
(menit)	BOD (g)	COD (g)	BOD/COD	BOD (g)	COD (g)	BOD/COD
0	0,135	2,019	0,067	0,370	1,653	0,224
15	0,221	1,261	0,175	0,386	1,187	0,325
30	0,091	1,211	0,075	0,677	1,084	0,625
60	0,100	1,002	0,100	0,494	1,026	0,481
120	0,206	0,917	0,225	0,397	0,661	0,600
240	0,102	0,573	0,179	0,146	0,897	0,162

Tabel LC. 6 Perubahan BOD₅/COD selama proses elektroosidasi anoda BDD

Waktu	BDD					
	Q = 5 mL s ⁻¹			Q = 1,5 mL s ⁻¹		
(menit)	BOD (g)	COD (g)	BOD/COD	BOD (g)	COD (g)	BOD/COD
0	0,135	1,848	0,073	0,236	1,305	0,181
15	0,192	1,280	0,150	0,479	0,902	0,530
30	0,623	1,132	0,550	0,601	1,011	0,595
60	0,228	1,044	0,218	0,475	0,830	0,572
120	0,186	0,981	0,190	0,332	0,667	0,498
240	0,109	0,283	0,386	0,101	0,505	0,200

Tabel LC. 7 Penyisihan TDS pada Penelitian Pendahuluan

Waktu (menit)	TDS (g/L)			
	Q = 5 mL s ⁻¹		Q = 1,5 mL s ⁻¹	
	DSA	BDD	DSA	BDD
0	7.57	7.15	7.24	9.70
15	7.48	7.06	7.98	9.67
30	7.22	7.08	7.95	9.50
60	7.31	7.14	7.56	9.55
120	7.08	7.34	7.21	9.40
240	7.02	7.09	7.13	9.34

Tabel LC. 8 Perubahan pH pada Penelitian Pendahuluan

Waktu (menit)	pH			
	Q = 5 mL s ⁻¹		Q = 1,5 mL s ⁻¹	
	DSA	BDD	DSA	BDD
0	3.38	3.18	3.35	2.98
15	3.15	3.12	3.35	2.93
30	3.23	3.01	3.32	2.73
60	3.21	2.97	3.26	2.63
120	3.20	3.10	3.24	2.59
240	3.25	2.99	3.14	2.52

Tabel LC. 9 Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)	
0	0,00	1273,75	1,29	1,00	0,00	1492,50	1,51	1,00	0,00	1242,50	1,25	1,00
15	0,02	1117,50	1,11	0,88	0,06	798,75	0,79	0,54	0,10	842,50	0,83	0,68
30	0,04	1023,75	0,99	0,80	0,12	761,25	0,74	0,51	0,21	711,25	0,69	0,57
60	0,08	961,25	0,91	0,75	0,25	667,50	0,63	0,45	0,42	580,00	0,55	0,47
120	0,17	917,50	0,85	0,72	0,52	605,00	0,56	0,41	0,86	430,00	0,40	0,35
240	0,35	892,50	0,81	0,70	1,05	467,50	0,43	0,31	1,76	317,50	0,29	0,26

Tabel LC. 10 Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀ (menit)	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀ (menit)	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)	
0	0,00	1648,75	2,49	1,00	0,00	1942,50	2,93	1,00	0,00	1555,00	2,35	1,00
15	0,01	1517,50	2,26	0,92	0,04	1330,00	1,98	0,68	0,07	1348,75	2,01	0,87
30	0,03	1405,00	2,07	0,85	0,08	1255,00	1,84	0,65	0,14	892,50	1,31	0,57
60	0,06	1380,00	2,00	0,84	0,17	1211,25	1,76	0,62	0,28	811,25	1,18	0,52
120	0,11	1342,50	1,92	0,81	0,34	1205,00	1,72	0,62	0,56	767,50	1,10	0,49
240	0,23	1217,50	1,72	0,74	0,68	1192,50	1,68	0,61	1,13	692,50	0,98	0,45

Tabel LC. 11 Penyisihan COD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀
	(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)	
0	0,00	1655,00	3,33	1,00	0,00	1580,00	3,18	1,00	0,00	1530,00	2,95	1,00
15	0,01	1423,75	2,83	0,86	0,03	1148,75	2,29	0,73	0,04	1105,00	2,47	0,72
30	0,02	1142,50	2,25	0,69	0,06	936,25	1,84	0,59	0,08	1123,75	2,34	0,73
60	0,04	1123,75	2,19	0,68	0,12	892,50	1,74	0,56	0,15	1048,75	2,29	0,69
120	0,08	1142,50	2,21	0,69	0,25	880,00	1,70	0,56	0,31	923,75	1,66	0,60
240	0,17	1055,00	2,02	0,64	0,50	848,75	1,62	0,54	0,63	792,50	1,51	0,52

Tabel LC. 12 Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀
	(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)	
0	0,00	1273,75	1,29	1,00	0,00	1492,50	1,51	1,00	0,00	1242,50	1,25	1,00
15	0,02	1198,75	1,19	0,94	0,05	1173,75	1,16	0,79	0,08	1098,75	1,09	0,88
30	0,03	1073,75	1,04	0,84	0,09	923,75	0,90	0,62	0,15	930,00	0,90	0,75
60	0,06	1036,25	0,98	0,81	0,19	736,25	0,70	0,49	0,32	836,25	0,79	0,67
120	0,13	1005,00	0,93	0,79	0,39	611,25	0,57	0,41	0,65	786,25	0,73	0,63
240	0,26	948,75	0,86	0,74	0,79	548,75	0,50	0,37	1,32	711,25	0,65	0,57

Tabel LC. 13 Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)	
0	0,00	1648,75	2,49	1,00	0,00	1942,50	2,93	1,00	0,00	1555,00	2,35	1,00
15	0,01	1573,75	2,34	0,92	0,03	1436,25	2,14	0,74	0,05	1230,00	1,83	0,79
30	0,03	1555,00	2,29	0,85	0,06	1330,00	1,96	0,68	0,10	1017,50	1,50	0,65
60	0,06	1523,75	2,21	0,84	0,12	1267,50	1,84	0,65	0,21	848,75	1,23	0,55
120	0,11	1505,00	2,15	0,81	0,25	1055,00	1,51	0,54	0,42	798,75	1,14	0,51
240	0,23	1461,25	2,06	0,74	0,51	1042,50	1,47	0,54	0,85	723,75	1,02	0,47

Tabel LC. 14 Penyisihan COD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀	Muatan Energi Spesifik	COD	COD	COD/COD ₀
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(mg L ⁻¹)	(g)	
0	0,00	1655,00	3,33	1,00	0,00	1580,00	3,18	1,00	0,00	1530,00	2,95	1,00
15	0,01	1480,00	2,95	0,89	0,02	1398,75	2,78	0,89	0,04	1311,25	2,46	0,86
30	0,02	1455,00	2,87	0,88	0,05	1080,00	2,13	0,68	0,08	1061,25	2,34	0,69
60	0,03	1398,75	2,73	0,85	0,09	998,75	1,95	0,63	0,15	905,00	2,29	0,59
120	0,06	1273,75	2,46	0,77	0,19	930,00	1,79	0,59	0,31	830,00	1,67	0,54
240	0,13	1267,50	2,42	0,77	0,38	923,75	1,76	0,58	0,63	705,00	1,61	0,46

Tabel LC. 15 Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)
0	0,00	0,23	0,00	0,10	0,00	0,17
15	0,02	0,27	0,06	0,46	0,10	0,05
30	0,04	0,04	0,12	0,23	0,21	0,10
60	0,08	0,11	0,25	0,17	0,42	0,06
120	0,17	0,06	0,52	0,19	0,86	0,06
240	0,35	0,16	1,05	0,14	1,76	0,05

Tabel LC. 16 Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)
0	0,00	0,25	0,00	0,45	0,00	0,30
15	0,01	0,15	0,04	0,37	0,07	0,25
30	0,03	0,15	0,08	0,37	0,14	0,15
60	0,06	0,19	0,17	0,19	0,28	0,18
120	0,11	0,38	0,34	0,29	0,56	0,14
240	0,23	0,19	0,68	0,28	1,13	0,11

Tabel LC. 17 Perubahan BOD Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)
0	0,00	0,20	0,00	0,07	0,00	0,34
15	0,01	0,53	0,03	0,33	0,04	0,27
30	0,02	0,20	0,06	0,10	0,08	0,25
60	0,04	0,31	0,12	0,20	0,15	0,29
120	0,08	0,42	0,25	0,50	0,31	0,23
240	0,17	0,38	0,50	0,31	0,63	0,38

Tabel LC. 18 Penyisihan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)
0	0,00	0,23	0,00	0,27	0,00	0,07
15	0,02	0,33	0,05	0,40	0,08	0,12
30	0,03	0,27	0,09	0,29	0,15	0,14
60	0,06	0,12	0,19	0,32	0,32	0,11
120	0,13	0,16	0,39	0,34	0,65	0,11
240	0,26	0,16	0,79	0,18	1,32	0,09

Tabel LC. 19 Penyisihan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)
0	0,00	0,25	0,00	0,45	0,00	0,38
15	0,01	0,10	0,03	0,40	0,05	0,25
30	0,03	0,10	0,06	0,07	0,10	0,22
60	0,06	0,15	0,12	0,15	0,21	0,15
120	0,11	0,19	0,25	0,11	0,42	0,26
240	0,23	0,14	0,51	0,18	0,85	0,17

Tabel LC. 20 Penyisihan BOD Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD	Muatan Energi Spesifik	BOD
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(Ah L ⁻¹)	(g)
0	0,00	0,20	0,00	0,10	0,00	0,50
15	0,01	0,55	0,02	0,80	0,04	0,46
30	0,02	0,16	0,05	0,49	0,08	0,34
60	0,03	0,13	0,09	0,39	0,15	0,24
120	0,06	0,48	0,19	0,27	0,31	0,27
240	0,13	0,48	0,38	0,34	0,63	0,50

Tabel LC. 21 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)

Waktu (menit)	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD
0	0,00	0,18	0,00	0,07	0,00	0,13
15	0,02	0,25	0,06	0,58	0,10	0,06
30	0,04	0,04	0,12	0,31	0,21	0,14
60	0,08	0,12	0,25	0,26	0,42	0,10
120	0,17	0,07	0,52	0,33	0,86	0,14
240	0,35	0,20	1,05	0,32	1,76	0,16

Tabel LC. 22 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75(80 mL/1500 mL)

Waktu (menit)	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD
0	0,00	0,10	0,00	0,15	0,00	0,13
15	0,01	0,07	0,04	0,19	0,07	0,12
30	0,03	0,07	0,08	0,20	0,14	0,11
60	0,06	0,10	0,17	0,11	0,28	0,15
120	0,11	0,20	0,34	0,17	0,56	0,13
240	0,23	0,11	0,68	0,17	1,13	0,12

Tabel LC. 23 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25(80 mL/2000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik	BOD/ COD
(menit)	(Ah L ⁻¹)		(Ah L ⁻¹)		(Ah L ⁻¹)	
0	0,00	0,06	0,00	0,02	0,00	0,11
15	0,01	0,19	0,03	0,15	0,04	0,12
30	0,02	0,09	0,06	0,05	0,08	0,11
60	0,04	0,14	0,12	0,11	0,15	0,14
120	0,08	0,19	0,25	0,30	0,31	0,13
240	0,17	0,19	0,50	0,19	0,63	0,25

Tabel LC. 24 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5(80 mL/1000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik	BOD/ COD
(menit)	(Ah L ⁻¹)		(Ah L ⁻¹)		(Ah L ⁻¹)	
0	0,00	0,18	0,00	0,18	0,00	0,05
15	0,02	0,28	0,05	0,34	0,08	0,11
30	0,03	0,26	0,09	0,32	0,15	0,15
60	0,06	0,12	0,19	0,45	0,32	0,14
120	0,13	0,17	0,39	0,60	0,65	0,15
240	0,26	0,19	0,79	0,36	1,32	0,14

Tabel LC. 25 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75(80 mL/1500 mL)

Waktu (menit)	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD
0	0,00	0,10	0,00	0,15	0,00	0,16
15	0,01	0,04	0,03	0,19	0,05	0,14
30	0,03	0,04	0,06	0,04	0,10	0,15
60	0,06	0,07	0,12	0,08	0,21	0,12
120	0,11	0,09	0,25	0,07	0,42	0,23
240	0,23	0,07	0,51	0,12	0,85	0,17

Tabel LC. 26 Pengaruh Kerapatan Arus terhadap Perubahan Biodegradabilitas Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)

Waktu (menit)	10 mA cm ⁻²		30 mA cm ⁻²		50 mA cm ⁻²	
	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD	Muatan Energi Spesifik (Ah L ⁻¹)	BOD/ COD
0	0,00	0,06	0,00	0,03	0,00	0,16
15	0,01	0,19	0,02	0,29	0,04	0,18
30	0,02	0,05	0,05	0,23	0,08	0,16
60	0,03	0,05	0,09	0,20	0,15	0,14
120	0,06	0,20	0,19	0,15	0,31	0,17
240	0,13	0,20	0,38	0,19	0,63	0,37

Tabel LC. 27 Selisih Massa COD dan BOD Anoda DSA

Rasio Volume Efektif Reaktor	Selisih	Waktu	COD (g)	BOD(g)
Rasio volume efektif reaktor 1/12,5	$\Delta 1$	15	0,35	-0,13
	$\Delta 2$	30	0,27	0,11
	$\Delta 3$	60	0,20	-0,03
	$\Delta 4$	120	0,13	-0,02
	$\Delta 5$	240	0,07	0,16
Rasio volume efektif reaktor1/18,75	$\Delta 1$	15	0,79	0,06
	$\Delta 2$	30	0,18	0,32
	$\Delta 3$	60	0,12	-0,07
	$\Delta 4$	120	0,33	0,04
	$\Delta 5$	240	0,04	-0,07
Rasio volume efektif reaktor 1/25	$\Delta 1$	15	0,39	-0,70
	$\Delta 2$	30	0,66	0,30
	$\Delta 3$	60	0,18	0,10
	$\Delta 4$	120	0,15	0,12
	$\Delta 5$	240	0,03	-0,07

Tabel LC. 28 Selisih Massa COD dan BOD Anoda BDD

Rasio Volume Efektif Reaktor	Selisih	Waktu	COD (g)	BOD(g)
Rasio volume efektif reaktor 1/12,5	$\Delta 1$	15	0,72	-0,35
	$\Delta 2$	30	0,05	0,23
	$\Delta 3$	60	0,10	0,06
	$\Delta 4$	120	0,07	-0,02
	$\Delta 5$	240	0,14	0,05
Rasio volume efektif reaktor1/18,75	$\Delta 1$	15	0,95	0,08
	$\Delta 2$	30	0,14	0,01
	$\Delta 3$	60	0,09	0,17
	$\Delta 4$	120	0,03	-0,09
	$\Delta 5$	240	0,04	0,00
Rasio volume efektif reaktor 1/25	$\Delta 1$	15	0,89	-0,26
	$\Delta 2$	30	0,44	0,23
	$\Delta 3$	60	0,10	-0,10
	$\Delta 4$	120	0,04	-0,31
	$\Delta 5$	240	0,08	0,20

Tabel LC. 29 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)	
0	0,00	11,60	9,2891	3,17	0,00	12,83	6,6639	3,08	0,00	10,47	3,332	3,19
15	0,02	11,51		3,09	0,06	12,74		3,04	0,10	10,41		3,1
30	0,04	10,82		2,83	0,12	12,72		3,07	0,21	10,05		3,15
60	0,08	9,91	6,9329	2,77	0,25	12,35	6,0781	3,08	0,42	10,29	3,0391	3,16
120	0,17	9,84		2,69	0,52	12,03		3,1	0,86	10,25		3,17
240	0,35	9,90	6,368	2,70	1,05	11,08	6,459	3,09	1,76	10,17	2,9475	3,1

Tabel LC. 30 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)	
0	0,00	9,91	11,171	3,17	0,00	11,11	11,774	2,98	0,00	11,65	9,9629	3,09
15	0,01	10,12		3,20	0,04	10,86		2,79	0,07	11,33		3,07
30	0,03	10,13		3,30	0,08	10,87		2,71	0,14	11,03		3,06
60	0,06	9,87	11,306	3,12	0,17	10,83	9,8569	2,89	0,28	10,67	10,437	3,1
120	0,11	9,77		3,09	0,34	10,91		2,88	0,56	9,48		3,13
240	0,23	9,60	9,585	3,02	0,68	10,91	9,3031	2,96	1,13	9,23	9,3031	3,08

Tabel LC. 31 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda BDD pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)	
0	0,00	10,38	15,271	3,01	0,00	11,18	11,052	3,12	0,00	11,3	15,271	3,14
15	0,01	10,41		3,13	0,03	10,88		3,14	0,04	11,02		3,19
30	0,02	10,44		3,11	0,06	10,99		3,10	0,08	10,87		3,1
60	0,04	10,24	14,036	3,16	0,12	10,67	9,747	3,14	0,15	10,65	15,4	3,08
120	0,08	10,39		3,24	0,25	10,56		3,22	0,31	10,45		3,16
240	0,17	10,34	13,366	3,16	0,50	10,20	9,3179	3,14	0,63	10,3	14,321	3,13

Tabel LC. 32 Kondisi pH , TDS dan Klorida Selama Proses Elektrolisis Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/12,5 (80 mL/1000 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH
(menit)	(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)	
0	0,00	11,60	9,2891	3,17	0,00	11,87	6,6639	3,05	0,00	10,47	3,332	3,19
15	0,02	10,26		2,95	0,05	11,65		3,11	0,08	10,33		3,27
30	0,03	10,13		2,77	0,09	11,45		3,14	0,15	9,85		3,15
60	0,06	10,17	7,0278	2,77	0,19	11,2	7,1228	3,12	0,32	9,83	3,0391	3,34
120	0,13	10,07		2,78	0,39	11,03		3,06	0,65	9,51		3,14
240	0,26	10,03	7,0958	2,79	0,79	10,94	6,368	3,04	1,32	9,43	3,6389	3,04

Tabel LC. 33 Kondisi pH dan TDS Selama Proses Elektrolisis Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/18,75 (80 mL/1500 mL)

Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH
	(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)	
0	0,00	9,91	12,68	3,17	0,00	11,11	11,774	2,98	0,00	11,68	9,9629	3,33
15	0,01	9,94		3,28	0,03	10,86		2,79	0,05	11,31		3,24
30	0,03	9,75		3,20	0,06	10,87		2,71	0,10	11,11		3,26
60	0,06	9,77	11,596	3,02	0,12	10,83	10,727	2,89	0,21	10,94	6,8129	3,25
120	0,11	9,90		3,10	0,25	10,91		2,88	0,42	10,66		3,31
240	0,23	9,74	9,3031	3,14	0,51	10,91	10,431	2,96	0,85	9,78	6,484	3,27

Tabel LC. 34 Kondisi pH dan TDS Selama Proses Elektrolisis Anoda DSA pada Rasio Volume Efektif 1/25 (80 mL/2000 mL)

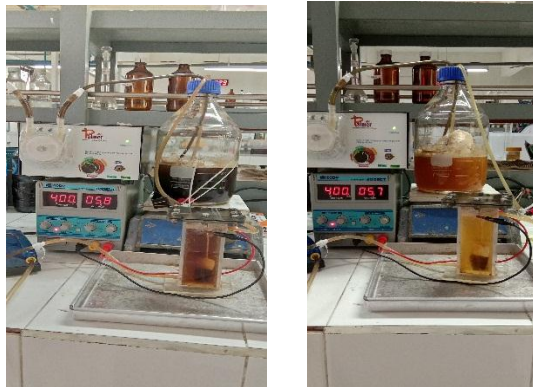
Waktu	10 mA cm ⁻²				30 mA cm ⁻²				50 mA cm ⁻²			
	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH	Muatan Energi Spesifik	TDS	Cl ⁻	pH
	(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)		(Ah L ⁻¹)	(g)	(g)	
0	0,00	10,38	15,271	3,01	0,00	11,18	15,472	3,12	0,00	11,45	15,271	3,11
15	0,01	10,76		3,05	0,02	10,77		3,16	0,04	11,32		3,18
30	0,02	10,60		3,02	0,05	10,65		3,09	0,08	11,25		3,2
60	0,03	10,56	14,036	3,10	0,09	10,45	14,62	3,07	0,15	11,04	15,595	3,1
120	0,06	10,45		3,03	0,19	10,38		3,11	0,31	10,55		3,04
240	0,13	10,27	12,984	3,02	0,38	10,33	14,702	3,03	0,63	10,36	12,411	3,12

LAMPIRAN D

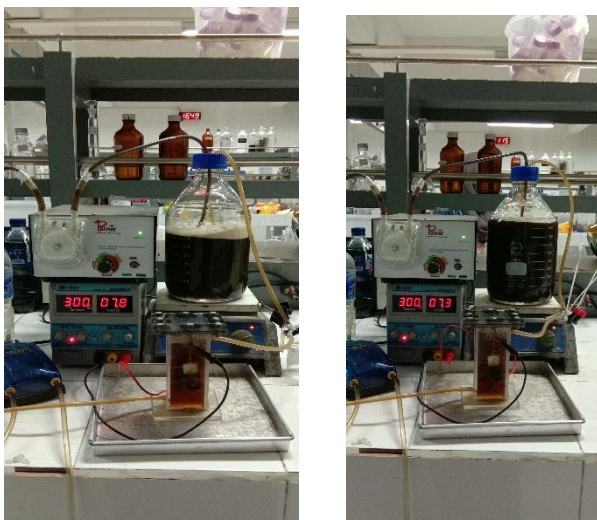
DOKUMENTASI PENELITIAN



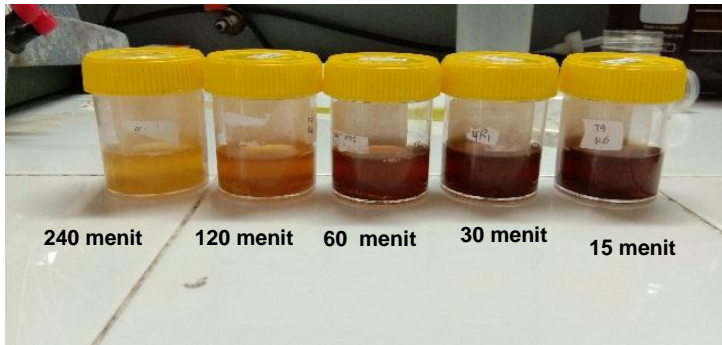
Gambar LD. 1 Pengambilan dan Penyaringan Sampel Lindi



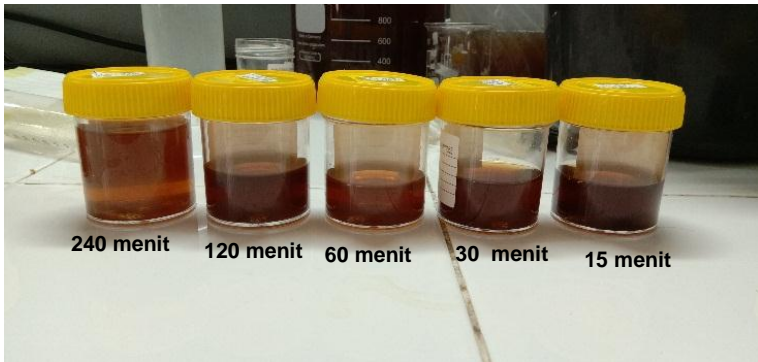
Gambar LD. 2 Operasi Reaktor Elektrooksidasi dengan Anoda BDD



Gambar LD. 3 Operasional Reaktor Elektrooksidasi dengan Anoda DSA



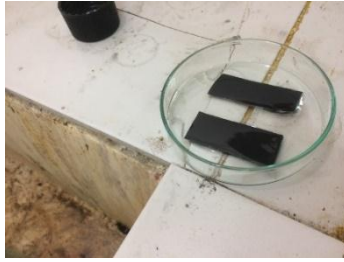
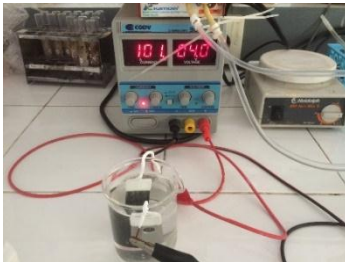
Gambar LD. 4 Lindi hasil pengolahan dengan Anoda BDD Variasi Kerapatan Arus 50 mA cm^{-2} Volume efektif reaktor $1/12,5$



Gambar LD. 5 Lindi Hasil Pengolahan dengan Anoda DSA Arus 50 mA cm^{-2} Volume efektif reaktor 1/12,5



Gambar LD. 6 Preparasi Lindi Sebelum diolah



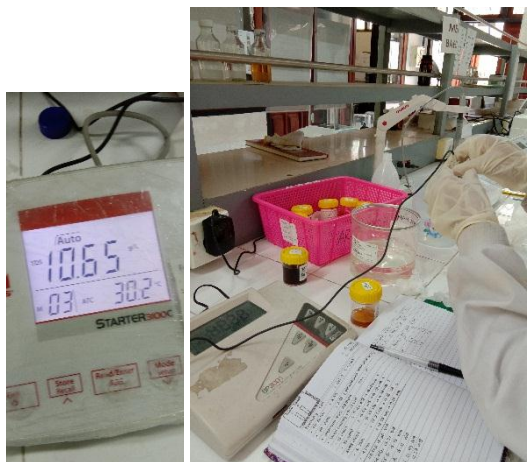
Gambar LD. 7 Polarisasi anoda dan katoda



Gambar LD. 8 Analisis Parameter COD



Gambar LD. 9 Analisis Parameter BOD



Gambar LD. 10 Analisis TDS dan pH



Gambar LD. 11 Analisis Cl⁻

BIODATA PENULIS



Deviani Dwi Hartatik dilahirkan di Jombang pada tanggal 16 Desember 1996. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Sumberejo I pada Tahun 2003-2009, SMPN 1 Ngadiluwih pada Tahun 2009-2012 dan SMAN 2 Kediri pada Tahun 2012-2015. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 03211540000010.

Selama masa perkuliahan, penulis pernah aktif sebagai anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) pada tahun 2016-2017 sebagai anggota Divisi Riset dan Teknologi serta tahun 2017-2018 sebagai sekretaris Divisi Riset dan Teknologi. Pada Tahun 2018, penulis mengikuti kerja praktik mengenai "Evaluasi Pengelolaan Limbah Drilling (Drilling Cutting dan Drilling Mud) serta Sludge Colling Tower" di Star Energy Geothermal Wayang Windu Ltd. Pangalengan Bandung Jawa Barat. Apabila ingin mengetahui lebih dalam mengenai penelitian ini, dapat dihubungi via email devianidwih@gmail.com

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



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

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

Kode/SKS : RE141681 (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 : 07.30 sampai 09.30
Lokasi : TL 102
Judul : Proses Elektrokodisasi Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) dan Dimensionally Stable Anode (DSA) untuk Meningkatkan Indeks Biodegradabilitas Lindi
Nama : Deviani Dwi Hartatik
NRP. : 0321154000010
Topik : Penelitian

Nilai TOEFL 490

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1	KWh g ⁻¹ bukan KWh g ⁻¹ .
2	Typos no. 2
3	kesimpulan & saran
4	OLR ?

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, ST.,MT.,Mphil, PhD



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948866, 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 : 07.30 sampai 09.30
Lokasi : TL 102
Judul : Proses Elektrooksidasi Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) dan Dimensionally Stable Anode (DSA) untuk Meningkatkan Indeks Biodegradabilitas Lindi
Nama : Deviani Dwi Hartatik
NRP. : 0321154000010
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	- Elektro oksidasi ? - Elektro oksidasi vs Electrolysis ✓
2.	• Karakteristik lindi → Biodegradabilitas • Target biodegradabilitas D_5 , mengapa?
3.	- Elektro oksidasi → jenis ^{Elektroda} katoda → baik vs buruk - BDD & DSA → jenis apa 18/7 2018
4.	Cek satuan ODR

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, ST., MT

Dosen Pembimbing Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., Mphil, PhD

()
()



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 07.30 sampai 09.30
 Lokasi TL 102
 Judul Proses Elektrokodisasi Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) dan Dimensionally Stable Anode (DSA) untuk Meningkatkan Indeks Biodegradabilitas Lindi
 Nama Deviani Dwi Hartatik
 NRP. 03211540000010
 Topik Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	Apakah yang dimaksudkan dengan rekalsitrants?
2	Apakah istilah coating pada anoda?
3	Apakah yang dimaksudkan dengan radikal hidroksil dan mekanisme nya dalam removal rekalsitrants?
4	Bagaimana rekalsitrants dapat terdegradasi dan elektrode-nya? Mengapa penyusunnya?
5	Apakah yang dimaksudkan dengan BSA? Kenapa disebut stabil?
hal 19	Pengaruh pH terhadap removal COD? Kenapa pada diagram arus dan removal removal?
20	Kemampuan arus tinggi $100 \text{ mA/cm}^2 \rightarrow$ kenapa removal COD rendah?
21	Berkaitan dengan mA/cm^2 itu. Tidak perlu assist lagi

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

Dosen Penguji Prof. Dr. Yuliana Trihadiningrum, MAppSc
 Dosen Pembimbing Arseto Yekti Bagastyo, ST.,MT.,Mphil, PhD

(Handwritten signatures)



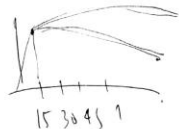
PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS
 Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

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 : 07.30 sampai 09.30
 Lokasi : TL 102
 Judul : Proses Elektrokodisasi Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) dan Dimensionally Stable Anode (DSA) untuk Meningkatkan Indeks Biodegradabilitas Lindi
 Nama : Deviani Dwi Hartatik
 NRP. : 0321154000010
 Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
	<p>- utk saran, harus ada pembahasan dan bab 4. tdk boleh tanpa pembahasan</p> <p>- pada komentarnya awal lindi, brnt pembahasan lindi berawal dr PPA kategori apa (tabel 2.1)</p> <p>- tnyuan no 2 semakanan of kesimpulan no 2 → jenis tdk pda proses elekt? ?</p> <p>- Saring hrs dgn kuantumnya → geladak pd metode.</p> <p>- kesimpulan brnt lhh gelak.</p> <p>- & gain dari mana?</p>  <p style="text-align: right;">na 16/7/19.</p>

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

Dosen Penguji : Dr.Ir. Ellina Pandebesie, MT
 Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, ST.,MT.,Mphil, PhD

(Handwritten signatures)




FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Nama : Devani Dwi Hartatik
NRP : 03211540000010
Judul Tugas Akhir : Proses Elektrokatalisis Menggunakan Anoda Boron Doped Diamond (BDD) dan Dimensionality Stable Anode (DSA) untuk Meningkatkan Indeks Biodegradabilitas Limbah

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1.	Perbaiki satuan kg/hg^1 bukan Kwh g^{-1}	Perbaikan pada halaman 97 -103
2.	Perbaiki tujuan no. 2	Perbaikan pada halaman 2
3.	Perbaiki kesimpulan dan Saran	Perbaikan pada halaman 103
4.	Perbaiki perhitungan OLR	Perbaikan hitungan OLR sudah dilakukan pada halaman 102

Dosen Pembimbing,


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

Mahasiswa Ybs,


Devani Dwi Hartatik



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Deviani Dwi Hartatik
 NRP : 02411510000010
 Judul Tugas Akhir : Proses Elektrooksidasi dengan Menggunakan Anoda EDD dan DSA untuk meningkatkan Indeks Biodegradabilitas Lindi

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	29 Oktober 2018	Diskusi hasil uji karakteristik dan pemilihan Pendahuluan	Ab
2.	07 Januari 2019	Diskusi penulisan laporan tugas akhir, pembagian Subab per pembahasan	Ab
3.	29 Januari 2019	Asistensi Pembahasan hasil Penelitian Pendahuluan dan Penulisan Laporan, pembahasan pemilihan utas.	Ab
4.	01 Februari 2019	Asistensi rata BOD ₅ /COD dan hasil analisis TDC	Ab
5.	12 Maret 2019	Diskusi grafik hubungan BOD ₅ dan COD, pembahasan syarat pengolahan Lindi secara biologis setelah diolah secara Kimiawi	Ab
6.	22 Mei 2019	Diskusi hasil revisi sidang progress	Ab
7.	25 Juni 2019	Perhitungan biaya bahan Kimia harga pada variasi yang dipilih sesuai ukuran reactor Lab, cari jurnal perbandingan harga umke aplikasi elektrolisis, pastikan harga pasar Industri	Ab
8.	24 Juli 2019	Asistensi revisi tugas akhir dan jurnal pomITS	Ab

Surabaya, 24 Juli 2019
 Dosen Pembimbing

Ab
 Ansho Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.PH.D

