

TUGAS AKHIR - RE184804

PROSES ELEKTRODIALISIS UNTUK PENYISIHAN KLORIDA DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI DISINFEKTAN PADA AIR LIMBAH DOMESTIK KAWASAN PESISIR

BONIFASIUS MAHARDHIKA TRIHANDONO

NRP. 03211840000048

Dosen Pembimbing

Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD

NIP. 19820804 200501 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2022



TUGAS AKHIR - RE184804

PROSES ELEKTRODIALISIS UNTUK PENYISIHAN KLORIDA DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI DISINFEKTAN PADA AIR LIMBAH DOMESTIK KAWASAN PESISIR

BONIFASIUS MAHARDHIKA TRIHANDONO

NRP. 03211840000048

Dosen Pembimbing

Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD

NIP. 19820804 200501 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - RE184804

**ELECTRODIALYSIS PROCESS TO REMOVE CHLORIDE AND ITS
UTILIZATION AS DISINFECTANT OF COASTAL AREA DOMESTIC
WASTEWATER**

BONIFASIUS MAHARDHIKA TRIHANDONO

NRP. 03211840000048

Advisor

Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD

NIP. 19820804 200501 1 001

DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil Engineering, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

PROSES ELEKTRODIALISIS UNTUK PENYISIHAN KLORIDA DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI DISINFEKTAN PADA AIR LIMBAH DOMESTIK KAWASAN PESISIR

TUGAS AKHIR

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

Oleh : **BONIFASIUS MAHARDHIKA TRIHANDONO**

NRP. 03211840000048

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD
2. Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, MAppSc
3. IDAA Warmadewanthi, ST, MT, PhD
4. Alfian Purnomo, ST, MT

Pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Bonifasius Mahardhika Trihandono / 0321184000048
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing / NIP : Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD /
19820804 200501 1 001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Proses Elektrodialisis untuk Penyisihan Klorida dan Pemanfaatannya Sebagai Disinfektan pada Air Limbah Domestik Kawasan Pesisir" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

(nama dan jabatan)

Surabaya, Juli 2022

Mahasiswa,

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT,
MPhil, PhD)
NIP. 19820804 200501 1 001



(Bonifasius Mahardhika Trihandono)

NRP. 0321184000048

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PROSES ELEKTRODIALISIS UNTUK PENYISIHAN KLORIDA DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI DISINFEKTAN PADA AIR LIMBAH DOMESTIK KAWASAN PESISIR

Nama Mahasiswa / NRP : Bonifasius Mahardhika Trihandono / 03211840000048
Departemen : Teknik Lingkungan FT-SPK – ITS
Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD

Abstrak

Air limbah domestik yang masuk ke unit *aerated lagoon* PT ITDC Nusantara Utilitas (PT ITDC NU), memiliki kandungan salinitas cukup tinggi. Hal ini terlihat dari *Total Dissolved Solids* (TDS) yang melebihi 1000 mg/L serta lokasi kawasan yang berada di pesisir pantai. Kandungan garam yang tinggi dapat menghambat proses pengolahan air limbah secara biologis, sehingga ada potensi untuk memaksimalkan proses biologis agar berjalan lebih baik. Setelah unit *aerated lagoon* terdapat proses klorinasi yang memanfaatkan senyawa sodium hipoklorit (NaOCl) dalam prosesnya. Upaya *recovery* klorin pada air limbah dapat menurunkan kandungan garam sekaligus menyediakan persediaan klorin, yang dapat digunakan pada proses klorinasi.

Dalam penelitian ini dilakukan upaya penurunan kandungan ion klorida pada air limbah, dan *recovery* klorin dengan cara mengoksidasi kandungan klorida. Penelitian ini dilakukan menggunakan sistem *batch reactor*, dengan volume air limbah domestik yang digunakan sebesar 2 liter dan volume larutan disodium hidrogen fosfat (Na_2HPO_4) sebesar 2 liter. Reaktor terdiri dari tiga kompartemen yang dipisahkan oleh *Anion Exchange Membrane* (AEM) dan *Cation Exchange Membrane* (CEM). Elektroda yang digunakan ialah karbon sebagai anoda serta *stainless steel* sebagai katoda. Eksperimen dilakukan menggunakan variasi pH awal larutan Na_2HPO_4 yaitu 8, 9, dan 10. Nilai pH akan menentukan spesies klorin yang dihasilkan setelah proses oksidasi pada kompartemen anoda. Sedangkan kuat arus operasi divariasikan menjadi 100 mA, 200 mA, dan 300 mA. Kuat arus akan menentukan tingkat penyisihan ion klorida pada air limbah serta tingkat pembentukan klorin pada kompartemen anoda yang berada pada *chlorine tank*. Parameter yang akan diamati saat diberikan perlakuan yaitu pH, TDS, dan kandungan klorida pada *wastewater tank*. Sementara itu parameter yang akan diamati pada *chlorine tank* ialah pH, TDS, klorida, dan klorin selama proses elektrodialisis.

Air limbah domestik PT ITDC NU memiliki karakteristik yaitu pH 6,11, TDS 742 mg/L, klorida (Cl^-) 673 mg/L, TSS 50 mg/L, BOD 19,73 mg/L, dan COD 168 mg/L. Kondisi optimum ditunjukkan oleh variasi kuat arus 100 mA dan pH 8 dengan waktu operasi selama 8 jam dapat menyisihkan kandungan klorida pada air limbah domestik yang telah ditambahkan konsentrasi klorida 2800 mg/L sebesar 40,22%, serta menghasilkan klor aktif 16,8 mg/L dengan pH akhir 7,42. Nilai pH akhir larutan pada variasi ini menunjukkan bahwa senyawa klorin berupa asam hipoklorit (HOCl) dan ion hipoklorit (OCl^-) dengan perbandingan 50%:50%. Pembubuhan klorin dari proses elektrodialisis pada air limbah domestik menunjukkan penurunan pada parameter TSS sebesar 25,93-33,33%; parameter BOD sebesar 40,77-45,70%; dan parameter COD sebesar 37,74-38,00%.

Kata Kunci: air limbah domestik, elektrodialisis, klorida, klor aktif, oksidasi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ELECTRODIALYSIS PROCESS TO REMOVE CHLORIDE AND ITS UTILIZATION AS DISINFECTANT OF COASTAL AREA DOMESTIC WASTEWATER

Student Name / NRP : Bonifasius Mahardhika Trihandono / 03211840000048
Department : Teknik Lingkungan FT-SPK – ITS
Advisor : Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD

Abstract

Domestic wastewater stream down to PT ITDC Nusantara Utilitas' (PT ITDC NU) aerated lagoon has high salinity. Total Dissolved Solids (TDS) that is more than 1000 mg/L and location of the tourism area is in coastal areas can be used as the indicators. A high concentration of salt may reduce efficiency of biological treatment, so there is the possibility to get better output of the process. After the aerated lagoon, there is a chlorination process utilizes sodium hypochlorite (NaOCl) as the disinfectant. Chlorine recovery of the wastewater can both remove salt concentration and provide chlorine that can be used thereafter.

In this study, there were efforts to reduce chloride content in wastewater and to recover chlorine by oxidizing the chloride content. This research uses a batch reactor with 2 liters of domestic wastewater and 2 liters of disodium hydrogen phosphate (Na_2HPO_4) solution. The reactor consists of three-compartment that is separated by Anion Exchange Membrane (AEM) and Cation Exchange Membrane (CEM). Experiments were carried out by varying the initial pH of Na_2HPO_4 solution to 8, 9, and 10. The pH value will indicate the chlorine species produced after the oxidation process in the anode compartment. While, the operating current is varied into 100 mA, 200 mA, and 300 mA. The operating current will determine the level of chloride ion removal in the wastewater as well as the level of chlorine formation in the anode compartment of chlorine tank. Observation in the experiment will be done on pH value, TDS, and chloride content in the wastewater tank. Meanwhile, observation in the chlorine tank will be on pH value, TDS, chloride content, and chlorine concentration throughout the process.

Domestic wastewater of PT ITDC NU has pH value of 6,11, TDS of 742 mg/L, chloride concentration (Cl^-) of 673 mg/L, TSS of 50 mg/L, BOD of 19,73 mg/L, and COD of 168 mg/L. The optimum condition is shown by the operating current of 100 mA and pH value of 8 which is operated for 8 hours. This condition can remove chloride content in domestic wastewater to which chloride concentration of 2800 mg/L has been added up to 40,22%, and produces 16,8 mg/L of active chlorine with final pH of 7,42. The final pH value of this variation indicates that active chlorine compounds are in the form of hypochlorous acid (HOCl) and hypochlorite ion (OCl^-) with a ratio of 50%:50%. The addition of chlorine from the electro dialysis process to domestic wastewater showed a decrease in the TSS up to 25.93-33.33%; BOD up to 40,77-45,70%; and COD up to 37,74-38,00%.

Keywords: domestic wastewater, electro dialysis, chloride, active chlorine, oxidation

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan penyertaan-Nya, sehingga laporan Tugas Akhir dengan judul “Proses Elektrodialisis untuk Penyisihan Klorida dan Pemanfaatannya Sebagai Disinfektan pada Air Limbah Domestik Kawasan Pesisir” dapat diselesaikan. Atas kontribusinya dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, MPhil, PhD selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selalu sabar dalam membimbing dan memberi masukan terkait penyusunan Tugas Akhir ini. Terima kasih juga atas pesan-pesan serta motivasi yang diberikan kepada penulis agar ke depannya penulis bisa menjadi pribadi yang lebih baik lagi.
2. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, MAppSc dan Ibu IDAA Warmadewanthi, ST, MT, PhD selaku dosen pengarah, terima kasih atas saran dan masukan yang diberikan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Pihak PT ITDC Nusantara Utilitas diwakili Kak Pendi dan Kak Julan yang bersedia untuk memberikan data penunjang, saran, dan masukan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Orang tua serta saudara-saudara yang selalu mendukung dan mendoakan penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman “Envisible” Angkatan 2018 yang selalu memberikan semangat dan membantu proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penyusunan Tugas Akhir ini dilakukan dengan semaksimal mungkin, namun penulis tidak mungkin luput dari kesalahan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar Tugas Akhir ini menjadi lebih baik dan dapat dirasakan kebermanfaatannya.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Ruang Lingkup	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Karakteristik Air Limbah.....	5
2.2 Total Dissolved Solids (TDS).....	6
2.2.1 Ion Klorida (Cl ⁻)	6
2.3 Klorin	6
2.4 Teknologi Desalinasi	7
2.5 Elektrodialisis	8
2.6 Faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrodialisis	9
2.4.1 Kerapatan Arus	9
2.4.2 pH	10
2.4.3 Laju Aliran.....	10
2.4.4 Karakteristik Membran Penukar Ion	10
2.4.5 Elektroda.....	10
2.4.6 Pelarut dan Larutan.....	10
2.7 Perhitungan Kebutuhan Energi	11
2.8 Penelitian Terdahulu	11
BAB III METODOLOGI	13
3.1 Deskripsi Umum	13
3.2 Lokasi Penelitian.....	13
3.3 Kerangka Penelitian	13
3.4 Persiapan Penelitian	16
3.5 Penelitian Pendahuluan.....	19
3.6 Penelitian Utama.....	20

3.7	Analisis Data dan Pembahasan	22
3.8	Kesimpulan dan Saran	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		23
4.1	Penelitian Pendahuluan	23
4.1.1	Karakterisasi Awal Air Limbah Domestik	23
4.1.2	Penentuan Konsentrasi Klorida pada Air Limbah Domestik untuk Elektrodialisis	23
4.1.3	Penentuan Waktu Operasi Elektrodialisis	26
4.2	Penelitian Utama	27
4.2.1	Tingkat Penyisihan Klorida	27
4.2.2	Pembentukan Klorin	31
4.2.3	Kebutuhan Energi	33
4.2.4	Pemanfaatan Klorin Hasil Elektrodialisis terhadap Air Limbah Domestik	34
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		37
5.1	Kesimpulan	37
5.2	Saran	37
DAFTAR PUSTAKA		39
LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM		43
LAMPIRAN B PROSEDUR PENGATURAN PH		49
LAMPIRAN C ANALISIS DAN PERHITUNGAN		51
LAMPIRAN D DOKUMENTASI PENELITIAN		59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Alur Pengolahan Air Limbah PT ITDC Nusantara Utilitas.....	5
Gambar 2. 2 Bentuk Klorin Berdasarkan pH	7
Gambar 2. 3 Mekanisme Elektrodialisis	8
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian.....	15
Gambar 3. 2 Konfigurasi Reaktor Elektrodialisis	17
Gambar 3. 3 Arah Aliran pada Reaktor.....	18
Gambar 3. 4 Skema Kerja Reaktor.....	21
Gambar 3. 5 <i>Mass Balance</i> Ion Klorida Selama Penelitian	22
Gambar 4. 1 Persentase Penyisihan Klorida Berdasarkan Besar Penambahan Larutan NaCl..	24
Gambar 4. 2 Perubahan Konsentrasi Klorida Berdasarkan Besar Penambahan Larutan NaCl	24
Gambar 4. 3 Perubahan Voltase Operasi Berdasarkan Besar Penambahan Larutan NaCl	25
Gambar 4. 4 Perubahan TDS pada Masing-masing <i>Reservoir Tank</i>	26
Gambar 4. 5 Konsentrasi Klorida dan Klorin yang Terbentuk pada Chlorine Tank.....	26
Gambar 4. 6 Perubahan Massa Klorida di Masing-masing Bak.....	29
Gambar 4. 7 Perubahan Konsentrasi TDS di Masing-masing Bak	30
Gambar 4. 8 Produksi Klor Aktif	31
Gambar 4. 9 Perubahan pH pada <i>Chlorine Tank</i>	31
Gambar 4. 10 <i>Mass Balance</i> Klorida pada Akhir Proses	32
Gambar 4. 11 Perubahan TSS Sebelum dan Setelah Klorinasi	34
Gambar 4. 12 Perubahan COD Sebelum dan Setelah Klorinasi.....	35
Gambar 4. 13 Perubahan BOD Sebelum dan Setelah Klorinasi.....	35

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Air Limbah Domestik PT ITDC NU	5
Tabel 2. 2 Klasifikasi Air Berdasarkan TDS	6
Tabel 2. 3 Contoh Teknologi Desalinasi Terbaru	8
Tabel 2. 4 Penelitian Terdahulu.....	12
Tabel 3. 1 Metode Uji Parameter Ukur.....	16
Tabel 3. 2 Baku Mutu Parameter Air Limbah	16
Tabel 3. 3 Variasi Penelitian.....	20
Tabel 3. 4 Titik dan Waktu <i>Sampling</i>	21
Tabel 4. 1 Karakteristik Awal Air Limbah Domestik.....	23
Tabel 4. 2 Konsentrasi Klorida Awal setelah Penambahan NaCl	23
Tabel 4. 3 Kebutuhan Energi Proses Elektrodialisis terhadap Produksi Klorin.....	33
Tabel 4. 4 Konsentrasi Klor Aktif dan pH setelah Proses Elektrodialisis Diperpanjang	33

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

The Nusa Dua merupakan kawasan perhotelan dan restoran yang berbatasan langsung dengan pantai, dimana kawasan tersebut dikelola oleh PT ITDC Nusantara Utilitas (PT ITDC NU) sebagai pengelola utilitas termasuk penanganan air limbah domestik kawasan. Berdasarkan data uji laboratorium rutin periode bulan Januari 2018 hingga bulan Agustus 2021, *Total Dissolved Solids* (TDS) pada air limbah domestik The Nusa Dua paling rendah yaitu pada bulan Februari 2018 sebesar 713,3 mg/L, dan paling tinggi di bulan Agustus 2021 yaitu 2118 mg/L. Penelitian yang dilakukan Haribowo *et al.* (2019) menunjukkan bahwa air limbah domestik daerah nonpesisir, tepatnya di IPAL Kelurahan Tlogomas, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang memiliki konsentrasi TDS sebesar 541,33 mg/L. Sehingga dapat disimpulkan bahwa air limbah domestik kawasan The Nusa Dua yang masuk pada instalasi pengolahan air limbah PT ITDC NU memiliki kadar TDS yang tergolong cukup tinggi. Hal ini dapat dimungkinkan karena adanya pembuangan air kolam renang ataupun juga *reject Seawater Reverse Osmosis* (SWRO) oleh para *tenant* di kawasan tersebut ke dalam saluran air limbah domestik. Selain itu aktivitas wisatawan yang melakukan pembilasan setelah berenang di pantai juga dapat berkontribusi pada peningkatan kadar TDS tersebut. Effendi (2003) menyatakan bahwa air dengan kadar TDS yang berada pada rentang 1001 hingga 3000 mg/L disebut sebagai air payau. Air bersih yang digunakan di daerah pesisir umumnya memiliki salinitas yang cukup tinggi, sehingga juga dapat mempengaruhi tingkat salinitas air limbah yang dihasilkan (Suryawan, 2018).

Air limbah domestik pada jaringan air limbah The Nusa Dua akan masuk ke dalam unit pengolahan *aerated lagoon* yang memanfaatkan proses biologis. Bunani *et al.* (2013) menyatakan bahwa kandungan garam yang tinggi pada air limbah dapat menurunkan efisiensi pengolahan air limbah secara biologis, seperti sistem lumpur aktif konvensional, sistem anaerobik, nitrifikasi dan denitrifikasi. Hal ini dikarenakan garam dapat mengganggu aktivitas biologis dengan menyebabkan terjadinya plasmolisis pada sel mikroorganisme (Ding *et al.*, 2021). Hal ini juga dapat dilihat dari data historis PT ITDC NU mengenai hasil uji karakteristik air limbah *effluent overflow gate* unit *aerated lagoon* yang dilepas ke badan air. Data historis tersebut menunjukkan air hasil olahan *aerated lagoon* masih belum konsisten, karena belum terpenuhinya baku mutu di waktu-waktu tertentu. Selain itu Ilyas *et al.* (2013) menyatakan bahwa air limbah domestik yang dilepas ke badan air dengan kandungan TDS yang tinggi dapat menurunkan kualitas air permukaan karena kandungan ion-ion pencemar di dalamnya. Tingginya angka TDS dapat disebabkan oleh ion-ion terlarut yang bersifat *toxic* seperti timah, arsenik, kadmium, nitrat, dan banyak lainnya. Selain itu, ion-ion yang biasanya ditemukan pada perairan (*major ion*) meliputi sodium, kalsium, magnesium, bikarbonat, sulfat, dan klorida.

Ion klorida (Cl^-) merupakan ion dengan unsur pembentuk klor yang menerima satu elektron, untuk membentuk ion dengan muatan negatif. Sifat ion klorida terhadap makhluk hidup yaitu tidak bersifat toksik dan bahkan memiliki peran dalam proses pengaturan tekanan osmotik sel (Effendi, 2003). Klorida yang terkandung pada air limbah berpotensi untuk dilakukan proses perolehan kembali (*recovery*) menjadi klorin, untuk digunakan pada proses *pre-chlorination* pada inlet saluran unit *Dissolved Air Flotation* (DAF) PT ITDC NU. Selama ini disinfektan yang digunakan pada proses *pre-chlorination* ialah senyawa natrium hipoklorit (NaOCl). *Recovery* dari air limbah domestik yang bisa didapatkan dalam bentuk Cl_2 , HOCl , dan ClO^- , dimana komponen kimia spesifik yang diperoleh bergantung kepada sel elektrolisis

dan parameter yang digunakan dalam pengoperasian reaktor, terutama pH (Mohammadi & Ebadi, 2021). Sementara itu, Wang *et al.* (2007) menunjukkan bahwa bentuk klorin pada suatu larutan didasarkan pada pH larutan tersebut. Pada pH asam, spesies klorin yang dapat terbentuk yaitu Cl_2 dan HOCl , sedangkan pada pH basa terbentuk OCl^- . Proses perolehan disinfektan yang diinginkan dapat dilakukan dengan mengoksidasi hasil proses elektrokimia. Hal ini sejalan dengan Cloete *et al.* (2009) yang menyatakan bahwa produk oksidasi dari sel membran elektrolisis pada larutan dengan salinitas tinggi akan menghasilkan larutan kaya Cl^- , yang telah digunakan pada banyak penelitian sebagai disinfektan dalam mengontrol pertumbuhan mikroba.

Metode pemisahan klorida dari air dengan menggunakan membran yang umum digunakan yaitu RO (*Reverse Osmosis*) dan elektrodialisis (Eltawil *et al.*, 2009). Elektrodialisis menjadi metode yang paling menarik untuk diterapkan dikarenakan efisiensi yang tinggi, konsumsi bahan kimia yang rendah, bahkan bisa sekaligus memekatkan ion yang menjadi target untuk dipisahkan (Ding *et al.*, 2021). Elektrodialisis ialah proses elektrokimia untuk mengekstraksi ion dari sebuah larutan dengan memindahkan ion-ion tersebut dari suatu kompartemen ke kompartemen lainnya menggunakan daya dorong yang diperoleh dari arus listrik (Hernández & Ruiz, 2021; Nataraj *et al.*, 2007). Setelah proses perpindahan ini, kandungan ion pada permukaan kompartemen konsentrat akan lebih tinggi dibanding permukaan kompartemen air limbah, yang disebut dengan teori polarisasi konsentrasi (La Cerva *et al.*, 2018). Polarisasi konsentrasi menjadi berlebihan ketika besaran densitas arus yang diterapkan menyebabkan kandungan ion pada elektrolit menyentuh nol, dimana kondisi ini disebut dengan batas densitas arus (Nakayama *et al.*, 2017). Perpindahan ion ini dapat dikendalikan dengan mengatur densitas arus pada sumber daya listrik yang digunakan (Huang *et al.*, 2007).

Penelitian ini membahas karakteristik air limbah domestik PT ITDC NU serta parameter yang berkaitan dengan padatan terlarut, padatan tersuspensi, serta kandungan organik, kondisi optimum dalam hal ini nilai pH dan kuat arus untuk memisahkan ion klorida dari air limbah domestik serta menghasilkan klorin menggunakan metode elektrodialisis, serta pengaruh penambahan hasil oksidasi pada proses elektrodialisis terhadap kandungan organik pada air yang telah melalui proses reaksi elektrodialisis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam upaya peningkatan efisiensi sistem pengolahan limbah PT ITDC NU.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini meliputi:

1. Bagaimana karakteristik air limbah domestik PT ITDC NU serta parameter yang berkaitan dengan padatan terlarut, padatan tersuspensi, serta kandungan organik?
2. Bagaimana kondisi optimum dalam hal ini nilai pH dan kuat arus untuk memisahkan ion klorida dari air limbah domestik serta menghasilkan klorin menggunakan metode elektrodialisis?
3. Bagaimana pengaruh penambahan hasil oksidasi proses elektrodialisis terhadap kandungan organik pada air limbah yang telah melalui proses reaksi elektrodialisis?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini yaitu:

1. Mengkaji karakteristik air limbah domestik PT ITDC NU serta parameter yang berkaitan dengan padatan terlarut, padatan tersuspensi, serta kandungan organik.

2. Mengkaji kondisi optimum dalam hal ini nilai pH dan kuat arus untuk memisahkan ion klorida dari air limbah domestik serta menghasilkan klorin menggunakan metode elektrodialisis.
3. Mengkaji pengaruh penambahan hasil oksidasi proses elektrodialisis terhadap kandungan organik pada air limbah yang telah melalui proses reaksi elektrodialisis.

1.4. Ruang Lingkup

Ruang lingkup yang digunakan dalam membatasi proses penelitian ini meliputi:

1. Sampel air limbah yang digunakan merupakan air limbah *influent* pada Instalasi Pengolahan Air Limbah PT ITDC NU tepatnya di unit *aerated lagoon* Cell 1A.
2. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Limbah Padat dan B3 dan Laboratorium Teknologi Pengolahan Air, Departemen Teknik Lingkungan, ITS.
3. Pembuatan alat atau model dilakukan dalam skala laboratorium.
4. Elektroda pada reaktor terdiri dari anoda karbon dan katoda *stainless steel*.
5. Variabel pada penelitian ini yaitu nilai pH dan kuat arus.
6. Parameter yang digunakan dalam rangka karakterisasi air limbah yaitu pH, TDS, TSS, BOD, COD, klorida, klorin.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa:

1. Informasi ilmiah mengenai pengaruh pH dan arus listrik yang digunakan pada proses elektrodialisis sebagai *pre-treatment* untuk menurunkan kandungan ion klorida, sebelum air limbah domestik masuk ke unit *aerated lagoon*.
2. Alternatif teknologi *recovery* klorin dalam rangka penyediaan disinfektan pada proses klorinasi.

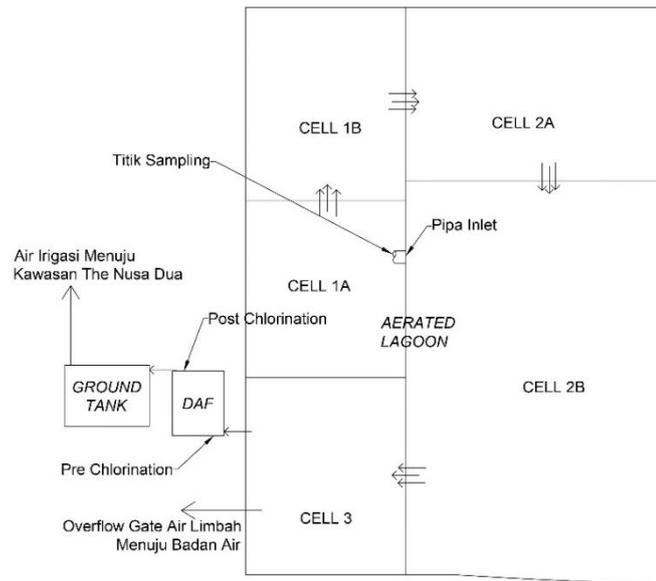
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Air Limbah

Air limbah yang menjadi objek penelitian ini merupakan *influent* air limbah domestik kawasan wisata perhotelan dan restoran pesisir pantai, The Nusa Dua. Dalam rangkaian instalasi pengolahan air limbah PT ITDC NU, terdapat dua unit yang digunakan yaitu *aerated lagoon* dan *Dissolved Air Flotation* (DAF). Air limbah diolah di *aerated lagoon*, agar memenuhi baku mutu air limbah untuk dilepas ke badan air melalui *overflow gate*. Selain itu, saluran *outlet aerated lagoon* juga akan terbagi menuju proses *pre-chlorination* dan masuk ke unit DAF untuk kemudian diolah menjadi air irigasi. Air irigasi ini diolah agar memenuhi baku mutu air kelas IV untuk menyirami taman di kawasan The Nusa Dua. *Aerated lagoon* terbagi menjadi Cell 1A, Cell 1B, Cell 2A, Cell 2B, dan Cell 3. Air limbah yang akan digunakan pada eksperimen ialah air limbah yang masuk ke Cell 1A. Berikut merupakan alur pengolahan air limbah domestik milik PT ITDC NU.



Gambar 2. 1 Skema Alur Pengolahan Air Limbah PT ITDC Nusantara Utilitas

Karakteristik air limbah domestik Cell 1A pada bulan November 2021 berdasarkan hasil uji laboratorium terbaru milik perusahaan PT ITDC NU yang diterbitkan oleh Balai Laboratorium Kesehatan Provinsi Bali, dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Karakteristik Air Limbah Domestik PT ITDC NU

No	Parameter	Satuan	Hasil
1	pH	-	8,79
2	Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	1285
3	Total Suspended Solid (TSS)	mg/L	80
4	BOD ₅	mg/L	38,25
5	COD	mg/L	96

Sumber: UPTD. Balai Laboratorium Kesehatan Provinsi Bali

2.2 Total Dissolved Solids (TDS)

Total Dissolved Solids (TDS) ialah padatan terlarut yang ukurannya lebih kecil jika dibandingkan padatan tersuspensi (Ahmad & El-Dessouky dalam Kustiyaningsih & Irawanto, 2020). Melihat lokasi sumber limbah domestik yang berada di pesisir pantai, sehingga kadungan TDS dapat dihubungkan dengan salinitas yang dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Klasifikasi Air Berdasarkan TDS

No	Nilai TDS (mg/L)	Tingkat Salinitas
1	0-1.000	Air Tawar
2	1.001-3.000	Agak asin/payau (<i>slightly saline</i>)
3	3.001-10.000	Sedang/payau (<i>moderately saline</i>)
4	10.001-100.000	Asin (<i>saline</i>)
5	>100.000	Sangat asin (<i>brine</i>)

Sumber: McNeely *et al.*, dalam Effendi (2003)

Ion-ion yang berkaitan dengan salinitas dan terkandung dalam air dinyatakan dalam TDS, dimana ion ini dapat berwujud karbonat, bikarbonat, klorida, sulfat, fosfat, nitrat, kalsium, magnesium, natrium, ion-ion organik, dan ion-ion lainnya (Afrianita *et al.*, 2017; Yusuf *et al.*, 2009).

2.2.1 Ion Klorida (Cl⁻)

Ion klorida merupakan ion bermuatan negatif yang mendominasi kandungan ion pada perairan laut. Ion klorida merupakan salah satu anion anorganik utama yang ditemukan dalam jumlah yang lebih banyak dibanding anion halogen lain pada perairan alami. Umumnya klorida ditemukan dengan wujud senyawa natrium klorida (NaCl), kalium klorida (KCl), dan kalsium klorida (CaCl₂). Selain itu, klorida juga dapat ditemukan dalam bentuk padatan yaitu pada batuan mineral *sodalite*. Proses pelapukan batuan juga dapat berkontribusi dalam lepasnya ion klorida ke perairan (Effendi, 2003). Dalam keadaan normal, ion klorida tidak dapat dioksidasi dan juga tidak bersifat toksik. Kandungan ion klorida yang berlebih dapat menurunkan kualitas air, dan meninggalkan noda putih pada perpipaan. Selain itu, kadar klorida yang tinggi pada air dapat mempercepat proses pengkaratan pada logam (Achmad, 2004; Lindsari *et al.*, 2017).

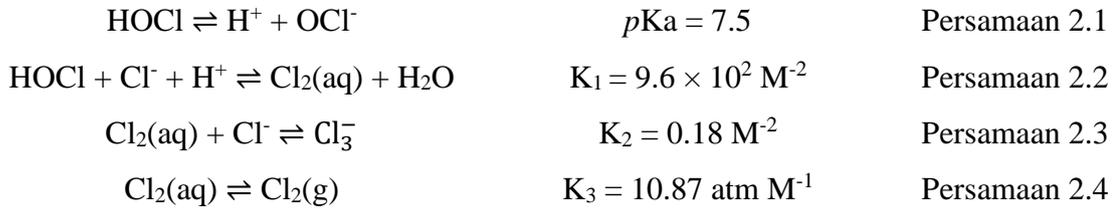
2.3 Klorin

Klorin (Cl₂) ialah molekul unsur dengan klor sebagai unsur penyusunnya. Klorin terbagi menjadi klorin terikat dan klorin bebas. Klorin terikat yaitu unsur klor yang memiliki ikatan dengan senyawa lain, sedangkan klorin bebas ialah klor yang tidak berikatan dengan senyawa lain seperti ion klorida dan ion hipoklorit (Effendi, 2003). Contoh klorin terikat yang ditemukan dalam ikatan membentuk senyawa yaitu garam natrium klorida (NaCl). Salah satu bentuk senyawa klorin lain yang telah diketahui mempunyai banyak kegunaan yaitu sodium hipoklorit (NaOCl). NaOCl dapat digunakan sebagai pemutih kertas, memenuhi kebutuhan farmasi, disinfektan, dan pemurnian air minum (Hasan, 2006). Klorin sering dimanfaatkan sebagai disinfektan untuk mengolah air dengan standar yang telah ditetapkan. Beberapa hal yang menjadi alasan dipilihnya klorin sebagai disinfektan meliputi (Tebbutt dalam Effendi, 2003):

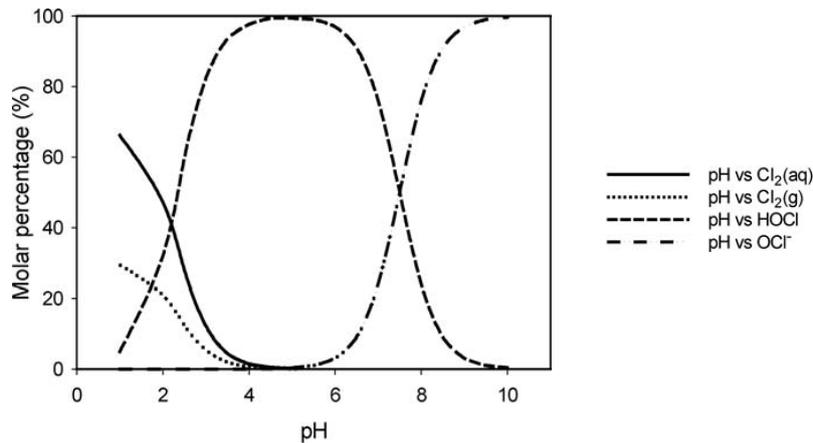
- Dapat dikemas dengan wujud gas, larutan, dan bubuk
- Cukup terjangkau
- Memiliki daya larut yang tinggi bahkan hingga 7.000 mg/L
- Residu klorin dalam larutan tidak berbahaya bagi manusia dengan kadar yang tidak berlebihan

- Dapat membunuh dan menghambat aktivitas mikroorganisme pencemar

Distribusi bentuk klorin di dalam larutan dengan kandungan salinitas yang mengandung senyawa asam hipoklorit (HOCl) ataupun natrium klorida (NaCl) dipengaruhi oleh nilai pH. Persamaan 2.1 hingga Persamaan 2.4 menunjukkan keadaan setimbang pada larutan dengan kandungan HOCl/NaCl.



Berdasarkan Persamaan 2.2, keberadaan ion Cl^- dan kondisi pH yang asam menyebabkan terbentuknya Cl_2 . Dari sini dapat dilihat bahwa pH akan mempengaruhi bentuk klorin berdasarkan reaksi ion klorida pada larutannya. Gambar 2.1 berikut menunjukkan bentuk distribusi bentuk klorin pada pH larutannya, didasarkan pada persamaan kesetimbangan Persamaan 2.1 hingga Persamaan 2.4 (Wang *et al.*, 2007).



Gambar 2. 2 Bentuk Klorin Berdasarkan pH

Sumber: Wang *et al.*, 2007

2.4 Teknologi Desalinasi

Desalinasi merupakan proses pemisahan garam dan mineral lainnya dari air dengan kandungan salinitas tinggi. Desalinasi sudah lama digunakan untuk mengekstraksi kandungan mineral dari air dengan kandungan salinitas, sehingga dapat diperoleh air yang lebih bersih dan dapat dimanfaatkan lebih jauh untuk berbagai keperluan. Teknologi desalinasi umumnya dimanfaatkan untuk memberikan alternatif penyediaan air bersih bagi kebutuhan manusia (Ahmed *et al.*, 2021). Teknologi desalinasi dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu termal seperti *multi-effect distillation* (MED), membran seperti *reverse osmosis* (RO), dan bermacam-macam teknologi desalinasi terbaru. Yang dimaksud dengan teknologi desalinasi terbaru yaitu proses desalinasi yang telah dikembangkan mengikuti perkembangan jaman (Elsaid *et al.*, 2020). Beberapa contoh teknologi terbaru pada proses desalinasi dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2. 3 Contoh Teknologi Desalinasi Terbaru

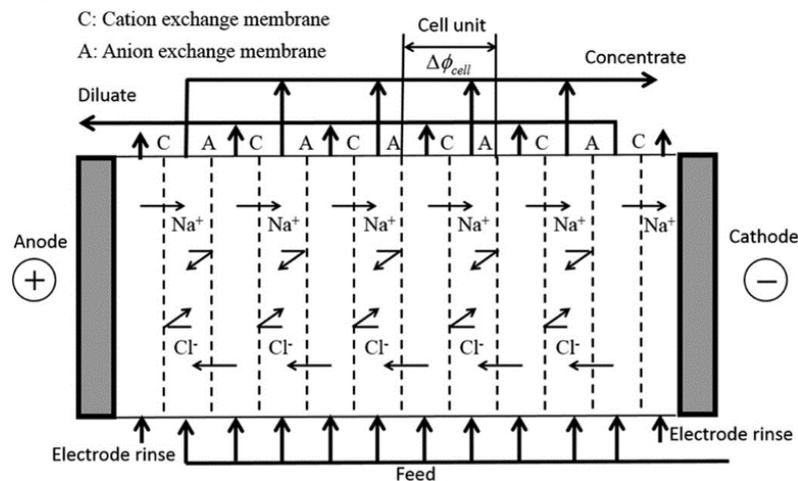
No	Metode	Prinsip Kerja
1	<i>Forward Osmosis</i>	Proses spontan tanpa memanfaatkan gaya dorong
2	<i>Electrodialysis/Electrodialysis Reversal</i>	Proses pemisahan ion memanfaatkan potensial listrik dan dibantu oleh membran yang selektif terhadap ion
3	<i>Capacitive Deionization (CDI)</i>	Proses pemisahan ion dengan memanfaatkan potensial listrik dan penyerapan ion
4	<i>Membrane Distillation</i>	Proses yang mengkombinasikan energi termal dan pemisahan menggunakan membran

Sumber: Elsaid *et al.*, 2020

2.5 Elektrodialisis

Elektrodialisis merupakan salah satu teknologi untuk desalinasi air payau ataupun air laut yang memiliki perkembangan yang pesat dikarenakan dinilai lebih ekonomis. Elektrodialisis ialah proses elektrokimia yang memanfaatkan perbedaan kemampuan suatu ion dalam melewati rangkaian membran selektif terhadap ion, dimana perpindahannya dibantu oleh perbedaan potensial listrik sebagai *driving force* ion tersebut (Sutrisna, 2002). Elektrodialisis sudah banyak diterapkan untuk desalinasi atau proses penurunan kandungan garam pada air laut, air limbah, ataupun air payau (Nakayama *et al.*, 2017). Elektrodialisis dengan membran penukar ion ataupun membran bipolar adalah alternatif paling menjanjikan dalam upaya pemisahan ion dikarenakan efisiensi yang tinggi, lebih fleksibel, kelayakan operasional, dan konsumsi bahan kimia yang rendah (Ding *et al.*, 2021).

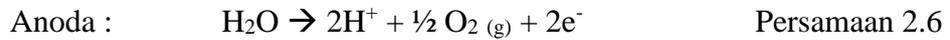
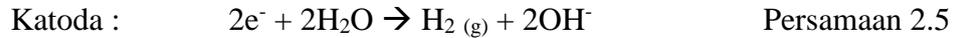
Proses perpindahan ion terjadi ketika air yang akan diolah dimasukkan ke dalam reaktor, kemudian anion akan berpindah melalui membran *Anion Exchange Membrane* (AEM) menuju kompartemen anoda. Sebaliknya, kation akan berpindah melalui *Cation Exchange Membrane* (CEM) menuju kompartemen katoda. Di akhir proses, kompartemen anoda dan kompartemen katoda akan menjadi kaya akan ion yang berasal dari air *influent* reaktor. Nakayama (2017) menyatakan bahwa kompartemen konsentrat akan memiliki konsentrasi ion yang lebih tinggi dibandingkan kompartemen air yang diolah.



Gambar 2. 3 Mekanisme Elektrodialisis

Sumber: Nakayama *et al.*, 2017

Saat elektrodialisis berlangsung, akan terjadi reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi oksidasi ialah proses pelepasan elektron dan penerimaan oksigen, sedangkan reaksi reduksi ialah proses penerimaan elektron dan pelepasan oksigen. Proses elektrodialisis akan menghasilkan reaksi sebagai berikut (Strathmann, 2004):



Elektrodialisis juga dapat memberikan hasil oksidasi berupa senyawa klorin. Hal ini terjadi di kompartemen anoda dengan reaksi sebagai berikut (Pretz *et al.*, 1999):



Produk reaksi oksidasi yang dominan ialah gas oksigen dikarenakan potensial redoks yang lebih rendah dibandingkan reaksi oksidasi dengan produk berupa klorin. Nantinya spesies klorin yang dihasilkan dapat diketahui melalui pH larutan, seperti yang sudah dicantumkan pada Gambar 2.2. Pretz *et al.* (1999) menyatakan bahwa semakin besar kerapatan arus elektroda maka semakin besar pula tingkat klorin yang dihasilkan. Percobaan yang dilakukan Choi *et al.* (2003) menunjukkan bahwa elektrodialisis pada larutan dengan kandungan ion klorida dalam rentang 709 mg/L hingga sekitar 2836 mg/L masih dinilai layak, jika dilihat dari konsumsi energi yang digunakan. Selain itu rentang tersebut juga dapat memberikan hasil oksidasi berupa senyawa klorin, dengan konsentrasi yang berpotensi untuk digunakan sebagai disinfektan.

Dalam menerapkan teknologi elektrodialisis, beberapa parameter terkait turbiditas dan TSS pada air yang akan diolah perlu diperhatikan. Padatan yang terdapat pada air yang masuk ke dalam reaktor dapat menyebabkan *fouling* pada membran. *Fouling* ialah penyumbatan pada membran yang dapat menghalangi proses perpindahan ion pada membran, sehingga efisiensi proses menjadi menurun (Salvo *et al.*, 2018). Vital *et al.* (2021) menyatakan bahwa nilai turbiditas kurang dari 10 NTU dan nilai TSS kurang 15 mg/L dapat meminimalisir dampak *fouling* pada membran reaktor elektrodialisis. Alternatif lain berupa perlakuan sederhana yang dapat diberikan pada membran untuk menghindari terjadinya *fouling* oleh kadnungan organik, yaitu dengan melakukan *backwashing* menggunakan *Cchemical Cleaning Agents* (CCA) berupa larutan basa pada periode waktu tertentu (Salvo *et al.*, 2018).

2.6 Faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrodialisis

Proses elektrodialisis ialah proses pemisahan ion dengan menggunakan prinsip elektrokimia, dimana faktor paling menonjol yaitu pengaruh aliran listrik dalam prosesnya. Selain itu, kinerja elektrodialisis dalam mengolah air limbah dipengaruhi oleh beberapa faktor yang meliputi densitas arus, pH, laju aliran, karakteristik membran penukar ion, elektroda, dan pelarut serta larutannya (Akhter *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2007).

2.4.1 Kerapatan Arus

Dalam proses elektrodialisis dimana memanfaatkan membran penukar ion dalam prosesnya, dapat terjadi keadaan yang disebut dengan polarisasi konsentrasi. Polarisasi konsentrasi disebabkan karena adanya perbedaan bilangan transport ion antara larutan dengan membran. Perbedaan tersebut membentuk gradien konsentrasi ion antara fasa membran dan fasa larutan. Polarisasi konsentrasi dapat berakibat pada terjadinya disosiasi air, *scaling*, perubahan pH, dan penurunan efisiensi energi (Strathmann, 2010). Untuk mencegah hal ini terjadi, diperlukan batas kerapatan arus dalam mengoperasikan reaktor elektrodialisis.

2.4.2 pH

Salah satu parameter yang sangat sensitif dan dapat mempengaruhi sebuah larutan yaitu pH. pH akan mempengaruhi hasil reaksi terutama pada ion-ion tertentu yang akan dioksidasi dalam reaktor elektrodialisis. Spesies klorin yang terbentuk pada suatu larutan dipengaruhi oleh pH larutan tersebut, dimana pada pH 0-2 akan terbentuk lebih banyak Cl_2 . Untuk pH 4-6 lebih dominan keberadaan spesies asam hipoklorit (HOCl), sedangkan untuk pH di atas 9 wujud klorin yang dominan yaitu ion hipoklorit (OCl^-) (Wang *et al.*, 2007).

2.4.3 Laju Aliran

Reaktor elektrodialisis yang menggunakan sistem *batch reactor* perlu memperhatikan laju aliran. Laju aliran dipengaruhi debit resirkulasi yang mana akan berhubungan dengan waktu detensi air di dalam reaktor elektrodialisis. Semakin lama laju aliran resirkulasi maka semakin besar konsentrasi ion yang dapat dihilangkan. Hal ini dikarenakan semakin lamanya waktu kontak antara arus listrik yang lewat pada air limbah yang diproses pada reaktor. Sedangkan laju aliran larutan elektrolit berlaku sebaliknya, dimana diperlukan laju aliran yang lebih besar sehingga proses reduksi terjadi dengan waktu yang singkat.

2.4.4 Karakteristik Membran Penukar Ion

Cation Exchange Membrane (CEM) dan *Anion Exchange Membrane* (AEM), merupakan membran yang bersifat semipermeabel dan digunakan sebagai membran penukar ion. Membran CEM dan AEM ini bersifat selektif terhadap ion terlarut tertentu, namun tidak melewatkan pelarut yang bersinggungan dengan membran tersebut. CEM dan AEM merupakan salah satu komponen penting dalam menjalankan proses elektrodialisis. Terdapat beberapa perbedaan mendasar antara CEM dan AEM yang meliputi gugus penyusunnya, dan perbedaan kondisi serta respon terhadap ion yang berinteraksi pada membran-membran tersebut (Bdiri *et al.*, 2019). CEM tersusun atas gugus penyusun bermuatan negatif seperti $-\text{SO}_3^-$, $-\text{COO}^-$, $-\text{PO}_3^{2-}$, $-\text{PO}_3\text{H}^-$, $-\text{C}_6\text{H}_4\text{O}^-$, sedangkan AEM tersusun atas gugus penyusun bermuatan positif seperti $-\text{NH}_3^+$, $-\text{NRH}_2^+$, $-\text{NR}_2\text{H}^+$, $-\text{NR}_3^+$, $-\text{PR}_3^+$, $-\text{SR}_2^+$ (Xu, 2005). CEM akan lebih cenderung melewatkan kation dikarenakan CEM bermuatan negatif, sedangkan AEM akan cenderung melewatkan anion dikarenakan AEM bermuatan positif.

2.4.5 Elektroda

Elektroda berfungsi sebagai konduktor untuk mengalirkan arus listrik dari sumber daya listrik ke dalam reaktor. Menurut Riyanto (2013), elektroda terbagi atas elektroda inert dan tak inert. Elektroda inert ialah elektroda yang tidak ikut bereaksi, sehingga yang mengalami proses oksidasi ataupun reduksi hanyalah elektrolit dalam sel elektrolisis. Contoh elektroda yaitu karbon (C) dan platina (Pt). Sedangkan elektroda tak inert ialah elektroda yang ikut bereaksi pada proses oksidasi ataupun reduksi. Contoh elektroda tak inert yaitu besi (Fe), aluminium (Al), tembaga (Cu), seng (Zn), perak (Ag), dan emas (Au). Sifat kecenderungan elektroda dalam mengalami oksidasi dapat dilihat pada deret volta, sebagai berikut.

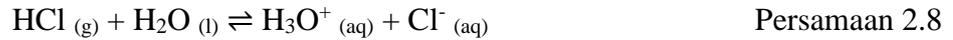


Dimana, semakin ke kiri logam akan lebih mudah mengalami oksidasi dan berlaku sebaliknya untuk logam yang paling kanan.

2.4.6 Pelarut dan Larutan

Riyanto (2013) menyatakan bahwa elektrolit ialah zat yang terurai menjadi ion-ion dalam larutan dan dapat menghantarkan arus listrik, sehingga kemudian disebut sebagai larutan elektrolit. Sedangkan untuk larutan yang tidak dapat menghantarkan listrik disebut sebagai larutan non elektrolit. Umumnya, senyawa yang memiliki ikatan dengan ion merupakan senyawa elektrolit. Sebagai contoh ialah garam dapur (NaCl), NaCl dengan wujud larutan

ataupun lelehan dapat menghantarkan listrik, sedangkan dalam wujud padatan NaCl tidak dapat menghantarkan listrik. Contoh lain ialah ketika HCl dilarutkan pada air sehingga terjadi reaksi demikian:



Reaksi di atas merupakan reaksi ionisasi yang menghasilkan ion-ion yang sebelumnya belum terbentuk atau yang disebut sebagai disosiasi. Reaksi terjadi dikarenakan berpindahnya hidrogen (H^+) sehingga membentuk H_3O^+ , dan ion Cl^- tidak berikatan dengan kation apapun. Dari reaksi tersebut, produk yang dihasilkan ialah larutan elektrolit dengan kemampuan untuk menghantarkan listrik.

2.7 Perhitungan Kebutuhan Energi

Muatan listrik dapat diketahui dengan mengalikan kuat arus yang dialirkan dengan waktu waktu operasi.

$$Q = I \times t \quad \text{Persamaan 2.9}$$

Dimana:

- Q = Muatan listrik (Coloumb)
- I = Kuat arus listrik (Ampere)
- t = Waktu operasi (detik)

Kemudian, untuk menghitung kebutuhan energi dapat dilakukan dengan melihat penurunan konsentrasi polutan selama proses berlangsung yang ditunjukkan sebagai muatan listrik spesifik, dengan persamaan sebagai berikut (Anglada *et al.*, 2009).

$$Q = \frac{J \ A \ t}{v} \quad \text{Persamaan 2.10}$$

$$J = \frac{I}{A} \quad \text{Persamaan 2.11}$$

$$Q = \frac{I \ t}{v} \quad \text{Persamaan 2.12}$$

$$W = Q \ V \quad \text{Persamaan 2.13}$$

Dimana:

- W = Konsumsi energi spesifik (kWh/m^3)
- Q = Muatan listrik spesifik (kAh/m^3)
- J = Kerapatan arus (A/m^2)
- A = Luas elektroda (m^2)
- v = Volume elektrolit (L)
- t = Waktu operasi (detik)
- I = Kuat arus listrik (Ampere)
- V = Tegangan listrik (Volt)

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai pertimbangan dalam melakukan penelitian ini. Hal penting yang diambil dari penelitian-penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2. 4 Penelitian Terdahulu

Rentang Rapat Arus	Limbah	Hasil	Referensi
50 A/m ²	Konsentrat <i>Reverse Osmosis</i> (RO)	Proses elektrodialisis skala lab untuk memisahkan kandungan garam dengan arus konstan 0,3 A dan kerapatan arus 50 A/m ² , yang dioperasikan selama 8 jam tidak mengakibatkan adanya <i>scaling</i> .	(Zhang <i>et al.</i> , 2012)
18 A/m ²	Air Asin (Larutan NaCl)	Proses elektrodialisis untuk menurunkan kandungan garam pada larutan NaCl dengan kecepatan sama di kedua kompartemen, didapatkan batas kerapatan arus 18 A/m ² .	(La Cerva <i>et al.</i> , 2018)
25 A/m ²	Konsentrat <i>Reverse Osmosis</i> (RO)	Proses elektrodialisis pada konsentrat <i>reverse osmosis</i> (RO) menggunakan kerapatan arus 25 A/m ² , didapatkan tingkat <i>recovery</i> garam dan total <i>chlorine</i> berturut-turut 29,28% dan 50,83%.	(Yusuf, 2015)
58,3 A/m ²	Air Asin (Larutan NaCl)	Proses elektrodialisis untuk menurunkan kandungan garam pada larutan NaCl dengan luas membran efektif 200 cm ² , didapatkan kerapatan arus optimal sebesar 58,3 A/m ² .	(Choi <i>et al.</i> , 2003)
22,5 A/m ²	Air limbah domestik	Proses elektrodialisis pada air limbah domestik menggunakan kerapatan arus 22,5 A/m ² , dapat menurunkan kandungan ion klorida (Cl ⁻) sebesar 85%.	(Gally <i>et al.</i> , 2018)

BAB III

METODOLOGI

3.1 Deskripsi Umum

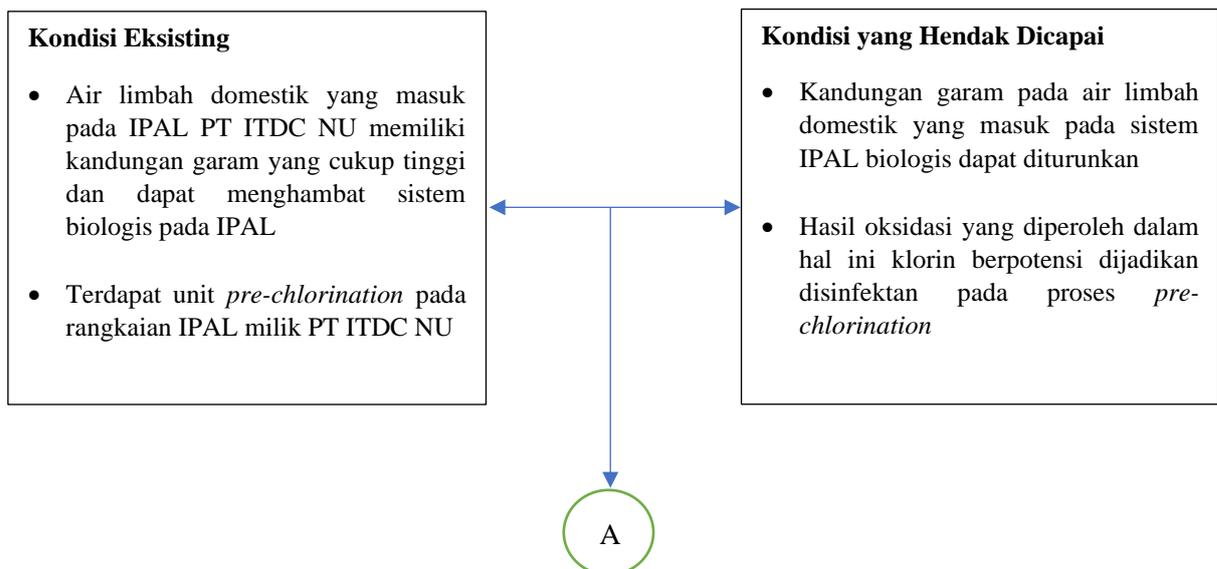
Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kandungan organik pada air limbah domestik, kadar padatan tersuspensi dan terlarut dan klorida. Tujuan lain dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui nilai pH dan kuat arus yang optimum dalam menerapkan proses elektrodialisis pada air limbah, sehingga didapat penurunan ion klorida terbesar serta potensi *recovery* klorin sebagai disinfektan yang dapat digunakan di proses *pre-chlorination*. Variasi diberlakukan pada nilai pH dan kuat arus dalam proses elektrodialisis. Tujuan selanjutnya yaitu untuk mengetahui pengaruh penambahan klorin yang dihasilkan pada proses elektrodialisis terhadap penurunan kandungan organik air limbah domestik.

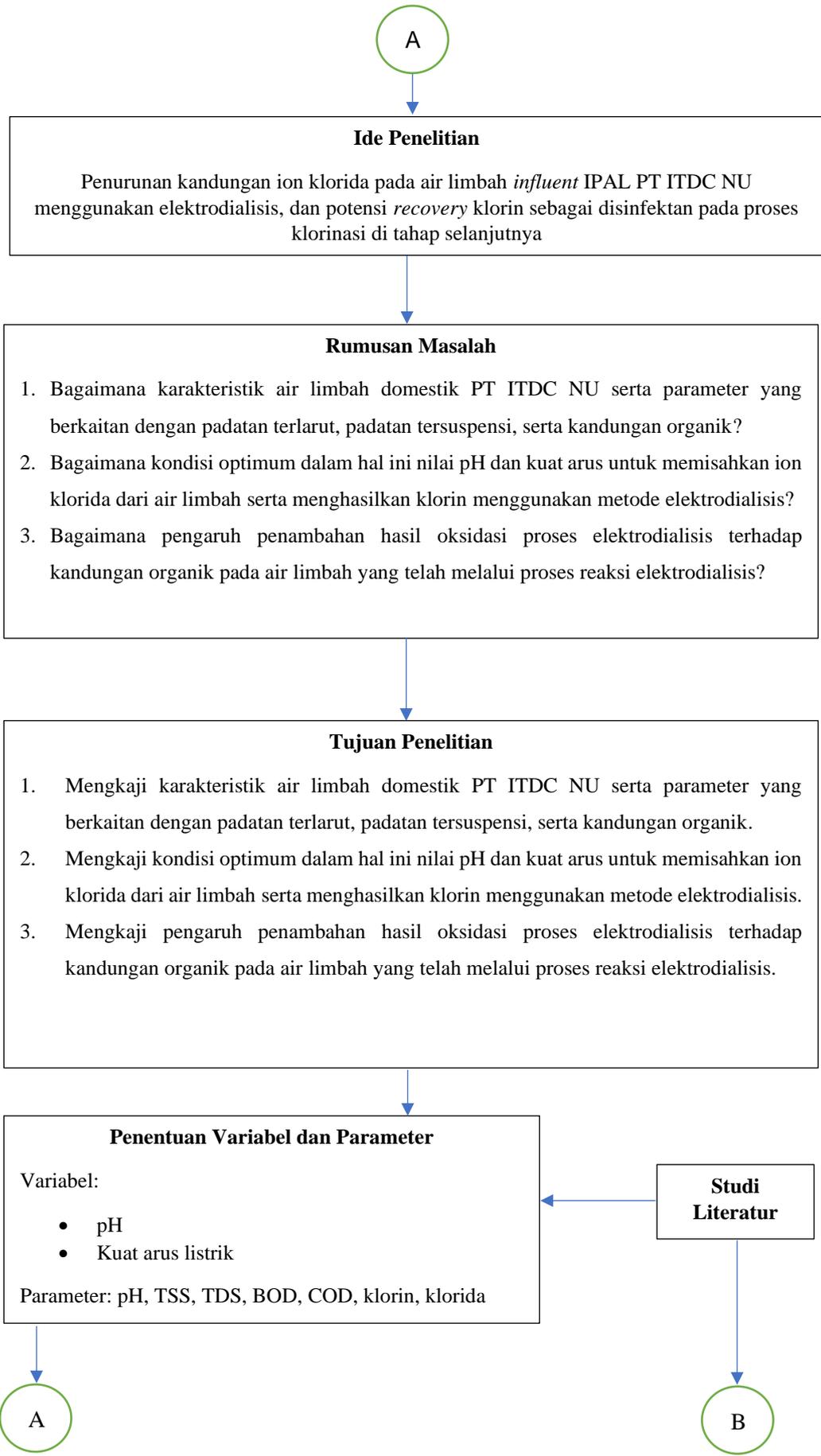
3.2 Lokasi Penelitian

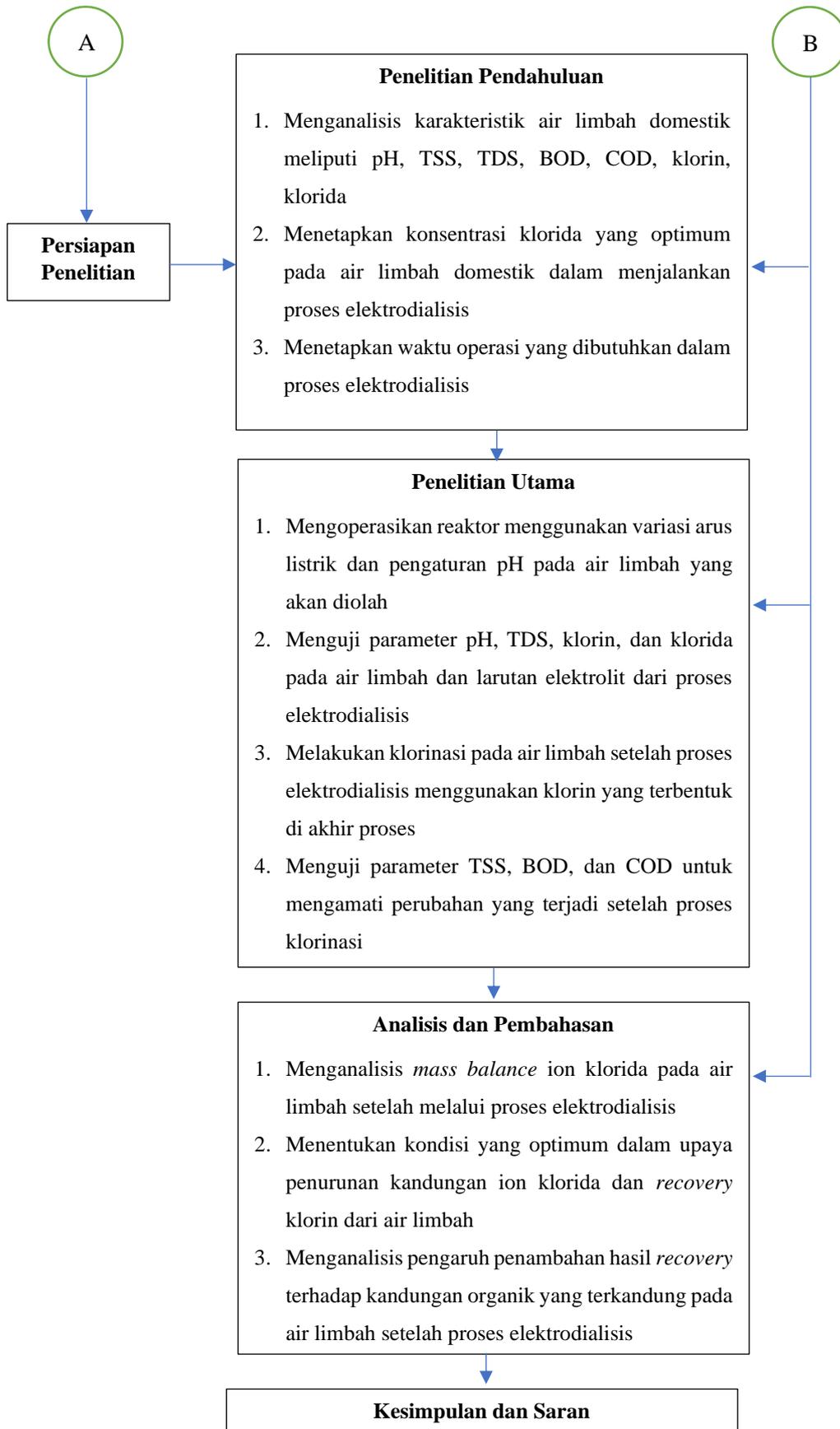
Lokasi pengambilan sampel bertempat di PT ITDC Nusantara Utilitas (PT ITDC NU), Nusa Dua di saluran inlet *aerated lagoon*. Sedangkan, untuk penelitian dan pengoperasian reaktor dilaksanakan di Laboratorium Limbah Padat dan B3 dan Laboratorium Teknologi Pengolahan Air, Departemen Teknik Lingkungan, ITS.

3.3 Kerangka Penelitian

Ide penelitian ini berawal dari kondisi eksisting dimana air limbah domestik yang diolah PT ITDC NU memiliki kadar TDS dan tingkat salinitas yang cukup tinggi dan dikhawatirkan menghambat proses pengolahan air limbah secara biologis. Selain itu, di dalam alur pengolahan air limbah domestik PT ITDC NU terdapat unit proses *pre-chlorination* sebelum memasuki unit lanjutan setelah *aerated lagoon*. Sehingga perlu dilakukan penelitian mengenai potensi *recovery* klorin untuk menambah persediaan disinfektan pada proses *pre-chlorination*.







Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.4 Persiapan Penelitian

3.4.1 Penentuan Variabel Penelitian

Agar suatu penelitian mendapatkan hasil yang optimum dan maksimal, maka perlu ditentukan variasi penelitian yang berguna sebagai pembandingan dalam mengambil kesimpulan dari penelitian. Variasi yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

1. Kuat Arus

Menurut Zhang *et al.* (2012), dengan kerapatan arus 5 mA/cm² yang diterapkan untuk reaktor dengan debit 20 L/jam dapat menyisihkan kandungan garam pada air hingga 45%. Untuk mendapatkan kerapatan arus optimum pada proses elektrodialisis dalam penelitian ini, perlu dilakukan variasi kuat arus. Sehingga nantinya pada akhir penelitian dapat diketahui kuat arus yang paling efektif untuk memisahkan ion klorida dari air limbah.

2. Nilai pH

Wujud dari spesies klorin pada suatu larutan dipengaruhi oleh pH, hal ini dapat menjadi pertimbangan mengingat produk yang ingin dicapai setelah proses oksidasi pada anoda yaitu senyawa NaOCl sebagai disinfektan. Variasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai pH awal yang optimum dalam proses *recovery* klorin, sehingga didapatkan produk klorin dengan konsentrasi tertinggi. Khelifa *et al.* (2004) menyatakan bahwa klorin dalam bentuk ion hipoklorit terlarut memiliki kekuatan yang erat dengan klorin aktif sebagai disinfektan. Oleh karena itu pada penelitian ini, pH awal larutan Na₂HPO₄ yang masuk ke reaktor diatur pada pH 8, 9, dan 10 mempertimbangkan penurunan pH yang akan terjadi selama proses elektrodialisis.

3.4.2 Penentuan Parameter Penelitian

Parameter penelitian yang diterapkan pada air limbah dan konsentrat berfungsi sebagai rujukan dalam melihat perubahan yang didapatkan setelah dijalankannya penelitian. Parameter yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1., serta prosedur analisis setiap parameter pada Lampiran A.

Tabel 3. 1 Metode Uji Parameter Ukur

No.	Parameter	Metode	Instrumen
1	pH	Potensiometri	pH meter
2	TDS	<i>Specific Conductivity</i>	<i>Conductivity Meter</i>
3	TSS	Gravimetri	Furnace
4	BOD	Iodometri	Buret
5	COD	<i>Open Reflux</i>	Buret
6	Klorin	Iodometri	Buret
7	Klorida	Argentometri	Buret

Untuk baku mutu tiap parameter mengacu pada Peraturan Gubernur Bali No. 16 Tahun 2016, yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Baku Mutu Parameter Air Limbah

No.	Parameter	Satuan	Baku Mutu
1	pH	-	6-9
2	TDS	mg/L	2000
3	TSS	mg/L	50

No.	Parameter	Satuan	Baku Mutu
4	BOD ₅	mg/L	28
5	COD	mg/L	50
6	Klorin	mg/L	-
7	Klorida	mg/L	-

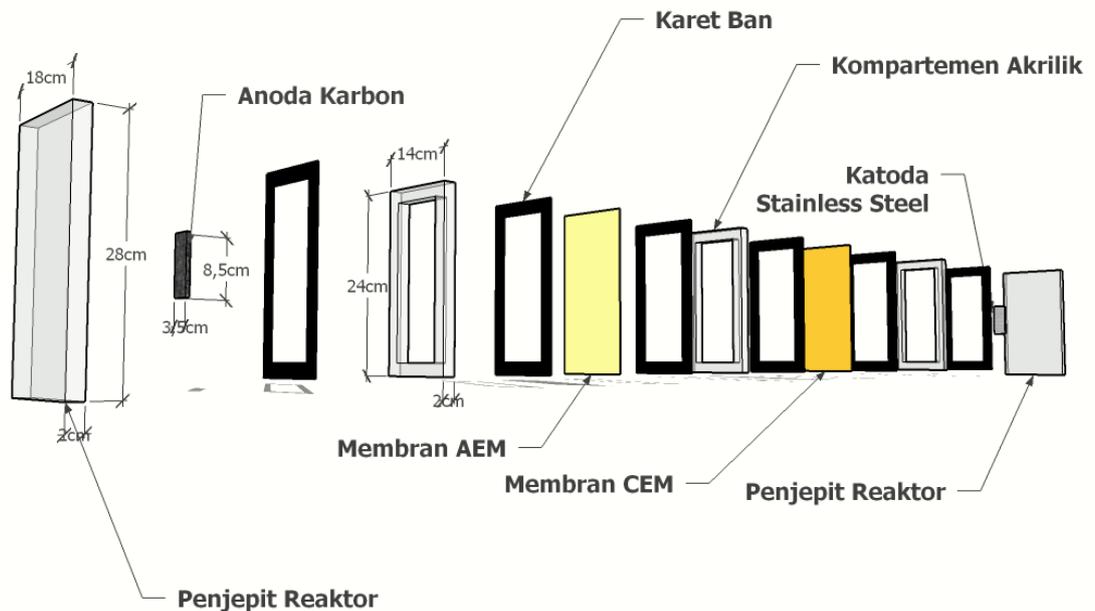
Sumber: Peraturan Gubernur Bali No. 16 Tahun 2016

3.4.3 Persiapan Alat

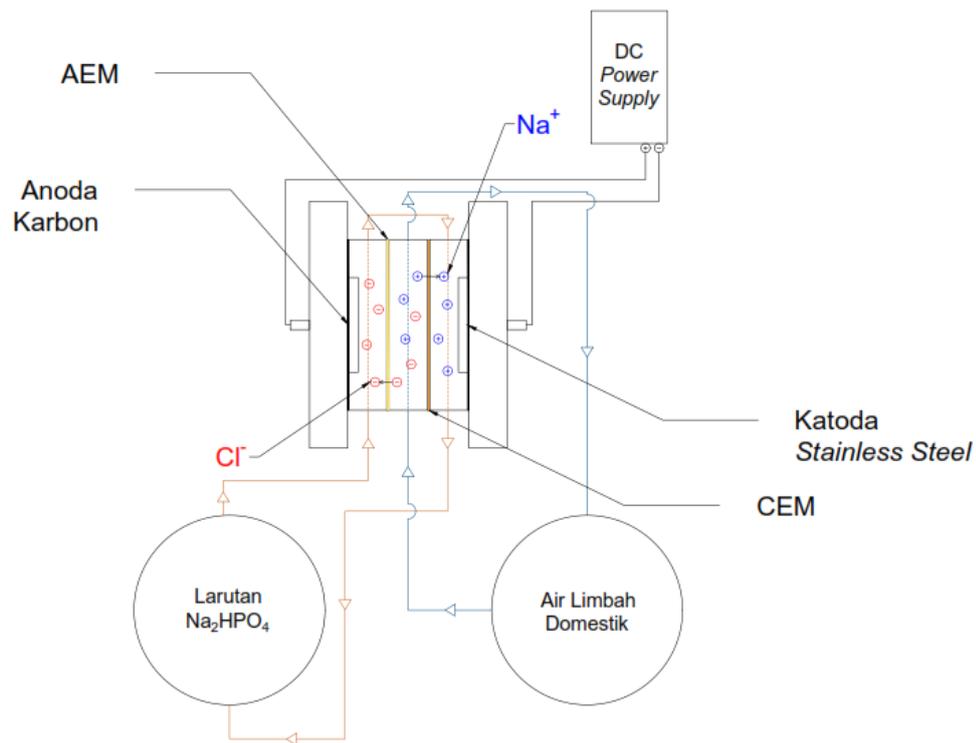
Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan peralatan penunjang yang harus disiapkan terlebih dahulu sebagai berikut:

1. Reaktor Elektrodialisis

Reaktor elektrodialisis yang digunakan dioperasikan dengan sistem *batch*. Reaktor terbuat dari bahan akrilik yang bersifat inert, stabil pada suhu panas, tahan terhadap korosi, dan dapat dibentuk sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Reaktor terdiri dari tiga kompartemen yang dibatasi oleh membran dan sekat karet, yang meliputi kompartemen anoda, kompartemen pusat, dan kompartemen katoda. Lapisan akrilik berbentuk prisma segi empat dengan dimensi pada kompartemen 2 cm x 14 cm x 24 cm (± 400 ml) dan dimensi pada lapisan penjepit reaktor 2 cm x 18 cm x 28 cm. Konfigurasi reaktor elektrodialisis dapat dilihat pada Gambar 3.2, sedangkan untuk rangkaian keseluruhan serta aliran air pada reaktor dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 2 Konfigurasi Reaktor Elektrodialisis



Gambar 3. 3 Arah Aliran pada Reaktor

2. Membran

Membran yang digunakan dalam penelitian adalah *Cation Exchange Membrane* (CEM/+) tipe CMI-7000S dan *Anion Exchange Membran* (AEM/-) tipe AMI-7001S yang disediakan oleh *Membrane International, Inc*. Membran ini berfungsi untuk membantu proses pertukaran ion yang ada di dalam reaktor sesuai dengan muatan yang terkandung pada membran tersebut. Dimensi membran yang digunakan yaitu 24 cm x 14 cm dengan luas membran efektif 200 cm² (20 cm x 10 cm).

3. Elektroda

Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini yaitu karbon sebagai anoda dan *stainless steel* sebagai katoda dengan dimensi 8,5 cm x 8,5 cm. Elektroda berfungsi untuk sebagai konduktor arus listrik dari DC *power supply* menuju reaktor elektrodialisis.

4. Kabel

Kabel berfungsi sebagai penghubung antara DC *power supply* dan elektroda.

5. DC *Power Supply*

DC *power supply* yang digunakan dalam proses elektrodialisis memiliki kuat arus dengan rentang 0-15 A dan rentang tegangan 0-60 V. DC *power supply* berfungsi untuk menyediakan arus listrik pada reaktor.

6. Selang

Selang yang digunakan memiliki diameter 0,5 cm yang berfungsi untuk mengalirkan air limbah domestik dan elektrolit menuju reaktor.

7. Pompa *Submersible*

Pompa *submersible* yang digunakan berfungsi untuk memompa air limbah domestik dan elektrolit dari tangki ke dalam reaktor dan kembali ke dalam tangki. Debit yang dialirkan hingga yaitu 200 L/jam pada *wastewater tank* dan 600 L/jam pada *chlorine tank*.

8. *Reservoir Tank*

Reservoir tank yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari *wastewater tank* yang berfungsi untuk menampung air limbah domestik dan *chlorine tank* yang berfungsi untuk menampung larutan elektrolit.

3.4.4 Persiapan Bahan

Dalam pelaksanaan penelitian ini, perlu disiapkan bahan-bahan yang akan digunakan dan kebutuhannya dapat diukur kuantitasnya meliputi:

1. Air Limbah Domestik
Air limbah domestik berasal dari sistem penyaluran air limbah domestik terpusat milik PT ITDC NU. Titik pengambilan berada di saluran inlet *aerated lagoon* tepatnya di kolam pertama yaitu Cell 1A.
2. Larutan Na_2HPO_4
Larutan Na_2HPO_4 berfungsi sebagai elektrolit yang akan menerima ion-ion dari proses elektrodialisis, serta titik pengamatan keberadaan klorin setelah elektrodialisis.
3. Larutan asam dan basa
Larutan asam menggunakan H_3PO_4 4%, sedangkan untuk larutan basa menggunakan NaOH 4%. Penggunaan larutan asam dan basa bertujuan untuk mengatur pH pada air limbah yang akan masuk ke dalam reaktor.
4. Larutan NaCl 5%
Larutan NaCl 5% akan digunakan dalam proses *pre-conditioning* pada membran penukar ion.
5. Aquades
Aquades digunakan untuk *flushing* dan juga sebagai pelarut dari Na_2HPO_4 .

3.4.5 Persiapan Pelaksanaan

Hal-hal yang perlu dilakukan sebelum melakukan penelitian ini meliputi:

1. Melakukan *pre-conditioning* pada membran AEM dan CEM dengan cara merendam membran ke dalam larutan NaCl 5% selama 24 jam pada suhu ruang. Hal ini dilakukan agar membran terhidrasi dan tereksipansi dan dapat dilalui ion pada saat proses elektrodialisis.
2. Menyiapkan reaktor dengan menggabungkan bagian-bagiannya sesuai konfigurasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.
3. Melakukan tes kebocoran pada reaktor untuk mencegah terjadinya gangguan pada saat proses penelitian. Tes kebocoran dilakukan dengan mengalirkan aquades pada reaktor, jika ditemukan rembesan pada reaktor perlu dilakukan penanganan.

3.5 Penelitian Pendahuluan

Sebelum melaksanakan penelitian utama, diperlukan penelitian pendahuluan untuk menentukan variasi yang akan dilakukan pada penelitian utama. Penelitian pendahuluan yang akan dilakukan meliputi:

1. Pengujian karakteristik air limbah domestik meliputi pH, TSS, TDS, BOD, COD, klorin, klorida.
2. Penentuan konsentrasi klorida yang optimum pada air limbah domestik dalam menjalankan proses elektrodialisis.
Penentuan konsentrasi klorida pada air limbah domestik dimaksudkan untuk mengetahui konsentrasi klorida yang efisien dalam hal penggunaan energi dan tingkat penurunan ion klorida saat dilakukan proses elektrodialisis. Akan dilakukan penambahan larutan NaCl 0,1 M pada air limbah domestik dengan konsentrasi ion klorida yang berbeda yaitu 700

mg/L, 1200 mg/L, 1700 mg/L, 2200 mg/L, dan 2800 mg/L. Kemudian akan dilakukan proses elektrodialisis pada setiap konsentrasi di atas, dan dilihat penurunan klorida paling besar pada air limbah. Proses elektrodialisis dilakukan selama 2 jam dengan menggunakan kuat arus sebesar 1 A. Selain itu juga akan dipertimbangkan penggunaan energi selama proses elektrodialisis pada tiap konsentrasi penambahan yang digunakan.

3. Penentuan waktu pengoperasian reaktor pada saat penelitian utama.
 Penentuan waktu operasi dilakukan dengan menggunakan konsentrasi klorida yang terpilih dari penelitian pendahuluan sebelumnya dan kuat arus maksimum. Kemudian reaktor dioperasikan hingga kandungan klorin yang dihasilkan mendekati dosis klorin yang digunakan oleh PT ITDC NU yaitu 14-15 mg/L. Khelifa *et al.* (2004) menyatakan bahwa pada 2,5 jam proses elektrodialisis, produksi Cl₂ mencapai titik puncak yang kemudian turun pada waktu selanjutnya. Maka dari itu penentuan waktu operasi direncanakan selama 5 jam dan pengamatan parameter pada air limbah dilakukan setiap 2,5 jam proses.

3.6 Penelitian Utama

Penelitian ini akan dilakukan dengan menerapkan tiga variasi kuat arus dan 3 variasi pH dalam proses elektrodialisis. Akan dilakukan analisis beberapa parameter sebelum dan sesudah reaktor dijalankan, yaitu parameter pH, TDS, TSS, BOD, COD, klorin, klorida. Variasi penelitian dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. 3 Variasi Penelitian

Kuat Arus (mA)	pH		
	8	9	10
100	A1	A2	A3
200	B1	B2	B3
300	C1	C2	C3

Variasi tersebut diterapkan pada penelitian utama dengan langkah-langkah sebagai berikut:

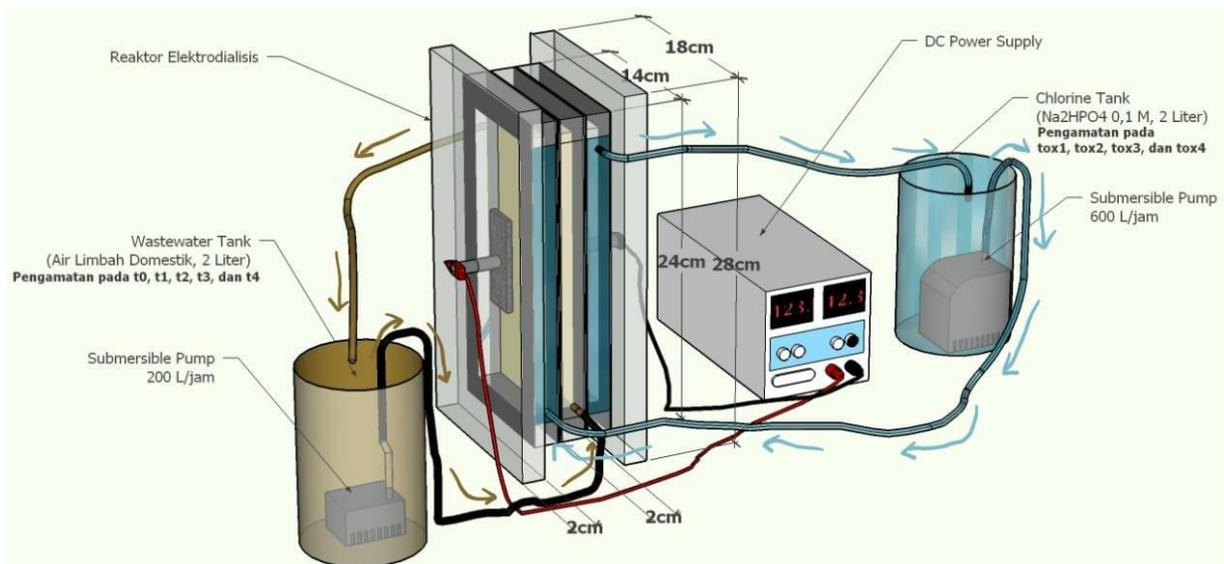
1. Mengisi *reservoir tank* dengan air limbah domestik sebanyak 2 liter, wadah ini kemudian disebut sebagai *wastewater tank*.
2. Mengisi *reservoir tank* kedua menggunakan larutan Na₂HPO₄ sebanyak 2 liter, wadah ini kemudian disebut sebagai *chlorine tank*.
3. Mengatur pH awal pada *wastewater tank* menggunakan H₃PO₄ 4% dan NaOH 4% menyesuaikan variasi yang telah ditentukan sebelumnya yaitu 8, 9, dan 10. Prosedur pengaturan pH dapat dilihat pada Lampiran B.
4. Mengoperasikan pompa untuk mengalirkan air limbah domestik dengan debit 200 L/jam dan larutan Na₂HPO₄ dengan debit 600 L/jam.
5. Mengoperasikan DC *power supply* dengan arus listrik menyesuaikan variasi yang telah ditetapkan pada penelitian pendahuluan.
6. Melakukan analisis parameter menyesuaikan waktu sampling yang ditetapkan pada penelitian pendahuluan. Analisis parameter dilakukan pengulangan sebanyak dua kali atau duplo. Dalam penelitian ini, waktu sampling yang ditetapkan yaitu sebelum reaksi (t₀) dan pada konsentrat hasil oksidasi (t_{ox}). Dalam pengoperasian reaktor, ditetapkan pengamatan pada *wastewater tank* dilakukan sebanyak empat kali selama pengoperasian reaktor (t₁, t₂, t₃, dan t₄). Untuk pengamatan pada *chlorine tank* juga dilakukan sebanyak empat kali selama pengoperasian reaktor (t_{ox1}, t_{ox2}, t_{ox3}, dan t_{ox4}). Selain itu dilakukan

pengamatan setelah penambahan hasil oksidasi di *wastewater tank* ($t_{\text{klorinasi}}$). Pengambilan sampel saat t_0 tidak diperhitungkan karena sudah dilakukan sebelum proses pengoperasian reaktor. Pengambilan sampel untuk dilakukan analisis ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 3. 4 Titik dan Waktu *Sampling*

Parameter	Volume Sampling (mL)	Titik Sampling	Waktu Sampling
pH	10	<i>Wastewater tank</i> dan <i>chlorine tank</i>	$t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_{ox1}, t_{ox2}, t_{ox3}, t_{ox4}, t_{\text{klorinasi}}$
TDS	10	<i>Wastewater tank</i> dan <i>chlorine tank</i>	$t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_{ox1}, t_{ox2}, t_{ox3}, t_{ox4}, t_{\text{klorinasi}}$
TSS	25	<i>Wastewater tank</i>	$t_0, t_{\text{klorinasi}}$
BOD	100	<i>Wastewater tank</i>	$t_0, t_{\text{klorinasi}}$
COD	10	<i>Wastewater tank</i>	$t_0, t_{\text{klorinasi}}$
Klorin	50	<i>Chlorine tank</i>	$t_{ox1}, t_{ox2}, t_{ox3}, t_{ox4}$
Klorida	20	<i>Wastewater tank</i> dan <i>chlorine tank</i>	$t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_{ox1}, t_{ox2}, t_{ox3}, t_{ox4}, t_{\text{klorinasi}}$

Dari penentuan kebutuhan sampel di atas, didapatkan bahwa kebutuhan sampel selama proses elektrodialisis pada *wastewater tank* sebesar 40 mL. Sedangkan untuk *chlorine tank* dibutuhkan minimal 90 mL untuk dilakukan pengamatan parameter. Analisis parameter di dalam eksperimen dilakukan secara duplo, maka kebutuhan sampel pada tiap *reservoir tank* dikalikan dua. Berikut pada Gambar 3.4 merupakan ilustrasi susunan reaktor serta alat penunjang penelitian, dilengkapi dengan detail titik pengambilan sampel uji.



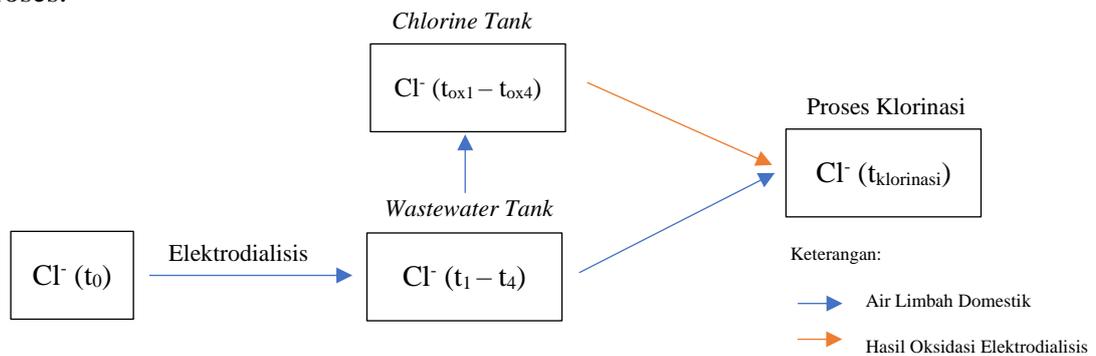
Gambar 3. 4 Skema Kerja Reaktor

Setelah didapatkan pengondisian optimum dalam mengoperasikan proses elektrodialisis, kemudian dilanjutkan dengan proses klorinasi pada air limbah menggunakan klorin yang dihasilkan dari elektrodialisis. Kondisi optimum ditentukan dengan melihat kebutuhan energi dalam memproduksi klorin, kemudian dipilih dua variasi kondisi pengoperasian elektrodialisis untuk dilanjutkan ke tahap percobaan klorinasi. Metode klorinasi yang digunakan merujuk Islami *et al.* (2019) yaitu dengan pembubuhan secara *two-step chlorination* (TSC) dengan rasio 5:1, dan interval waktu 50 detik. Klorinasi dilakukan dengan menggunakan *magnetic stirrer* kecepatan pengadukan 350 rpm dengan waktu kontak 20 menit. Dosis klorin yang digunakan pada percobaan menyesuaikan dosis klorin yang digunakan PT ITDC NU dalam melakukan klorinasi pada air limbahnya yaitu 15 mg/L. Pengamatan dilakukan pada parameter TSS, BOD, dan COD di awal dan di akhir proses klorinasi.

3.7 Analisis Data dan Pembahasan

Hasil pengoperasian reaktor dengan menerapkan variasi pH dan kuat arus dianalisis untuk melihat tingkat pemisahan ion dari air limbah domestik dan melihat potensi *recovery* klorin. Analisis yang akan dilakukan meliputi:

1. Menentukan kondisi yang optimum dalam upaya penurunan kandungan ion klorida dan *recovery* klorin dari air limbah, serta *mass balance* dari ion klorida pada keseluruhan proses.



Gambar 3. 5 *Mass Balance* Ion Klorida Selama Penelitian

2. Menganalisis pengaruh penambahan hasil *recovery* terhadap kandungan organik yang terkandung pada air limbah setelah proses elektrodialisis.

3.8 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan berisi jawaban atas tujuan penelitian ini didasarkan pada hasil analisis dan pembahasan. Kesimpulan disajikan dalam bentuk poin-poin, dimulai dari karakteristik air limbah yang telah dianalisis. Kemudian hasil penelitian mengenai pH dan kuat arus yang optimum untuk menjalankan proses elektrodialisis pada air limbah, serta pengaruh penambahan klorin hasil oksidasi elektrodialisis pada air limbah domestik.

Sedangkan saran yang disampaikan nantinya berupa rekomendasi berdasarkan peluang pengembangan dari topik ini, sehingga diharapkan didapatkan hasil yang lebih baik dan komprehensif.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan terdiri atas tiga bagian yang meliputi karakterisasi awal air limbah domestik, penentuan konsentrasi klorida yang akan digunakan dalam elektrodialisis, dan penentuan waktu operasi.

4.1.1 Karakterisasi Awal Air Limbah Domestik

Karakterisasi awal dilakukan untuk mengetahui kondisi air limbah domestik yang akan digunakan dalam proses elektrodialisis. Pengujian karakteristik air limbah domestik dengan memperhatikan parameter pH, TDS, Klorida (Cl^-), TSS, BOD, dan COD. Karakteristik air limbah domestik milik PT ITDC NU dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Karakteristik Awal Air Limbah Domestik

No.	Parameter	Hasil
1	pH	6,11
2	TDS	742 mg/L
3	Klorida	673 mg/L
4	TSS	50 mg/L
5	BOD	19,73 mg/L
6	COD	168 mg/L

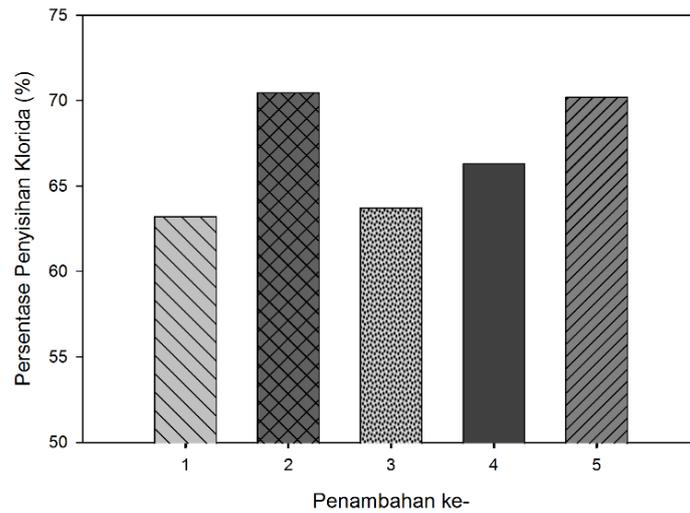
4.1.2 Penentuan Konsentrasi Klorida pada Air Limbah Domestik untuk Elektrodialisis

Penentuan konsentrasi klorida dilakukan untuk menetapkan konsentrasi klorida yang masuk ke reaktor elektrodialisis, sehingga didapatkan konsentrasi yang sesuai untuk proses elektrodialisis dalam hal penurunan klorida serta penggunaan energi. Menurut Tanaka (2010), konsentrasi garam terlarut dan tegangan yang digunakan sangat mempengaruhi konsumsi energi spesifik dari proses elektrodialisis. Penentuan konsentrasi klorida dilakukan dengan menambahkan konsentrasi klorida menggunakan larutan NaCl 0,1 M. Konsentrasi klorida yang ditambahkan pada air limbah divariasikan yaitu 700 mg/L, 1200 mg/L, 1700 mg/L, 2200 mg/L, dan 2800 mg/L. Menurut Choi *et al.* (2003), air limbah dengan kandungan ion klorida pada rentang 709 mg/L hingga sekitar 2836 mg/L masih dinilai layak untuk dilakukan pengolahan menggunakan proses elektrodialisis. Air limbah domestik setelah dilakukan penambahan larutan NaCl menunjukkan konsentrasi klorida awal yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

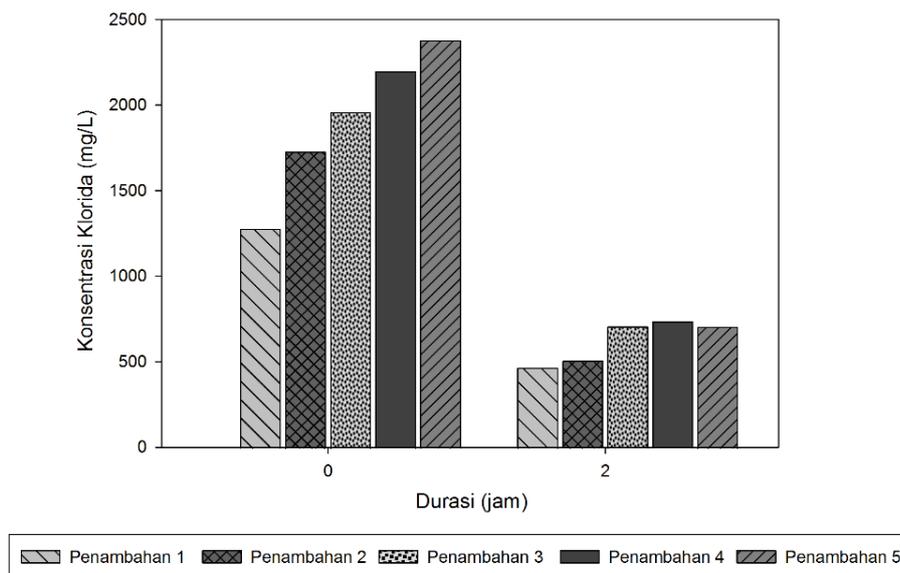
Tabel 4. 2 Konsentrasi Klorida Awal setelah Penambahan NaCl

Penambahan ke-	Konsentrasi Klorida	Konsentrasi Klorida setelah Penambahan
1	700 mg/L	1280 mg/L
2	1200 mg/L	1730 mg/L
3	1700 mg/L	1960 mg/L
4	2200 mg/L	2200 mg/L
5	2800 mg/L	2380 mg/L

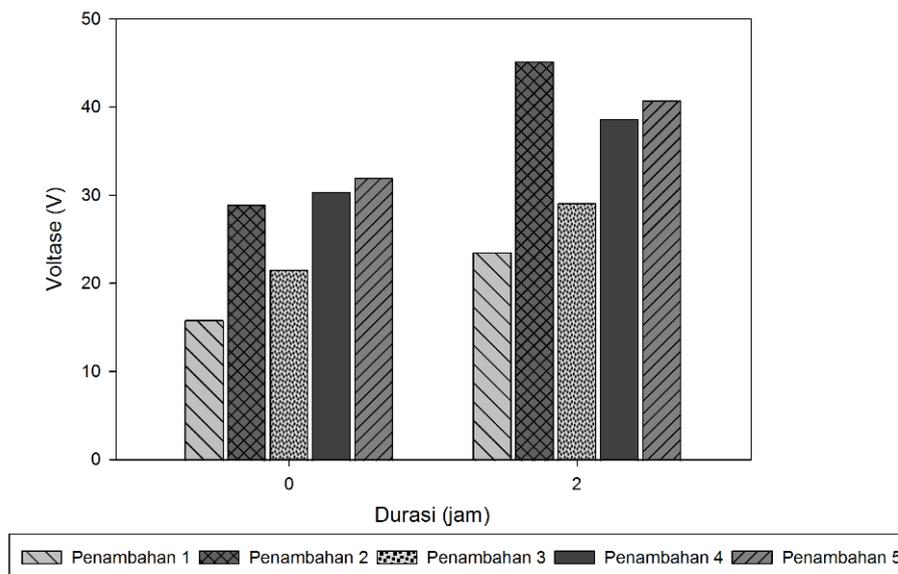
Konsentrasi klorida air limbah setelah penambahan pada konsentrasi pertama meningkat dikarenakan pada air limbah domestik asli konsentrasi klorida sekitar 673 mg/L. Konsentrasi klorida pada air limbah setelah penambahan larutan NaCl kemudian dijadikan konsentrasi klorida awal air limbah domestik. Kemudian air limbah domestik dimasukkan pada reaktor elektrodialisis selama 2 jam, dan dilihat penurunan konsentrasi klorida pada air limbah. Perubahan tingkat konsentrasi klorida pada air limbah serta persentase penurunan konsentrasi klorida dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 berikut. Data yang ditampilkan dalam bentuk tabel dapat dilihat pada Lampiran C.1. Selain itu juga dapat dilihat perubahan voltase pada tiap variasi penambahan NaCl pada Gambar 4.3 dengan data berupa tabel pada Lampiran C.2.



Gambar 4. 1 Persentase Penyisihan Klorida Berdasarkan Besar Penambahan Larutan NaCl



Gambar 4. 2 Perubahan Konsentrasi Klorida Berdasarkan Besar Penambahan Larutan NaCl



Gambar 4. 3 Perubahan Voltase Operasi Berdasarkan Besar Penambahan Larutan NaCl

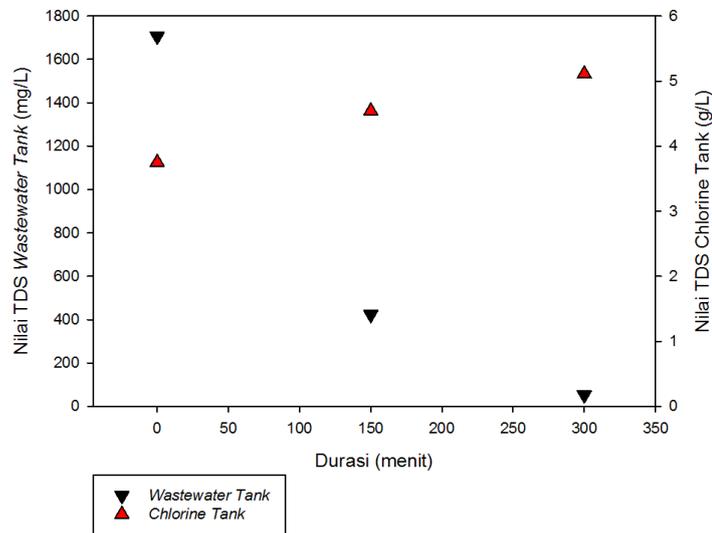
Pada setiap variasi penambahan larutan NaCl terjadi perubahan voltase di akhir prosesnya. Peningkatan voltase ini disebabkan oleh meningkatnya hambatan pada sel elektrodialisis, terutama kompartemen anoda yang semakin kaya akan ion klorida sehingga hambatannya semakin meningkat. Mehdizadeh *et al.* (2019) menyatakan bahwa *internal resistance* pada sel elektrodialisis terdiri dari hambatan ohmik dan non-ohmik (contohnya: polarisasi konsentrasi; perubahan konsentrasi larutan). Voltase berbanding lurus dengan hambatan pada sel elektrodialisis. Sehingga ketika hambatan meningkat pada kompartemen anoda, peningkatan juga akan terjadi pada voltase operasi. Hal ini dapat dijelaskan dapat dijelaskan dengan Hukum Ohm mengenai hubungan kuat arus (I), tegangan (V), dan hambatan sistem (R) yang dapat dilihat pada persamaan berikut (Wen *et al.*, 1996).

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Persamaan 4.1}$$

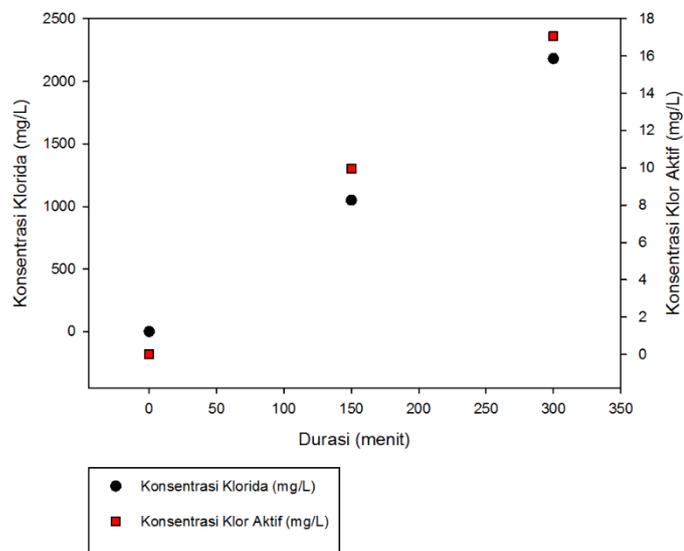
Berdasarkan hasil pengoperasian elektrodialisis dengan variasi konsentrasi klorida awal, didapatkan bahwa persentase penurunan konsentrasi klorida pada Penambahan 2 dan Penambahan 5 memiliki hasil yang hampir sama. Namun jika dibandingkan dari perubahan voltase, selisih voltase awal dan akhir Penambahan 5 lebih kecil dibanding Penambahan 2. Hal ini dikarenakan konsentrasi klorida pada Penambahan 5 lebih tinggi dibanding Penambahan 2, sehingga voltase pada Penambahan 5 yang nantinya akan berpengaruh pada konsumsi energi spesifik dari proses elektrodialisis menjadi lebih rendah dibanding Penambahan 2. Voltase awal dan akhir yang tinggi pada Penambahan 2 dapat disebabkan oleh teknik pembersihan membran yang kurang maksimal, sehingga terjadi *fouling* yang disebabkan oleh kandungan organik dan hambatan pada membran meningkat. Peningkatan hambatan pada membran dapat terjadi dikarenakan proses adsorpsi atau presipitasi molekul organik pada membran (Lindstrand *et al.*, 2000). Selain itu anomali pada voltase awal Penambahan 2 dapat disebabkan oleh ketelitian dalam merangkai reaktor dalam hal ini jarak antar tiap bagian di dalam reaktor. Maka dari itu nantinya yang akan digunakan pada penelitian utama ialah air limbah dengan konsentrasi klorida Penambahan 5 yang memiliki konsentrasi klorida awal setelah prosedur penambahan larutan NaCl sebesar 2380 mg/L, mempertimbangkan fluktuasi kandungan klorida awal dari air limbah.

4.1.3 Penentuan Waktu Operasi Elektrodialisis

Penentuan waktu operasi elektrodialisis dilakukan dengan memperhatikan klorin yang terbentuk selama proses. Waktu akhir proses ditentukan saat produksi klorin sudah mendekati konsentrasi klorin yang menjadi dosis *pre-chlorination* oleh PT ITDC NU. Khelifa *et al.* (2004) menunjukkan bahwa ketika proses elektrodialisis sudah berjalan 2,5 jam, konsentrasi klorin yang didapatkan sudah berada pada titik puncak yang mana setelahnya terjadi penurunan konsentrasi klorin yang didapat. Oleh karena itu, penentuan waktu operasi dilakukan selama 5 jam dimana pengamatan parameter dilakukan setiap 2,5 jam serta menggunakan kuat arus 1 A. Parameter yang diamati yaitu perubahan TDS pada kedua *reservoir tank*. Selain itu juga diamati perubahan ph, penambahan klorida, dan klorin yang terbentuk pada *chlorine tank*. Gambar 4.1 menunjukkan perubahan TDS pada masing-masing kompartemen sedangkan Gambar 4.2 menunjukkan peningkatan konsentrasi klorida dan klorin yang terbentuk pada *chlorine tank*. Data penentuan waktu operasi yang ditampilkan dalam bentuk tabel dapat dilihat pada Lampiran C.3.



Gambar 4. 4 Perubahan TDS pada Masing-masing *Reservoir Tank*



Gambar 4. 5 Konsentrasi Klorida dan Klorin yang Terbentuk pada Chlorine Tank

Parameter TDS pada *wastewater tank* menunjukkan penurunan dan peningkatan pada *chlorine tank*. Hal ini menunjukkan bahwa proses perpindahan ion antar kompartemen berlangsung. Hal ini juga dapat dilihat pada konsentrasi klorida di *chlorine tank* yang semula tidak terdeteksi menjadi bertambah seiring berjalannya proses elektrodialisis. Ion klorida yang berpindah ke *chlorine tank* kemudian akan teroksidasi menjadi klorin di kompartemen anoda, dengan reaksi yang dapat dilihat pada Persamaan 2.7. Khelifa *et al.* (2004) menyatakan bahwa salah satu faktor yang mempengaruhi tingkat pembentukan klorin ialah waktu operasi. Waktu operasi elektrodialisis akan mempengaruhi lama proses elektrolisis pada anoda, sehingga semakin lama proses oksidasi klorin semakin besar konsentrasi klorin yang terbentuk. Konsentrasi klorin dengan hasil yang paling mendekati konsentrasi yang diinginkan, yaitu konsentrasi klorin setelah proses pengoperasian selama 5 jam. Sehingga waktu operasi yang dipilih dan digunakan pada penelitian utama ialah 5 jam.

4.2 Penelitian Utama

Penelitian utama bertujuan untuk mengetahui kondisi optimum dalam menjalankan proses elektrodialisis sehingga didapat penurunan konsentrasi klorida pada air limbah dan produk klorin yang dapat dimanfaatkan selanjutnya. Proses elektrodialisis akan menyisihkan konsentrasi klorida pada air limbah domestik dengan memindahkan ion-ion klorida ke larutan elektrolit Na_2HPO_4 melalui membran penukar ion. Selanjutnya ion klorida (Cl^-) yang ada di larutan elektrolit akan melewati kompartemen anoda dan teroksidasi menjadi klorin (Cl_2), dengan reaksi yang dapat dilihat pada Persamaan 2.7. Pada kompartemen katoda akan terjadi reaksi reduksi dengan reaksi yang dominan menghasilkan produk berupa gas hidrogen (H_2) dengan reaksi yang dapat dilihat pada Persamaan 2.5.

Penelitian utama dilakukan dengan mengoperasikan reaktor sebanyak sembilan kali dengan memvariasikan pH dan kuat arus dengan penjabaran pada subbab 3.6. Penelitian utama dimulai dengan mengatur pH awal menggunakan H_3PO_4 4% ataupun NaOH 4% menyesuaikan pH yang diinginkan. Sedangkan untuk variasi kuat arus dilakukan dengan mengatur *DC Power Supply* agar sumber listrik yang masuk ke reaktor berada pada kondisi kuat arus yang tetap (*current constant*).

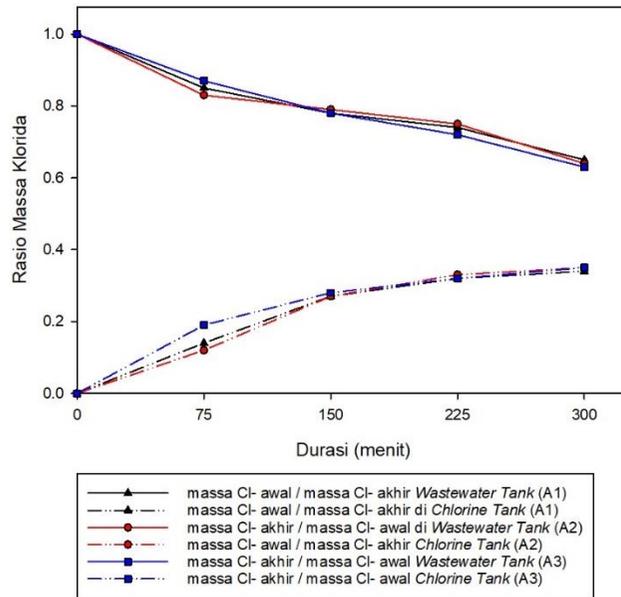
4.2.1 Tingkat Penyisihan Klorida

Pada reaktor elektrodialisis akan terjadi perpindahan ion menuju elektroda menyesuaikan muatan dari ion tersebut. Ion klorida ialah ion dengan muatan negatif yang perpindahannya akan menuju kompartemen anoda yang merupakan kutub positif pada reaktor elektrodialisis. Perpindahan ion klorida menuju kompartemen anoda juga akan dibantu oleh membran *Anion Exchange Membrane* (AEM) yang memiliki gugus penyusun positif. Perpindahan ion klorida dari air limbah domestik menuju larutan elektrolit menyebabkan penurunan konsentrasi klorida pada air limbah domestik, serta peningkatan konsentrasi klorida pada larutan elektrolit. Nakayama *et al.* (2017) menyatakan bahwa elektrodialisis merupakan salah satu alternatif teknologi yang dapat memisahkan ion-ion seperti ion klorida dari air laut, air payau, ataupun air limbah. Hasil yang didapatkan Gally *et al.* (2018) menunjukkan persentase penurunan klorida pada air limbah domestik sebesar 85% dengan kerapatan arus $22,5 \text{ A/m}^2$. Dalam penelitian ini, konsentrasi klorida pada air limbah diturunkan dengan mengoperasikan reaktor elektrodialisis selama 5 jam yang telah ditentukan pada penelitian pendahuluan untuk menentukan waktu operasi. Besar penambahan dan penurunan konsentrasi klorida serta parameter TDS yang terjadi pada reaktor ditampilkan dengan menggunakan rasio perubahan massa pada klorida serta konsentrasi pada TDS. Rasio massa klorida dan konsentrasi TDS pada *wastewater tank* dihitung dengan membandingkan nilai akhir terhadap nilai awal pada masing-

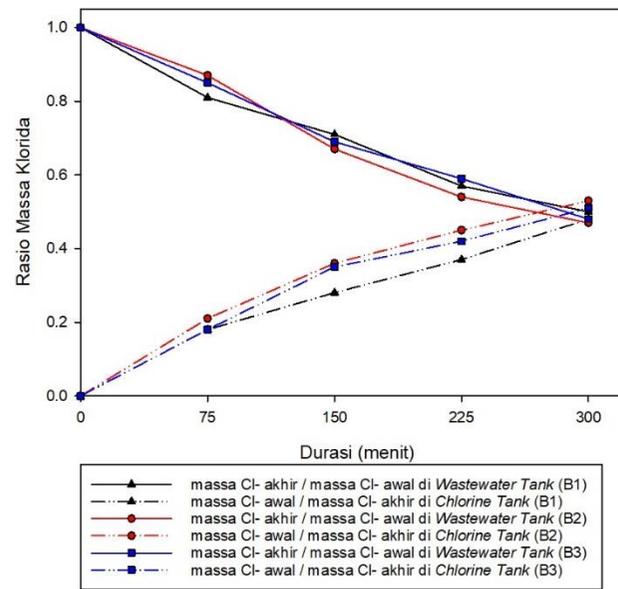
masing parameter. Konsentrasi TDS pada *chlorine tank* dihitung dengan membandingkan nilai awal terhadap nilai akhir pada parameter yang diamati. Sedangkan, rasio massa klorida pada *chlorine tank* dihitung dengan membandingkan massa akhir yang terbentuk pada *chlorine tank* terhadap massa awal *wastewater tank*. Tren perubahan rasio massa klorida dapat dilihat pada Gambar 4.6 serta rasio konsentrasi TDS pada Gambar 4.7. Data lengkap pada setiap variasi yang ditampilkan dalam bentuk tabel dapat dilihat pada Lampiran C.4 hingga C.12.

Jiang *et al.* (2014) menyatakan bahwa waktu operasi yang diperlukan untuk menyisihkan kandungan klorida dari air asin dengan persentase sebesar 98,51% menunjukkan penurunan dari 147 menit menjadi 78 menit, yang dilakukan dengan meningkatkan kerapatan arus dari 30 menjadi 60 mA/cm². Penelitian ini menunjukkan bahwa pada variasi kuat arus 300 mA rasio penurunan klorida pada rentang 0,68-0,71 dengan pengoperasian selama 150 menit. Jika dibandingkan dengan tiga variasi pH di kuat arus 100 mA, rasio penurunan klorida 0,63-0,65 didapatkan dengan mengoperasikan reaktor selama 300 menit. Perbedaan tingkat penyisihan ion klorida yang didapat dikarenakan adanya perbedaan kuat arus yang digunakan. Semakin besar kuat arus maka tegangan yang digunakan juga semakin besar. Hal ini sejalan dengan pernyataan Sutrisna (2002) bahwa proses pemisahan pada elektrodialisis didasarkan oleh *driving force* berupa tegangan yang diterapkan pada proses elektrodialisis. Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa semakin besar kuat arus operasi yang diterapkan, semakin besar pula rasio penurunan massa klorida pada air limbah domestik. Rasio penurunan klorida terbesar didapatkan pada variasi kuat arus 300 mA dan pH 10 sebesar 0,36. Sedangkan rasio penurunan klorida terendah ditunjukkan pada variasi kuat arus 100 mA pH 8 sebesar 0,65.

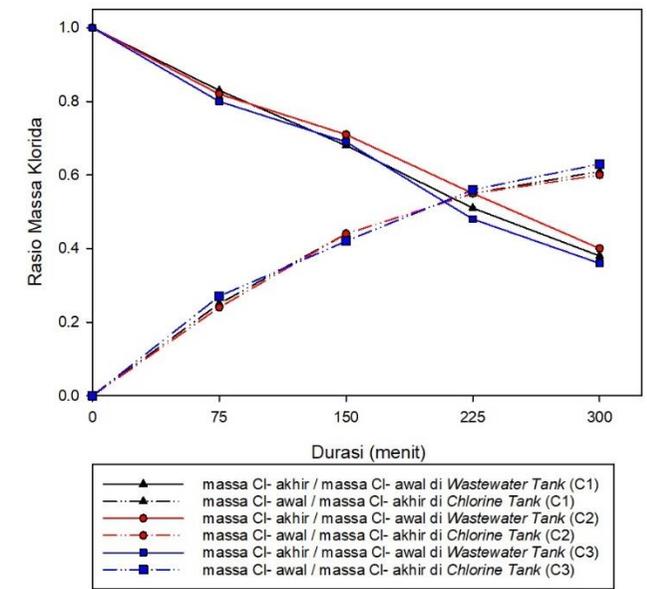
Tren penurunan klorida ini sejalan dengan tren penurunan TDS pada air limbah domestik. Hal ini dikarenakan klorida merupakan bagian dari parameter TDS, sehingga idealnya penurunan pada parameter klorida juga sejalan dengan penurunan parameter TDS. Material dalam air yang tercakup dalam TDS meliputi karbonat, bikarbonat, klorida, sulfat, fosfat, nitrat, kalsium, magnesium, natrium, ion organik, dan ion lainnya (Afrianita *et al.*, 2017). Rasio penurunan TDS terbesar yaitu pada variasi kuat arus 300 mA pH 10 sebesar 0,38 sedangkan yang terendah pada variasi kuat arus 100 mA pH 9 sebesar 0,81.



(a)

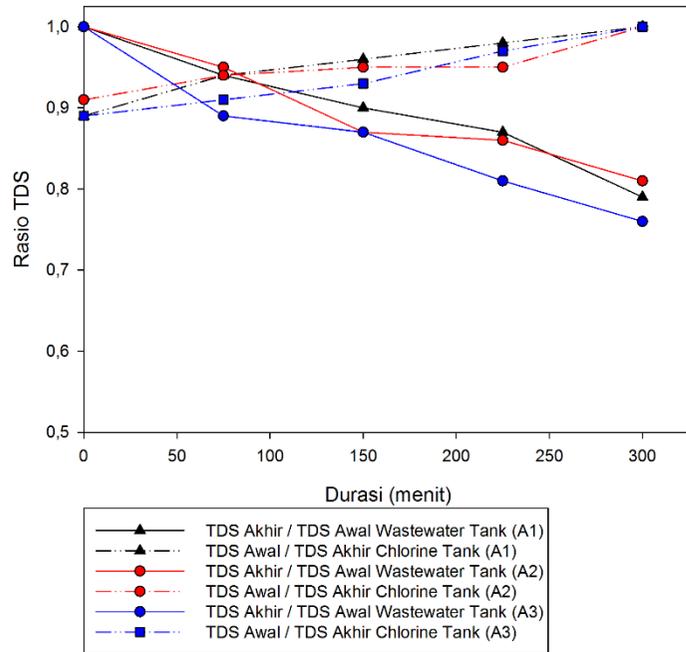


(b)

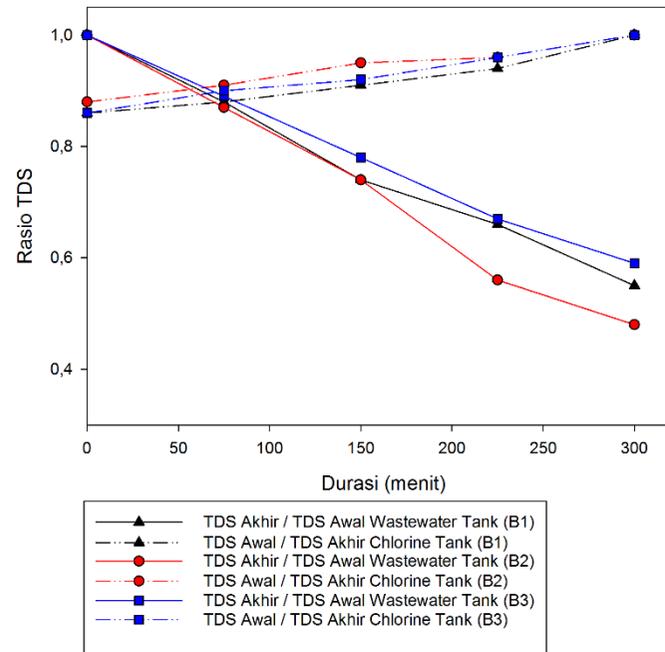


(c)

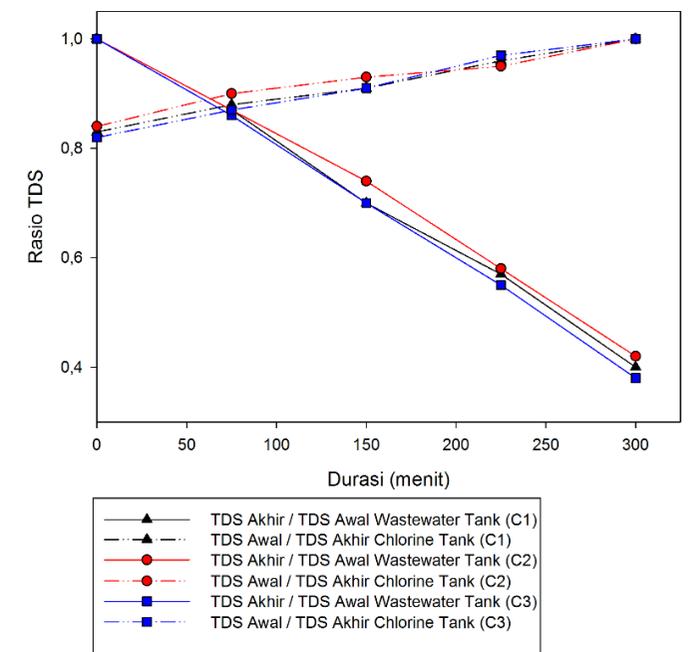
Gambar 4. 6 Perubahan Massa Klorida di Masing-masing Bak: (a) kuat arus 100 mA; (b) kuat arus 200 mA; (c) kuat arus 300 mA



(a)



(b)



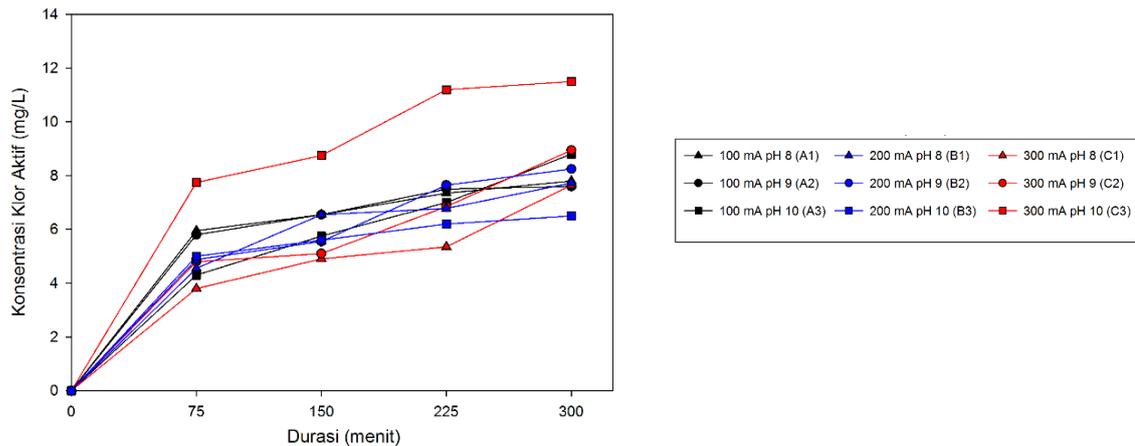
(c)

Gambar 4. 7 Perubahan Konsentrasi TDS di Masing-masing Bak: (a) kuat arus 100 mA; (b) kuat arus 200 mA; (c) kuat arus 300 mA

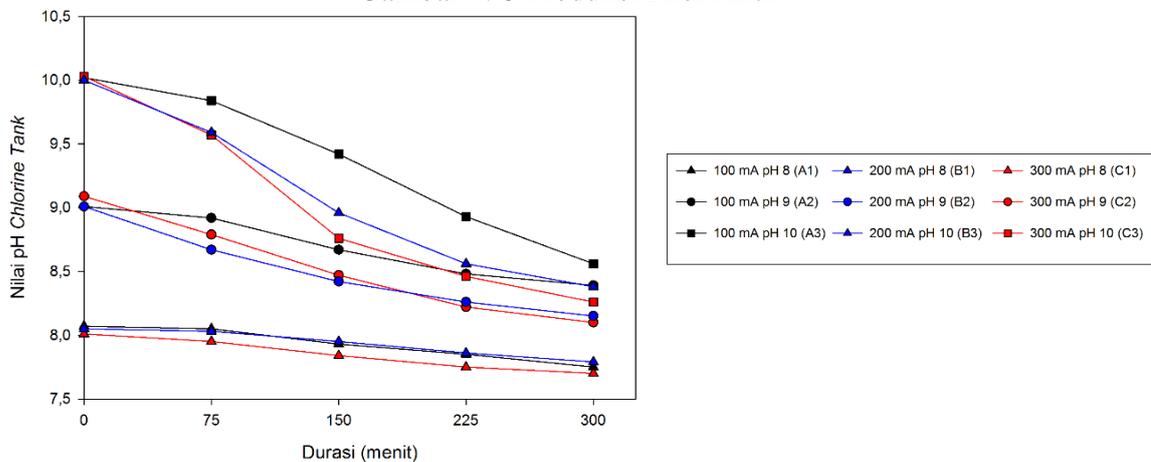
4.2.2 Pembentukan Klorin

Reaksi oksidasi pada kompartemen anoda selain menghasilkan oksigen akan menghasilkan klorin. Reaksi oksidasi klorin terjadi dikarenakan keberadaan ion klorida yang berasal dari kompartemen air limbah domestik. Yusuf (2015) menunjukkan hasil total klorin dari proses elektrodialisis lima kompartemen dan kerapatan arus $2,5 \text{ A/m}^2$ selama 36 jam sebesar $50,83 \text{ mg/L}$. Senyawa klorin yang dihasilkan dipengaruhi oleh pH larutan. Nilai pH dari proses yang berjalan dapat menjadi petunjuk mengenai spesies klorin yang terbentuk selama proses elektrodialisis. Analisis klorin dilakukan dengan melihat konsentrasi klor aktif yang ada pada larutan. Klor aktif ialah klor bebas yang tersedia dan mempunyai daya disinfeksi dengan wujud asam hipoklorit (HOCl) dan ion hipoklorit (OCl^-) (Said, 2007). Tren pembentukan klorin pada *chlorine tank* setiap variasi dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.

Khelifa *et al.* (2004) menunjukkan bahwa semakin besar kerapatan arus yang diterapkan pada proses elektrolisis, semakin besar pula konsentrasi klor aktif yang terbentuk. Gambar 4.8 menunjukkan konsentrasi klor aktif yang dihasilkan paling besar pada variasi kuat arus 300 mA pH 10 yaitu $11,5 \text{ mg/L}$. Konsentrasi klor aktif pada variasi yang lain menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan. Variasi dengan konsentrasi klor aktif paling rendah yaitu kuat arus 200 mA pH 10 sebesar $6,50$. Hasil konsentrasi klor aktif yang didapat pada penelitian ini tidak sejalan dengan semakin besarnya kerapatan arus. Hal ini dapat dikarenakan tingkat fluktuasi konsentrasi klorida awal dari masing-masing variasi. Hal-hal yang mempengaruhi tingkat produksi klorin pada proses elektrolisis meliputi kerapatan arus, konsentrasi larutan elektrolit, dan waktu operasi (Khelifa *et al.*, 2004).

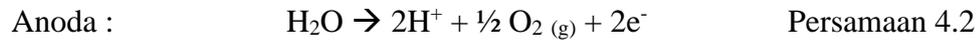


Gambar 4. 8 Produksi Klor Aktif

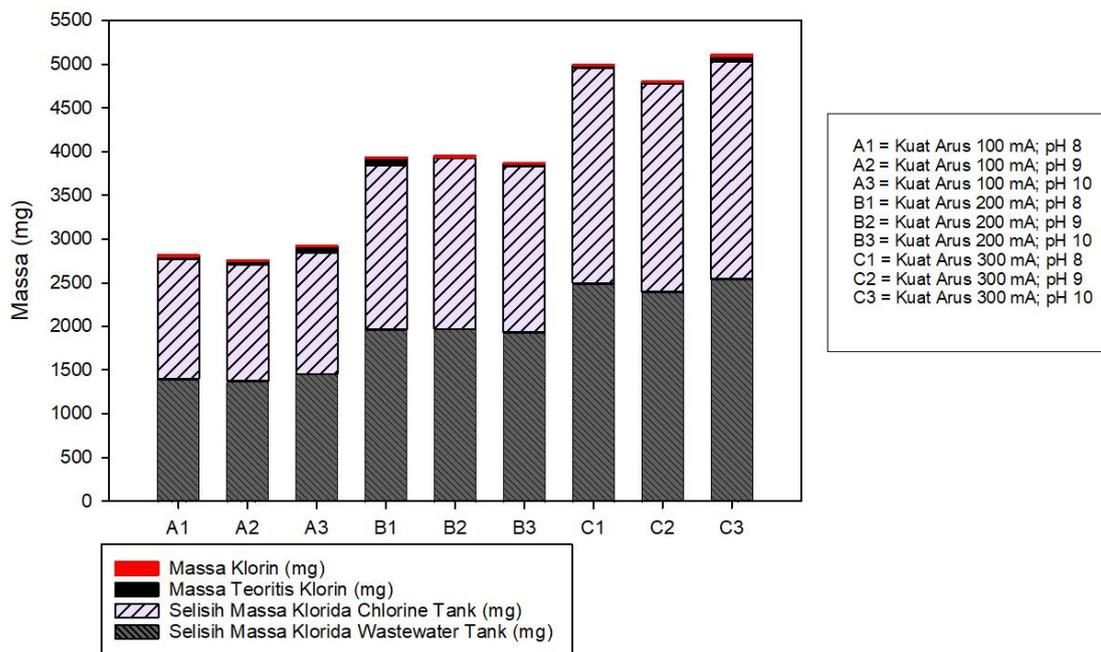


Gambar 4. 9 Perubahan pH pada *Chlorine Tank*

Perubahan nilai pH pada *chlorine tank* seiring berjalannya proses elektrodialisis dapat dilihat pada Gambar 4.9. Penurunan pH larutan selama reaksi elektrolisis berlangsung disebabkan munculnya ion H^+ sebagai produk dari proses oksidasi pada anoda, dengan persamaan sebagai berikut.



Jika merujuk pada Gambar 2.2 tentang bentuk klorin berdasarkan pH, dapat diperkirakan spesies klorin yang terbentuk pada masing-masing variasi dengan melihat pH akhir dari proses elektrodialisis. Variasi dengan pH akhir paling tinggi ialah variasi kuat arus 100 mA pH 10 yaitu sebesar 8,56 dimana rentang tersebut menunjukkan kehadiran klorin berupa ion hipoklorit (OCl^-) dengan persentase di atas 90%. Sedangkan yang paling rendah ada pada variasi kuat arus 300 mA pH 8 sebesar 7,70 yang mengindikasikan spesies klorin yang terbentuk berupa senyawa asam hipoklorit ($HOCl$) dan ion hipoklorit (OCl^-), dengan rasio 50%:50%.



Gambar 4. 10 *Mass Balance* Klorida pada Akhir Proses

Ion klorida (Cl^-) yang berpindah dan teroksidasi menjadi klorin pada proses elektrodialisis diamati untuk melihat *mass balance* ion klorida selama proses yang dapat dilihat pada Gambar 4.10. Ion klorida pada air limbah domestik akan mengalami penurunan dikarenakan berpindahnya ion tersebut menuju kompartemen yang berisi larutan elektrolit dengan dibantu membran penukar ion. Sehingga di akhir proses kandungan ion klorida pada larutan elektrolit akan menjadi kaya akan ion klorida. Selain itu juga terjadi proses oksidasi oleh anoda terhadap ion klorida yang terkandung pada larutan elektrolit menjadi senyawa klorin. Massa klorin teoritis didapat melalui pengurangan perubahan rasio klorida pada *wastewater tank* dengan rasio klorida *chlorine tank*. Kemudian selisih yang didapat dikalikan dengan massa klorida awal pada *wastewater tank* sebelum elektrodialisis. Dari perhitungan tersebut didapatkan selisih massa klorida yang memiliki kemungkinan telah teroksidasi menjadi klorin pada anoda, sehingga dianggap sebagai massa klorin teoritis. Reaksi oksidasi klorida menjadi klorin sebagai berikut.



4.2.3 Kebutuhan Energi

Setelah menerapkan proses elektrodialisis menggunakan pengaturan kuat arus dan pH pada air limbah domestik, kemudian dilakukan penentuan mengenai kondisi optimum operasi dalam menghasilkan klorin. Kondisi optimum ditentukan dengan melihat konsumsi energi spesifik dan dibandingkan dengan massa klorin yang dihasilkan. Kemudian akan dilihat hasil perhitungan paling kecil, yang menunjukkan adanya potensi penambahan waktu operasi agar didapatkan target konsentrasi klorin yang diinginkan. Hasil bagi kebutuhan energi dan massa klorin di akhir proses pada setiap variasi dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4. 3 Kebutuhan Energi Proses Elektrodialisis terhadap Produksi Klorin

Variasi	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Konsentrasi Klor Aktif (mg/L)	Kebutuhan Energi Produksi Klorin (Wh/mg)
Kuat Arus 100 mA pH 8 (A1)	2,62	7,5	0,349
Kuat Arus 100 mA pH 9 (A2)	2,39	7,9	0,303
Kuat Arus 100 mA pH 10 (A3)	3,10	8,8	0,352
Kuat Arus 200 mA pH 8 (B1)	10,03	7,73	1,298
Kuat Arus 200 mA pH 9 (B2)	10,54	8,25	1,277
Kuat Arus 200 mA pH 10 (B3)	10,93	6,50	1,681
Kuat Arus 300 mA pH 8 (C1)	11,24	7,65	1,469
Kuat Arus 300 mA pH 9 (C2)	12,51	8,95	1,397
Kuat Arus 300 mA pH 10 (C3)	13,18	11,5	1,146

Konsentrasi klorin paling besar ditunjukkan pada variasi kuat arus 300 mA pH 10 yaitu sebesar 11,5 mg/L, namun kebutuhan energi untuk memproduksi klorin pada variasi ini cukup besar yaitu 1,146 Wh/mg. Sedangkan hasil bagi kebutuhan energi dan produksi klorin paling kecil ditunjukkan pada variasi kuat arus 100 mA pada pH 8 dan 9 berturut-turut sebesar 0,349 Wh/mg dan 0,303 Wh/mg. Sehingga variasi kuat arus 100 mA pH 8 dan 9 dilakukan kembali dengan menambah waktu operasi selama 8 jam yang bertujuan untuk meningkatkan konsentrasi klorin yang terbentuk pada larutan elektrolit. Hasil yang didapat setelah waktu operasi elektrodialisis pada variasi pH 8 dan 9 diperpanjang dibandingkan pada variasi dengan konsentrasi klorin tertinggi setelah melalui proses elektrodialisis selama 5 jam yaitu variasi kuat arus 300 mA pH 10. Berikut merupakan perbandingan variasi A1 dan A2 yang diperpanjang terhadap variasi C3 dengan waktu operasi 5 jam.

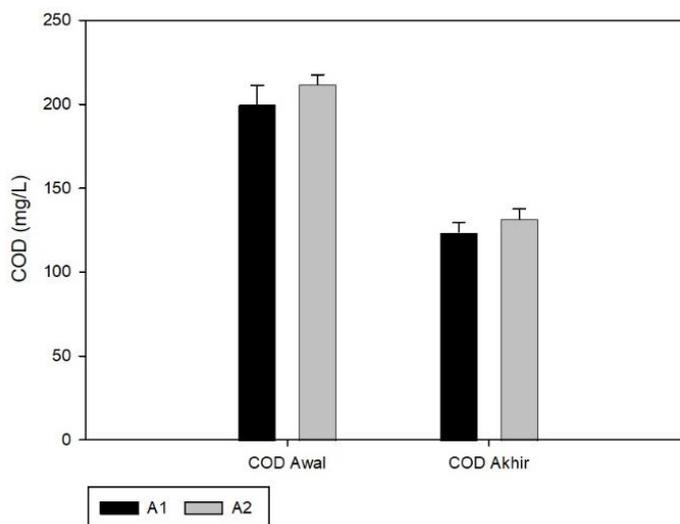
Tabel 4. 4 Konsentrasi Klor Aktif dan pH setelah Proses Elektrodialisis Diperpanjang

Variasi	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Persentase Removal Klorida	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Kebutuhan Energi Produksi Klorin (Wh/mg)	pH
Waktu Operasi 5 jam					
Kuat Arus 300 mA pH 10 (C3)	13.18	62,19%	11.5	1.146	8.26
Waktu Operasi 8 jam (diperpanjang)					
Kuat Arus 100 mA pH 8 (A1)	15,504	40.22%	16,8	0.923	7,42
Kuat Arus 100 mA pH 9 (A2)	10,569	47.18%	14,7	0.719	7,99

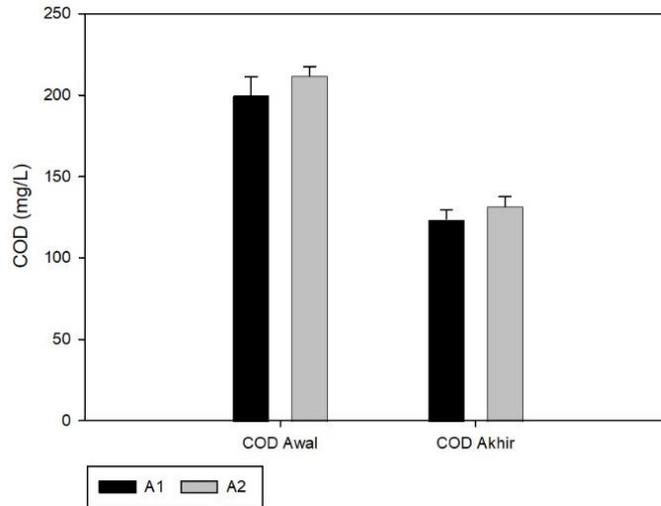
Pretz *et al.*, (1999) mendapatkan bahwa besar kuat arus yang dialiri selama 1 jam untuk menghasilkan 1 miligram klorin pada kerapatan arus 1,5; 3,75; dan 8 mA/cm² berturut-turut sebesar 8; 11; 13 Ah/mg. Hasil yang sama didapatkan pada penelitian ini berupa tren peningkatan kebutuhan energi dalam memproduksi klorin seiring meningkatnya kerapatan arus yang ditunjukkan pada Tabel 4.3. Kebutuhan energi dalam memproduksi klorin variasi A1 dan A2 dengan waktu operasi yang diperpanjang tetap menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan variasi C3. Meskipun begitu konsentrasi klorin yang diperoleh pada variasi A1 dan A2 menunjukkan hasil yang lebih besar dibanding C3. Nilai pH pada variasi A1 sebesar 7,42 yang mengindikasikan kandungan senyawa klorin berupa asam hipoklorit (HOCl) dan ion hipoklorit (OCl⁻) dengan perbandingan sebesar 50%:50%. pH akhir variasi A2 sebesar 7,99 yang menunjukkan senyawa klorin yang dominan berupa ion hipoklorit (OCl⁻) yaitu sekitar 75%. Sedangkan, variasi C3 yang dioperasikan dengan waktu operasi lebih singkat memiliki pH akhir sebesar 8,26 dengan senyawa klorin yang dominan berupa ion hipoklorit (OCl⁻) sekitar 85%.

4.2.4 Pemanfaatan Klorin Hasil Elektrodialisis terhadap Air Limbah Domestik

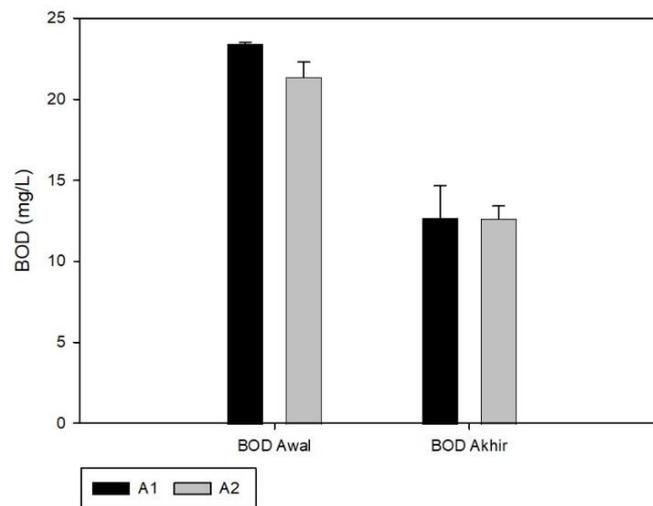
Pemanfaatan klorin dilakukan dengan menambahkan larutan elektrolit setelah melewati proses elektrodialisis pada air limbah domestik. Hal ini dilakukan untuk melihat potensi penurunan kandungan organik pada air limbah domestik dengan memanfaatkan klorin hasil dari elektrodialisis. Pengaruh klorinasi diamati dengan melihat perubahan karakteristik air limbah domestik yang meliputi parameter TSS, COD, dan BOD. Proses klorinasi dilakukan dengan metode pembubuhan *two-step chlorination* (TSC) rasio 5:1 dan interval waktu 50 detik. Klorin hasil dari masing-masing variasi diatur sehingga konsentrasinya menjadi 15 mg/L. Perubahan kualitas air limbah dapat dilihat pada Gambar 4.11, Gambar 4.12, dan Gambar 4.13. Data berupa tabel dapat dilihat pada Lampiran C.13 hingga Lampiran C.15.



Gambar 4. 11 Perubahan TSS Sebelum dan Setelah Klorinasi



Gambar 4. 12 Perubahan COD Sebelum dan Setelah Klorinasi



Gambar 4. 13 Perubahan BOD Sebelum dan Setelah Klorinasi

Islami *et al.* (2019) melakukan klorinasi pada air limbah domestik menggunakan teknik pembubuhan yang sama yaitu *Two-step Chlorination* (TSC) dan mendapatkan persentase penyisihan BOD dan COD berturut-turut sebesar 53% dan 35%. Pada percobaan klorinasi dalam penelitian ini didapatkan bahwa parameter TSS mengalami penurunan sebesar 25,93% untuk air limbah dari variasi A1 dan sebesar 33,33% untuk air limbah dari variasi A2. Penurunan pada parameter BOD terjadi sebesar 45,70% untuk air limbah variasi A1 dan 40,77% untuk air limbah variasi A2. Parameter COD menunjukkan penurunan sebesar 38,00% pada air limbah variasi A1 dan 37,74% pada air limbah variasi A2. Perubahan nilai parameter yang berkaitan dengan kandungan organik dalam air limbah terjadi karena reaksi oksidasi oleh klor bebas. Penurunan konsentrasi BOD lebih besar pada klorinasi dengan menggunakan klorin variasi A1. Hal ini dikarenakan persentase senyawa klorin berupa asam hipoklorit (HOCl) pada variasi A1 lebih besar dibandingkan A2 jika ditinjau dari pH larutan. Teknik pembubuhan secara TSC juga berperan dalam memberikan ketersediaan klor bebas yang lebih banyak pada air yang hendak diolah, dikarenakan klorinasi tahap pertama akan menghasilkan kloramin sebagai *secondary disinfectant* (Islami *et al.*, 2019).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini antara lain:

1. Air limbah domestik PT ITDC NU memiliki karakteristik yaitu pH 6,11, TDS 742 mg/L, klorida (Cl^-) 673 mg/L, TSS 50 mg/L, BOD 19,73 mg/L, dan COD 168 mg/L.
2. Kondisi optimum ditunjukkan oleh variasi kuat arus 100 mA dan pH 8 dengan waktu operasi selama 8 jam dapat menyisihkan kandungan klorida pada air limbah domestik yang telah ditambahkan konsentrasi klorida 2800 mg/L sebesar 40,22%, serta menghasilkan klor aktif 16,8 mg/L dengan pH akhir 7,42. Nilai pH akhir larutan pada variasi ini menunjukkan bahwa senyawa klorin berupa asam hipoklorit (HOCl) dan ion hipoklorit (OCl^-) dengan perbandingan 50%:50%. Persentase senyawa klorin berupa HOCl pada variasi ini lebih besar dibanding variasi lain yang menunjukkan potensi disinfeksi lebih baik pada air limbah domestik.
3. Pembubuhan klorin dari proses elektrodialisis pada air limbah domestik menunjukkan penurunan pada parameter TSS sebesar 25,93-33,33%; parameter BOD sebesar 40,77-45,70%; dan parameter COD sebesar 37,74-38,00%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada pengoperasian elektrodialisis untuk menyisihkan klorida yaitu dengan melakukan pembersihan membran AEM dan CEM yang telah digunakan dengan merendam membran pada *Chemical Cleaning Agents* (CCA), untuk mencegah endapan ataupun kotoran pada membran. Selain itu juga perlu dilakukannya penyaringan pada air limbah domestik yang akan diolah, agar tidak menurunkan kualitas membran tersebut serta tidak menyebabkan interferensi. Kemudian, karakteristik air limbah domestik terutama rasio parameter BOD dan COD juga perlu dipertimbangkan sebagai alasan dalam memilih elektrodialisis untuk mengolah air limbah tersebut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, R. (2004). *Kimia Lingkungan*. Penerbit Andi.
- Afrianita, R., Edwin, T., & Alawiyah, A. (2017). Total Dissolved Solids (Tds) Air Sumur Gali Di Kecamatan Padang Utara. *Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas*, 8(November 2015).
- Ahmed, F. E., Khalil, A., & Hilal, N. (2021). Emerging desalination technologies: Current status, challenges and future trends. *Desalination*, 517(July), 115183. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115183>
- Akhter, M., Habib, G., & Qamar, S. U. (2018). Application of Electrodialysis in Waste Water Treatment and Impact of Fouling on Process Performance. *Journal of Membrane Science & Technology*, 08(02). <https://doi.org/10.4172/2155-9589.1000182>
- Anglada, Á., Urriaga, A., & Ortiz, I. (2009). Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: Fundamentals and review of applications. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(12), 1747–1755. <https://doi.org/10.1002/jctb.2214>
- Bdiri, M., Dammak, L., Larchet, C., Hellal, F., Porozhnyy, M., Nevakshenova, E., Pismenskaya, N., & Nikonenko, V. (2019). Characterization and cleaning of anion-exchange membranes used in electrodialysis of polyphenol-containing food industry solutions; comparison with cation-exchange membranes. *Separation and Purification Technology*, 210(August 2018), 636–650. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.044>
- Bunani, S., Yörükoğlu, E., Sert, G., Yüksel, Ü., Yüksel, M., & Kabay, N. (2013). Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water. *Desalination*, 315, 33–36. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.015>
- Choi, E. Y., Choi, J. H., & Moon, S. H. (2003). An electrodialysis model for determination of the optimal current density. *Desalination*, 153(1–3), 399–404. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01134-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01134-7)
- Cloete, T. E., Thantsha, M. S., Maluleke, M. R., & Kirkpatrick, R. (2009). The antimicrobial mechanism of electrochemically activated water against *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* as determined by SDS-PAGE analysis. *Journal of Applied Microbiology*, 107(2), 379–384. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04233.x>
- Ding, R., Ding, Z., Chen, X., Fu, J., Zhou, Z., Chen, X., Zheng, X., Jin, Y., & Chen, R. (2021). Integration of electrodialysis and Donnan dialysis for the selective separation of ammonium from high-salinity wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 405(June 2020), 127001. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127001>
- Effendi, H. (2003). *Telaah Kualitas Air* (13th ed.). Kanisius.
- Elsaid, K., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S., Ramadan, M., & Olabi, A. G. (2020). Environmental impact of emerging desalination technologies: A preliminary evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104099. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104099>
- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2009). A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2245–2262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.011>

- Gally, C. R., Benvenuti, T., Da Trindade, C. D. M., Rodrigues, M. A. S., Zoppas-Ferreira, J., Pérez-Herranz, V., & Bernardes, A. M. (2018). Electrodialysis for the tertiary treatment of municipal wastewater: Efficiency of ion removal and ageing of ion exchange membranes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 5855–5869. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.052>
- Haribowo, R., Megah, S., & Rosita, W. (2019). Efisiensi Sistem Multi Soil Layering Pada Pengolahan Air Limbah Domestik Pada Daerah Perkotaan Padat Penduduk. *Jurnal Teknik Pengairan*, 10(1), 11–27. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2019.010.01.2>
- Hasan, A. (2006). Dampak Penggunaan Klorin. *Jurnal Teknik Lingkungan P3TL-BPPT*, 7(1), 90–96.
- Hernández, J., & Ruiz, D. (2021). Removal of chloride ions from a copper leaching solution, using electrodialysis, to improve the uranium extraction through ion-exchange. *Journal of Hazardous Materials*, 420(July). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126582>
- Huang, C., Xu, T., Zhang, Y., Xue, Y., & Chen, G. (2007). Application of electrodialysis to the production of organic acids: State-of-the-art and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 288(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.11.026>
- Ilyas, N. I., Nugraha, W. D., & Sumiyati, S. (2013). Penurunan Kadar TDS Pada Limbah Tahu Dengan Teknologi Biofilm Menggunakan Media Biofilter Kerikil Hasil Letusan Gunung Merapi Dalam Bentuk Random (studi kasus: Industri Tahu Jomblang Semarang). *Jurnal Tugas Akhir Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro*, 1–10.
- Islami, B. B., Priadi, C. R., Adityosulindro, S., & Abdillah, A. (2019). Wastewater Disinfection Efficiency Using One- Step and Two-Step Chlorination. *MATEC Web of Conferences*, 280, 05015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928005015>
- Jiang, C., Wang, Y., Zhang, Z., & Xu, T. (2014). Electrodialysis of concentrated brine from RO plant to produce coarse salt and freshwater. *Journal of Membrane Science*, 450, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.09.020>
- Khelifa, A., Moulay, S., Hannane, F., Benslimene, S., & Hecini, M. (2004). Application of an experimental design method to study the performance of electrochlorination cells. *Desalination*, 160(1), 91–98. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)90021-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)90021-5)
- Kustiyaningsih, E., & Irawanto, R. (2020). PENGUKURAN TOTAL DISSOLVED SOLID (TDS) DALAM FITOREMEDIASI DETERJEN DENGAN TUMBUHAN *Sagittaria lancifolia*. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 7(1), 143–148. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2020.007.1.18>
- La Cerva, M., Gurreri, L., Tedesco, M., Cipollina, A., Ciofalo, M., Tamburini, A., & Micale, G. (2018). Determination of limiting current density and current efficiency in electrodialysis units. *Desalination*, 445(June), 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.028>
- Lindasari, S., Rudiyanisya., Utomo, K. P. (2017). Penentuan Kapasitas Adsorpsi Ion Klorida (Cl-) Pada Pasir Kuarsa Terlapis Mangan Oksida Dan Kaolin Teraktivasi HCl. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 6(1), 8–16.
- Lindstrand, V., Sundström, G., & Jönsson, A. S. (2000). Fouling of electrodialysis

- membranes by organic substances. *Desalination*, *128*(1), 91–102. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00026-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00026-6)
- Luque Di Salvo, J., Cosenza, A., Tamburini, A., Micale, G., & Cipollina, A. (2018). Long-run operation of a reverse electro dialysis system fed with wastewaters. *Journal of Environmental Management*, *217*, 871–887. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.110>
- Mehdizadeh, S., Yasukawa, M., Abo, T., Kakihana, Y., & Higa, M. (2019). Effect of spacer geometry on membrane and solution compartment resistances in reverse electro dialysis. *Journal of Membrane Science*, *572*, 271–280. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.09.051>
- Mohammadi, S., & Ebadi, T. (2021). Production of a water disinfectant by membrane electrolysis of brine solution and evaluation of its quality change during the storage time. *Arabian Journal of Chemistry*, *14*(2), 102925. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102925>
- Nakayama, A., Sano, Y., Bai, X., & Tado, K. (2017). A boundary layer analysis for determination of the limiting current density in an electro dialysis desalination. *Desalination*, *404*, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.013>
- Nataraj, S. K., Hosamani, K. M., & Aminabhavi, T. M. (2007). Potential application of an electro dialysis pilot plant containing ion-exchange membranes in chromium removal. *Desalination*, *217*(1–3), 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.012>
- Pretz, J., Korngold, E., & Kedem, O. (1999). A chlorine-free anode for electro dialysis. *Separation and Purification Technology*, *15*(2), 147–152. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(98\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(98)00093-8)
- Riyanto. (2013). *Elektrokimia dan Aplikasinya*. Graha Ilmu.
- Said, N. I. (2007). Disinfeksi Untuk Proses Pengolahan Air Minum. *Jurnal Air Indonesia*, *3*(1), 15–28. <https://doi.org/10.29122/jai.v3i1.2314>
- Strathmann, H. (2004). *Assessment of Electro dialysis water desalination process cost*.
- Strathmann, H. (2010). Electro dialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, *264*(3), 268–288. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.069>
- Suryawan, I. W. K. (2018). Fitoremediasi cod, fosfat, dan amonia air limbah domestik bersalinitas dengan eceng gondok (*eichhornia crassipes*). *Jurnal Riset Kajian Teknologi Dan Lingkungan (JRKTL)*, *1*(2), 95–100.
- Sutrisna, P. D. (2002). Bipolar Membrane Elektro dialisis: Teknologi Atraktif untuk Produksi Asam dan Basa. *Unitas*, *10*(2), 33–44.
- Tanaka, Y. (2010). *Ion Exchange Membrane Electro dialysis : Fundamentals, Desalination, Separation*. Nova Science.
- Vital, B., Torres, E. V., Sleutels, T., Gagliano, M. C., Saakes, M., & Hamelers, H. V. M. (2021). Fouling fractionation in reverse electro dialysis with natural feed waters demonstrates dual media rapid filtration as an effective pre-treatment for fresh water. *Desalination*, *518*(July). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115277>
- Wang, L., Bassiri, M., Najafi, R., Najafi, K., Yang, J., Khosrovi, B., Hwong, W., Barati, E.,

- Belisle, B., Celeri, C., & Robson, M. C. (2007). Hypochlorous acid as a potential wound care agent: part I. Stabilized hypochlorous acid: a component of the inorganic armamentarium of innate immunity. *Journal of Burns and Wounds*, 6, e5. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17492050><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC1853323>
- Wen, T., Solt, G. S., & Gao, D. W. (1996). Electrical resistance and coulomb efficiency of electro dialysis (ED) apparatus in polarization. *Journal of Membrane Science*, 114(2), 255–262. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(96\)00005-1](https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00005-1)
- Xu, T. (2005). Ion exchange membranes: State of their development and perspective. *Journal of Membrane Science*, 263(1–2), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.05.002>
- Yusuf, E., Rachmanto, T. A., & Laksmono, R. (2009). Pengolahan Air Payau Menjadi Air Bersih dengan Menggunakan Membrae Reverse Osmosis. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan UPN Surabaya*, 1(1).
- Yusuf, I. D. Y. Y. (2015). *Recovery Garam dari Air Konsentrat Reverse Osmosis Menggunakan Elektrodialisis dengan Variasi Rapat Arus dan Jumlah Kompartemen*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Zhang, Y., Ghyselbrecht, K., Vanherpe, R., Meesschaert, B., Pinoy, L., & Van der Bruggen, B. (2012). RO concentrate minimization by electro dialysis: Techno-economic analysis and environmental concerns. *Journal of Environmental Management*, 107, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.020>

LAMPIRAN A

PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM

A.1 Pengukuran pH

- a. Alat
 - pH meter
 - Botol sampel
- b. Bahan
 - Sampel air limbah dan larutan elektrolit
- c. Prosedur kerja
 - 1) Mengambil sampel air limbah dan larutan elektrolit dan menempatkannya pada masing-masing botol sampel.
 - 2) Membersihkan alat pH meter menggunakan aquades.
 - 3) Mengatur parameter yang akan diukur pada alat agar menjadi pH.
 - 4) Mencelupkan batang pH meter pada sampel.
 - 5) Menunggu hasil hingga terdapat keterangan pengukuran telah selesai pada alat pH meter.

A.2 Pengukuran *Total Dissolved Solids* (TDS)

- a. Alat
 - pH ion lab
 - Botol sampel
- b. Bahan
 - Sampel air limbah dan larutan elektrolit
- c. Prosedur kerja
 - 1) Mengambil sampel air limbah dan larutan elektrolit dan menempatkannya pada masing-masing botol sampel.
 - 2) Membersihkan alat pH ion lab menggunakan aquades.
 - 3) Mengatur parameter yang akan diukur pada alat agar menjadi TDS.
 - 4) Mencelupkan batang pH meter pada sampel.
 - 5) Menunggu hasil hingga terdapat keterangan pengukuran telah selesai pada alat pH ion lab.

A.3 Analisis *Total Suspended Solid* (TSS)

- a. Alat
 - Cawan porselen
 - Furnace
 - Oven
 - *Vacuum filter*
 - Desikator
 - Neraca analitik
- b. Bahan
 - Sampel air limbah
 - Kertas saring
- c. Prosedur kerja
 - 1) Memasukkan cawan porselen pada furnace 550°C selama 1 jam, kemudian memasukkan cawan pada oven selama 15 menit.

- 2) Memasukkan kertas saring ke dalam oven 105°C selama 1 jam.
- 3) Mendinginkan cawan porselen dan kertas saring dengan meletakkannya ke dalam desikator selama 15 menit.
- 4) Menimbang berat dari cawan porselen dan kertas saring menggunakan neraca analitik (e mg)
- 5) Meletakkan kertas saring yang telah ditimbang pada *vacuum filter*.
- 6) Menuangkan 25 mL sampel air limbah di atas filter yang telah dipasang pada *vacuum filter*, dan mencatat volume sampel (g mL).
- 7) Mensaring sampel air limbah hingga airnya kering dan kertas filter kering.
- 8) Memasukkan kertas saring dan cawan porselen ke dalam oven 105°C selama 1 jam.
- 9) Mendinginkan kertas saring dan cawan porselen ke dalam desikator selama 15 menit.
- 10) Menimbang berat bertas saring dan cawan porselen menggunakan neraca analitik (f mg).
- 11) Menghitung jumlah padatan tersuspensi menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Total padatan tersuspensi} = \frac{(f-e) \times 1000 \times 1000}{g}$$

e = berat awal cawan dan kertas saring

f = berat akhir cawan dan kertas saring setelah dioven 105°C

g = volume sampel (mL)

A.4 Analisis *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)

a. Alat

- 1 buah labu ukur berukuran 1 L
- 2 botol winkler 300 mL
- 2 botol winkler 150 mL
- Aerator
- Drum atau ember
- Inkubator
- Labu ukur 500 mL
- Pipet 10 mL dan 5 mL
- Gelas ukur 100 mL
- Buret
- Erlenemeyer 250 mL

b. Bahan

- Larutan buffer fosfat
Larutkan ke dalam labu ukur 1 L yang berisi 500 mL aquades, 8,5 g KH_2PO_4 , 21,75 g K_2HPO_4 , 33,4 g $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan 1,7 g NH_4Cl . Setelah itu mengencerkan larutan menggunakan aquades hingga menjadi 1 L. Kemudian mengatur pH larutan hingga menjadi 7,2 menggunakan asam HCl atau basa NaOH 0,1 atau 1N.
- Larutan magnesium sulfat
Larutkan ke dalam labu ukur 1 L yang berisi 500 mL aquades, 22,5 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan mengencerkannya menggunakan aquades hingga 1 L.
- Larutan kalium klorida
Larutkan ke dalam labu ukur 1 L yang berisi 500 mL aquades, 27,5 g CaCl_2 dan mengencerkannya dengan aquades hingga 1 L.
- Larutan feri klorida

Larutkan ke dalam labu ukur 1 L yang berisi 500 mL aquades, 0,25 FeCl₃. 6H₂O dan mengencerkannya dengan aquades hingga 1 L.

- Larutan Basa NaOH atau KOH dan asam HCl atau H₂SO₄ 1N untuk menetralkan pH sampel air limbah hingga nilai pH berada di rentang 7,0-7,6.
- Bubuk inhibitor nitrifikasi
- Benih (*inoculum, seed*)
Ambil 10 g tanah subur, yang dapat ditanami, tidak mengandung pestisida, pH antara 6 hingga 7,5. Selanjutnya mencampurkan tanah tersebut dengan 100 mL sampel air limbah yang akan diuji. Menyimpan suspensi tersebut selama 1 hari pada temperatur 20°C dalam inkubator gelap.

c. Prosedur kerja

Pembuatan Air Pengencer

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

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

Prosedur BOD

- 1) Menentukan pengenceran.

Untuk menganalisa BOD harus diketahui besarnya pengenceran melalui KMnO₄ sebagai berikut:

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

- 2) Prosedur BOD dengan winkler.
 - a) Siapkan 1 buah labu ukur 500 mL dan tuangkan sampel sesuai dengan perhitungan pengenceran, tambahkan air pengencer sampai batas labu.
 - b) Siapkan 2 buah botol Winkler 300 mL dan 2 buah botol Winkler 150 mL.
 - c) Tuangkan air dalam labu takar tadi kedalam botol Winkler 300 mL dan 150 mL sampai tumpah.
 - d) Tuangkan air pengencer ke botol Winkler 300 mL dan 150 mL sebagai blanko sampai tumpah.
 - e) Masukkan kedua botol Winkler 300 mL ke dalam inkubator 20°C selama 5 hari.
 - f) Kedua botol Winkler 150 mL yang berisi air dianalisa oksigen terlarutnya dengan prosedur sebagai berikut.
 - Tambahkan 1 mL larutan mangan sulfat
 - Tambahkan pereaksi oksigen
 - Botol ditutup dengan hati-hati agar tidak ada gelembung udaranya lalu balik-balikkan beberapa kali.
 - Biarkan gumpalan mengendap selama 5-10 menit
 - Tambahkan 1 mL asam sulfat pekat, tutup dan balik-balikkan.
 - Tuangkan 100 mL larutan ke dalam erlenmeyer 250 mL.
 - Titrasi dengan larutan Natrium Tiosulfat 0,0125 N sampai warna menjadi coklat muda.

- Tambahkan 3-4 tetes indikator amilum dan titrasi dengan Natrium Tiosulfat hingga warna biru hilang.
- g) Setelah 5 hari, analisa kedua larutan dalam botol Winkler 300 mL dengan analisa oksigen terlarut.
- h) Hitung Oksigen Terlarut dan BOD dengan rumus berikut:

$$\text{OT (mg O}_2\text{/L)} = \frac{a \times N \times 8000}{100 \text{ mL}}$$

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

$$P = \frac{\text{mL sampel}}{\text{volume hasil pengenceran (500 mL)}}$$
 - X_0 = oksigen terlarut sampel pada $t = 0$
 - X_5 = oksigen terlarut sampel pada $t = 5$
 - B_0 = oksigen terlarut blanko pada $t = 0$
 - B_5 = oksigen terlarut blanko pada $t = 5$
 - P = derajat pengenceran

A.5 Analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD)

a. Alat

- Tabung COD
- Rak COD
- Erlenmeyer 250 mL 2 buah
- Erlenmeyer 100 mL
- Pipet tetes 1 buah
- Pipet 10 mL dan 5 mL
- Gelas ukur 25 mL
- *Beaker glass* 50 mL
- Kompor listrik

b. Bahan

- Larutan Kalium Dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0,1 N
- Kristal Perak Sulfat (Ag_2SO_4) dicampur dengan Asam Sulfat (H_2SO_4)
- Kristal Merkuri Sulfat (Hg_2SO_4)
- Larutan Standart Fero Amonium Sulfat 0,05 N
- Larutan Indikator Fenantrolin Fero Sulfat (Feroin)

c. Prosedur kerja

- 1) Menuangkan 1 mL sampel air limbah pada masing-masing erlenmeyer dimana salah satu tabung akan digunakan sebagai blanko.
- 2) Menambahkan Hg_2SO_4 sebanyak $\frac{1}{4}$ bagian spatula.
- 3) Menambahkan 2 mL larutan Kalium Dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 0,1 N.
- 4) Menambahkan larutan campuran Ag_2SO_4 dan H_2SO_4 sebanyak 4 mL.
- 5) Mengalirkan air pendingin pada kondensor kemudian memasang erlenmeyer.
- 6) Menyalakan alat pemanas dan refluks larutan selama 2 jam.
- 7) Mendinginkan erlenmeyer dengan cara dibiarkan kemudian dilepas.
- 8) Melepaskan erlenmeyer dari kondensor dan menunggu hingga dingin.
- 9) Menambahkan indikator feroin sebanyak 1 tetes.
- 10) Memindahkan sampel yang ada pada tabung COD ke erlenmeyer 100 mL.
- 11) Melakukan titrasi menggunakan larutan standart FAS 0,05 N, hingga warna biru-hijau berubah menjadi merah-coklat permanen.

12) Hitung COD dengan rumus berikut.

$$\text{COD (mg O}_2\text{/L)} = \frac{(A-B) \times n \times 8000}{\text{Volume sampel}} \times P \times f$$

- a = FAS titrasi blanko (mL)
- b = FAS titrasi sampel (mL)
- N = normalitas larutan FAS
- F = faktor (20: titran blanko kedua)
- P = pengenceran

A.6 Analisis Klorida

a. Alat

- Erlenmeyer 100 mL
- Sendok spatula
- Pipet 10 mL
- Buret
- *Beaker glass*

b. Bahan

- Larutan Perak Nitrat (AgNO_3) 1/35,45 N
Melarutkan 4,7945 g AgNO_3 dalam labu pengencer 1 L larutan aquades.
- Larutan Kalium kromat (K_2CrO_4) 10%
Melarutkan 10 g K_2CrO_4 dalam labu pengencer 100 mL larutan aquades.
- Faktor koreksi AgNO_3
 - Melarutkan 1,6485 g NaCl dengan larutan aquades dalam labu ukur sampai tanda batas.
 - Mengambil 10 mL larutan NaCl dengan pipet volumetrik, lalu dimasukkan ke dalam beaker glass.
 - Menambahkan 3 tetes HNO_3 pekat, 3 tetes K_2CrO_4 10%, dan 1 sendok spatula bubuk MgO atau ZnO.
 - Menitrasinya dengan larutan AgNO_3 1/35,45 hingga warna kuningnya berubah warna menjadi merah bata.
 - Menghitung nilai faktor koreksi AgNO_3 dengan persamaan berikut :
 - Faktor koreksi $\text{AgNO}_3 = 10 / \text{mL titrasi } \text{AgNO}_3$
 - Nilai faktor tersebut sebagai nilai koreksi untuk menghitung Cl^- (mg/L) pada akhir prosedur analisis klorida.

c. Prosedur kerja

- 1) Mengambil sampel air limbah dan larutan elektrolit sebanyak 25 mL dan menuangkan pada erlenmeyer 100 mL.
- 2) Menambahkan 0,5 mL K_2CrO_4 10%.
- 3) Menambahkan bubuk MgO sebanyak 1 sendok spatula.
- 4) Menitrasi dengan titran AgNO_3 hingga warna berubah menjadi merah bata.
- 5) Menghitung nilai Cl^- menggunakan rumus berikut.

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

- A = mL titrasi
- f = faktor koreksi
- V = volume sampel

A.7 Analisis Klor Aktif

a. Alat

- Erlenmeyer 100 mL
- Sendok spatula
- Pipet 5 mL
- Buret

b. Bahan

- Sampel larutan elektrolit
- Asam asetik (glacial) yang pekat
- Kristal kalium iodida
- Larutan standar Natrium Tiosulfat 0,0125 N
- Indikator amilum

c. Prosedur kerja

- 1) Mengambil erlenmeyer 100 mL dan mengisi dengan 25 mL sampel larutan elektrolit
- 2) Menambahkan 2,5 mL asam asetik glacial.
- 3) Menambahkan kurang lebih 1 gram kristal KI.
- 4) Menambahkan 3 tetes indikator amilum kemudian muncul warna biru.
- 5) Menitrasi dengan larutan standart Natrium Tiosulfat 0,0125 N sampai warna biru berubah menjadi jernih yang pertama.

LAMPIRAN B

PROSEDUR PENGATURAN PH

B.1 Pembuatan Larutan Standar

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ pekat} &= \frac{\% \times \text{berat jenis} \times 100}{\text{berat molekul}} \\ &= \frac{97\% \times 1,94 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \times 100}{98,08} \\ &= 18,2 \text{ M} \end{aligned}$$

Pengenceran larutan induk

Rumus yang digunakan ialah $V_1 M_1 = V_2 M_2$

Dimana:

V_1 = Volume larutan induk yang dibutuhkan

M_1 = Molaritas larutan induk

V_2 = Volume larutan yang akan dibuat

M_2 = Molaritas larutan yang akan dibuat

Pembuatan larutan NaOH

$$\text{Molaritas} = \frac{n}{V}$$

$$n = \frac{m}{Mr \text{ NaOH}}$$

NaOH 1 N → mengambil 4 g NaOH dan melarutkannya ke dalam 100 mL aquades.

B.2 Perhitungan Penambahan Volume Asam/Basa

Rumus yang digunakan ialah $V_1 M_1 = V_2 M_2$

Dimana:

V_1 = Volume larutan induk yang dibutuhkan

M_1 = Molaritas larutan induk

V_2 = Volume larutan yang akan dibuat

M_2 = Molaritas larutan yang akan dibuat

Contoh perhitungan untuk 7 L air limbah domestik pH 8,79 yang akan diberikan variasi berupa pengaturan pH menjadi 6 menggunakan larutan standar H_2SO_4 0,005 M. Volume asam yang perlu ditambahkan pada air limbah perlu dihitung dengan cara sebagai berikut.

$$\text{pH} = 6 \rightarrow \text{H}^+ = 10^{-6} \text{ M}$$

$$\text{pH} = 8,79 \rightarrow \text{H}^+ = 10^{-8,79} \text{ M}$$

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

$$V_1 \times 0,005 \text{ M} = 7 \text{ L} \times (10^{-6} \text{ M} - 10^{-8,79} \text{ M})$$

$$V_1 = \frac{7 \text{ L} \times (10^{(-6)} \text{ M} - 10^{(-8,79)} \text{ M})}{0,005 \text{ M}}$$

$$V_1 = 0,001 \text{ L} \sim 1 \text{ mL}$$

Jadi, untuk mengatur pH menjadi 6 diperlukan larutan H_2SO_4 0,005 M sebanyak 1 mL

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C

ANALISIS DAN PERHITUNGAN

Tabel C.1 Perubahan Konsentrasi Klorida dan Persentase Removal Klorida Berdasarkan Penambahan Larutan NaCl

Durasi (jam)	Konsentrasi Klorida (mg/L)				
	Penambahan 1	Penambahan 2	Penambahan 3	Penambahan 4	Penambahan 5
0	1280	1730	1960	2200	2380
2	470	510	710	740	708
Persentase Penyisihan	63,28%	70,52%	63,78%	66,36%	70,25%

Tabel C.2 Perubahan Voltase pada Setiap Konsentrasi Klorida setelah Penambahan Larutan NaCl

Durasi (jam)	Voltase (V)				
	Penambahan 1	Penambahan 2	Penambahan 3	Penambahan 4	Penambahan 5
0	15,9	29	21,6	30,4	32
2	23,6	45,2	29,15	38,7	40,8

Tabel C.3 Konsentrasi TDS dan Klorida pada Kedua *Reservoir Tank* serta Parameter Klorin di *Chlorine Tank* pada Penelitian Pendahuluan Waktu Operasi

Durasi (menit)	<i>Wastewater tank</i>		<i>Chlorine tank</i>		
	TDS (mg/L)	Klorida (mg/L)	TDS (g/L)	Klorida (mg/L)	Klorin (mg/L)
0	1706	2280	3,75	0	0
150	423	1140	4,54	1050	9,95
300	52	140	5,11	2180	17,05

Tabel C.4 Hasil Analisis Variasi A1 (Kuat Arus 100 mA; pH 8)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank										Chlorine Tank								
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)
0	0.00	1702	1.00	7.29	2020	3989.5	596.5	1.00	0.00	3.65	0.89	8.07	0	0	567.875	0.00	0	0.00	0.00	0.00
75	0.60	1596	0.94	7.36	1740	3393	293.75	0.85	0.15	3.85	0.94	8.05	295	567.875	519.625	0.14	5.95	11.45	0.01	28.63
150	1.24	1530	0.90	7.48	1610	3099.25	154.25	0.78	0.22	3.93	0.96	7.93	580	1087.5	171.75	0.27	6.55	12.28	-0.05	-197.25
225	1.91	1487	0.87	7.58	1550	2945	357.5	0.74	0.26	4.01	0.98	7.85	690	1259.25	107.5	0.32	7.35	13.41	-0.05	-214.75
300	2.62	1340	0.79	7.63	1380	2587.5		0.65	0.35	4.11	1.00	7.75	770	1366.75		0.34	7.5	13.31	0.01	35.25

Tabel C.5 Hasil Analisis Variasi A2 (Kuat Arus 100 mA; pH 9)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank										Chlorine Tank								
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)
0	0.00	1611	1.00	7.52	1930	3811.75	652.75	1.00	0.00	3.81	0.91	9.01	0	0	471.625	0.00	0	0.00	0.00	0.00
75	0.55	1530	0.95	7.66	1620	3159	136.75	0.83	0.17	3.94	0.94	8.92	245	471.625	540.875	0.12	5.8	11.17	0.05	181.13
150	1.13	1399	0.87	7.81	1570	3022.25	172.25	0.79	0.21	3.97	0.95	8.67	540	1012.5	246.75	0.27	6.55	12.28	-0.06	-223.00
225	1.75	1380	0.86	7.84	1500	2850	412.5	0.75	0.25	3.98	0.95	8.48	690	1259.25	72	0.33	7.5	13.69	-0.08	-297.50
300	2.39	1310	0.81	7.94	1300	2437.5		0.64	0.36	4.17	1.00	8.39	750	1331.25		0.35	7.9	14.02	0.01	43.00

Tabel C.6 Hasil Analisis Variasi A3 (Kuat Arus 100 mA; pH 10)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank									Chlorine Tank									
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)
0	0.00	1734	1.00	7.59	2000	3950	498.5	1.00	0.00	3.69	0.89	10.02	0	0	741.125	0.00	0	0.00	0.00	0.00
75	0.71	1535	0.89	7.68	1770	3451.5	352.25	0.87	0.13	3.8	0.91	9.84	385	741.13	383.875	0.19	4.3	8.28	-0.06	-242.63
150	1.47	1504	0.87	7.79	1610	3099.25	249.25	0.78	0.22	3.86	0.93	9.42	600	1125	152.5	0.28	5.75	10.78	-0.07	-274.25
225	2.26	1408	0.81	7.93	1500	2850	356.25	0.72	0.28	4.04	0.97	8.93	700	1277.5	107	0.32	7	12.78	-0.04	-177.50
300	3.10	1312	0.76	7.98	1330	2493.75		0.63	0.37	4.16	1.00	8.56	780	1384.5		0.35	8.8	15.62	0.02	71.75

Tabel C.7 Hasil Analisis Variasi B1 (Kuat Arus 200 mA; pH 8)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank									Chlorine Tank									
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)
0	0.00	1666	1.00	7.8	2000	3950	752	1.00	0.00	3.73	0.86	8.05	0	0	702.625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	2.31	1470	0.88	7.61	1640	3198	406.75	0.81	0.19	3.81	0.88	8.03	365	702.625	403.625	0.18	4.55	8.76	0.01	49.37
150	4.75	1240	0.74	7.68	1450	2791.25	549.25	0.71	0.29	3.95	0.91	7.95	590	1106.25	335.5	0.28	6.55	12.28	0.01	52.50
225	7.32	1093	0.66	7.77	1180	2242	254.5	0.57	0.43	4.06	0.94	7.86	790	1441.75	439.75	0.37	6.78	12.36	0.07	266.25
300	10.03	919	0.55	7.75	1060	1987.5		0.50	0.50	4.32	1.00	7.79	1060	1881.5		0.48	7.73	13.71	0.02	81.00

Tabel C.8 Hasil Analisis Variasi B2 (Kuat Arus 200 mA; pH 9)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank										Chlorine Tank									
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)	
0	0.00	1689	1.00	7.85	1880	3713	495.5	1.00	0.00	3.8	0.88	9.01	0	0	789.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	2.43	1462	0.87	7.85	1650	3217.5	715	0.87	0.13	3.95	0.91	8.67	410	789.25	560.75	0.21	4.88	9.38	-0.08	-293.75	
150	4.99	1245	0.74	7.97	1300	2502.5	488.5	0.67	0.33	4.09	0.95	8.42	720	1350	329	0.36	5.55	10.41	-0.04	-139.50	
225	7.68	952	0.56	8.07	1060	2014	270.25	0.54	0.46	4.16	0.96	8.26	920	1679	273.5	0.45	7.65	13.96	0.01	20.00	
300	10.54	812	0.48	8.15	930	1743.75		0.47	0.53	4.32	1.00	8.15	1100	1952.5		0.53	8.25	14.64	0.00	16.75	

Tabel C.9 Hasil Analisis Variasi B3 (Kuat Arus 200 mA; pH 10)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank										Chlorine Tank									
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (g)	Δmassa Klorida (g)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (g)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)	
0	0.00	1615	1.00	7.91	1880	3713	554	1.00	0.00	3.74	0.86	10	0	0	664.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	2.52	1441	0.89	7.93	1620	3159	579.5	0.85	0.15	3.89	0.90	9.59	345	664.125	648.375	0.18	5.00	9.63	-0.03	-110.13	
150	5.17	1259	0.78	7.98	1340	2579.5	375.5	0.69	0.31	3.98	0.92	8.96	700	1312.5	238.75	0.35	5.60	10.50	-0.05	-179.00	
225	7.97	1088	0.67	8.07	1160	2204	422.75	0.59	0.41	4.16	0.96	8.56	850	1551.25	348	0.42	6.20	11.32	-0.01	-42.25	
300	10.93	945	0.59	8.21	950	1781.25		0.48	0.52	4.33	1.00	8.38	1070	1899.25		0.51	6.50	11.54	0.01	32.50	

Tabel C.10 Hasil Analisis Variasi C1 (Kuat Arus 300 mA; pH 8)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank									Chlorine Tank									
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)
0	0.00	1720	1.00	6.9	2040	4029	694.5	1.00	0.00	3.86	0.83	8.01	0	0	1020.25	0.00	0	0	0.00	0.00
75	2.59	1492	0.87	6.98	1710	3334.5	581.75	0.83	0.17	4.07	0.88	7.95	530	1020.25	770.375	0.25	3.8	7.315	-0.08	-325.75
150	5.32	1200	0.70	7.05	1430	2752.75	681.75	0.68	0.32	4.21	0.91	7.84	955	1790.625	435.875	0.44	4.9	9.1875	-0.13	-514.38
225	8.20	975	0.57	7.15	1090	2071	533.5	0.51	0.49	4.46	0.96	7.75	1220	2226.5	240.75	0.55	5.35	9.76375	-0.07	-268.50
300	11.24	690	0.40	7.24	820	1537.5		0.38	0.62	4.63	1.00	7.7	1390	2467.25		0.61	7.65	13.57875	0.01	24.25

Tabel C.11 Hasil Analisis Variasi C2 (Kuat Arus 300 mA; pH 9)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank									Chlorine Tank									
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)
0	0.00	1707	1.00	6.93	2020	3989.5	713.5	1.00	0.00	3.84	0.84	9.09	0	0	952.875	0.00	0	0.00	0.00	0.00
75	2.88	1478	0.87	6.83	1680	3276	427	0.82	0.18	4.09	0.90	8.79	495	952.875	809.625	0.24	4.8	9.24	-0.06	-239.38
150	5.92	1266	0.74	6.94	1480	2849	645	0.71	0.29	4.26	0.93	8.47	940	1762.5	445.75	0.44	5.1	9.56	-0.16	-622.00
225	9.12	985	0.58	7.01	1160	2204	610.25	0.55	0.45	4.32	0.95	8.22	1210	2208.25	170.25	0.55	6.85	12.50	-0.11	-422.75
300	12.51	718	0.42	7.19	850	1593.75		0.40	0.60	4.56	1.00	8.1	1340	2378.5		0.60	8.95	15.89	0.00	17.25

Tabel C.12 Hasil Analisis Variasi C3 (Kuat Arus 300 mA; pH 10)

Durasi (menit)	Konsumsi Energi Spesifik (Wh/L)	Wastewater Tank									Chlorine Tank									
		TDS (mg/L)	TDS Akhir/TDS Awal	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida akhir/Klorida Awal	Δrasio Klorida	TDS (g/L)	TDS Awal/TDS Akhir	pH	Konsentrasi Klorida (mg/L)	Massa Klorida (mg)	Δmassa Klorida (mg)	Klorida Akhir/Klorida Awal	Konsentrasi Klorin (mg/L)	Massa Klorin (mg)	Δrasio Klorida	Massa Teoritis Klorin (mg)
0	0.00	1698	1.00	6.73	2010	3969.75	810.75	1.00	0.00	3.81	0.82	10.03	0	0	1087.625	0.00	0	0.00	0.00	0.00
75	3.04	1468	0.86	6.94	1620	3159	406.25	0.80	0.20	4.05	0.87	9.57	565	1087.625	562.375	0.27	7.75	14.92	-0.07	-276.88
150	6.24	1192	0.70	7.29	1430	2752.75	833.75	0.69	0.31	4.2	0.91	8.76	880	1650	558.25	0.42	8.75	16.41	-0.11	-433.00
225	9.62	931	0.55	7.33	1010	1919	494	0.48	0.52	4.48	0.97	8.46	1210	2208.25	276.75	0.56	11.2	20.44	-0.04	-157.50
300	13.18	641	0.38	7.35	760	1425		0.36	0.64	4.63	1.00	8.26	1400	2485		0.63	11.5	20.41	0.02	59.75

Tabel C.13 Parameter TSS Sebelum dan Setelah Proses Klorinasi

Variasi	Konsentrasi TSS (mg/L)		Persentase Penyisihan (%)
	Awal	Akhir	
A1	27 ± 1.414	20 ± 2.828	25,93
A2	54 ± 5.657	36 ± 2.828	33,33

Tabel C.14 Parameter BOD Sebelum dan Setelah Proses Klorinasi

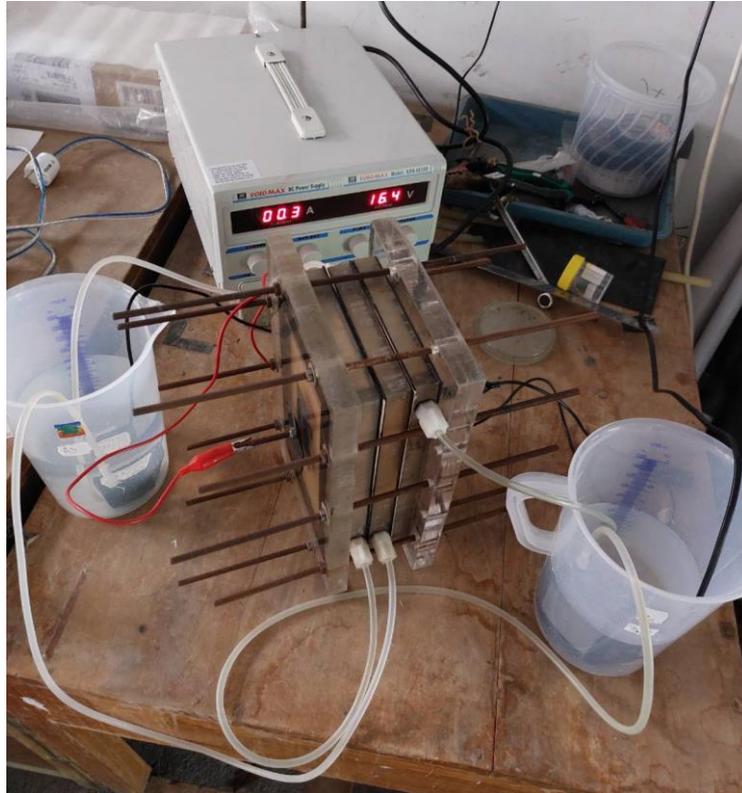
Variasi	Konsentrasi BOD (mg/L)		Persentase Penyisihan (%)
	Awal	Akhir	
A1	23,45 ± 0,071	12,73 ± 1,935	45,70
A2	21,40 ± 0,919	12,67 ± 0,742	40,77

Tabel C.15 Parameter COD Sebelum dan Setelah Proses Klorinasi

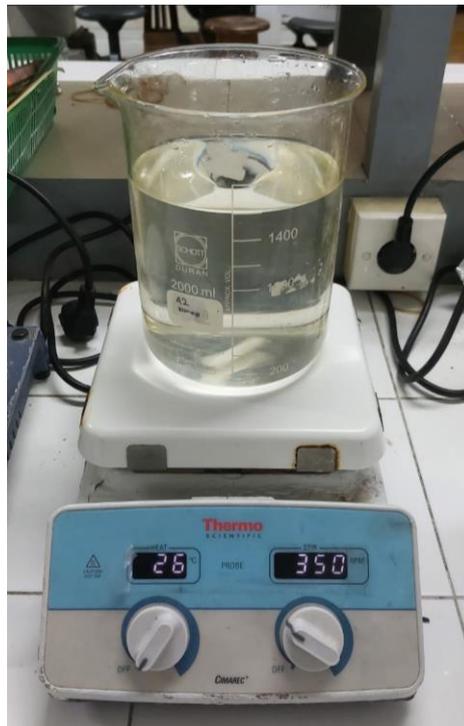
Variasi	Konsentrasi COD (mg/L)		Persentase Penyisihan (%)
	Awal	Akhir	
A1	205 ± 11,314	124 ± 5,657	38,00
A2	212 ± 5,657	132 ± 5,657	37,74

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN D DOKUMENTASI PENELITIAN



Gambar D.1 Pengoperasian Reaktor Elektrodialisis



Gambar D.2 Proses Klorinasi pada Air Limbah Domestik



Gambar D.3 Chlorine Tank (kiri) dan Wastewater Tank (kanan)



Gambar D.4 Titik Akhir Titrasi Uji Klorida



Gambar D.5 Larutan Uji Klorin yang Telah Dianalisis

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Bonifasius Mahardhika Trihandono dilahirkan di Jayapura pada tanggal 17 Agustus 2000. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD YPPK Gembala Baik Jayapura pada tahun 2006-2012. Kemudian melanjutkan pendidikan menengah tingkat pertama di SMP YPPK Santo Paulus Jayapura pada tahun 2012-2015 dan pendidikan menengah atas di SMA Kolese Santo Yusup Malang pada tahun 2015-2018. Penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 03211840000048.

Selama masa kuliah, penulis aktif dalam beberapa kegiatan kemahasiswaan seperti kepanitiaan dan organisasi. Penulis pernah terlibat dalam kepengurusan komunitas *Environmental Engineering English Club* (EEEC) HMTL ITS sebagai staf divisi *International Affairs* pada periode kepengurusan 2019/2020 serta *Society of Petroleum Engineer* (SPE) ITS *Student Chapter* sebagai staf divisi *Science Course* periode kepengurusan 2019/2020. Penulis dapat dihubungi melalui email bonifasiusmt@gmail.com.



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Bonifasius Mahardhika Trihandono
NRP : 03211840000048
Judul : *Proses Elektrodialisis untuk Penyisihan Klorida dan Pemanfaatannya Sebagai Disinfektan pada Air Limbah Domestik Kawasan Pesisir*

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	11 Februari 2022	Pembahasan mengenai perbaikan mengenai metode serta teknik penulisan pada proposal	
2	7 Maret 2022	Pembahasan mengenai persiapan pelaksanaan penelitian dalam Tugas Akhir	
3	16 Maret 2022	Pembahasan mengenai rencana menambah prosedur yaitu menambah konsentrasi Cl ⁻ pada air limbah menggunakan larutan NaCl	
4	17 Maret 2022	Pembahasan lanjutan mengenai rencana menambah prosedur yaitu menambah konsentrasi Cl ⁻ pada air limbah menggunakan larutan NaCl	
5	1 April 2022	Pembahasan mengenai penelitian pendahuluan untuk menentukan konsentrasi Cl ⁻ yang akan ditambahkan pada penelitian utama	
6	20 April 2022	Pembahasan mengenai hasil penelitian pendahuluan untuk menentukan konsentrasi Cl ⁻ yang akan ditambahkan pada penelitian utama	
7	22 April 2022	Pembahasan mengenai rencana pengerjaan Tugas Akhir untuk mengantisipasi laboratorium yang tutup karena libur lebaran	
8	9 Mei 2022	Pembahasan mengenai laporan Tugas Akhir untuk persiapan sidang kemajuan	
9	13 Mei 2022	Pembahasan mengenai laporan Tugas Akhir untuk persiapan sidang kemajuan	
10	14 Mei 2022	Pembahasan mengenai hal-hal yang perlu diperbaiki pada laporan Tugas Akhir menjelang sidang kemajuan	
11	20 Mei 2022	Pembahasan mengenai penulisan laporan Tugas Akhir setelah sidang kemajuan	
12	26 Mei 2022	Pembahasan mengenai visualisasi data penelitian Tugas Akhir	
13	21 Juni 2022	Pembahasan mengenai finalisasi laporan Tugas Akhir	

Surabaya, 24 Juni 2022
Dosen Pembimbing

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



UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

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

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022
Pukul : 14.15 - 15.30 WIB
Lokasi : TL-106
Judul : Proses Elektrodialisis untuk Penyisihan Klorida dan Pemanfaatannya Sebagai Disinfektan pada Air Limbah Domestik Kawasan Pesisir
Nama : Bonifasius Mahardhika Trihandono
NRP. : 0321184000048
Topik : Penelitian

Nilai TOEFL 490

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1.	Kesalahan ketik
1.	Redaksional kalimat tujuan :- Sinkronkan tujuan & kesimpulan.
1.	Pembersihan membran - skala besar?
1.	Tambahkan pustaka ttg. membran ionik (AEM & CEM).
1.	Cek pustaka (konsistensi daftar pustaka)
1.	

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

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

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

Dosen Pembimbing

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



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

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

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022
Pukul : 14.15 - 15.30 WIB
Lokasi : TL-106
Judul : Proses Elektrodialisis untuk Penyisihan Klorida dan Pemanfaatannya Sebagai Disinfektan pada Air Limbah Domestik Kawasan Pesisir
Nama : Bonifasius Mahardhika Trihandono
NRP. : 0321184000048
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Tambahkan sumber limbah domestik
2.	Perubahan BOD dan COD setelah proses

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
Ervin Nurhayati, ST, MT, Ph.D

()

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

()



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

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

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022
Pukul : 14.15 - 15.30 WIB
Lokasi : TL-106
Judul : Proses Elektrodialisis untuk Penyisihan Klorida dan Pemanfaatannya Sebagai Disinfektan pada Air Limbah Domestik Kawasan Pesisir
Nama : Bonifasius Mahardhika Trihandono
NRP. : 0321184000048
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Perbaiki tulisan
2.	Pembahasan ditambahkan
3.	Penambahan bahasan dan pustaka diperbaiki

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 IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D

()

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

()



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)

Periode: Genap 2021/2022

No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Jumat, 8 Juli 2022

Pukul : 14.15 - 15.30 WIB

Lokasi : TL-106

Judul : Proses Elektrodialisis untuk Penyisihan Klorida dan Pemanfaatannya Sebagai Disinfektan pada Air Limbah Domestik Kawasan Pesisir

Nama : Bonifasius Mahardhika Trihandono

NRP. : 0321184000048

Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Agar dijelaskan kembali pada hal 7. Ion Cl^- pada $NaCl$ tidak beracun. Tapi pada fosgen ($COCl_2$) sangat beracun. Benarkah Cl pada fosgen merupakan <u>ion</u> ? lihat lagi kalimat tsb
2.	Kesimpulan 1 tidak sesuai dgn tujuan \rightarrow termeter mana yang berkaitan dgn. <u>elutis</u> ? yg pada kesimpulan hanya karakteristk sj. Perbaiki!
3.	Saran: mengapa membran AEM & CEM hrs diucii dgn. aquades. Dalam penerapannya juga harus dgn. <u>ahades</u> ? Mahal!
4.	hal 9: CEM & AEM hanya dijelaskan <u>sepintas</u> . Jelaskan mekanisme kerja CEM & AEM. Muatan \oplus & \ominus pada membran berasal dari mana? Apa bedanya dgn. membran biasa? Renghasi tinjauan pustaka ttg CEM & AEM
5.	Jelaskan kriteria air limbah yang dapat diolah dgn. elektrodialisis seperti yg. <u>bersih</u> .

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

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

Dosen Penguji

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

Dosen Pembimbing

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

(JampS)
(Ar)