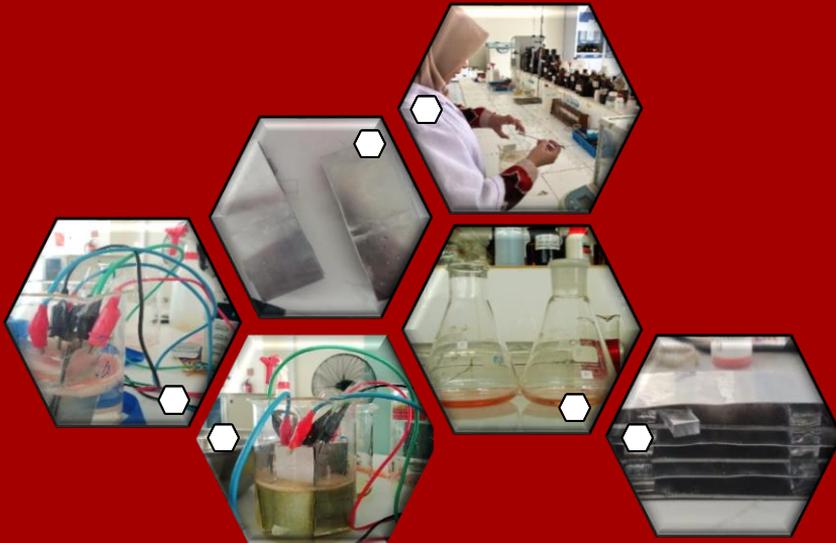


**ANALISIS PENGARUH JENIS ELEKTRODA DAN WAKTU KONTAK
PADA PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI TEKSTIL
MENGUNAKAN METODE ELEKTROFLOTASI**



**RANI ANGRAENI
D131201011**



**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**ANALISIS PENGARUH JENIS ELEKTRODA DAN WAKTU KONTAK
PADA PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI TEKSTIL
MENGUNAKAN METODE ELEKTROFLOTASI**

**RANI ANGRAENI
D131201011**



**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**ANALISIS PENGARUH JENIS ELEKTRODA DAN WAKTU KONTAK
PADA PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI TEKSTIL
MENGUNAKAN METODE ELEKTROFLOTASI**

RANI ANGRAENI

D131201011

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Teknik Lingkungan

pada

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI

ANALISIS PENGARUH JENIS ELEKTRODA & WAKTU KONTAK PADA PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI TEKSTIL MENGGUNAKAN METODE ELEKTROFLOTASI

RANI ANGRAENI
D131201011

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada 10 September 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:

Pembimbing tugas akhir,



Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.
NIP. 197506232015042001

Mengetahui:

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr.Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., AER.
NIP. 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul **“Analisis Pengaruh Jenis Elektroda dan Waktu Kontak pada Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil Menggunakan Metode Elektroflotasi”** adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 10 September 2024



Rani Angraeni
NIM D131201011

UCAPAN TERIMA KASIH

Maha Besar Allah Subhanahu Wata'ala dengan segala keagungan dan kekuasaannya yang telah memberikan kesehatan dan kesempatan hingga pada hari ini, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul "Analisis Pengaruh Jenis Elektroda dan Waktu Kontak pada Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil Menggunakan Metode Elektrolisis". Sholawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah SAW., yang telah membawa umat manusia dari alam kegelapan ke masa yang cerah seperti saat sekarang ini.

Penelitian yang penulis lakukan dapat terlaksana dengan sukses serta dapat terampungkan dalam bentuk tugas akhir ini atas bimbingan, diskusi, dan arahan dari Ibu Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T. selaku dosen pembimbing. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak/Ibu dosen serta karyawan dan staf Departemen Teknik Lingkungan yang telah memberikan banyak pengetahuan kepada penulis selama bangku perkuliahan.

Teruntuk teman-teman Lingkungan 2020 serta ENTITAS 2021, penulis berterima kasih atas segala cerita dan pengalaman yang kalian berikan kepada penulis selama menjalani dinamika perkuliahan. Serta kepada seluruh pihak yang membantu selama penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian.

Tugas akhir ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, Alm. Mappiare, S.Pd. dan Rosdiana, S.Pd. yang senantiasa memberikan dukungan, baik secara finansial dan moral, mendidik dan menyayangi, serta senantiasa mendoakan dan memberikan nasehat kepada penulis. Terima kasih terdalem penulis persembahkan kepada Mama dan Bapak. Berkat bimbingan kalian penulis dapat menyadari pentingnya pendidikan yang menjadi sumber semangat penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis,
Rani Angraeni

ABSTRAK

RANI ANGRAENI. **Analisis pengaruh jenis elektroda dan waktu kontak pada pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan metode elektroflotasi** (dibimbing oleh Roslinda Ibrahim).

Latar Belakang. Peningkatan populasi meningkatkan kebutuhan air bersih dan volume air limbah, dengan industri tekstil sebagai salah satu penyumbang pencemaran melalui limbah cair yang dihasilkannya. Penanganan pencemaran air menjadi semakin penting untuk menjaga ketersediaan air bersih. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi efektivitas metode elektroflotasi dalam mengurangi pencemar dalam air limbah industri tekstil. **Metode.** Pengolahan dilakukan dengan sistem *batch* menggunakan tegangan listrik 25 Volt, dengan variasi jenis elektroda dan waktu kontak sebagai variabel bebas. Elektroda yang digunakan meliputi kombinasi anoda aluminium dengan katoda stainless steel (E1) dan anoda aluminium dengan katoda besi (E2), serta variasi waktu kontak selama 30 menit (T1), 50 menit (T2), dan 70 menit (T3). **Hasil.** Karakteristik awal limbah meliputi warna 300 Pt-Co dan total krom 13,958 mg/L. Kombinasi elektroda aluminium-besi dengan waktu kontak 70 menit (E2T3) mencapai efisiensi tertinggi dalam penyisihan warna (85,42%) dan total krom (71,12%), meskipun hasilnya belum sesuai dengan baku mutu. Ditemukan juga bahwa gas O₂ dan H₂ berdampak negatif terhadap konsentrasi parameter warna dan krom total. **Kesimpulan.** Proses elektroflotasi dengan variasi elektroda dan waktu kontak yang digunakan dapat menyisihkan parameter warna dan krom total dalam air limbah industri tekstil.

Kata Kunci: Air limbah industri tekstil; elektroflotasi; variasi elektroda; waktu kontak; gelembung gas

ABSTRACT

RANI ANGRAENI. **Analysis of the effect of electrode types and contact time on textile industry wastewater treatment using electroflotation method** (Supervised Roslinda Ibrahim).

Background. The increase in population has led to a higher demand for clean water and an increased volume of wastewater, with the textile industry being a significant contributor to pollution through the liquid waste it produces. Addressing water pollution has become increasingly important to maintain the availability of clean water. **Aim.** This study aims to identify the effectiveness of the electroflotation method in reducing pollutants in textile industry wastewater. **Method.** The treatment was carried out using a batch system with an electrical voltage of 25 Volts, with variations in electrode types and contact time as independent variables. The electrodes used include combinations of aluminum anode with stainless steel cathode (E1) and aluminum anode with iron cathode (E2), along with contact time variations of 30 minutes (T1), 50 minutes (T2), and 70 minutes (T3). **Results.** The initial wastewater characteristics included a color of 300 Pt-Co and total chromium of 13,958 mg/L. The results showed that electrode variations and contact time significantly influenced contaminant removal. The combination of aluminum-iron electrodes with a 70-minute contact time (E2T3) achieved the highest removal efficiency for color (85,42%) and total chromium (71,12%), although the results did not yet meet the quality standards. It was also found that O₂ and H₂ gases negatively affected the concentrations of color and total chromium parameters. **Conclusion.** The electroflotation process, utilizing variations in electrodes and contact time, can effectively remove color and total chromium parameters from textile industry wastewater.

Keywords: Textile industry wastewater; electroflotation; electrode variations; contact time; gas bubbles

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	.iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Teori	4
BAB II. METODE PENELITIAN.....	27
2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	27
2.2 Variabel Penelitian.....	27
2.3 Alat dan Bahan Penelitian	29
2.4 Populasi dan Sampel	32
2.5 Persiapan Penelitian	32
2.6 Pelaksanaan Penelitian dan Pengumpulan Data	34
2.7 Teknik Analisis Data	36
2.8 Diagram Alir Penelitian.....	40
BAB III. HASIL DAN PEMBAHASAN	41
3.1 Analisis Karakteristik Awal Air Limbah Industri Tekstil	41
3.2 Pengaruh Jenis Elektroda dan Waktu Kontak.....	41
3.3 Pengaruh Pembentukan Gas O ₂ dan H ₂	48
3.4 Efisiensi Metode Elektrolisis	58
BAB IV. KESIMPULAN DAN SARAN.....	62
4.1 Kesimpulan	62
4.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	64
LAMPIRAN	69

DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
1. Karakteristik dan komposisi air limbah industri tekstil	6
2. Baku mutu air limbah industri tekstil.....	7
3. Sifat fisis aluminium, stainless steel, dan besi	19
4. Studi penelitian terdahulu yang relevan	21
5. Matriks penelitian	28
6. Alat pengujian	30
7. Bahan pengujian	31
8. Metode pengujian sampel air limbah	35
9. Interpretasi nilai koefisien determinasi	39
10. Karakteristik awal air limbah industri tekstil.....	41
11. Hasil pengujian parameter warna pada tiap variasi pengolahan	42
12. Hasil uji statistik regresi linear berganda terhadap konsentrasi warna.....	45
13. Hasil pengujian parameter total krom pada tiap variasi pengolahan.....	46
14. Hasil uji statistik tiap variabel terhadap konsentrasi krom total	48
15. Arus, densitas listrik, dan mol elektron tiap variasi	49
16. Mol dan volume gas O ₂ tiap variasi elektroda dan waktu kontak	51
17. Mol dan volume gas H ₂ tiap variasi elektroda dan waktu kontak	52
18. Mol O ₂ dan H ₂ terhadap parameter warna	54
19. Analisis uji statistik hubungan mol gas terhadap parameter warna.....	54
20. Mol O ₂ dan H ₂ terhadap parameter krom total	56
21. Analisis uji statistik hubungan mol gas terhadap parameter krom total.....	56
22. Efisiensi elektrolisis pada pengolahan air limbah industri tekstil.....	59

DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
1. Polutan yang dihasilkan dari proses industri tekstil.....	5
2. Elektrolisis air.....	9
3. Proses elektroflotasi.....	11
4. Desain reaktor elektroflotasi.....	33
5. Proses elektroflotasi.....	35
6. Diagram alir penelitian	40
7. Pengaruh jenis elektroda dan waktu kontak pada parameter warna.....	44
8. Pengaruh jenis elektroda dan waktu kontak terhadap krom total	46
9. Mol gas O ₂ dan H ₂ yang terbentuk pada tiap variasi.....	53
10. Hubungan pembentukan gas O ₂ terhadap parameter warna.....	55
11. Hubungan pembentukan gas H ₂ terhadap parameter warna.....	55
12. Hubungan pembentukan gas O ₂ terhadap parameter krom total	57
13. Hubungan pembentukan gas H ₂ terhadap parameter krom total	58
14. Efisiensi pengolahan pada parameter warna	59
15. Efisiensi pengolahan pada parameter krom total	60

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor urut	Halaman
1. Baku Mutu Air Limbah Industri Tekstil	70
2. Metode Pengujian Sampel	71
3. Hasil Pengujian Sampel.....	73
4. Perhitungan Elektron dan Gas yang Dihasilkan dalam Pengolahan	74
5. Hasil Pengujian Statistik	76
6. Dokumentasi Penelitian	86

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan jumlah penduduk yang besar serta selalu meningkat setiap tahunnya. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS), jumlah penduduk Indonesia pada pertengahan 2023 mencapai 278,7 juta jiwa. Jumlah tersebut meningkat 1,05% dari tahun sebelumnya, yaitu pada pertengahan 2022 dimana jumlah penduduk Indonesia mencapai 275,77 juta jiwa. Peningkatan populasi penduduk pada suatu wilayah akan sejalan dengan peningkatan kebutuhan air. Kebutuhan air bersih yang meningkat akan sejalan dengan volume air limbah yang dihasilkan (Pratamadina & Wikaningrum, 2022).

Salah satu faktor yang berkontribusi pada pencemaran air adalah pola konsumsi masyarakat yang sejalan dengan produksi pangan, sandang, dan papan yang terus meningkat. Karena hal tersebut, urgensi penanganan pencemaran air menjadi hal yang sangat krusial terhadap keberlangsungan ketersediaan air bersih.

Industri tekstil merupakan contoh industri yang bergerak untuk memenuhi kebutuhan sandang masyarakat yang semakin meningkat. Industri tekstil dapat menghasilkan air limbah dengan jumlah besar yang dihasilkan dari proses produksi tekstil yang mengandung berbagai polutan organik dan anorganik. Air limbah tekstil biasanya terdiri dari bahan kimia sisa proses pencelupan, pencucian, dan pencetakan kain, serta zat warna, minyak, dan partikel padat tersuspensi.

Air limbah industri tekstil dicirikan oleh kandungan organik dan nilai COD yang tinggi serta warna yang pekat. Pada air limbah industri tekstil konsentrasi warna dapat mencapai 4.277,5 Pt-Co dan nilai COD sebesar 1.640 mg/L. Nilai tersebut melebihi standar peraturan baku mutu menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 tentang Baku Mutu Air Limbah. Karena hal tersebut parameter warna dan COD dapat disebut sebagai parameter kunci dalam air limbah industri tekstil (Dewi & Suseno, 2023; Rachmawati & Damayanti, 2013).

Tingginya konsentrasi warna sejalan dengan tingkat konsentrasi krom total dalam air limbah industri tekstil. Krom total dalam air limbah tekstil berasal dari proses pewarnaan, dimana logam berat digunakan untuk mengikat warna pada serat kain agar tidak mudah luntur. Konsentrasi total kromium dalam air limbah industri tekstil dapat mencapai 10 – 450 mg/L (Gani dkk., 2023; Álvarez-Ayuso & Nugteren, 2005). Karena hal tersebut, pewarna tekstil dalam air limbah mengandung senyawa kimia serta rantai senyawa yang panjang sehingga sulit terdegradasi dan sulit untuk diolah secara biologis (Rachmawati & Damayanti, 2013; Widayastuti dkk., 2020). Oleh karena itu, diperlukan pengolahan yang efektif dan efisien terhadap parameter warna dan krom total dalam air limbah industri tekstil sebelum dibuang ke lingkungan.

Pengolahan air limbah industri tekstil dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya dengan metode elektroflotasi. Elektroflotasi adalah metode dalam

pengolahan air limbah yang menggunakan gelembung yang dihasilkan oleh kedua elektroda untuk meningkatkan kontak yang efektif antara gelembung dan partikel sehingga menghasilkan efisiensi flotasi yang tinggi (Chen et al., 2002). Dengan kata lain proses elektroflotasi merupakan proses pengolahan air limbah dengan bantuan prinsip elektrokimia serta reaksi redoks yang terjadi antara kedua elektroda sehingga dapat menghasilkan gelembung untuk membantu peningkatan efisiensi flotasi.

Berdasarkan hasil penelitian Haryono (2021) proses elektroflotasi dapat menyisihkan parameter warna dalam air limbah industri tekstil hingga 93,3%. Penelitian lain yang dilakukan oleh Putri dkk. (2023), proses elektroflotasi dapat menyisihkan parameter logam berat seperti mangan (Mn) hingga 96% dan besi (Fe) hingga 100% pada air limbah asam tambang. Selain parameter fisika-kimia, proses elektroflotasi juga mampu menyisihkan parameter biologis dalam air limbah (Nathanael dkk., 2021).

Dari beberapa penelitian tersebut, telah terbukti bahwa proses elektroflotasi dapat menyisihkan polutan dalam suatu air limbah. Namun, penelitian mengenai penerapan metode elektroflotasi dalam pengolahan air limbah industri tekstil masih memerlukan pengembangan dan penelitian lebih lanjut. Hal ini disebabkan oleh adanya faktor-faktor lain yang perlu dipertimbangkan dalam metode elektroflotasi, seperti waktu kontak dan jenis elektroda yang digunakan.

Berdasarkan permasalahan di atas, maka diperlukan penelitian terkait "Analisis Pengaruh Jenis Elektroda dan Waktu Kontak pada Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil Menggunakan Metode Elektroflotasi" dalam skala laboratorium. Adapun parameter yang akan diolah terbatas pada parameter warna dan krom total.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik parameter dari air limbah industri tekstil?
2. Bagaimana pengaruh variasi waktu kontak dan pemilihan jenis elektroda terhadap efisiensi pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan metode elektroflotasi?
3. Berapa jumlah mol gas O_2 dan mol gas H_2 dan yang dibutuhkan untuk menurunkan parameter pencemar dalam air limbah industri tekstil menggunakan metode elektroflotasi?
4. Bagaimana efektivitas pengolahan air limbah industri tekstil dengan menggunakan metode elektroflotasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut

1. Mengetahui karakteristik parameter dari air limbah industri tekstil
2. Menganalisis pengaruh variasi waktu kontak dan pemilihan jenis elektroda terhadap efisiensi pengolahan air limbah industri tekstil menggunakan metode

elektroflotasi

3. Menganalisis pembentukan jumlah mol gas O₂ dan H₂ yang dibutuhkan untuk mengurangi parameter pencemar dalam air limbah industri tekstil
4. Menganalisis efektivitas pengolahan air limbah industri tekstil dengan menggunakan metode elektroflotasi

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut

1. Bagi penulis

Merupakan kontribusi dalam melaksanakan penelitian sebagai bagian dari kewajiban Tri Dharma Perguruan Tinggi serta merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi sarjana di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

2. Bagi Instansi Pendidikan

Menambah referensi ilmu pengetahuan khususnya pada bidang riset kualitas air, terutama terkait pengolahan air limbah industri tekstil dengan elektroflotasi. Diharapkan nantinya penelitian ini dapat menjadi acuan sehingga dapat dikembangkan oleh peneliti selanjutnya.

3. Bagi pelaku usaha

Sebagai salah satu alternatif pengolahan air limbah industri tekstil dalam usaha pengelolaan lingkungan. Dengan adanya penelitian ini, para pelaku usaha dapat menerapkan metode pengolahan air limbah industri tekstil yang tepat.

4. Bagi Masyarakat

Memberikan pengetahuan tentang air limbah industri tekstil dan elektroflotasi. sehingga dapat menumbuhkan kesadaran akan pentingnya pengolahan air limbah terutama air limbah industri tekstil.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup penelitian ialah sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan adalah penelitian eksperimental di laboratorium dengan menggunakan model sederhana pengolahan air limbah industri tekstil dengan metode elektroflotasi menggunakan sistem *batch*.
2. Sampel air limbah industri tekstil yang digunakan berupa air limbah industri tekstil *artificial* yang dibuat dengan menambahkan bahan-bahan sesuai dengan proses produksi industri tekstil agar menghasilkan sampel air limbah yang sesuai dengan kondisi awal air limbah industri tekstil.
3. Variasi yang akan digunakan adalah jenis ekektroda dan waktu kontak.
4. Parameter yang akan dianalisis sesuai dengan parameter dalam baku mutu air limbah industri tekstil dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 16 Tahun 2019, yaitu warna dan krom total.

1.6 Teori

1.6.1 Air limbah

Dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 7 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah, air limbah adalah sisa dari suatu usaha dan/atau kegiatan yang berwujud cair. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2022, air limbah adalah air yang berasal dari suatu proses dalam suatu kegiatan. Menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 58 Tahun 1995, limbah cair adalah semua bahan buangan yang berbentuk cair yang kemungkinan mengandung mikroorganisme patogen, bahan kimia beracun, dan radioaktivitas. Adapun dalam Rahmawan dkk. (2023), air limbah merupakan hasil dari suatu kegiatan manusia yang akhirnya disalurkan menuju drainase dan berakhir di badan air.

Bergantung pada asalnya, air limbah memiliki komposisi fisik, kimia, dan mikrobiologi yang berbeda. Dalam Tchobanoglous *et al.* (2004), sumber air limbah dikelompokkan menjadi tiga:

1. Air limbah domestik

Merupakan air limbah yang berasal dari usaha dan atau kegiatan pemukiman, rumah makan, perkantoran, perniagaan, apartemen, dan asrama. Air limbah domestik mengandung berbagai bahan antara lain: kotoran, urin, dan air bekas cucian yang mengandung deterjen, bakteri, dan virus.

2. Air limbah non-domestik

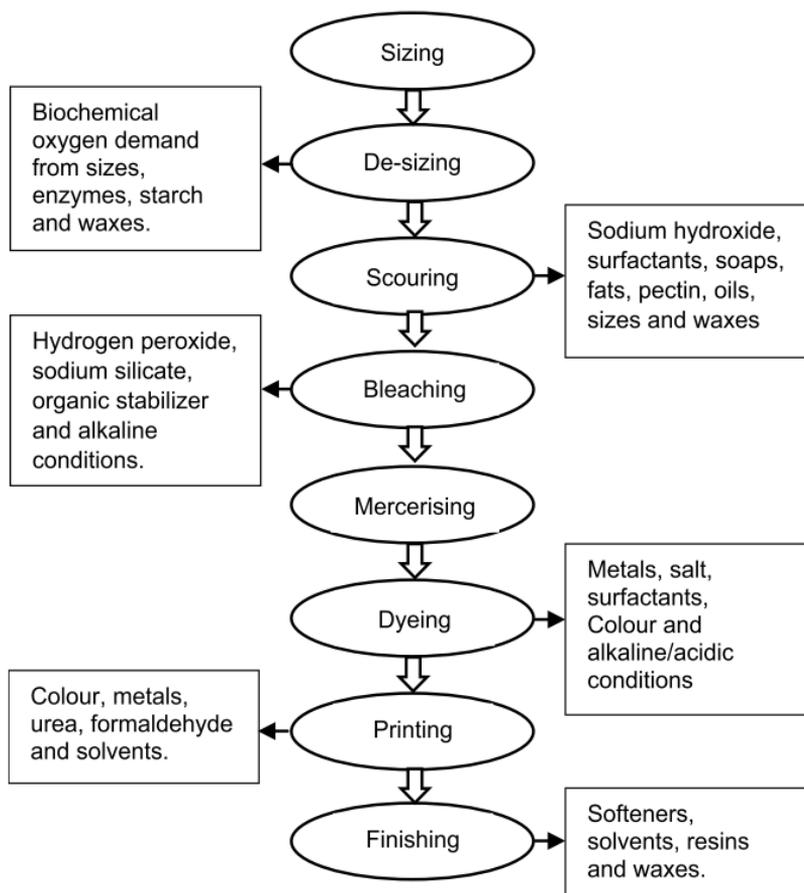
Air limbah jenis ini dihasilkan oleh kegiatan industri, baik akibat proses pembuatan atau produksi yang dihasilkan industri tersebut maupun proses lainnya. Selain dari kegiatan industri, air limbah non-domestik juga dihasilkan dari kegiatan pertanian, peternakan, perikanan, transportasi, dan sumber lainnya.

3. Infiltrasi

Infiltrasi adalah masuknya air tanah ke dalam saluran air buangan melalui sambungan pipa, pipa bocor, atau dindig manhole. Sedangkan *inflow* adalah masuknya aliran air permukaan melalui tutup *manhole*, atap, area drainase, *cross connection* saluran air hujan maupun air buangan. Besarnya infiltrasi dan *inflow* yang masuk ke saluran air buangan tergantung pada panjang saluran, umur saluran konstruksi material, jarak muka air tanah terhadap saluran, tipe tanah, penutup tanah, dan kondisi topografi.

1.6.2 Karakteristik dan baku mutu air limbah industri tekstil

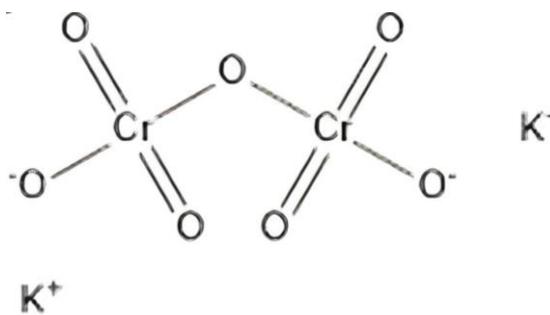
Karakteristik air limbah industri tekstil. Air limbah industri tekstil adalah air yang telah digunakan dalam proses produksi di industri tekstil dan kemudian dibuang karena mengandung berbagai kontaminan. Limbah ini biasanya mengandung bahan kimia dan zat berbahaya yang berasal dari proses pewarnaan, pencucian, pencelupan, dan pelapisan.



Gambar 1. Polutan yang dihasilkan dari proses industri tekstil
Sumber: Holkar et al., 2016

Air limbah industri tekstil, selain mengandung bahan pewarna dan pigmen, juga memiliki kandungan kimiawi kompleks seperti logam berat dan senyawa organik beracun. Zat-zat ini tidak hanya merusak estetika lingkungan dengan mencemari badan air, tetapi juga mengancam keseimbangan ekosistem.

Logam berat adalah parameter penting dalam pemantauan kualitas lingkungan. Logam berat adalah sekelompok unsur logam yang memiliki massa jenis tinggi (lebih besar dari 5 g/cm³) dan umumnya bersifat toksik, bahkan dalam konsentrasi rendah. Dalam konteks lingkungan dan kesehatan, parameter logam berat merujuk pada konsentrasi logam-logam ini yang diukur dalam suatu sampel, seperti air, tanah, atau udara. Konsentrasi tinggi dari logam berat seperti merkuri (Hg), kadmium (Cd), timbal (Pb), tembaga (Cu), besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), kromium (Cr), arsen (As), dan nikel (Ni) dapat terakumulasi dalam rantai makanan, membahayakan organisme tingkat tinggi termasuk manusia. Dampak jangka panjang dari pencemaran ini termasuk gangguan kesehatan pada manusia seperti kerusakan organ, masalah reproduksi, hingga risiko kanker (Holkar et al., 2016; Wang et al., 2022).



Gambar 2. Ikatan kimia $K_2Cr_2O_7$

Dalam air limbah industri tekstil, logam berat yang paling umum ditemui adalah kromium. Krom digunakan dalam beberapa jenis pewarna, terutama untuk warna hijau, kuning, dan oranye, yang memerlukan senyawa kromium sebagai bahan utama dalam proses pewarnaan. Pewarna krom kompleks memberikan hasil warna yang tahan lama dan stabil. Dalam pewarnaan tekstil, krom digunakan untuk menghasilkan warna-warna tertentu yang sulit dicapai dengan pewarna non-logam. Krom memberikan daya serap warna yang tinggi pada serat tekstil, membuat warna lebih hidup dan tahan lama. Kromium dipilih karena sifat-sifat kimianya yang unik, terutama dalam memberikan hasil warna dan kualitas produk akhir yang diinginkan. Sementara logam berat lainnya mungkin tidak memberikan hasil yang sama dalam konteks ini (Irhamni, 2017; Mukhtar dkk., 2014; Nurbarasamuma & Chaerul, 2022; Shuhaimi-Othman & Gasim, 2005).

Dalam air limbah industri tekstil, kromium biasanya hadir dalam dua bentuk oksidasi utama:

1. Kromium (VI) atau Krom Heksavalen (Cr^{6+})

Merupakan bentuk kromium yang lebih berbahaya dan bersifat sangat toksik serta karsinogenik. Kromium heksavalen sering digunakan dalam proses pencelupan atau sebagai agen oksidasi dalam industri tekstil. Cr^{6+} larut dalam air dan dapat mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan benar.

2. Kromium (III) atau Krom Trivalen (Cr^{3+})

Kromium trivalen merupakan bentuk yang lebih stabil dan kurang beracun dibandingkan Cr^{6+} . Cr^{3+} kadang digunakan sebagai zat pewarna atau dalam proses penyamakan kulit yang terkait dengan tekstil. Dalam air limbah, Cr^{3+} dapat mengendap sebagai hidroksida pada kondisi pH tertentu dan lebih mudah diolah dibandingkan Cr^{6+} .

Tabel 1. Karakteristik dan komposisi air limbah industri tekstil

Parameter	Satuan	Nilai
pH	–	7,00 – 9,00
BOD	mg/L	80 – 6.000
COD	mg/L	150 – 12.000
TSS	mg/L	15 – 8.000
TDS	mg/L	2.900 – 3.100
Klorida	mg/L	1.000 – 1.600
Total kjeldahl nitrogen	mg/L	70 – 80

Parameter	Satuan	Nilai
Warna	Pt-Co	50 – 2.500
Total kromium	mg/L	10 – 450

Sumber: Yuniarti & Widayatno, 2022; Álvarez-Ayuso & Nugteren, 2005

Pengolahan air limbah tekstil menjadi krusial untuk mencegah dampak negatif tersebut. Metode pengolahan yang efektif seperti koagulasi-flokulasi, adsorpsi, dan oksidasi lanjutan sangat diperlukan untuk menghilangkan bahan pencemar dari air limbah. Pemanfaatan teknologi membran, bioremediasi, dan elektrokoagulasi juga semakin berkembang sebagai solusi ramah lingkungan dalam mengurangi kandungan bahan berbahaya. Upaya ini tidak hanya bertujuan untuk memenuhi standar lingkungan yang ketat, tetapi juga untuk mendorong keberlanjutan industri tekstil melalui daur ulang air dan bahan baku (Holkar et al., 2016; Wang et al., 2022).

Selain metode fisik dan kimia, pendekatan biologis seperti penggunaan mikroorganisme dalam proses bioremediasi juga menjanjikan. Mikroorganisme tertentu mampu menguraikan senyawa organik kompleks menjadi zat yang lebih sederhana dan tidak berbahaya. Pengembangan penelitian dalam bidang ini diharapkan dapat menghasilkan solusi yang lebih efisien dan ekonomis dalam pengolahan air limbah industri tekstil, sehingga dampak lingkungan dapat diminimalisir tanpa mengorbankan keberlanjutan industri tersebut (Holkar et al., 2016; Wang et al., 2022).

Baku mutu air limbah industri tekstil. Baku mutu air limbah merupakan acuan penting dalam pengelolaan limbah industri karena berfungsi untuk memastikan bahwa air limbah yang dilepaskan ke lingkungan tidak melebihi batas aman yang ditetapkan. Aturan ini bertujuan untuk melindungi kualitas air di badan air penerima, mencegah pencemaran, serta menjaga kelestarian ekosistem. Dalam konteks industri tekstil, baku mutu air limbah mencakup berbagai parameter seperti nilai pH, kandungan bahan organik, kadar logam berat, serta jumlah padatan tersuspensi. Setiap parameter memiliki batas maksimal yang harus dipenuhi oleh industri sebelum air limbah dapat dilepas ke lingkungan.

Dalam Permen LH No. 5 Tahun 2014 dijelaskan bahwa baku mutu air limbah adalah ukuran batas atau kadar unsur pencemar dan/atau jumlah unsur yang ditenggang keberadaannya dalam air limbah yang akan dibuang atau dilepas ke dalam badan air dari suatu usaha dan/atau kegiatan. Adapun nilai baku mutu dari air limbah industri tekstil sebagai berikut.

Tabel 2. Baku mutu air limbah industri tekstil

Parameter	Nilai	Satuan
Warna	200	mg/L
Krom Total	1	Pt-Co

Sumber: Lampiran II Permen LHK Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019

Keterangan:

Pt-Co : *true colour*

Untuk memenuhi baku mutu air limbah, industri tekstil harus menerapkan teknologi pengolahan yang efektif, seperti pengendapan, filtrasi, dan oksidasi, serta melakukan pengawasan dan pengujian berkala. Kegagalan mematuhi standar ini dapat berakibat pada sanksi administratif atau penghentian operasional. Selain itu, pemenuhan baku mutu mencerminkan tanggung jawab sosial dan lingkungan industri, yang berkontribusi pada reputasi positif dan keberlanjutan jangka panjang, baik dari sisi ekonomi maupun lingkungan.

1.6.3 Flotasi

Flotasi adalah unit operasi untuk memisahkan fasa cair atau fasa padat dari fasa cair dalam suatu air limbah. Pemisahan partikel dari cairannya pada proses flotasi didasarkan pada perbedaan berat jenis partikel dengan bantuan gelembung udara (Bessy & H., 2018).

Beberapa aplikasi flotasi diantaranya flotasi dalam *primary clarification*, flotasi sebagai *secondary clarification* dengan atau tanpa penambahan bahan kimia, dan flotasi dalam pengentalan biosolid. Penghilangan padatan tersuspensi juga mempengaruhi beban BOD dan COD air limbah. Hal tersebut karena karena beberapa padatan tersuspensi bersifat organik, sehingga dengan berkurangnya padatan tersuspensi karena terurai melalui flotasi, beban BOD dan COD air limbah dapat berkurang.

Dalam Hu et al. (2010) terdapat empat langkah pada proses flotasi, yaitu:

1. Terbentuknya gelembung dalam air limbah
2. Terjadinya kontak antara gelembung gas dan partikel tersuspensi dalam air
3. Terikatnya partikel tersuspensi atau droplet minyak dengan gelembung gas
4. Naiknya gelembung kompleks yang terdiri atas udara-padatan ke permukaan yang mana material yang mengapung akan disingkirkan.

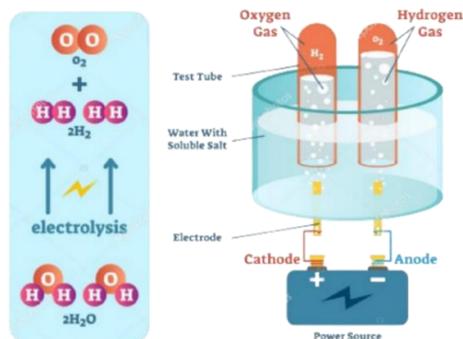
Terdapat lima tipe dalam sistem flotasi yang mana diklasifikasikan berdasarkan persebaran gelembung, yaitu:

1. *Dissolved air flotation*, yaitu gelembung yang terbentuk dari kondisi jenuh akibat adanya reduksi tekanan
2. *Induced (Dispersed) air flotation*, yaitu gelembung yang terinduksi dan terbentuk akibat pencampuran mekanis antara suatu gas dan cairan
3. *Froth Air Flotation*, yaitu gelembung yang terbentuk akibat adanya injeksi gas ke dalam cairan menggunakan *sparger*
4. *Electrolytic air flotation*, yaitu gelembung yang terbentuk akibat adanya proses elektrolisis dalam air
5. *Vacuum air flotation*, yaitu gelembung yang terbentuk akibat terlepasnya udara dari suatu larutan jenuh dengan tekanan negatif.

1.6.4 Elektrolisis

Elektrolisis adalah pemisahan senyawa menjadi elemen-elemen penyusunannya dengan memberikan arus listrik. Elektrolisis sendiri berarti suatu proses memecah

molekul menjadi bagian-bagian kecil dengan menggunakan arus listrik yang mana kutub positif dan kutub negatif dalam sebuah sumber listrik dapat menyerap ion yang berlawanan dari sebuah larutan atau elektrolit dan menyebabkan terjadinya pemisahan ion dan membentuk zat baru. Menurut Samantara & Ratha (2019), elektrolisis adalah proses pemecahan molekul air yang stabil menjadi molekul hidrogen dan oksigen dengan bantuan sel elektrokimia yang terdiri atas anoda (kutub positif) dan katoda (kutub negatif).



Gambar 3. Elektrolisis air

Pada proses elektrolisis, reaksi di anoda dan katoda melibatkan transfer elektron untuk menghasilkan oksigen dan hidrogen. Jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi ini ditentukan oleh perubahan bilangan oksidasi (valensi) unsur yang terlibat dalam reaksi.

Pada anoda bermuatan positif, reaksi yang terjadi berupa reaksi oksidasi, yaitu reaksi pelepasan elektron sehingga menyebabkan meningkatnya bilangan oksidasi oksigen dari -2 dalam air (H_2O) menjadi 0 dalam gas oksigen (O_2). Setiap molekul air (H_2O) melepaskan dua elektron saat satu atom oksigen dioksidasi. Untuk mencapai kondisi yang stabil, setiap molekul oksigen harus terdiri atas dua atom oksigen, sehingga total elektron yang harus dilepaskan sebanyak empat elektron untuk membentuk 1 molekul gas O_2 . Reaksi yang terjadi dapat dituliskan dalam persamaan berikut:



Pada katoda bermuatan negatif akan terjadi reaksi reduksi yang merupakan reaksi penangkapan elektron yang menyebabkan penurunan bilangan oksidasi hidrogen dari +1 dalam ion H^+ menjadi 0 dalam gas hidrogen (H_2). Setiap ion hidrogen (H^+) akan menerima satu elektron untuk membentuk gas hidrogen (H_2). Untuk mencapai kondisi yang stabil, setiap molekul hidrogen harus terdiri atas dua atom hidrogen, sehingga diperlukan dua elektron untuk membentuk satu molekul gas H_2 . Reaksi yang terjadi dapat dituliskan dalam persamaan berikut:



Jadi, secara keseluruhan reaksi yang terjadi dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:



Adapun komponen yang diperlukan dalam suatu proses elektrolisis sebagai berikut:

Elektrolit. Elektrolit adalah zat yang mengandung ion bebas yang merupakan pembawa arus listrik dalam suatu larutan. Jika ion-ion dalam elektrolit tidak bergerak, seperti pada garam padat (*solid salt*) maka elektrolisis tidak dapat terjadi.

Sumber arus listrik searah (*Direct Current/DC*). Sumber arus listrik searah (DC) ini berfungsi sebagai penyedia energi yang diperlukan untuk membuat atau melepaskan ion dalam elektrolit. Arus DC menyediakan kondisi yang lebih stabil untuk proses elektrolisis karena tidak ada gangguan yang diakibatkan oleh perubahan arus. Selain itu, penggunaan arus DC juga membantu dalam pembentukan gas yang konsisten serta kontrol intensitas arus dan tegangan yang lebih baik dalam proses elektrolisis.

Elektroda. Elektroda adalah sebuah penghantar listrik yang digunakan untuk membuat kontak dengan bagian non-logam dari sebuah rangkaian (semikonduktor, elektrolit, atau vakum). Elektroda yang digunakan kebanyakan terbuat dari logam, *graphite* dan bahan semikonduktor. Elektroda dalam sel elektrokimia dapat disebut juga sebagai anoda dan katoda. Anoda didefinisikan sebagai kutub positif tempat elektron datang dari sel elektrokimia dan oksidasi terjadi, sedangkan katoda didefinisikan sebagai kutub negatif tempat elektron memasuki sel elektrokimia dan reduksi terjadi. Setiap elektroda dapat menjadi anoda dan katoda tergantung dari arus listrik yang diberikan. Pemilihan bahan elektroda tergantung pada reaksi kimia antara elektroda dan elektrolit serta biaya pembuatannya.

Setiap elektroda akan menarik ion yang memiliki muatan yang berlawanan. Ion-ion bermuatan positif (kation) akan bergerak menuju katoda yang bermuatan negatif, sementara ion-ion bermuatan negatif (anion) akan bergerak menuju anoda yang bermuatan positif. Oleh karena itu, elektron akan diserap atau dilepaskan oleh atom atau ion pada elektroda. Atom yang mendapatkan atau kehilangan elektron akan menjadi ion bermuatan, dan akan terlarut dalam elektrolit. Ion yang mendapatkan atau kehilangan elektron akan menjadi atom yang bermuatan, terpisah dari elektrolit. Proses migrasi ini memerlukan energi yang diberikan oleh sumber listrik eksternal.

1.6.5 Elektroflotasi

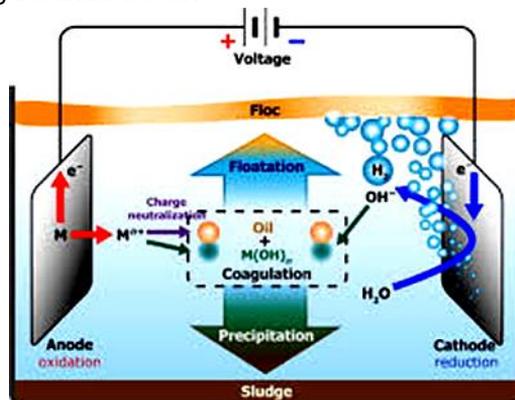
Elektroflotasi (*electroflotation/EF*) adalah proses pengolahan air limbah yang memisahkan partikel-partikel yang tersuspensi dalam air limbah menggunakan gelembung gas yang dihasilkan selama elektrolisis air (Mohtashami & Shang, 2019).

Proses elektroflotasi. Elektroflotasi adalah metode pengolahan air limbah yang memanfaatkan proses elektrolisis untuk menghasilkan gelembung gas, terutama oksigen dan hidrogen, yang terbentuk pada permukaan elektroda anoda dan katoda. Dalam proses ini, oksidasi air terjadi di anoda, menghasilkan oksigen, sementara reduksi air di katoda menghasilkan hidrogen. Gelembung-gelembung ini berperan penting dalam proses flotasi, karena mampu mengikat partikel-partikel

tersuspensi dan mengangkatnya ke permukaan, sehingga dapat dipisahkan dari air limbah. Efektivitas elektroflotasi sangat dipengaruhi oleh kondisi elektrolisis, seperti arus listrik yang digunakan, jenis elektroda, dan komposisi air limbah itu sendiri.

Proses pembentukan gelembung selama elektrolisis terdiri dari tiga tahap utama: nukleasi, pertumbuhan, dan pelepasan. Pada tahap nukleasi, gelembung mulai terbentuk dari gas yang terlarut di sekitar permukaan elektroda. Kemudian, gelembung ini mengalami pertumbuhan seiring dengan berlanjutnya reaksi elektrokimia dan akumulasi gas. Ukuran gelembung yang terbentuk dipengaruhi oleh laju reaksi elektrolisis serta kondisi fisik di sekitar elektroda, seperti tegangan permukaan dan kekentalan medium. Tahap terakhir adalah pelepasan, di mana gelembung-gelembung yang telah cukup besar akan melepaskan diri dari elektroda dan naik ke permukaan air. Efisiensi pelepasan gelembung ini penting untuk memastikan bahwa partikel kontaminan dalam air limbah dapat terperangkap dan terbawa oleh gelembung menuju permukaan.

Selain parameter proses elektrolisis, faktor lain yang mempengaruhi keberhasilan elektroflotasi adalah desain reaktor dan konfigurasi elektroda. Pengaturan yang tepat dapat meningkatkan distribusi gelembung di seluruh volume air limbah, sehingga mempercepat proses penghilangan kontaminan. Penggunaan elektroda dengan area permukaan yang lebih besar atau material yang tahan korosi juga dapat meningkatkan efisiensi produksi gelembung. Penelitian lebih lanjut dalam optimasi parameter elektroflotasi dapat menghasilkan teknologi yang lebih efisien dan hemat energi, yang sangat diperlukan dalam pengolahan air limbah industri yang berskala besar.



Gambar 4. Proses elektroflotasi

Elektronukleasi dipengaruhi oleh kerapatan arus yang diterapkan, ditandai dengan akumulasi gas di permukaan elektroda. Fase terakhir dari evolusi gas adalah pelepasan gelembung yang menyebabkan gaya apung dan massa jenis cairan berinteraksi, menyebabkan partikel tersuspensi menempel pada gelembung gas yang mengapung ke permukaan dan akhirnya menjadi lumpur (Martínez-Huitle et al., 2018). Oleh karena itu, elektroflotasi menggunakan pelat logam sebagai elektroda yang disusun sesuai dengan keoptimuman dan jenis limbah yang akan diolah.

Elektroflotasi (EF) adalah proses pengolahan air limbah efektif yang menggabungkan elektrokoagulasi dan flotasi untuk menghilangkan berbagai polutan. Elektrokoagulasi (EC) dan elektroflotasi (EF) adalah proses yang saling terkait dan sering dikombinasikan sebagai elektrokoagulasi/flotasi (ECF) untuk pengolahan air dan air limbah. EC menggunakan elektrolisis untuk menghasilkan agen koagulasi seperti logam hidroksida, sementara EF menghasilkan gelembung yang mengapungkan polutan ke permukaan. Dalam proses ini, elektroda logam (biasanya aluminium) larut di anoda, menghasilkan zat koagulasi seperti logam hidroksida, sementara gas hidrogen dilepaskan di katoda. Koagulan ini bergabung dengan polutan membentuk flok, yang kemudian melayang ke permukaan melalui gelembung gas (Emamjomeh & Sivakumar, 2009; Jiménez et al., 2016).

Mekanisme kontak antara gelembung gas dan molekul polutan dalam sistem elektroflotasi meliputi pengapungan, penyerapan, dan pelekatan. Pengapungan terjadi karena ikatan fisik antara gelembung gas dan molekul polutan, penyerapan terjadi pada struktur koagulan tersuspensi terhadap gelembung gas, dan pelekatan disebabkan oleh gaya tarik intra molekular pada permukaan antara dua fasa yang menghasilkan tegangan permukaan (Putri, 2020).

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses elektroflotasi. Proses elektroflotasi dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut diuraikan sebagai berikut.

Gelembung gas. Gelembung gas yang dihasilkan dari proses elektrolisis memiliki karakteristik yang sangat unik dan berbeda dibandingkan dengan gelembung yang dihasilkan oleh metode flotasi konvensional. Gelembung-gelembung ini sangat halus dan seragam, dengan diameter yang biasanya lebih kecil dari 100 mikrometer. Karena ukurannya yang sangat kecil, gelembung elektrolit memiliki luas permukaan yang lebih besar relatif terhadap volume mereka, yang memungkinkan interaksi yang lebih efektif dengan partikel-partikel tersuspensi dalam air limbah. Luas permukaan yang besar ini juga meningkatkan peluang partikel tersuspensi untuk menempel pada gelembung, sehingga proses pemisahan menjadi lebih efisien (Martínez-Huitle et al., 2018; Chen, 2004).

Kecepatan naiknya gelembung gas yang sangat lambat juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi elektroflotasi. Karena gerakannya yang lambat, gelembung-gelembung ini memiliki waktu yang lebih lama untuk berinteraksi dengan partikel-partikel di dalam air limbah, memungkinkan lebih banyak partikel untuk menempel sebelum gelembung mencapai permukaan. Proses ini sangat penting dalam memisahkan partikel-partikel yang sangat halus atau ringan, yang mungkin tidak dapat dipisahkan secara efektif dengan metode lain. Keuntungan lain dari kecepatan gelembung yang lambat adalah mengurangi gangguan arus dalam medium, yang biasanya dapat menyebabkan pecahnya gelembung dan mengurangi efisiensi flotasi (Martínez-Huitle et al., 2018; Chen, 2004).

Efisiensi yang lebih tinggi dari elektroflotasi dibandingkan dengan metode flotasi konvensional membuatnya menjadi pilihan yang unggul untuk pengolahan air limbah industri, terutama dalam memisahkan partikel-partikel halus dan zat-zat

tersuspensi lainnya. Dengan demikian, teknologi elektroflotasi terus dikembangkan dan dioptimalkan untuk menghadapi tantangan pencemaran air yang semakin kompleks dalam skala industri (Martínez-Huitle et al., 2018; Chen, 2004).

Derajat keasaman (pH). Ukuran gelembung hidrogen yang terbentuk selama proses elektrolisis sangat dipengaruhi oleh pH lingkungan reaksi. Dalam suasana asam, gelembung hidrogen yang terbentuk di katoda cenderung lebih besar dibandingkan dengan gelembung yang dihasilkan dalam kondisi netral atau basa. Hal ini disebabkan oleh tingginya konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam lingkungan asam, yang memfasilitasi pembentukan gelembung gas hidrogen dalam ukuran yang lebih besar. Gelembung ini lebih mudah terlihat dan lebih cepat terlepas dari permukaan elektroda karena gaya apung yang lebih kuat. Dalam suasana basa, pembentukan gelembung hidrogen di katoda menjadi lebih lambat, dan ukurannya cenderung lebih kecil karena konsentrasi ion hidrogen yang lebih rendah.

Sementara itu, ukuran gelembung oksigen yang terbentuk di anoda juga dipengaruhi oleh pH larutan. Menurut penelitian Chen (2004), dalam suasana basa, ukuran gelembung oksigen cenderung meningkat seiring dengan naiknya pH. Ini kemungkinan disebabkan oleh penurunan tegangan permukaan di sekitar gelembung pada pH tinggi, yang memungkinkan pertumbuhan gelembung oksigen menjadi lebih besar sebelum akhirnya terlepas dari elektroda. Sebaliknya, dalam kondisi pH netral, baik gelembung hidrogen maupun oksigen cenderung lebih kecil dan lebih seragam. Pada pH ini, reaksi elektrolisis berjalan lebih stabil dan menghasilkan distribusi gelembung yang lebih merata.

Perbedaan ukuran gelembung gas ini memiliki implikasi penting dalam proses elektroflotasi dan pengolahan air limbah. Gelembung yang lebih kecil, terutama pada pH netral, memiliki luas permukaan yang lebih besar, yang meningkatkan peluang bagi partikel-partikel tersuspensi untuk menempel pada gelembung dan diangkat ke permukaan. Di sisi lain, gelembung yang lebih besar dalam suasana asam atau basa mungkin kurang efisien dalam menangkap partikel-partikel halus, tetapi dapat lebih efektif dalam mengangkat partikel-partikel yang lebih besar atau berat. Oleh karena itu, pengaturan pH selama proses elektrolisis menjadi salah satu parameter kunci yang harus dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan dalam sistem elektroflotasi, tergantung pada karakteristik limbah yang diolah.

Arus listrik. Kerapatan arus merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi pembentukan gelembung gas dalam proses elektrolisis, terutama dalam konteks elektroflotasi. Kerapatan arus yang tinggi akan mempercepat laju pembentukan gelembung gas, namun juga berdampak pada ukuran gelembung tersebut. Menurut Chen (2004), peningkatan intensitas arus cenderung mengurangi ukuran gelembung gas. Hal ini disebabkan oleh peningkatan jumlah titik nukleasi pada permukaan elektroda ketika kerapatan arus meningkat, yang menghasilkan lebih banyak gelembung kecil dibandingkan gelembung besar. Gelembung kecil ini memiliki luas permukaan yang lebih besar relatif terhadap volumenya, sehingga lebih efektif dalam menangkap dan mengangkat partikel-partikel tersuspensi dalam air limbah.

Permukaan elektroda juga memainkan peran penting dalam pembentukan gelembung gas. *Stainless steel* sering digunakan sebagai material elektroda karena sifatnya yang tahan korosi dan memiliki konduktivitas yang baik. Permukaan *stainless steel* diketahui memberikan hasil yang optimal dalam pembentukan gelembung gas yang seragam dan kecil. Hal ini berhubungan dengan struktur permukaan *stainless steel* yang memungkinkan distribusi arus listrik yang lebih merata, sehingga memfasilitasi pembentukan gelembung gas yang lebih efisien. Oleh karena itu, pemilihan material elektroda menjadi salah satu faktor kunci dalam optimalisasi proses elektroflotasi.

Selain kerapatan arus, tegangan listrik yang diterapkan juga mempengaruhi efisiensi pengolahan. Penelitian oleh Sugito, dkk. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan tegangan listrik berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi pengolahan. Tegangan yang lebih tinggi menyebabkan laju elektrolisis meningkat, menghasilkan lebih banyak gelembung gas dalam waktu yang lebih singkat. Ini mempercepat proses pengangkatan partikel tersuspensi ke permukaan, sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan. Namun, peningkatan tegangan juga harus diimbangi dengan pengaturan yang tepat, karena tegangan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan konsumsi energi yang berlebihan dan kerusakan pada elektroda.

Selain itu, tegangan yang lebih tinggi dapat mempengaruhi karakteristik fisik gelembung gas. Pada tegangan yang lebih tinggi, pembentukan gelembung menjadi lebih cepat, namun ukuran gelembung cenderung lebih kecil dan lebih stabil. Ini penting dalam proses pengolahan air limbah karena gelembung yang lebih kecil dan stabil akan lebih efisien dalam menangkap partikel tersuspensi dan bahan pencemar lainnya. Pengaturan tegangan yang optimal dapat meningkatkan efektivitas pengolahan dengan mengoptimalkan ukuran dan distribusi gelembung gas di dalam larutan.

Oleh karena itu, baik kerapatan arus maupun tegangan listrik memiliki peran penting dalam mengontrol efisiensi proses elektroflotasi. Kerapatan arus yang tepat akan menghasilkan gelembung kecil yang efektif dalam mengangkat partikel-partikel tersuspensi, sementara tegangan yang optimal akan mempercepat laju elektrolisis dan meningkatkan efisiensi pengolahan secara keseluruhan. Kombinasi dari kedua faktor ini, bersama dengan pemilihan material elektroda yang tepat seperti *stainless steel*, dapat menghasilkan sistem pengolahan air limbah yang lebih efisien dan hemat energi. Penelitian lebih lanjut dalam optimasi parameter ini sangat diperlukan untuk mengembangkan teknologi pengolahan air limbah yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

Material, susunan, dan konfigurasi elektroda. Elektroflotasi dapat berfungsi dengan efisien karena adanya elektroda yang berperan sebagai anoda dan katoda. Sistem elektroda ini merupakan komponen yang sangat penting dalam proses elektroflotasi. Elektroda seperti besi, aluminium, dan *stainless steel* sangat murah, mudah ditemukan, dan dapat digunakan dalam proses elektroflotasi. Pemilihan elektroda didasarkan pada ketahanan elektroda, biaya, serta kemampuannya

dalam menghasilkan gas hidrogen dan oksigen selama proses elektroflotasi (Chen, 2004).

Susunan Elektroda mengacu pada cara elektroda-elektroda dihubungkan dalam sirkuit, seperti secara seri atau paralel. Susunan ini menentukan bagaimana arus dan tegangan dibagi di antara elektroda-elektroda dalam sistem. Proses elektrolisis dapat menggunakan konfigurasi elektroda yang berbeda, termasuk susunan seri dan paralel (Shevchenko et al., 2020).

Dalam susunan seri, elektroda-elektroda dihubungkan secara berurutan. Arus listrik yang mengalir sama di setiap elektroda, tetapi tegangan dibagi di antara elektroda-elektroda tersebut. Susunan ini bisa menghasilkan penurunan tegangan per elektroda, yang dapat mengurangi efisiensi elektrolisis jika arus yang dibutuhkan tinggi. Susunan seri memungkinkan penggunaan tegangan tinggi dengan arus yang lebih rendah sehingga dapat mengurangi konsumsi energi jika arus yang digunakan relatif kecil. Akan tetapi, penggunaan elektroda yang disusun secara seri dapat menurunkan efisiensi jika arus yang dibutuhkan lebih besar karena tegangan per elektroda menurun. Oleh karena itu, untuk memperoleh hasil yang optimal diperlukan pengaturan dan kontrol tegangan lebih rumit (Shevchenko et al., 2020).

Dalam susunan paralel, setiap elektroda dihubungkan ke sumber listrik secara langsung. Ini berarti setiap elektroda menerima tegangan penuh, tetapi arus total dibagi di antara elektroda-elektroda tersebut. Pada susunan elektroda secara paralel, setiap elektroda menerima tegangan penuh yang dapat meningkatkan efisiensi elektrolisis. Penggunaan elektroda yang disusun paralel dapat meningkatkan laju produksi hidrogen secara signifikan sebesar 72% - 118%. Selain itu, pengaturan dan kontrol arus pada susunan paralel lebih mudah dilakukan untuk memperoleh hasil yang optimal. Akan tetapi, pada susunan elektroda paralel membutuhkan arus total yang lebih besar yang dapat meningkatkan konsumsi energi. Oleh karena itu, susunan paralel memerlukan sumber daya listrik yang lebih kuat (Shevchenko et al., 2020; Liang et al., 2011)

Konfigurasi Elektroda merujuk pada cara elektroda-elektroda ditempatkan atau digunakan dalam sistem elektrolisis, seperti konfigurasi monopolar, bipolar, atau tiga elektroda. Konfigurasi ini menentukan bagaimana elektroda-elektroda berinteraksi satu sama lain dan dengan larutan, serta bagaimana reaksi elektrokimia terjadi. Beberapa jenis konfigurasi yang digunakan dalam proses elektrolisis, diantaranya (De Silva et al., 2020; Samantara & Ratha, 2019):

1. Monopolar: Dalam konfigurasi ini, setiap elektroda dihubungkan langsung ke sumber daya listrik sebagai anoda atau katoda. Biasanya digunakan dalam pengaturan sederhana dan umum di elektrolisis. Konfigurasi jenis ini sederhana dalam pemasangan dan pengoperasian serta diatur untuk berbagai jenis elektrolit. Namun, konsentrasi arus bisa menjadi tidak merata yang dapat mempengaruhi efisiensi reaksi
2. Bipolar: Elektroda dihubungkan secara berturut-turut sehingga salah satu sisi elektroda bertindak sebagai anoda dan sisi lainnya sebagai katoda. Konfigurasi ini sering digunakan dalam reaktor yang lebih besar dan kompleks. Konfigurasi

ini dapat mengurangi jumlah kabel dan koneksi yang digunakan serta dapat meningkatkan efisiensi proses dalam sistem besar. Akan tetapi, konfigurasi bipolar memerlukan desain yang lebih kompleks serta konsentrasi arus bisa lebih sulit dikendalikan.

3. *Three-electrode* (Tiga Elektroda): Konfigurasi ini melibatkan tiga elektroda, yaitu elektroda kerja, elektroda referensi, dan elektroda pembantu. Biasanya digunakan dalam pengukuran elektrokimia untuk mendapatkan data yang lebih akurat tentang proses elektrolisis. Konfigurasi jenis ini memberikan kontrol yang lebih baik terhadap potensial pada elektroda kerja serta dapat memberikan hasil yang lebih optimal. Namun, konfigurasi *three-electrode* lebih kompleks dan membutuhkan peralatan yang lebih canggih sehingga kurang efisien dan ekonomis untuk pengolahan air limbah.

Waktu kontak. Waktu kontak dalam proses elektroflotasi merupakan salah satu faktor kritis yang mempengaruhi keberhasilan pemisahan zat tersuspensi dari air limbah. Waktu kontak yang memadai memungkinkan partikel-partikel tersuspensi untuk berinteraksi dengan gelembung gas yang dihasilkan selama proses elektrolisis. Selama interaksi ini, partikel dapat menempel pada permukaan gelembung, yang kemudian membawa partikel-partikel tersebut ke permukaan air, di mana mereka dapat dipisahkan dari air limbah. Oleh karena itu, pengaturan waktu kontak yang tepat sangat penting untuk memastikan efisiensi proses elektroflotasi yang tinggi.

Namun, peningkatan waktu kontak tidak selalu menjamin efisiensi yang lebih baik. Penelitian yang dilakukan oleh Ledoh, dkk. (2022) menunjukkan bahwa ada batas optimal dalam pengaturan waktu kontak. Jika waktu kontak terlalu singkat, partikel mungkin tidak memiliki cukup waktu untuk berinteraksi dengan gelembung gas, sehingga efisiensi pemisahan menurun. Sebaliknya, jika waktu kontak terlalu lama, hal ini dapat mengakibatkan pemborosan energi dan penurunan efisiensi proses secara keseluruhan. Dalam beberapa kasus, partikel yang sudah menempel pada gelembung dapat terlepas kembali ke dalam air karena interaksi yang terlalu lama, sehingga mengurangi efektivitas pengolahan.

Selain itu, pengaturan waktu kontak juga terkait erat dengan efisiensi energi. Dalam proses elektroflotasi, energi digunakan untuk menghasilkan gelembung gas melalui elektrolisis. Waktu kontak yang terlalu panjang berarti proses elektrolisis berlangsung lebih lama, yang dapat meningkatkan konsumsi energi tanpa memberikan keuntungan signifikan dalam efisiensi pemisahan. Oleh karena itu, pengaturan waktu kontak yang optimal tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pengolahan, tetapi juga untuk mengoptimalkan penggunaan energi, sehingga proses elektroflotasi menjadi lebih hemat biaya dan ramah lingkungan.

Pengaruh waktu kontak juga dapat bervariasi tergantung pada karakteristik air limbah yang diolah. Misalnya, dalam air limbah dengan konsentrasi tinggi zat tersuspensi, waktu kontak yang lebih lama mungkin diperlukan untuk memastikan semua partikel dapat berinteraksi dengan gelembung gas. Sebaliknya, dalam air limbah dengan konsentrasi zat tersuspensi yang rendah, waktu kontak yang lebih pendek mungkin sudah cukup untuk mencapai efisiensi pengolahan yang optimal.

Oleh karena itu, penting untuk melakukan penyesuaian parameter proses berdasarkan sifat spesifik air limbah yang dihadapi.

Secara keseluruhan, pengaturan waktu kontak yang tepat dalam proses elektroflotasi adalah kunci untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi pemisahan, penggunaan energi, dan kualitas output. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi waktu kontak optimal dalam berbagai kondisi operasi dan jenis air limbah, sehingga teknologi elektroflotasi dapat diterapkan secara lebih luas dan efektif dalam berbagai industri.

Kelebihan dan kekurangan elektroflotasi. Menurut Shah (2023), proses elektroflotasi memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan teknologi pengapungan lainnya, terutama dalam hal efisiensi dan fleksibilitasnya. Salah satu keunggulan utama adalah kemampuannya untuk mendispersi gelembung gas dengan sangat baik. Gelembung gas yang dihasilkan dalam elektroflotasi biasanya lebih halus dan seragam dibandingkan dengan teknologi pengapungan lainnya. Gelembung halus ini memiliki luas permukaan yang lebih besar, yang memungkinkan interaksi yang lebih baik dengan partikel-partikel polutan dalam air limbah. Hal ini meningkatkan peluang partikel-partikel tersebut untuk menempel pada gelembung dan terbawa ke permukaan, sehingga efisiensi pemisahan menjadi lebih tinggi.

Keunggulan kedua yang dijelaskan oleh Shah adalah pengaruh kerapatan arus terhadap konsentrasi gelembung gas yang dihasilkan. Dalam elektroflotasi, kerapatan arus dapat diatur untuk mengubah jumlah dan ukuran gelembung gas yang terbentuk. Dengan mengatur kerapatan arus, operator dapat menyesuaikan proses elektroflotasi agar sesuai dengan karakteristik air limbah yang diolah, seperti konsentrasi polutan dan jenis kontaminan. Kemampuan untuk mengubah konsentrasi gelembung gas ini memberikan fleksibilitas dalam proses pengolahan, sehingga dapat meningkatkan efisiensi penyisihan polutan dalam berbagai kondisi operasi.

Selain itu, Shah juga menekankan pentingnya pemilihan elektroda yang tepat dalam menentukan efektivitas proses elektroflotasi. Material elektroda yang digunakan harus tahan terhadap korosi dan memiliki konduktivitas yang baik untuk memastikan pembentukan gelembung gas yang efisien. Pemilihan elektroda yang sesuai juga dapat mengoptimalkan distribusi arus listrik di seluruh sistem, sehingga memastikan bahwa seluruh volume air limbah mendapatkan perlakuan yang merata. Dengan memilih elektroda yang tepat, proses elektroflotasi dapat berjalan lebih efisien, hemat energi, dan memberikan hasil yang optimal dalam hal penyisihan polutan. Kombinasi dari faktor-faktor ini menjadikan elektroflotasi sebagai teknologi yang sangat efektif dan dapat diandalkan untuk pengolahan air limbah industri.

Kelebihan elektroflotasi. Penggunaan teknologi elektroflotasi dalam pengolahan air limbah industri tekstil memiliki beberapa kelebihan, diantaranya:

1. Elektroflotasi lebih fleksibel dan kompetitif daripada sistem tangki yang membutuhkan lahan yang luas

2. Elektroflotasi berukuran kecil sehingga hanya membutuhkan biaya perawatan dan pengoperasian yang rendah jika dibandingkan dengan proses pengapungan yang lain
 3. Menghasilkan gelembung yang lebih efektif dari metode pengapungan lainnya yang efektif terhadap penyisihan parameter pencemar
 4. Efektifitas gelembung dapat dikontrol dengan pemilihan elektroda yang tepat
- Kekurangan elektroflotasi.* Dalam penerapannya, pengolahan air limbah dengan metode elektroflotasi juga memiliki kekurangan, yaitu:
1. Konsumsi energi yang tinggi
 2. Dalam keadaan tertentu membutuhkan elektroda yang khusus sulit ditemukan dan juga mahal
 3. Membutuhkan perawatan elektroda secara intensif

1.6.6 Karakteristik aluminium, stainless steel, dan besi

Aluminium dan paduannya sangat dihargai dalam berbagai aplikasi teknik karena kombinasi keunggulannya. Logam ini dikenal karena bobotnya yang ringan, yang membuatnya ideal untuk penggunaan di industri penerbangan dan otomotif di mana pengurangan berat sangat penting. Selain itu, aluminium memiliki sifat mampu bentuk (*formability*) yang sangat baik, memungkinkan desain yang kompleks dan presisi. Kekuatan tariknya yang cukup tinggi dan ketahanan terhadap korosi memperpanjang masa pakai komponen yang terbuat dari aluminium, sedangkan sifat mekaniknya dapat ditingkatkan melalui proses pengerjaan dingin atau perlakuan panas. Kemampuan las aluminium bervariasi tergantung pada jenis paduannya, tetapi banyak paduan yang menawarkan las yang berkualitas baik, yang semakin memperluas aplikasinya dalam berbagai industri (Wartono & Aprianto, 2021).

Paduan aluminium terbagi menjadi dua kategori utama: paduan yang dapat diperlakukan dengan pemanasan dan paduan yang tidak dapat diperlakukan dengan pemanasan. Paduan yang dapat diperlakukan dengan pemanasan, seperti paduan berbasis tembaga, dapat mengalami perubahan sifat mekanik yang signifikan setelah pemanasan dan pendinginan, sehingga cocok untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan tinggi. Di sisi lain, paduan yang tidak dapat diperlakukan dengan pemanasan, seperti paduan berbasis magnesium, mengandalkan proses pengerjaan dingin untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Keunggulan aluminium yang lain, seperti konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta ketahanan terhadap korosi, menjadikannya pilihan yang sangat menarik untuk berbagai aplikasi industri, termasuk konstruksi dan elektronik (Wartono & Aprianto, 2021).

Stainless steel adalah bahan yang sangat diandalkan dalam berbagai aplikasi berkat sifatnya yang unggul. Material ini mengandung kromium dalam jumlah minimal 11%, yang membentuk lapisan pasif di permukaan baja dan memberikan perlindungan terhadap korosi. Selain kromium, *stainless steel* juga sering mengandung nikel, molibdenum, dan elemen lainnya yang meningkatkan

ketahanan terhadap oksidasi serta memperbaiki kekuatan mekanik. Keunggulan utama *stainless steel* meliputi ketahanan terhadap korosi, kekuatan yang baik, dan kemudahan dalam proses pembentukan dan pembuatan, membuatnya ideal untuk berbagai aplikasi mulai dari peralatan dapur hingga komponen arsitektur dan industri. Selain itu, *stainless steel* dapat didaur ulang tanpa mengurangi kualitasnya, menjadikannya pilihan yang ramah lingkungan (Rudy dkk., 2018).

Di sisi lain, besi merupakan logam yang memiliki kekuatan tinggi dan titik lebur yang tinggi, menjadikannya bahan dasar yang sangat kuat untuk berbagai aplikasi teknik. Meskipun besi murni memiliki beberapa kekurangan, seperti kecenderungan untuk berkarat ketika terkena udara dan kelembapan, sifat-sifatnya dapat ditingkatkan melalui paduan dengan elemen lain seperti karbon untuk membentuk baja. Baja yang terbuat dari besi dan karbon atau paduan lainnya menawarkan kekuatan mekanik yang lebih tinggi dibandingkan besi murni dan dapat disesuaikan untuk berbagai kegunaan. Kombinasi ini memungkinkan pembuatan komponen yang kuat dan tahan lama untuk berbagai aplikasi industri dan konstruksi (Rudy dkk., 2018).

Besi sendiri memiliki peran penting dalam industri dan teknologi, berfungsi sebagai bahan dasar untuk berbagai paduan logam. Dengan titik lebur yang tinggi, besi memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan material lainnya, seperti baja, yang merupakan hasil paduan besi dengan karbon dan elemen lain. Penggunaan besi dalam pembuatan struktur dan mesin menunjukkan betapa pentingnya logam ini dalam mendukung berbagai sektor industri, mulai dari konstruksi bangunan hingga manufaktur otomotif. Sifat dasar besi yang kuat dan tahan lama menjadikannya komponen vital dalam banyak aplikasi teknik dan struktur (Rudy dkk., 2018).

Namun, meskipun besi dan *stainless steel* memiliki beberapa kesamaan, seperti ketahanan dan kekuatan, *stainless steel* menawarkan perlindungan tambahan terhadap korosi berkat lapisan pasif yang dibentuk oleh kromium. Ini membuat *stainless steel* lebih cocok untuk aplikasi di lingkungan yang keras dan korosif dibandingkan dengan besi, yang cenderung memerlukan perlakuan tambahan untuk mengatasi masalah korosi. Perbedaan ini menekankan pentingnya memilih material yang tepat sesuai dengan kebutuhan aplikasi dan kondisi lingkungan yang dihadapi.

Tabel 3. Sifat fisis aluminium, *stainless steel*, dan besi

Sifat Fisis	Aluminium (Al)	Besi (Fe)	<i>Stainless steel</i>
Simbol	Al	Fe	Fe, Cr, Ni, Mo, dan lainnya
Nomor Atom	13	26	-
Berat Atom	26,981 g/mol	55,845 g/mol	-
Kepadatan	2,70 g/cm ³	7,87 g/cm ³	7,75 – 8,05 g/cm ³
Titik Lebur	660,32 °C	1.538 °C	1.400 – 1.450 °C
Titik Didih	2.519 °C	2.862 °C	>2.500 °C
Konduktivitas Termal	235 W/m.k	80,4 W/m.k	15 – 25 W/m.k
Konduktivitas Listrik	37,7 × 10 ⁶ S/m	10 × 10 ⁶ S/m	1,45 × 10 ⁶ S/m

Sifat Fisis	Aluminium (Al)	Besi (Fe)	<i>Stainless steel</i> (tipe 304)
Modulus Elastisitas	70 Gpa	210 Gpa	190 – 210 Gpa
Koefisien Muai Panjang	$23,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$11,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$16 - 17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Kapasitas Kalor Spesifik	0,897 J/g.K	0,449 J/g.K	0,500 J/g.K
Struktur Kristal	Kubus berpusat muka (FCC)	Kubus berpusat tubuh (BCC)	Kubus berpusat muka (FCC)
Warna	Perak keabu-abuan	Abu-abu	Perak mengkilap
Kekerasan	2,75 pada skala Mohs	4 pada skala Mohs	5,5 – 6,3 pada skala Mohs

1.6.7 Studi penelitian terdahulu yang relevan

Tabel 4. Studi penelitian terdahulu yang relevan

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Andini Adi Putri, Ika Meicahayanti, Searpin Nugroho, Ibrahim, dan Febrina Zulya, 2023	Pengaruh Waktu Kontak serta Jenis Elektroda Al-Al dan Al-Fe pada Elektrokoagulasi dalam Penyisihan Fe dan Mn Air Asam Tambang	Penelitian ini menganalisis pengaruh jenis elektroda dan waktu kontak pada metode elektrokoagulasi menggunakan plat aluminium (Al) dan besi (Fe) untuk mengolah air asam tambang. Variasi waktu kontak adalah 45, 90, 120, 150, dan 180 menit, dengan jenis elektroda Al-Al dan Al-Fe. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak, semakin efektif penyisihan besi (Fe) dan mangan (Mn) dari air asam tambang. Plat Al-Al lebih efisien dibandingkan Al-Fe karena menghasilkan lebih banyak flok. Plat Al-Al dengan waktu kontak 180 menit adalah yang paling efektif, dengan penyisihan besi (Fe) sebesar 100% dari konsentrasi awal 1,25 mg/L dan mangan (Mn) sebesar 96% dari konsentrasi awal 2,58 mg/L.
2	Berliani Indah Yuniarti & Tri Widayatno, 2022(Yuniarti & Widayatno, 2022)	Analisa Perubahan BOD, COD, dan TSS Limbah Cair Industri Tekstil Menggunakan Metode Elektrooksidasi - Elektrokoagulasi Elektroda Fe-C dengan Sistem Semi Kontinyu	Penggunaan elektroda Fe-C (besi dan karbon) dengan metode elektrooksidasi-elektrokoagulasi secara semi-kontinyu melibatkan variasi tegangan (8, 12, 16, dan 20 Volt) serta waktu (15 dan 45 menit) untuk menentukan BOD, COD, dan TSS. Metode ini berhasil mengurangi BOD dari 1479,9 mg/L menjadi 104,91 mg/L, dan COD dari 829,2 mg/L menjadi 212,29 mg/L. Namun, nilai kandungan TSS tetap tinggi, yaitu lebih dari 3000 mg/L, dengan 9400 mg/L pada tegangan 8 Volt dan waktu 15 menit, serta 23800 mg/L pada tegangan 8 Volt dan waktu 45 menit
3	Rony Pasonang Sihombing & Yunus Tonapa Sarungu, 2022	Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil dengan Metoda Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Besi (Fe) dan Aluminium (Al)	Hasil penelitian pengolahan air limbah tekstil menggunakan elektroda Fe dan Al serta SS (<i>Stainless steel</i>) pada rapat arus 0,25-1,25 A/dm ² dengan waktu proses 35 menit diperoleh kadar COD dengan efisiensi proses lebih besar 80% dan kadar turbiditas dengan efisiensi lebih besar 90%. Untuk penggunaan

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			<p>elektroda Fe dengan rapat arus $1,0 \text{ A/dm}^2$ dengan waktu 30 menit menghasilkan penyisihan COD $75,3 \text{ mgO}_2/\text{L}$ dengan efisiensi 94% dan penurunan kekeruhan (turbiditas) 1,21 NTU dengan efisiensi penurunan 96%, sedangkan dengan elektroda Al kondisi terbaik dicapai pada rapat arus $0,75 \text{ A/dm}^2$ dengan waktu proses 35 menit menghasilkan penyisihan COD $24,13 \text{ mg O}_2/\text{L}$ dengan efisiensi 97% dan penurunan turbiditas 0,35 NTU dengan efisiensi penurunan 99,8%.</p>
4	<p>Dionysisu Nathanel, Keenan Michael Agape, Adriana Anteng Anggorowati, dan Andrew Joewono, 2021</p>	<p>Pengolahan Limbah Cair Industri dari PT SIER Menggunakan Metode Elektroflotasi (EF)</p>	<p>Menggunakan <i>stainless steel</i> sebagai anoda dan aluminium sebagai katoda diperoleh hasil bahwa dengan tegangan listrik sebesar 32,5 Volt dan waktu kontak selama 60 menit menunjukkan hasil penurunan nilai COD dan TSS yang paling besar. COD mengalami penurunan dari $236,66 \text{ mg/L}$ menjadi $24,56 \text{ mg/L}$ atau sebesar 90%, TSS mengalami penurunan nilai dari 187 mg/L menjadi $34,33 \text{ mg/L}$ atau sebesar 81,64%. Sedangkan penurunan koloni bakteri dari $4,7 \times 10^4$ koloni bakteri/ml sampel menjadi $4,03 \times 10^3$ koloni bakteri/ml atau sebesar 91,42% pada tegangan listrik sebesar 19 Volt dan waktu kontak selama 20 menit.</p>
5	<p>Haryono, 2021</p>	<p>Kinerja Metode Elektroflotasi pada Pengolahan Air Limbah Pewarna Tekstil Dispersi</p>	<p>Menggunakan aluminium sebagai katoda dan <i>stainless steel</i> sebagai anoda menunjukkan bahwa kondisi optimum elektroflotasi dicapai pada penggunaan beda potensial listrik sebesar 12 V dan waktu elektroflotasi selama 60 menit. Pada kondisi tersebut, nilai COD dan tingkat warna dari air limbah tekstil dapat diturunkan dengan efisiensi pemisahan berturut-turut sebesar 88,9% dan 93,3%, dengan kebutuhan energi listrik spesifik sebesar 200 kWh/m^3. Sedangkan nilai penurunan konsentrasi zat warna per kWh energi listrik berdasarkan COD dan tingkat warna masing-masing adalah $16293,3 \text{ ppm/kWh}$ dan $23333,3 \text{ Pt-Co/kWh}$.</p>

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
6	Sutanto, S. Warnasih, A.H. Mulyati, dan Y. M. Intan, 2021	<i>Application of Continuous System Electrocoagulation Method for Textile Industry Wastewater Treatment</i>	Menggunakan pasangan elektroda Aluminium (Al) secara elektrokoagulasi (EC). Hasil menunjukkan kerapatan tegangan optimum adalah 12 Vcm ⁻¹ dan laju alir 1 mL ^{s-1} . Pengurangan COD mencapai 91,80% dan TSS 87,83%, meskipun TSS tidak memenuhi baku mutu. Warna berkurang 83,98%, pH meningkat dalam kisaran toleransi, DO meningkat hingga 8,2 mg ^{L-1} , konduktivitas naik hingga 5350 $\mu\text{s cm}^{-1}$, dan konsentrasi Al naik hingga 2,71 mg ^{L-1} .
7	Atikah, 2021	Penyisihan Logam dalam Limbah Cair Kerajinan Tenun Songket dengan Metode Elektrokimia	Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium secara <i>batch</i> menggunakan lempengan aluminium berukuran 24, 32, dan 40 cm ² sebagai elektroda. Variasi dilakukan pada waktu dan ukuran lempengan dengan tegangan 12 Volt dan arus 0,5 ampere, serta jarak elektroda 5 cm. Sampel diambil pada 20, 30, 40, 50, dan 60 menit setelah elektroda dialiri arus, kemudian diendapkan selama 30 menit sebelum dianalisis. Hasil menunjukkan penurunan kadar Fe tertinggi sebesar 94,14% (0,15 mg/L) pada menit ke-60 dengan lempengan 40 cm ² . Kondisi terbaik untuk Zn adalah penurunan 98,04% (0,02 mg/L) pada waktu dan ukuran lempengan yang sama.
8	Hossein Ehsani, Naser Mehrdadi, Gholamreza Asadollahfardi, Nabi Bidhendi, dan Ghasem Azarian, 2020	<i>A New Combined Electrocoagulation-Electroflotation Process for Pretreatment of Synthetic and Real Moquette-Manufacturing Industry Wastewater: Optimization of Operating Conditions</i>	Industri manufaktur moquette menghasilkan air limbah berkonsentrasi tinggi <i>polyvinyl acetate</i> (PVAc), yang beracun dan dapat menghambat mikroorganisme di instalasi pengolahan air limbah biologis. Studi ini menggunakan proses gabungan elektrokoagulasi-elektroflotasi untuk mengolah air limbah tersebut. Efisiensi pengolahan diukur berdasarkan pengurangan COD, TSS, PVAc, TDS, dan konduktivitas listrik (EC) dari air limbah sintesis dan nyata. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi meningkat dengan peningkatan kerapatan arus dan waktu retensi serta dengan pengurangan jarak elektroda. Dalam kondisi optimal, efisiensi pengurangan untuk air limbah nyata

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			mencapai 93,9% (COD), 92,9% (TSS), 95,9% (PVAc), 90,5% (TDS), dan 85% (EC). Elektroda besi lebih efisien dan ekonomis dibandingkan aluminium. Proses ini juga memfasilitasi flotasi dan pemadatan flok di permukaan reaktor, menghilangkan kebutuhan unit sedimentasi/flotasi tambahan.
9	Kiswanto, Wintah, dan Jaya Maulana, 2019	Penurunan Warna, TSS, dan Cr pada Limbah Batik Tulis Secara Elektrolisis dan Biosand di Desa Kalipucang Wetan Kabupaten Batang	Proses elektrolisis dan biosand menggunakan variasi tegangan 12, 18, dan 32 Volt serta waktu kontak 60, 120, dan 180 menit dengan penyaring pasir, kerikil, dan kasa. Menggunakan dua plat aluminium sebagai elektroda, hasil analisis menunjukkan penyisihan zat warna tertinggi 95,43%, TSS 99,42%, COD 89,73%, dan Cr 78,16% dengan tegangan dan waktu kontak optimal. Hasil pengolahan memenuhi baku mutu Permen LH No.5 Tahun 2004 dan Perda Jateng No.5 Tahun 2012 kecuali untuk COD.
10	Nabila Fauzi, Kartika Udyani, Daril Ridho Zuchrillah, dan Fitriatun Hasanah, 2019	Penggunaan Metode Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Aluminium dan Besi pada Pengolahan Air Limbah Batik	Menggunakan elektroda aluminium (Al) sebagai anoda dan besi (Fe) sebagai katoda. Proses elektrokoagulasi dilakukan dengan tegangan 3 Volt, 6 Volt, 9 Volt, dan 12 Volt, serta waktu 90 menit, 150 menit, dan 210 menit. Elektroda disusun paralel dengan jarak 1,5 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada waktu 150 menit dengan tegangan 12 Volt, penurunan persentase TSS mencapai 76,08%. Untuk COD, pada waktu 90 menit dengan tegangan 6 Volt, penurunan persentase mencapai 94,01%, sedangkan untuk BOD, pada waktu 90 menit dengan tegangan 6 Volt, penurunan persentase mencapai 97,30%.
11	Haryono, Muhammad Faizal D., Christi Liamita N., dan Atiek Rostika, 2018	Pengolahan Limbah Zat Warna Tekstil Terdispersi dengan Metode Elektroflotasi	Menggunakan aluminium sebagai katoda dan <i>stainless steel</i> sebagai anoda diperoleh hasil elektroflotasi terbaik dengan nilai COD 122,4 mg/L (sebagai % pemisahan polutan adalah 88,9%) dan tingkat warna 100 mg/L Pt-Co (sebagai % pemisahan polutan adalah 93,3%) diperoleh ketika digunakan tegangan 12 V dan waktu kontak 60 menit. Hal ini menunjukkan semakin besar

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			tegangan dan semakin lama waktu elektroflotasi, penurunan nilai COD dan warna semakin besar.
12	Novie Putri Setianingrum, Agus Prasetya, dan Sarto, 2017 (Setianingrum et al., 2017)	Pengaruh Tegangan Listrik, Jarak Antar Elektroda dan Waktu Kontak Terhadap Penurunan Zat Warna <i>Remazol Red RB</i> Menggunakan Metode Elektrokoagulasi	Proses elektrokoagulasi menggunakan arus listrik searah untuk koagulasi melalui elektrokimia. Dalam penelitian ini, tegangan listrik divariasikan menjadi 10 Volt dan 15 Volt, jarak antar elektroda menjadi 2 cm dan 3 cm, serta waktu kontak menjadi 0, 10, 20, 40, dan 60 menit. Pengukuran COD, TSS, dan warna dilakukan setiap 10, 20, 40, dan 60 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan dan jarak elektroda mempengaruhi penurunan COD, TSS, dan warna pada limbah cair sintesis <i>Remazol Red RB</i> . Kondisi optimal adalah tegangan 10 Volt dan jarak antar elektroda 2 cm dengan waktu kontak 10 menit, menghasilkan penurunan COD dari 428 mg/L menjadi 54 mg/L, TSS dari 850 mg/L menjadi 277 mg/L, dan warna dari 2733 Pt-Co menjadi 75,5 Pt-Co.
13	Izabel de Oliveira da Mota, José Adilson des Castro, Rui de Góes Casqueira, dan Angelo Gomes de Oliveira Junior, 2015	<i>Study of Electroflotation Method for Treatment of Wastewater from Washing Soil Contaminated by Heavy Metals</i>	Menggunakan elektroda berupa <i>stainless steel</i> dalam proses elektroflotasi secara efektif mampu menghilangkan 97% kadar timbal, barium, dan seng dari air limbah yang berasal dari pencucian tanah yang terkontaminasi oleh cairan pengeboran dari sumur minyak dengan waktu perlakuan selama 20 menit.
14	Noviyanti Dwi Lestari & Tuhu Agung, 2014	Penurunan TSS dan Warna Limbah Industri Batik Secara Elektro Koagulasi	Proses elektrokoagulasi dengan variasi kuat arus yaitu 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 Ampere dan waktu kontak 20, 60, 100, 140 dan 180 menit. Proses elektrokoagulasi ini menggunakan enam plat aluminium sebagai elektroda. Hasil analisis menunjukkan persentase penyisihan COD tertinggi mencapai 83,33% terjadi pada menit ke 180 dengan kuat arus 2,5 Ampere, persentase penyisihan TSS mencapai 90% dan zat warna mencapai

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			88,51% dengan waktu kontak 180 menit dan kuat arus 2,5 Ampere.
15	Andik Yulianto, Luqman Hakim, Indah Purwaningsih, dan Vidya Ayu Pravitasari, 2009	Pengolahan Limbah Cair Industri Batik Pada Skala Laboratorium Dengan Menggunakan Metode Elektrokoagulasi	Penelitian laboratorium secara <i>batch</i> menggunakan 3 lempengan <i>stainless steel</i> berukuran 6x10 cm sebagai anoda dan 3 lempengan aluminium berukuran sama sebagai katoda. Variasi dilakukan pada tegangan listrik 25 dan 30 Volt dengan arus 1 Ampere, serta jarak elektroda 1,5 dan 3 cm. Volume reaktor efektif adalah 12 liter. Sampel diambil pada 5, 10, 15, 30, 45, dan 60 menit sejak elektroda mulai dialiri arus, lalu diendapkan selama 30 menit sebelum analisis. Analisis mengacu pada SNI untuk parameter COD, warna, TSS, dan minyak lemak. Hasil menunjukkan penyisihan COD tertinggi 30% pada menit ke-60, tegangan 25 Volt, jarak elektroda 3 cm. Penurunan warna maksimum 64% pada menit ke-30, 12 Volt, jarak elektroda 1,5 cm. TSS dan minyak lemak turun 77% dan 88% pada menit ke-60, tegangan 25 Volt, jarak elektroda 1,5 cm.
16	Merzouk Belkacem, Madani Khodir, dan Sekki Abdelkarim, 2008	<i>Treatment Characteristics of Textile Wastewater and Removal of Heavy Metals Using the Electroflotation Technique</i>	Menggunkana metode elektroflotasi (EF) dengan elektroda aluminium. Parameter utama yang diuji meliputi tegangan, jarak antara elektroda, waktu pengolahan, pH, dan konduktivitas. Penggunaan parameter optimal (U = 20 V, D = 1 cm, t = 20 menit) pada air limbah industri dari pabrik beludru di Aljazair menunjukkan pengurangan BOD ₅ sebesar 93,5%, COD 90,3%, kekeruhan 78,7%, padatan tersuspensi 93,3%, dan warna lebih dari 93%. Selain itu, studi pemisahan ion logam berat seperti besi, nikel, tembaga, seng, timbal, dan kadmium menunjukkan bahwa elektroflotasi sangat cepat (kurang dari 15 menit) dengan tingkat pengurangan mencapai 99%.

Sumber: Kajian Pustaka, 2024

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih 3 bulan, terhitung sejak bulan Juni – Agustus 2024. Penelitian dimulai dengan persiapan alat dan bahan untuk perakitan reaktor, pembuatan sampel, hingga analisis kualitas air limbah industri tekstil.

Pembuatan dan pengolahan sampel air limbah dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, sedangkan pengujian sampel dilakukan di Balai Besar Laboratorium Kesehatan Masyarakat Kota Makassar.

2.2 Variabel Penelitian

Jenis penelitian yang akan dilakukan adalah penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif yang berfokus pada riset pengembangan untuk metode elektroflotasi. Penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi seberapa efektif metode elektroflotasi dalam mengurangi kadar kontaminan pada air limbah industri tekstil. Elektroflotasi adalah proses pemisahan yang memanfaatkan pembentukan gelembung gas pada elektroda untuk mengangkat partikel terlarut atau terdispersi dalam air, sehingga memfasilitasi penghapusan kontaminan. Dengan mengidentifikasi dan menganalisis efektivitas metode ini, penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk pengolahan air limbah, khususnya dalam industri tekstil yang sering menghadapi masalah pencemaran berat.

Dalam penelitian ini, terdapat tiga variabel utama yang akan diperhatikan. Variabel-variabel ini terdiri dari variabel bebas yang mempengaruhi proses elektroflotasi, variabel terikat yang menunjukkan hasil dari proses, dan variabel kontrol yang harus dijaga konsistensinya selama eksperimen. Dengan mengatur dan mengevaluasi variabel-variabel ini, penelitian diharapkan dapat menentukan parameter optimal untuk mencapai penurunan kadar kontaminan yang maksimal dan memberikan wawasan yang berguna bagi pengembangan metode pengolahan air limbah yang lebih efektif.

2.2.1 Variabel bebas

Variabel bebas adalah faktor-faktor yang mempengaruhi timbulnya variabel terikat, yaitu efektivitas proses elektroflotasi dalam menurunkan kadar kontaminan pada air limbah. Variabel bebas dalam penelitian ini mencakup jenis elektroda dan waktu kontak. Pernyataan Mohsthashami & Shang (2019) mendukung pentingnya faktor-faktor ini, dengan menyebutkan bahwa bahan elektroda, desain reaktor, dan variabel proses (waktu kontak) adalah elemen kunci dalam mempengaruhi hasil dari proses elektroflotasi.

Penelitian oleh Haryono (2021) menunjukkan bahwa dengan meningkatkan tegangan dan memperpanjang waktu kontak, penyisihan parameter warna pada air limbah dapat mencapai 93,33%. Selain itu, penelitian oleh Sutanhaji dkk. (2019) melaporkan bahwa penyisihan parameter krom total dapat mencapai 99,99% dengan pengaturan yang sesuai. Temuan ini menunjukkan bahwa penyesuaian variabel bebas seperti tegangan listrik dan waktu kontak dapat secara signifikan meningkatkan efektivitas proses elektroflotasi dalam mengolah air limbah, menjadikannya area fokus utama dalam penelitian untuk mencapai hasil yang optimal dalam pengurangan kontaminan.

Tabel 5. Matriks penelitian

Jenis Elektroda (E)	Waktu Kontak (T)		
	T1	T2	T3
E1	E1T1	E1T2	E1TE
E2	E2T1	E2T2	E2T3

Sumber: Perencanaan Penelitian, 2024

Keterangan:

E1: Elektroda Aluminium (Al) – *Stainless steel*

E2: Elektroda Aluminium (Al) – Besi (Fe)

T1: Waktu kontak 30 menit

T2: Waktu kontak 50 menit

T3: Waktu kontak 70 menit

Berdasarkan matriks penelitian pada Tabel 5, jenis elektroda yang digunakan yaitu elektroda Al – *Stainless steel* dan Al – Fe. Pemilihan elektroda tersebut didasarkan pada beberapa penelitian sebelumnya, diantaranya penelitian yang dilakukan oleh De Oliveira Da Mota et al. (2015) yang mampu mereduksi logam berat hingga 97% menggunakan elektroda stainless steel, penelitian Putri dkk. (2023) yang menggunakan elektroda Al – Fe dan Al – Al mampu mereduksi logam berat sebesar 96% – 100%, serta penelitian Haryono (2021) yang menggunakan elektroda aluminium – stainless steel dan mampu mereduksi parameter warna hingga 93,3%. Selain itu, pemilihan elektroda-elektroda tersebut juga mempertimbangkan nilai ekonomis serta ketersediaan elektroda di pasaran.

Adapun pemilihan waktu kontak didasarkan pada penelitian Lestari & Agung (2014) yang mengolah air limbah industri batik dengan variasi waktu kontak 20, 60, 100, 140, dan 180 menit serta menggunakan kuat arus 2,5 A. Hasil optimal diperoleh pada waktu kontak paling lama, yaitu 180 menit. Namun, mengingat waktu tersebut terlalu panjang untuk aplikasi praktis, diperlukan waktu pengolahan yang lebih singkat tetapi tetap memberikan hasil yang optimal. Oleh karena itu, setelah mempertimbangkan berbagai faktor, dipilih variasi waktu kontak 30, 50, dan 70 menit namun menggunakan tegangan listrik yang lebih besar untuk memperoleh hasil pengolahan yang lebih efisien. Solihah & Suwerda (2020) menemukan bahwa tegangan yang lebih tinggi (25 V) menyebabkan penghilangan kromium yang lebih besar (89,6%) dibandingkan dengan tegangan yang lebih rendah (15 V dengan efisiensi pengolahan 18,66%).

2.2.2 Variabel terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas dan menjadi objek utama yang diamati untuk menilai efektivitas metode elektroflotasi. Dalam konteks penelitian ini, variabel terikat mencakup konsentrasi hasil pengolahan air limbah, yang diukur berdasarkan parameter warna dan krom total. Parameter warna mengacu pada tingkat perubahan warna air limbah setelah proses elektroflotasi, sementara krom total mengukur konsentrasi logam kromium yang tersisa dalam air. Kedua parameter ini merupakan indikator penting dari kualitas air limbah yang telah diproses dan efektivitas metode elektroflotasi dalam menghilangkan kontaminan.

Pengukuran parameter warna dan krom total memberikan informasi kritis tentang sejauh mana proses elektroflotasi berhasil dalam mengurangi kadar kontaminan. Penurunan konsentrasi parameter ini menandakan keberhasilan dalam mengolah air limbah, dengan pencapaian penurunan yang signifikan menunjukkan bahwa variabel bebas seperti tegangan listrik dan jenis elektroda diatur secara efektif. Observasi terhadap variabel terikat ini memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi secara kuantitatif dampak dari berbagai pengaturan variabel bebas, serta mengidentifikasi kondisi optimal untuk mencapai pengurangan kontaminan yang maksimal. Dengan demikian, analisis terhadap parameter warna dan krom total tidak hanya menilai hasil pengolahan, tetapi juga membantu dalam penyempurnaan proses elektroflotasi untuk aplikasi yang lebih efisien dan efektif.

2.2.3 Variabel kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang dapat mempengaruhi variabel terikat, yaitu variabel yang diukur atau diamati dalam sebuah penelitian. Meskipun variabel kontrol memiliki potensi untuk mengubah hasil penelitian, pengaruhnya dapat diabaikan atau diminimalisasi melalui pengaturan yang tepat. Hal ini dilakukan dengan cara menjaga kondisi variabel kontrol agar tetap sama atau konsisten di seluruh percobaan atau kelompok uji. Adapun variabel kontrol pada penelitian ini yaitu:

1. Desain reaktor yang digunakan
2. Jenis aliran listrik yang digunakan
3. Besar tegangan listrik yang digunakan
4. Konsentrasi air limbah yang diolah
5. Volume air limbah yang diolah

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini melibatkan penggunaan beberapa alat serta bahan pada berbagai tahapan penelitian, mulai dari perencanaan hingga pengujian pengolahan sampel air limbah. Adapun alat dan bahan yang digunakan diuraikan sebagai berikut:

2.3.1 Alat

Adapun alat yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 6. Alat pengujian

Metode	Alat	Fungsi
SNI 6989.17:2009 (Cara uji krom total (Cr-T) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) – nyala)	Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)-nyala	Untuk mengukur absorbansi cahaya pada panjang gelombang khusus untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi krom dalam sampel
	Lampu katoda berongga (<i>Hollow Cathode Lamp/HCL</i>) krom	Menghasilkan radiasi elektromagnetik yang khusus untuk atomisasi krom dalam SSA sehingga dapat mendeteksi kadar krom dengan tepat
	Gelas <i>beaker</i> 100 mL dan 250 mL	Untuk menampung dan mencampur larutan standar, reagen, atau sampel dalam volume tertentu untuk dianalisis
	Pipet volumetrik 10 mL dan 50 mL	Untuk mengukur volume larutan standar dan sampel dengan ketelitian tinggi untuk persiapan larutan standar dan pengenceran sampel
	Labu ukur 50 mL; 100 mL; dan 1000 mL	Untuk mengukur dan menyiapkan volume larutan dengan presisi yang diperlukan dalam proses pengujian
	<i>Erlenmeyer</i> 100 mL	Untuk mencampur larutan reagen atau untuk reaksi kimia yang memerlukan pencampuran berkapasitas sedang
	Corong gelas	Untuk menuangkan larutan atau sampel ke dalam wadah atau perangkat lainnya dengan presisi dan untuk meminimalkan kehilangan sampel
	Kaca arloji	Sebagai wadah ketika mengukur volume kecil larutan atau sampel dengan presisi
	Pemanas Listrik	Untuk memanaskan larutan atau sampel dalam proses pencampuran atau reaksi kimia untuk mempercepat proses atau menguapkan pelarut
	Saringan membran dengan ukuran pori 0,45 µm	Untuk menyaring partikel halus dari larutan atau sampel sebelum dianalisis untuk menghindari interferensi dalam SSA
	Timbangan analitik dengan ketelitian 0,0001 g	Untuk menimbang reagen dan sampel dengan ketelitian tinggi dalam persiapan larutan standar dan proses pengujian
	Labu semprot	Untuk menampung gas-gas hasil reaksi atau larutan yang akan diuapkan, terutama dalam proses pengurangan volume sampel sebelum dianalisis
	SNI	Tabung Nessler

Metode	Alat	Fungsi
06-6989.24:2005 (Cara uji warna secara perbandingan visual)	50 mL	larutan standar warna sehingga memungkinkan perbandingan visual langsung antara sampel dan standar
	Neraca analitik	Untuk menimbang bahan kimia dengan ketelitian tinggi dalam pembuatan larutan standar warna sehingga dapat diperoleh konsentrasi yang akurat
	Labu ukur 100 mL	Untuk mengukur dan menyiapkan volume larutan dengan presisi tinggi, termasuk dalam pembuatan larutan standar warna

2.3.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 7. Bahan pengujian

Metode	Bahan	Fungsi
SNI 6989.17:2009 (Cara uji krom total (Cr-T) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) – nyala)	Air bebas mineral	Digunakan untuk pengenceran sampel dan pembuatan larutan standar
	Asam nitrat (HNO ₃) pekat	Memecah senyawa kromium dan menjaga sampel dalam kondisi asam
	Krom trioksida (CrO ₃) atau kalium dikromat (K ₂ Cr ₂ O ₇)	Sebagai agen oksidasi dalam analisis kimia, termasuk dalam reaksi penguraian dan preparasi sampel
	Gas asetilen (C ₂ H ₂) HP dengan tekanan minimum 100 psi	Sebagai bahan bakar untuk nyala api pada spektrofotometer serapan atom (AAS)
	Larutan pengencer HNO ₃ 0,05 M	Untuk mengencerkan larutan sampel yang terlalu pekat sehingga dapat dilakukan analisis dengan lebih tepat
	Larutan pencuci HNO ₃ 5%	Untuk membersihkan peralatan dan wadah yang digunakan dalam pengujian
	Udara tekan HP atau udara tekan dari kompresor	Untuk menyediakan udara bertekanan yang diperlukan dalam operasi instrument laboratorium atau peralatan analisis
SNI 06-6989.24:2005 (Cara uji warna secara perbandingan visual)	Air suling	Sebagai pelarut murni untuk menghindari kontaminasi yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran warna
	Larutan induk warna 500 unit Pt-Co	Sebagai standar referensi untuk mengkalibrasi dan membandingkan intensitas warna sampel air secara visual dalam pengujian warna
	Larutan 1,246 g kalium kloro platina (K ₂ PtCl ₆)	Sebagai bahan untuk membuat larutan standar

Metode	Bahan	Fungsi
	yang ekuivalen dengan 500 mg logam platina dan 1,0 g kobal klorida, ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) yang ekuivalen dengan 250 mg logam kobal	

2.4 Populasi dan Sampel

Penelitian ini difokuskan pada pengolahan air limbah dari industri tekstil, yang merupakan hal penting mengingat dampak lingkungan yang signifikan dari limbah tekstil yang tidak diolah dengan baik. Untuk keperluan penelitian, air limbah industri tekstil yang digunakan diperoleh melalui metode buatan atau *artificial*, yang memungkinkan peneliti untuk memiliki kontrol yang lebih baik terhadap komposisi dan karakteristik limbah yang diuji. Metode buatan ini melibatkan pembuatan air limbah dengan menambahkan bahan-bahan yang biasanya ditemukan dalam limbah tekstil, seperti zat pewarna, bahan kimia, dan logam berat, untuk meniru kondisi limbah nyata yang dihasilkan oleh proses produksi tekstil. Dengan menggunakan air limbah buatan ini, penelitian dapat lebih mudah mengidentifikasi dan mengukur efektivitas metode elektroflotasi dalam kondisi yang terstandarisasi.

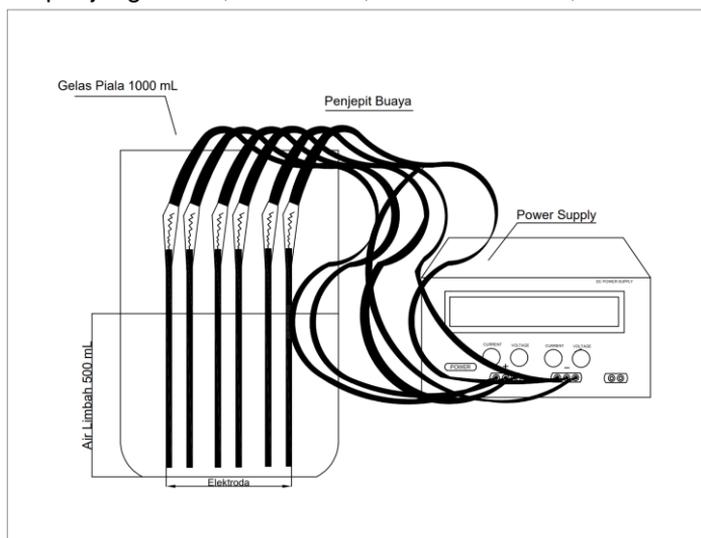
Dalam konteks penelitian ini, populasi yang ditargetkan adalah air limbah industri tekstil secara umum, yang mencakup berbagai jenis limbah yang dihasilkan oleh proses tekstil. Namun, untuk mendapatkan data yang relevan dan dapat diandalkan, sampel yang digunakan dalam eksperimen adalah limbah cair industri tekstil yang sengaja dibuat. Sampel ini dirancang untuk mencerminkan komposisi dan sifat limbah tekstil yang sebenarnya, memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi performa metode elektroflotasi secara efektif. Penggunaan sampel buatan memastikan bahwa variabel-variabel dalam penelitian dapat dikontrol dan dimodifikasi sesuai kebutuhan, sehingga hasil yang diperoleh dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai efektivitas pengolahan air limbah dalam situasi yang terukur dan konsisten.

2.5 Persiapan Penelitian

2.5.1 Perencanaan desain reaktor elektroflotasi

Perencanaan desain reaktor dilakukan dengan mempertimbangkan kemampuan pengolahan metode elektroflotasi terhadap variasi yang akan digunakan dalam penelitian. Reaktor ini terdiri dari rancangan listrik sederhana yang dirangkai dengan penyangga pelat dan pelat sebagai elektroda yang dihubungkan dengan gelas *beaker* berukuran 1000 ml. Penentuan elektroda didasarkan pada kemampuan menghantarkan listrik baik di kutub negatif maupun positif, kemampuan aksesibilitas, kestabilan dalam reaksi elektrolisis, serta efisiensi untuk mengolah polutan dalam air limbah. Adapun Elektroda yang digunakan, yaitu

elektroda Aluminium – *Stainless steel* (E1) serta elektroda Aluminium – Fe (E2) dengan ukuran panjang 10 cm, lebar 4 cm, dan ketebalan 0,2 cm.



Gambar 5. Desain reaktor elektroflokasi

Elektroda terdiri atas 3 pasang elektroda yang dirangkai secara paralel dan ditempatkan secara vertikal dalam reaktor. Penempatan elektroda secara vertikal dalam elektrolisis memiliki beberapa keuntungan. Pada elektrolisis aluminium, penggunaan elektroda vertikal memungkinkan operasi yang stabil pada suhu rendah dan kerapatan arus hingga 1 A/cm^2 , dengan sedikit sekali kotoran (elektroda yang larut) yang berasal dari anoda dalam produk akhirnya (Gunnarsson et al., 2019).

Elektroda disusun secara paralel. Dimana setiap elektroda dihubungkan langsung ke *power supply* menggunakan penjepit buaya, sehingga setiap elektroda menerima tegangan yang sama. Dalam susunan paralel, arus dibagi di antara elektroda, tetapi setiap elektroda menerima tegangan penuh dari sumber listrik. Dengan cara demikian, dapat meningkatkan efisiensi proses elektroflokasi serta memudahkan kontrol dan pengaturan arus yang masuk ke tiap elektroda sehingga proses pengolahan yang dilakukan dapat menjadi lebih stabil dan efisien.

Dalam aplikasi pengolahan air limbah, susunan elektroda vertikal mengonsumsi lebih sedikit energi dibandingkan susunan horizontal, meskipun mungkin memiliki sedikit penurunan efisiensi dalam menghilangkan kekeruhan dan kebutuhan oksigen kimia. Susunan elektroda vertikal dalam pengolahan air limbah lebih hemat energi karena distribusi arus listrik lebih merata dan jarak elektroda yang lebih pendek, sehingga mengurangi resistensi listrik. Aliran air yang memanfaatkan gravitasi meningkatkan transfer massa tanpa memerlukan banyak energi tambahan, meskipun sedikit mengurangi efisiensi penghilangan polutan. Selain itu, susunan ini juga mengurangi pembentukan gas di sekitar elektroda, sehingga menurunkan kebutuhan energi elektrolisis. Sementara susunan horizontal dapat meningkatkan efisiensi melalui turbulensi yang lebih baik, namun membutuhkan

lebih banyak energi karena resistensi dan kebutuhan pengaturan aliran yang lebih kompleks (Genc & Eryilmaz, 2017).

2.5.2 Pembuatan sampel air limbah

Air limbah yang digunakan dalam penelitian ini berupa air limbah *artificial* (buatan) yang dibuat berdasarkan karakteristik air limbah industri tekstil sebenarnya. Air limbah dibuat dengan melarutkan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) serta pewarna tekstil berwarna merah tua (merk Wantex) ke dalam aquades.

2.6 Pelaksanaan Penelitian dan Pengumpulan Data

Penelitian ini berbasis kuantitatif sehingga pengumpulan data dilakukan melalui eksperimen yang menghasilkan data percobaan. Data ini dikumpulkan secara langsung di lokasi dalam kondisi yang terkontrol. Data primer ini mencakup pengujian parameter pencemar yang meliputi parameter warna dan krom total dalam air limbah industri tekstil, sesuai dengan standar yang berlaku sebelum dan setelah proses pengolahan menggunakan reaktor elektroflotasi.

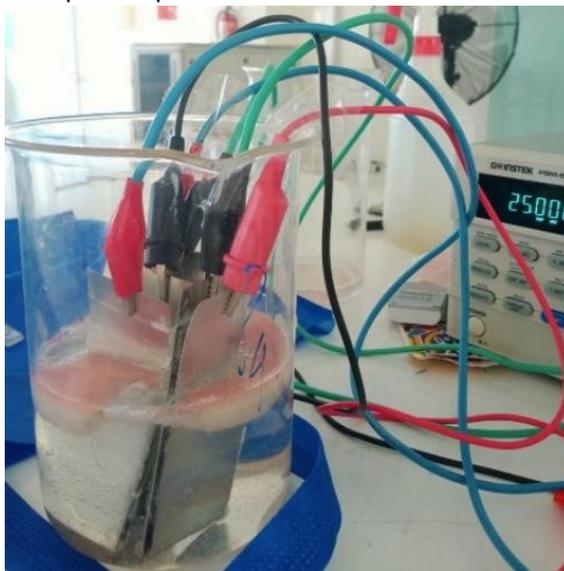
2.6.1 Pengolahan sampel air limbah

Pengolahan air limbah dilakukan dengan menggunakan sistem *batch*, di mana volume air limbah tekstil yang digunakan adalah sebesar 500 mL. Sistem *batch* dipilih untuk memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap variabel-variabel proses, seperti waktu kontak dan jenis elektroda, yang berperan penting dalam efektivitas pengolahan. Pada penelitian ini, digunakan tiga pasang elektroda untuk setiap jenis elektroda, yaitu aluminium – *stainlees steel* dan aluminium – besi, yang disusun secara paralel. Penyusunan paralel ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengolahan dengan memperluas area reaksi dan mengoptimalkan distribusi arus listrik.

Air limbah yang akan diolah ditampung dalam sebuah reaktor berupa gelas *beaker* berkapasitas 1000 mL. Penggunaan gelas *beaker* memungkinkan pengamatan visual langsung terhadap proses elektroflotasi, termasuk pembentukan gelembung gas dan perubahan warna air limbah selama proses berlangsung. Elektroda yang telah terhubung dengan tegangan listrik sebesar 25 Volt melalui *power supply* kemudian dimasukkan ke dalam reaktor tersebut. Tegangan 25 Volt dipilih karena dianggap cukup untuk menghasilkan gelembung gas yang diperlukan untuk mengangkat partikel tersuspensi tanpa menyebabkan *overpotential* yang bisa merusak elektroda.

Proses pengolahan dilakukan dengan variasi waktu kontak selama 30, 50, dan 70 menit. Variasi waktu ini bertujuan untuk menentukan durasi optimal yang dapat mencapai efisiensi tertinggi dalam pengurangan polutan tanpa menghabiskan energi secara berlebihan. Selain itu, untuk memastikan keandalan data, setiap variasi waktu dilakukan duplo, atau dua kali pengulangan. Pengulangan ini penting

untuk meminimalkan kemungkinan kesalahan acak dan untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh dapat direproduksi.



Gambar 6. Proses elektroflotasi

Efluen hasil pengolahan setiap variasi diambil kemudian dilakukan pengujian untuk mengetahui tingkat efektivitas dari masing-masing variasi jenis elektroda dan waktu kontak. Hasil akhir dari proses ini akan memberikan informasi mengenai kombinasi optimal antara jenis elektroda dan waktu kontak yang paling efisien untuk mengurangi polutan dalam air limbah tekstil, yang pada akhirnya dapat digunakan sebagai referensi dalam skala industri.

2.6.2 Pengujian sampel air limbah

Pengujian sampel air limbah dilakukan sebelum dan setelah pengolahan dilakukan. Pengujian sampel akan dilakukan secara duplo untuk memperoleh tingkat akurasi data yang lebih baik. Sampel yang mewakili sebagai konsentrasi awal zat pencemar adalah sampel air limbah yang diambil secara langsung di lokasi pengambilan sampel. Sedangkan, sampel yang mewakili sebagai konsentrasi akhir zat pencemar adalah sampel air limbah yang diambil pada reaktor elektroflotasi setelah dilakukannya pengolahan. Pengujian ini dilakukan di lokasi pengujian pengolahan air limbah yang telah ditentukan. Pengujian sampel air limbah dilakukan pada parameter zat pencemar yang ditentukan. Adapun metode yang digunakan sebagai berikut.

Tabel 8. Metode pengujian sampel air limbah

No	Parameter	Satuan	Metode	Acuan Metode
1	Warna	Pt-Co	Perbandingan Visual	SNI 6989.24:2005
2	Krom total	mg/L	SSA-Nyala	SNI 6989.17:2009

Sumber: Perencanaan Penelitian, 2024

Pengujian parameter warna. Pengujian parameter warna mengacu pada SNI 6989.24:2005 tentang Air dan air limbah – Bagian 24: Cara uji warna secara perbandingan visual. Prinsip metode ini yaitu dengan membandingkan warna sampel air dengan larutan standar yang dikenal sebagai larutan induk warna 500 unit Pt-Co. Larutan induk ini digunakan sebagai acuan standar untuk mengukur intensitas warna dalam sampel air. Sampel air ditempatkan dalam wadah transparan (tabung Nessler) dan dibandingkan secara visual dengan serangkaian larutan standar yang memiliki konsentrasi warna yang berbeda, diukur dalam unit Pt-Co. Warna sampel yang paling mirip dengan salah satu larutan standar menunjukkan kadar warna dalam sampel tersebut. Hasil pengamatan kemudian digunakan untuk menghitung konsentrasi warna dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Warna contoh (unit Pt – Co)} = \frac{A \times 50}{B} \quad (4)$$

Keterangan:

A = perkiraan unit warna dari contoh yang diencerkan

B = volume (mL) contoh yang diencerkan

Pengujian parameter krom total. Pengujian parameter krom total mengacu pada SNI 6989.17:2009 tentang Air dan air limbah – Bagian 17: Cara uji krom total (Cr-T) secara spektrofotometri Serapan Atom (SSA) – Nyala. Prinsip metode ini yaitu dengan mengubah logam krom dalam sampel menjadi bentuk atomnya melalui pemanasan dalam nyala udara-asetilen. Atom krom kemudian menyerap energi radiasi elektromagnetik dari lampu katoda dengan panjang gelombang 357,9 μm . Besarnya energi yang diserap oleh atom krom diukur, di mana jumlah serapan energi ini berbanding lurus dengan kadar krom dalam sampel. Jadi, semakin tinggi kadar krom, semakin besar energi yang diserap, yang kemudian digunakan untuk menentukan konsentrasi krom total dalam sampel.

Hasil pengukuran yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung konsentrasi krom total dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Cr – T (mg/L)} = C \times f_p \quad (5)$$

Keterangan:

Cr – T = konsentrasi krom total (mg/L)

C = kadar yang didapat dari hasil pengukuran (mg/L)

f_p = faktor pengenceran

2.7 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan mengumpulkan hasil pengujian parameter air limbah industri tekstil yang meliputi parameter warna dan krom total. Konsentrasi akhir dari pencemar air limbah industri tekstil dibandingkan dengan baku mutu air limbah industri tekstil. Selain itu, efisiensi pengolahan reaktor elektroflotasi terhadap air limbah industri tekstil dihitung untuk mengetahui kemampuan dan kapasitas pengolahan reaktor elektroflotasi terhadap air limbah industri tekstil. Adapun persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$\% \text{ penurunan} = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \times 100\% \quad (6)$$

Keterangan:

C_0 = Konsentrasi awal

C_1 = Konsentrasi akhir

Dalam Dabke et al. (2012), untuk menentukan jumlah mol gas O_2 dan H_2 yang dihasilkan dalam proses elektrolisis dapat digunakan Hukum Faraday I, yang menyatakan bahwa massa zat yang dihasilkan pada suatu elektroda selama proses elektrolisis berbanding lurus dengan muatan listrik yang digunakan. Hukum Faraday I dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m = \frac{Q \cdot M}{F \cdot z} \quad (7)$$

Keterangan:

m = Massa zat yang dihasilkan atau dikonsumsi (gram)

Q = Jumlah muatan listrik yang mengalir (Coulomb)

M = Massa molar zat (gram/mol)

F = Tetapan Faraday (96.485,3 Coulomb)

z = Jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi

Untuk menghitung jumlah elektron yang terlibat dalam proses elektrolisis, Persamaan 7 dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$z = \frac{Q \cdot M}{m \cdot F} \quad (8)$$

Adapun muatan Listrik dapat diperoleh dengan mengalikan arus listrik (I) yang digunakan dalam proses elektrolisis dengan waktu kontak dalam satuan detik (t), sehingga Persamaan 8 dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$z = \frac{(I \cdot t) \cdot M}{m \cdot F} \quad (9)$$

Untuk menghitung jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi massa zat dan massa molar zat dapat diabaikan, sehingga Persamaan 9 dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$\text{Elektron yang Digunakan} = \frac{I \cdot t}{96.485,3} \quad (10)$$

Setelah diperoleh jumlah elektron yang digunakan dari tiap variasi pengolahan elektroflotasi, selanjutnya jumlah mol gas O_2 dan H_2 yang terbentuk dapat dihitung. Dari Persamaan 1 diketahui bahwa diperlukan untuk melepas 4 elektron untuk membentuk satu molekul gas O_2 , sehingga untuk menghitung jumlah mol gas O_2 yang terbentuk dapat digunakan persamaan berikut:

$$\text{Mol Gas } O_2 = \frac{1}{4} \times \text{Elektron yang Digunakan} \quad (11)$$

Sedangkan dari Persamaan 2 dapat dilihat bahwa untuk membentuk satu mol gas H_2 diperlukan 2 elektron, sehingga untuk menghitung jumlah mol gas H_2 yang terbentuk dapat digunakan persamaan berikut:

$$\text{Mol Gas } H_2 = \frac{1}{2} \times \text{Elektron yang Digunakan} \quad (12)$$

1 mol gas yang terbentuk sama dengan 22,4 L/mol pada keadaan standar (STP), sehingga untuk menghitung volume gas O_2 dan H_2 yang terbentuk digunakan persamaan berikut.

$$\text{Volume Gas} = \text{Jumlah Mol} \times 22,4 \text{ L/mol} \quad (13)$$

Data-data yang telah diperoleh tersebut kemudian dianalisis dengan menggunakan IBM SPSS *Statistics* 27 untuk mengetahui pengaruh waktu kontak dan pemilihan jenis elektroda pada setiap parameter serta melihat hubungan pembentukan gas O₂ dan H₂ terhadap konsentrasi hasil pengolahan.

Sebelum melakukan uji statistik, dilakukan terlebih dahulu uji normalitas untuk melihat apakah data hasil penelitian terdistribusi normal atau tidak. Uji normalitas penting untuk menentukan jenis uji statistik yang akan digunakan. Pemilihan jenis uji normalitas yang digunakan dapat dilihat dari jumlah sampel yang ada. Untuk jumlah sampel > 50 dapat menggunakan uji normalitas Kolmogorov-Smirnov. Adapun untuk jumlah sampel < 50 dapat menggunakan uji normalitas Shapiro-Wilk. Uji normalitas Shapiro-Wilk adalah metode yang efektif untuk menilai normalitas data pada ukuran sampel antara 3 – 50. Namun Royston (1982) menyatakan bahwa metode bisa digunakan untuk ukuran sampel yang lebih besar, yaitu hingga 2000 sampel dan bahkan hingga 5000 sampel (Rahman & Govindarajulu, 1997).

Salah satu uji statistik yang bisa digunakan untuk menggambarkan hubungan antar variabel dalam suatu penelitian adalah regresi linear. Regresi linear merupakan metode yang efektif untuk memprediksi berbagai variabel dalam berbagai konteks untuk menggambarkan prediksi dan tren berbagai variabel. Regresi linear berganda adalah metode statistik untuk menganalisis pengaruh dua atau lebih variabel bebas terhadap variabel terikat. Kelebihan metode ini meliputi kemampuan memprediksi variabel terikat dan mengukur kekuatan hubungan antar variabel (Harahap et al., 2013; Maharadja et al., 2021; Pratama et al., 2021)

Setelah dilakukan uji statistik regresi linear pada IBM SPSS *Statistics* 27, diperoleh persamaan regresi linear dari output hasil uji statistik. Persamaan regresi linear berfungsi untuk menggambarkan hubungan fungsional antara variabel bebas dan variabel tak bebas. Dalam Zuhri (2020), secara umum model regresi linear dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Y = a + bX \quad (14)$$

Keterangan:

Y = Variabel dependen (variabel terikat)

a, b = Konstanta (*constant*)

X = Variabel independen (variabel bebas)

Dari hasil uji regresi diperoleh nilai koefisien determinasi (*R Square*) yang akan digunakan untuk menentukan hubungan variabel. Koefisien determinasi (*R Square*) adalah ukuran statistik yang digunakan untuk menilai sejauh mana variabilitas dalam variabel dependen dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model regresi. Nilai *R Square* berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai 0 menunjukkan bahwa model regresi tidak dapat menjelaskan variabilitas variabel dependen sama sekali, dan nilai 1 menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan seluruh variabilitas variabel dependen. Dalam konteks uji statistik regresi linear, baik sederhana maupun berganda, *R Square* memberikan informasi yang penting

mengenai seberapa baik model tersebut memprediksi hasil dan seberapa besar kontribusi variabel independen terhadap perubahan variabel dependen.

Dalam regresi linear sederhana, di mana hanya ada satu variabel independen, *R Square* mengukur proporsi variabilitas variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen tersebut. Sebagai contoh, jika *R Square* bernilai 0,70, ini berarti bahwa 70% dari variabilitas dalam variabel dependen dapat dijelaskan oleh variabel independen, sedangkan 30% sisanya mungkin dipengaruhi oleh faktor-faktor lain yang tidak termasuk dalam model. Dalam regresi linear berganda, di mana terdapat lebih dari satu variabel independen, *R Square* menunjukkan seberapa baik gabungan dari semua variabel independen dapat menjelaskan variabilitas variabel dependen. Namun, penting untuk diingat bahwa nilai *R Square* yang tinggi tidak selalu menunjukkan bahwa model tersebut adalah yang terbaik, karena *R Square* dapat meningkat dengan menambahkan lebih banyak variabel independen, bahkan jika variabel tambahan tersebut tidak relevan. Oleh karena itu, evaluasi model regresi harus mempertimbangkan juga koefisien regresi dan analisis residual untuk memastikan validitas dan reliabilitas model yang digunakan.

Pemodelan linier menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan pendekatan lain seperti pemodelan eksponensial untuk tugas peramalan dan prediksi. Studi telah menunjukkan bahwa regresi linier dapat memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan dengan pemodelan eksponensial dalam beberapa kasus. Model tren linier juga telah menunjukkan tingkat kesalahan yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pemodelan lainnya seperti pemodelan eksponensial dan geometri (Nuzwan Sudariana et al., 2023).

Adapun interpretasi tingkat pengaruh dari koefisien determinasi menurut Sugiyono (2012) sebagai berikut.

Tabel 9. Interpretasi nilai koefisien determinasi

Interval Koefisien Determinasi	Tingkat Pengaruh
0,00 – 0,199	Sangat Lemah
0,20 – 0,399	Lemah
0,40 – 0,599	Moderat/Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat Kuat

Sumber: Sugiyono, 2012

2.8 Diagram Alir Penelitian

