

**TEKNOLOGI HIBRID ELEKTROKOAGULASI-FLOTASI
DAN BIOMEDIKAL UNTUK SOLUSI PEMURNIAN LIMBAH
CAIR BERKELANJUTAN**



**Lomba Karya Tulis Ilmiah
FUSE 2025
Politeknik Manufaktur Bandung**

Disusun Oleh :

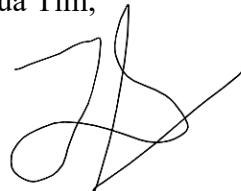
Muhammad Zavier Rizkayanto	*****
Azahid Pramudyia Al Ghifahri	*****
Harold Daniel Metcalf Siregar	*****

**SEKOLAH MENENGAH KEJURUAN NEGERI 4 JAKARTA
JAKARTA
2025**

PENGESAHAN KARYA TULIS ILMIAH

1. Judul Karya Tulis Ilmiah : Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal untuk solusi pemurnian limbah berkelanjutan
2. Pengajuan untuk Lomba : Lomba Karya Tulis Ilmiah (LTKI)FUSE 2025
3. Ketua Tim Penulis
 - a. Nama Lengkap : Muhammad Zavier Rizkayanto
 - b. NISN : *****
 - c. Jurusan : Teknik Mekatronika
 - d. Sekolah : SMK NEGERI 4 JAKARTA
 - e. No. Tel/HP : *****
 - f. Email :*****
4. Anggota Tim Penulis : .2 orang (di luar ketua)
 - a. Anggota Tim 1 : Azahid Pramudya Al Ghifahri
 - b. Anggota Tim 2 : Harold Daniel Metcalf Siregar
5. Guru Pembimbing :
 - a. Nama Lengkap dan Gelar : Mochammad Aldi Mauludin
 - b. NIP : *****
 - c. No. Tel/HP : *****

Jakarta, 29 september 2025
Ketua Tim,



(Muhammad Zavier
Rizkayanto)
NISN. *****

"TEKNOLOGI HIBRID ELEKTROKOAGULASI-FLOTASI DAN BIOMEDIKAL UNTUK SOLUSI PEMURNIAN LIMBAH CAIR BERKELANJUTAN"

**Muhammad Zavier Rizkayanto, Azahid Pramudya Al Ghifahri, Harold
Metcalf Daniel Siregar**

SMKN 4 JAKARTA, JAKARTA UTARA

email: muhammadzavierrizkayanto@gmail.com

ABSTRAK

Pencemaran limbah cair domestik dan industri skala kecil di kawasan perkotaan, khususnya pada pintu-pintu air, merupakan isu lingkungan yang mendesak dan memerlukan solusi komprehensif. Penelitian ini mengusulkan gagasan inovatif berupa Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal sebagai pendekatan baru untuk pemurnian limbah cair secara berkelanjutan. Hipotesis yang diajukan adalah integrasi tiga metode, yaitu pra-perlakuan dengan agen biomedikal (Eco-Enzyme dan EM4), dilanjutkan dengan proses elektrokoagulasi untuk menggumpalkan polutan, serta flotasi untuk memisahkan flok, akan menghasilkan sinergi yang lebih efektif daripada metode konvensional. Berdasarkan analisis konseptual dan tinjauan pustaka, sistem ini diprediksi mampu mencapai efisiensi tinggi dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS. Sistem ini menawarkan solusi yang efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan, sekaligus mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis. Sebagai kesimpulan, penerapan sistem hibrida ini memiliki potensi besar untuk menjadi model pengelolaan limbah cair yang efektif di masa depan, berkontribusi pada pemulihhan kualitas air sungai dan ekosistem perkotaan.

Kata Kunci: Biomedikal, Elektrokoagulasi, Limbah Cair, Solusi Berkelanjutan, Teknologi Hibrida

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah Swt. karena berkat rahmat, taufik, dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan karya tulis ilmiah dengan judul "*Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal untuk Solusi Pemurnian Limbah Berkelanjutan*" dengan baik dan tepat waktu. Tanpa pertolongan-Nya, karya tulis ilmiah ini tidak akan terselesaikan sebagaimana adanya saat ini.

Karya tulis ilmiah ini disusun untuk mengikuti Lomba Karya Tulis Ilmiah (LKTI) dalam rangka Future Automation Skill Exhibition (FUSE). Melalui karya tulis ilmiah ini, penulis berusaha memberikan gagasan yang relevan dengan permasalahan lingkungan, khususnya terkait pencemaran limbah yang semakin kompleks.

Dalam proses penyusunan karya tulis ilmiah ini, penulis menyadari tidak akan mampu menyelesaikannya tanpa adanya dukungan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Mochammad Aldi Mauludin selaku guru pembimbing kami di SMK NEGERI 4 JAKARTA yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan yang tak terhingga selama proses penyusunan proposal ini
2. Panitia penyelenggara Future Automation Skill Exhibition (FUSE) yang telah menyediakan wadah bagi generasi muda untuk menyalurkan kreativitas, inovasi, dan kepedulian terhadap perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Penulis menyadari bahwa karya tulis ilmiah ini masih jauh dari sempurna dan memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan dan penyempurnaan karya tulis ilmiah ini di masa mendatang.

Semoga karya tulis ilmiah ini dapat memberikan manfaat, tidak hanya bagi penulis, melainkan juga bagi pembaca dan pihak-pihak yang memiliki perhatian terhadap isu lingkungan. Semoga pula karya sederhana ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang teknologi pengolahan limbah berkelanjutan.

Jakarta, 26 September 2025

Penulis

DAFTAR ISI

PENGESAHAN KARYA TULIS ILMIAH.....	i
ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL	4
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	4
2.1 Konsep Keberlanjutan dan Analisis Karakteristik Limbah Cair	4
2.2 Landasan Teori Teknologi Elektrokimia: Elektrokoagulasi dan Flotasi	6
2.3 Landasan Teori Teknologi Biomedikal: Bioremediasi dengan Ekoenzim.....	8
2.4 Studi Pendekatan Hibrid untuk Solusi Pengolahan Limbah Berkelanjutan ..	10
BAB III METODE PENULISAN	14
3.1 Jenis dan Pendekatan Kajian.....	14
3.2 Sumber dan Prosedur Pengumpulan Data	14
3.3 Teknik Analisis Data.....	15
BAB IV PEMBAHASAN	16
4.1 Ringkasan Temuan Utama	16
4.2 Analisis Perbandingan Efisiensi Unit Proses	16
4.3 Rekomendasi Kerangka Operasional.....	17
BAB V PENUTUP.....	21
5.1 Simpulan	21
5.2 Saran	22
DAFTAR PUSTAKA.....	24

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar Baku Mutu Limbah Cair RPH (Contoh Acuan)	6
Tabel 2. 2 Reaksi Elektrokimia Dasar pada Elektrokoagulasi.....	7
Tabel 2. 3 Efektivitas Bioremediasi Anaerob dengan Ekoenzim (EE).....	10
Tabel 2. 4 Faktor Kritis Operasional dan Dampaknya pada Efisiensi Elektrokoagulasi (Sintesis).....	12
Tabel 4. 1 Rekomendasi Parameter Operasional (Baseline / Rentang & Rationale)	17

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan pesat populasi global yang berpusat di kawasan perkotaan telah menimbulkan tekanan yang signifikan terhadap kuantitas dan kualitas sumber daya air tawar. Fenomena urbanisasi dan industrialisasi skala kecil secara kolektif berkontribusi terhadap beban polutan organik dan anorganik yang terlepas ke perairan alami, memicu krisis air global dan degradasi ekosistem akuatik [1]. Di Indonesia, tantangan ini semakin nyata, khususnya pada wilayah padat penduduk dan pintu-pintu air di perkotaan. Sungai dan saluran drainase sering menjadi tempat pembuangan akhir bagi limbah cair domestik dan efluen industri yang tidak diolah secara memadai. Sebagai akibatnya, parameter kualitas air esensial seperti *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Total Suspended Solids* (TSS) seringkali teridentifikasi jauh melampaui ambang batas baku mutu yang ditetapkan oleh regulasi lingkungan [2]. Kondisi pencemaran kronis ini tidak hanya mengancam keanekaragaman hayati perairan, tetapi juga berimplikasi langsung pada kesehatan masyarakat yang berada di hilir.

Metode pengolahan limbah cair konvensional yang umum diterapkan, seperti proses lumpur aktif (biological treatment) atau koagulasi berbasis bahan kimia, menghadapi berbagai kendala efisiensi dan operasional. Meskipun sistem koagulasi kimia efektif dalam mereduksi padatan tersuspensi, penggunaannya menuntut dosis reagen kimia yang tinggi, sehingga meningkatkan biaya operasional dan secara simultan menghasilkan volume lumpur sekunder yang besar, yang pada akhirnya menambah persoalan baru dalam aspek pengelolaan residu berbahaya [3]. Di sisi lain, proses biologis sederhana seringkali dicirikan oleh kebutuhan waktu tinggal hidrolik (HRT) yang panjang dan menunjukkan ketidakstabilan signifikan saat dihadapkan pada fluktuasi konsentrasi polutan yang tinggi atau keberadaan senyawa toksik, termasuk logam berat [4]. Keterbatasan-keterbatasan ini menunjukkan adanya celah teknologi yang memerlukan inovasi sistem pengolahan yang lebih adaptif, kompak, dan mengutamakan keberlanjutan lingkungan.

Sejalan dengan urgensi tersebut, pendekatan teknologi hibrid yang mengintegrasikan prinsip elektrokimia dan biologi telah muncul sebagai solusi alternatif yang menjanjikan. Teknologi Elektrokoagulasi-Flotasi (EC-F) terbukti unggul dalam menghilangkan berbagai jenis polutan, baik organik maupun anorganik, dengan memanfaatkan ion koagulan yang dilepaskan secara *in situ* dari elektroda, tanpa memerlukan penambahan koagulan eksternal. Selain efisiensi yang tinggi, sistem EC-F dapat dioptimalkan untuk menghasilkan air olahan dengan

kualitas yang memenuhi standar untuk digunakan kembali (*reuse*) [5]. Secara paralel, pendekatan Biomedikal menggunakan agen hayati seperti Eco-Enzyme atau inokulum mikroba komersial (misalnya EM4) telah dilaporkan efektif dalam mendegradasi polutan, sehingga berkontribusi pada penurunan kadar COD, BOD, dan TSS melalui mekanisme alami [6]. Meskipun kedua pendekatan ini memiliki keunggulan, penelitian yang mengkaji sinergi integrasi antara pra-perlakuan biomedikal dengan proses inti elektrokimia masih terbatas.

Berdasarkan analisis kesenjangan teknologi dan potensi sinergis tersebut, penelitian ini mengajukan konsep Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal. Integrasi pra-perlakuan biologis yang ramah lingkungan dengan proses elektrokimia-fisik ini dihipotesiskan mampu meningkatkan efisiensi penurunan polutan secara komprehensif, menghemat konsumsi energi, serta secara signifikan mengurangi volume lumpur berbahaya. Oleh karena itu, penerapan sistem hibrida ini memiliki potensi besar untuk menjadi model pengelolaan limbah cair yang berkelanjutan, menawarkan solusi mutakhir untuk menghadapi permasalahan pencemaran air di kawasan perkotaan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana mekanisme dan potensi sinergi yang terjadi ketika pra-perlakuan biomedikal (Eco-Enzyme/EM4) diintegrasikan dengan proses Elektrokoagulasi-Flotasi (EC-F) dalam upaya meningkatkan efisiensi pemurnian BOD, COD, dan TSS pada limbah cair perkotaan?
2. Berdasarkan tinjauan literatur, apa keunggulan konseptual yang ditawarkan oleh Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal dalam mengatasi keterbatasan signifikan metode pengolahan limbah cair konvensional (seperti koagulasi kimia dan proses biologis sederhana)?
3. Apa saja tantangan teknis dan rekayasa utama dalam merancang dan mengimplementasikan sistem hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal, serta bagaimana kerangka operasional sistem ini dapat diusulkan untuk penerapannya di kawasan perkotaan?

1.3 Tujuan

1. Menganalisis Mekanisme Sinergi: Menganalisis secara teoretis mekanisme dan potensi sinergi yang optimal ketika proses pra-perlakuan biomedikal (Eco-Enzyme/EM4) diintegrasikan dengan Elektrokoagulasi-Flotasi (EC-F) dalam upaya meningkatkan efisiensi pemurnian BOD, COD, dan TSS.
2. Mengevaluasi Keunggulan Konseptual: Mengevaluasi keunggulan konseptual Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal

dalam mengatasi keterbatasan mendasar dari metode pengolahan limbah cair konvensional.

3. Bagaimana menganalisis potensi efektivitas sistem hibrid ini dalam pemurnian limbah cair perkotaan, serta karakteristik apa yang dibutuhkan agar konsep sistem dapat berjalan secara teoretis?

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

Kajian pustaka ini berfungsi sebagai landasan teoretis untuk pengembangan model teknologi hibrid elektrokoagulasi-flotasi dan biomedikal. Penjabaran ini mencakup konsep keberlanjutan, analisis karakteristik limbah, prinsip kerja teknologi elektrokimia dan biologis, serta studi preseden mengenai integrasi sistem hibrid dalam upaya pemurnian limbah cair.

2.1 Konsep Keberlanjutan dan Analisis Karakteristik Limbah Cair

2.1.1 Peran Teknologi Inovatif dalam Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG 6)

Penyediaan dan pengelolaan air bersih serta sanitasi yang berkelanjutan merupakan fokus utama Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG) keenam yang diinisiasi oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa. Pencapaian SDG 6 menuntut adanya teknologi inovatif, khususnya dalam sektor pengolahan air limbah, guna mencegah pencemaran lingkungan dan memastikan ketersediaan sumber daya air bersih.

Dalam konteks nasional, pemenuhan baku mutu air limbah sebelum dibuang ke lingkungan merupakan mandat hukum yang harus dipatuhi. Pemerintah Indonesia menetapkan kebijakan untuk menjamin standar kesehatan lingkungan dan persyaratan kesehatan air, yang diatur, salah satunya, dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 32 Tahun 2017. Regulasi ini mencerminkan komitmen terhadap pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab. Pembuangan air limbah yang tidak memenuhi standar baku mutu dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan gangguan estetika, sehingga teknologi pengolahan menjadi prasyarat mutlak dalam operasional industri maupun domestik [7].

2.1.2 Karakteristik Dasar dan Parameter Kritis Limbah Cair

Air limbah perkotaan dan beberapa jenis limbah industri, seperti limbah tahu atau Rumah Potong Hewan (RPH), dicirikan oleh kandungan zat pencemar yang tinggi, baik terlarut maupun tersuspensi. Pengukuran parameter-parameter kritis ini sangat esensial untuk mendefinisikan tantangan pengolahan dan menentukan pendekatan teknologi yang tepat.

Terdapat tiga parameter utama yang sering dijadikan indikator beban pencemaran:

1. *Chemical Oxygen Demand* (COD): Parameter ini mengukur total kebutuhan oksigen kimiawi yang diperlukan untuk mengoksidasi seluruh bahan organik dan anorganik yang terdapat dalam air limbah. Data empiris menunjukkan bahwa nilai COD pada limbah industri, seperti limbah tahu, dapat mencapai angka 1.200 mg/L , meskipun pada limbah lain mungkin ditemukan nilai rata-rata 127,14 mg/L.
2. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD): Parameter ini merefleksikan jumlah oksigen yang dikonsumsi oleh mikroorganisme dalam periode waktu tertentu untuk mendegradasi zat organik. Nilai rata-rata BOD pada air limbah sebelum pengolahan sering kali berada pada kisaran 52,71 mg/L.
3. *Total Suspended Solids* (TSS) dan *Total Solids* (TS): TSS adalah total padatan yang tersuspensi dalam air limbah. Kandungan TSS dapat sangat bervariasi; misalnya, limbah tertentu memiliki rata-rata 0,16 mg/L , sementara limbah tahu dapat memiliki nilai TS hingga 9.490 mg/L dan TSS 4.190 mg/L [8] – [9].

Tingginya konsentrasi polutan, terutama COD, menunjukkan adanya potensi masalah dalam pengolahan biologis konvensional. Apabila nilai COD sangat tinggi relatif terhadap BOD, maka rasio BOD/COD menjadi rendah (biasanya di bawah 0,3). Rasio yang rendah ini mengindikasikan bahwa sebagian besar kontaminan bersifat *recalcitrant*, yang berarti zat tersebut sulit atau bahkan tidak dapat diuraikan secara efektif oleh mikroorganisme biologis. Kondisi limbah yang *recalcitrant* ini memerlukan pra-perlakuan berbasis fisik-kimia atau elektrokimia, seperti elektrokoagulasi, untuk memecah kontaminan menjadi senyawa yang lebih sederhana dan meningkatkan rasio BOD/COD agar dapat diolah oleh proses biomedikal selanjutnya [10].

2.1.3 Penetapan Standar Baku Mutu Limbah Cair

Keberhasilan sistem pengolahan limbah diukur berdasarkan kemampuan efluen yang dihasilkan untuk memenuhi standar baku mutu yang berlaku. Sebagai contoh acuan dalam konteks pengolahan limbah dengan beban organik dan padatan tinggi, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 tahun 2014 mengatur baku mutu air limbah untuk kegiatan Rumah Pemotongan Hewan (RPH). Standar ini menetapkan batas maksimum konsentrasi polutan yang diizinkan, yang menjadi target kinerja utama bagi teknologi hibrid yang diusulkan [11].

Tabel 2.1 menyajikan standar baku mutu limbah cair RPH yang digunakan sebagai referensi untuk menetapkan target kinerja pemurnian limbah.

Tabel 2. 1 Standar Baku Mutu Limbah Cair RPH (Contoh Acuan)

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum	Sumber Referensi
COD	Mg/L	200	Permen LH No. 5 Th. 2014
BOD	Mg/L	100	Permen LH No. 5 Th. 2014
TSS	Mg/L	100	Permen LH No. 5 Th. 2014
PH	-	6-9	Permen LH No. 5 Th. 2014

2.2 Landasan Teori Teknologi Elektrokimia: Elektrokoagulasi dan Flotasi

Teknologi elektrokoagulasi (EC) dipilih sebagai tahapan pra-perlakuan utama karena efektivitasnya yang tinggi dalam menghilangkan padatan tersuspensi (TSS), minyak, lemak, dan logam berat, serta potensinya untuk memecah molekul organik *recalcitrant*.

2.2.1 Prinsip Dasar dan Reaksi Redoks dalam Elektrokoagulasi

Elektrokoagulasi didefinisikan sebagai proses elektrokimia yang menggunakan energi listrik untuk melarutkan logam elektroda, menghasilkan ion koagulan *in situ* langsung di dalam air limbah. Berbeda dengan koagulasi kimia konvensional yang memerlukan penambahan zat kimia dari luar, EC menghasilkan koagulan secara berkelanjutan melalui reaksi oksidasi-reduksi yang terkontrol.

Selama proses EC, anoda dan katoda memiliki peran spesifik berdasarkan transfer elektron. Anoda adalah elektroda tempat terjadinya reaksi oksidasi (pelepasan elektron dari logam), yang berfungsi sebagai sumber ion koagulan. Sementara itu, katoda adalah elektroda tempat terjadinya reaksi reduksi (penangkapan elektron), yang menghasilkan gas hydrogen (H_2) dan ion hidroksida (OH^-). Ion logam yang dihasilkan di anoda (Fe^{2+} atau Al^{3+}) kemudian bereaksi dengan OH^- dan air, membentuk spesies monomerik dan polimerik hidroksida, seperti $Fe(OH)_3$ atau $Al(OH)_3$. Koagulan ini memerangkap dan menstabilkan

partikel polutan, membentuk flok yang mudah dipisahkan [12] - [14].

Reaksi elektrokimia dasar yang terjadi pada penggunaan elektroda besi (Fe) dan aluminium (Al) dijelaskan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Reaksi Elektrokimia Dasar pada Elektrokoagulasi

Elektroda	Reaksi	Fungsi	Sumber Pustaka
Anoda (Oksidasi)	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	Sumber ion koagulan	[12] - [14]
Katoda (Reduksi)	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	Menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan ion hidroksida (OH^-)	[12] - [14]
Reaksi Keseluruhan	Pembentukan M(OH)_n ($\text{M}=\text{Fe}/\text{Al}$)	Flokulasi dan adsorpsi polutan	[12] - [14]

2.2.2 Faktor-Faktor Kritis yang Memengaruhi Efisiensi Elektrokoagulasi

Efisiensi EC adalah fungsi langsung dari optimasi parameter operasional. Memahami faktor-faktor ini sangat penting untuk merancang reaktor yang efektif dan berkelanjutan.

1. Tegangan Listrik (Voltase) dan Kerapatan Arus.

Peningkatan tegangan listrik cenderung meningkatkan efisiensi proses karena memperbesar medan listrik antar elektroda dan meningkatkan jumlah atom logam yang terionisasi, yang berujung pada produksi koagulan yang lebih besar. Namun, terdapat batasan optimal. Penerapan tegangan yang terlalu tinggi, misalnya di atas 16 V, berpotensi menyebabkan fenomena *passivation* pembentukan lapisan oksida yang padat pada permukaan elektroda. *Passivation* ini menghambat pelarutan ion logam dan transfer elektron, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi penyisihan kontaminan serta memboroskan energi listrik. Oleh karena itu, prinsip keberlanjutan menuntut operasional pada tegangan yang menghasilkan efisiensi tertinggi tanpa menyebabkan *passivation*.

2. Waktu Kontak.

Waktu kontak atau waktu retensi adalah parameter vital karena menentukan seberapa banyak logam elektroda yang terlarut dan seberapa lama waktu yang tersedia bagi flok untuk berinteraksi dengan kontaminan. Semakin lama waktu kontak, semakin banyak flok M(OH)_n yang terbentuk, sehingga meningkatkan

jumlah kompleks yang dapat mengikat polutan. Penelitian empiris menunjukkan bahwa terdapat waktu kontak terbaik, seperti 160 menit, yang mampu mencapai efisiensi penurunan konsentrasi yang maksimal.

3. Kecepatan Pengadukan.

Kecepatan pengadukan, yang diukur dalam rotasi per menit (rpm), memengaruhi morfologi dan kuantitas flok yang terbentuk. Semakin cepat pengadukan, semakin banyak flok yang terbentuk. Flok yang dihasilkan pada kecepatan pengadukan yang tinggi, misalnya 400 rpm, cenderung lebih stabil, kurang mengandung air, dan lebih padat, yang memudahkan proses pemisahan fasa padat-cair. Peningkatan efisiensi penyisihan kontaminan tertinggi sering dicapai pada kecepatan pengadukan yang optimal.

Faktor lain yang turut memengaruhi EC meliputi kerapatan arus, jenis material elektroda (Fe, Al, Cu), pH awal larutan, dan jarak antar plat.

2.2.3 Mekanisme Pemisahan Fasa Padat Melalui Flotasi

Flotasi merupakan proses pemisahan fasa padat-cair yang efisien dan sering diintegrasikan setelah elektrokoagulasi, dikenal sebagai Elektrokoagulasi-Flotasi (EC-F). Mekanisme flotasi melibatkan penempelan gelembung gas pada partikel flok tersuspensi, yang kemudian mengangkat partikel tersebut ke permukaan air limbah untuk dikumpulkan sebagai *sludge*.

Sinergi antara elektrokoagulasi dan flotasi terjadi secara alami. Salah satu produk dari reaksi reduksi di katoda EC adalah gas hidrogen (H₂). Gelembung H₂ yang sangat halus ini bertindak sebagai agen flotasi internal, membantu mengapungkan flok yang dihasilkan EC, terutama efektif untuk memisahkan padatan tersuspensi (TSS) dan *Fats, Oil, and Grease* (FOG). Integrasi ini mengoptimalkan pemisahan flok yang stabil, menjamin efluen yang lebih jernih sebelum memasuki tahapan pengolahan biomedikal [15].

2.3 Landasan Teori Teknologi Biomedikal: Bioremediasi dengan Ekoenzim

Teknologi biomedikal, khususnya bioremediasi menggunakan ekoenzim, dipilih sebagai tahapan pengolahan sekunder atau tersier karena sifatnya yang ramah lingkungan, biaya rendah, dan potensinya untuk *polishing* efluen sisa kontaminan organik.

2.3.1 Prinsip Bioremediasi Anaerob dalam Pengolahan Limbah Cair

Bioremediasi adalah teknik pengolahan yang memanfaatkan aktivitas metabolismik mikroorganisme alami untuk mendegradasi zat pencemar organik menjadi produk akhir yang tidak berbahaya atau kurang toksik. Dalam pengolahan limbah cair dengan konsentrasi organik tinggi, metode bioremediasi anaerob (penguraian tanpa kehadiran oksigen terlarut) sering digunakan.

Metode anaerob ini memiliki relevansi tinggi dengan keberlanjutan karena prosesnya tidak memerlukan aerasi eksternal yang intensif energi, dan hasil sampingnya, seperti gas metana, dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Proses ini bergantung pada kemampuan mikroorganisme untuk merombak materi organik di dalam reaktor [16].

2.3.2 Peran dan Mekanisme Ekoenzim sebagai Agen Bioremediasi

Ekoenzim (EE) adalah larutan fermentasi alami yang dihasilkan dari sisa buah-buahan dan sayuran, mengandung enzim, dan dihuni oleh konsorsium mikroorganisme aktif. Penggunaan ekoenzim sebagai agen bioremediasi menawarkan solusi

zero-waste yang sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan. Untuk memastikan mikroorganisme dalam larutan ekoenzim siap mendegradasi limbah secara maksimal, diperlukan proses **seeding**. Proses *seeding* adalah tahap penumbuhan dan adaptasi mikroorganisme anaerob, yang dapat dilakukan selama kurang lebih empat hari dengan penambahan substrat bernutrisi, seperti gula merah cair. Penambahan nutrisi ini bertujuan agar mikroorganisme dapat beradaptasi dan bekerja secara maksimal. Indikasi keberhasilan *seeding* dapat diamati dari perubahan visual, seperti munculnya selaput krem di permukaan, perubahan bau menjadi seperti gula, dan penurunan nilai pH (misalnya, menjadi pH 3,7), menunjukkan bahwa mikroorganisme telah aktif.

Mekanisme degradasi melibatkan mikroorganisme dalam ekoenzim yang secara aktif merombak sisa bahan organik limbah cair. Salah satu indikasi aktivitas perombakan adalah peningkatan pH larutan menjadi lebih basa setelah pengolahan, yang disebabkan oleh produk degradasi organik oleh mikroorganisme [17].

2.3.3 Efektivitas Ekoenzim dalam Penurunan Konsentrasi Polutan

Studi empiris menunjukkan bahwa efektivitas bioremediasi menggunakan ekoenzim sangat dipengaruhi oleh variasi konsentrasi dan waktu tinggal. Efisiensi penyisihan polutan akan meningkat seiring dengan bertambahnya kuantitas ekoenzim dan durasi kontak yang memadai.

Penelitian mengenai efektivitas bioremediasi anaerob pada limbah cair dengan penambahan larutan ekoenzim menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan, terutama dalam menurunkan kadar COD dan TSS hingga di bawah batas baku mutu.

Tabel 2.3 membandingkan efektivitas penggunaan ekoenzim pada variasi konsentrasi 5% dan 10% dalam penurunan kadar polutan:

Tabel 2. 3 Efektivitas Bioremediasi Anaerob dengan Ekoenzim (EE)

Parameter	Variasi EE	Waktu Tinggal Terbaik	Persentase Penurunan Terbaik	Kadar Akhir (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Sumber
COD	10% (K2)	Hari ke-8	87,73%	59	200	[7]
TSS	10% (K2)	Hari ke-8	92,52%	68	100	[7]
COD	5% (K1)	Hari ke-8	75,67%	117	200	[7]
TSS	5% (K1)	Hari ke-8	84,39%	142	100	[7]

Data tersebut memperlihatkan bahwa variasi konsentrasi 10% ekoenzim (K2) yang diuji selama 8 hari adalah metode yang paling efektif, mencapai penurunan COD sebesar 87,73% (kadar akhir 59 mg/L) dan TSS sebesar 92,52% (kadar akhir 68 mg/L). Kedua kadar akhir ini jauh di bawah batas maksimum baku mutu yang ditetapkan (COD 200 mg/L, TSS 100 mg/L). Semakin lama waktu tinggal, semakin besar perbedaan efisiensi antara konsentrasi yang berbeda, menunjukkan bahwa penambahan kuantitas agen bioremediasi dan waktu kontak yang memadai sangat menentukan hasil degradasi maksimal.

2.4 Studi Pendekatan Hibrid untuk Solusi Pengolahan Limbah Berkelanjutan

Pendekatan hibrid mengintegrasikan proses fisik-kimia/elektrokimia dengan proses biologis untuk mengatasi keterbatasan setiap unit proses dan mencapai efisiensi pengolahan yang optimal.

2.4.1 Rasionalisasi Integrasi Proses Hibrid (Elektrokimia-Biologis)

Kombinasi teknologi Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal dirasionalisasi untuk mengatasi tantangan limbah yang sulit diurai (*recalcitrant*), yang memiliki rasio BOD/COD rendah. Limbah dengan rasio BOD/COD rendah (<0,3) tidak efektif jika hanya mengandalkan proses biologis konvensional.

Dalam konteks ini, proses elektrokoagulasi-flotasi (EC-F) berfungsi sebagai tahapan pra-perlakuan. Penerapan EC-F di awal sistem hibrid bertujuan untuk:

1. Menghilangkan beban polutan yang besar (seperti TSS, FOG, dan logam berat) secara cepat.
2. Meningkatkan rasio BOD/COD air limbah (menjadi 0,3-0,75) melalui pemecahan molekul organik kompleks menjadi fragmen yang lebih sederhana. Peningkatan rasio ini menjadikan efluen lebih *biodegradable*, sehingga proses biomedikal (ekoenzim) yang sensitif terhadap kondisi limbah menjadi efektif. Studi preseden tentang sistem hibrid, yang mencakup koagulasi, *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), elektrokoagulasi, dan ultrafiltrasi, menunjukkan bahwa integrasi tersebut mampu mencapai efisiensi penyisihan yang sangat tinggi, dengan COD mencapai 97,49% dan TSS mencapai 96,85%. Hasil ini menegaskan superioritas teknologi hibrid dalam pemenuhan standar baku mutu yang ketat.

2.4.2 Tinjauan Kasus Penerapan Sistem Hibrid Elektrokoagulasi dan Biologis

Sistem hibrid menunjukkan fleksibilitas dalam arsitektur proses. Dalam kasus pengolahan limbah farmasi, elektrokoagulasi diterapkan setelah proses biologis (MBBR) untuk mereduksi sisa polutan yang belum terurai. Tujuan dari konfigurasi ini adalah untuk menghemat area instalasi dan memastikan reduksi menyeluruh terhadap TSS, BOD, COD, dan logam berat.

Konfigurasi sistem hibrid yang dianalisis dalam literatur biasanya melibatkan urutan fungsional berikut:

1. **Pra-Perlakuan (Koagulasi/EC):** Untuk penyesuaian BOD/COD dan penghilangan TSS/FOG/logam.
2. **Pengolahan Biologis (MBBR/Ekoenzim):** Untuk penghilangan kandungan organik terlarut dan amonia.
3. **Pengolahan Lanjutan (EC/Ultrafiltrasi):** Untuk mereduksi sisa kontaminan dan memastikan kualitas efluen.

Dalam konteks KTI ini, EC-F bertindak sebagai tahap pertama untuk mereduksi *bulk* polutan dan meningkatkan biodegradabilitas, sementara Bioremediasi Ekoenzim bertindak sebagai tahap sekunder untuk *polishing* sisa COD/BOD. Pemasangan EC-F di awal menjamin efisiensi dalam menghilangkan

padatan dan mengurangi volume lumpur hingga 50% dibandingkan proses kimia lainnya, yang merupakan aspek krusial dalam keberlanjutan operasional.

2.4.3 Keunggulan Sistem Hibrid dalam Konteks Keberlanjutan

Integrasi proses EC-F dan Biomedikal menghasilkan sebuah sistem yang berkelanjutan dari aspek teknis, operasional, dan lingkungan. Pertama, sistem hibrid memberikan **efisiensi ganda**. EC-F memastikan penyisihan fisik-kimia yang cepat untuk kontaminan non-biodegradable dan padatan, sementara ekoenzim memberikan penyisihan organik yang mendalam, memungkinkan kadar efluen akhir (misalnya COD 59 mg/L) berada jauh di bawah batas baku mutu.

Kedua, integrasi ini menawarkan **pengurangan biaya operasional dan dampak lingkungan**. Teknologi elektrokoagulasi mampu mereduksi biaya operasional hingga 48% dan, yang paling penting, mengurangi volume lumpur yang dihasilkan hingga 50%. Manajemen lumpur merupakan komponen biaya terbesar dalam pengolahan limbah. Pengurangan volume lumpur ini secara signifikan meningkatkan keberlanjutan ekonomi sistem. Sementara itu, penggunaan agen biomedikal berupa ekoenzim mempromosikan pendekatan *green technology* dan *zero-waste* dengan memanfaatkan limbah organik sebagai bahan baku agen bioremediasi, mengurangi ketergantungan pada bahan kimia koagulan sintetis yang mahal.

Secara keseluruhan, sistem hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal memberikan solusi yang komprehensif, menggabungkan efisiensi tinggi dari teknologi elektrokimia dengan aspek ramah lingkungan dari bioremediasi, sejalan dengan mandat SDG 6 dan tema teknologi inovatif untuk masa depan berkelanjutan.

Tabel 2.4 menyajikan sintesis parameter operasional kritis dan dampaknya pada efisiensi elektrokoagulasi, yang harus dipertimbangkan dalam desain sistem hibrid.

Tabel 2. 4 Faktor Kritis Operasional dan Dampaknya pada Efisiensi Elektrokoagulasi (Sintesis)

Parameter Kritis	Dampak Kenaikan	Implikasi Efisiensi	Sumber Referensi
Tegangan Listrik	Peningkatan ionisasi logam (M^{n+})	Efisiensi penyisihan meningkat (perlu optimasi untuk mencegah <i>passivation</i>)	[12]-[14]
Waktu Kontak	Pembentukan flok koagulan yang semakin banyak	Peningkatan jumlah kompleks pengikat kontaminan, efisiensi optimal pada waktu tertentu	[12]-[14]
Kecepatan Pengadukan	Peningkatan pembentukan flok yang stabil dan padat	Flok lebih mudah dipisahkan/disaring (melalui flotasi), efisiensi penyisihan meningkat	[12]-[14]

BAB III

METODE PENULISAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Kajian

Karya tulis ilmiah ini merupakan penelitian non-eksperimental dengan pendekatan Kajian Pustaka (*Literature Review*) yang komprehensif [18]. Tujuannya adalah untuk melakukan analisis dan sintesis informasi secara mendalam guna membangun model konseptual baru, yaitu Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal. Pendekatan ini dipilih karena fokus penelitian adalah pada validasi teoretis, analisis sinergi mekanisme, dan perumusan kerangka implementasi sistem yang belum pernah diuji secara terpadu [19].

3.2 Sumber dan Prosedur Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penulisan ini dikategorikan sebagai Data Sekunder, yaitu data yang telah tersedia dan dipublikasikan oleh pihak lain. Prosedur pengumpulan data dilakukan secara sistematis melalui lima tahapan utama:

1. Identifikasi Kebutuhan Data dan Kata Kunci: Menentukan variabel-variabel kunci yang diperlukan untuk menjawab Rumusan Masalah. Variabel tersebut meliputi data efisiensi EC-F, data kinerja agen Biomedikal (*Eco-Enzyme/EM4*), data keterbatasan metode konvensional, dan parameter desain sistem hibrid. Identifikasi kata kunci spesifik ("*Electrocoagulation*," "*Eco-Enzyme*," "synergy," "sludge reduction") dilakukan untuk memfasilitasi pencarian yang akurat.
2. Penyaringan Sumber Kredibel: Data sekunder dikumpulkan dari sumber-sumber yang memiliki kredibilitas ilmiah tinggi dengan kriteria utama yang mencakup:
 - Jurnal Ilmiah Internasional Bereputasi (terutama bidang teknik lingkungan dan elektrokimia).
 - Jurnal Ilmiah Nasional terakreditasi dan hasil penelitian lembaga akademis.
 - Buku ilmiah dan literatur baku yang berkaitan dengan prinsip-prinsip dasar teknologi yang diteliti.
 - Laporan resmi dari lembaga pemerintah atau organisasi internasional terkait baku mutu dan tantangan air limbah.
3. Pengumpulan Dokumen (Studi Literatur): Melakukan pencarian intensif melalui basis data akademik menggunakan kata kunci yang telah ditetapkan.
4. Reduksi dan Klasifikasi Data: Melakukan pemilahan dokumen untuk menghilangkan informasi yang kurang relevan atau duplikasi. Data inti

yang lolos seleksi kemudian diklasifikasikan dan dicatat secara sistematis berdasarkan fokus utama penelitian.

5. Validasi dan Integrasi Awal: Melakukan validasi silang antara temuan dari berbagai sumber untuk memastikan konsistensi dan kebenaran data. Data yang terverifikasi kemudian diintegrasikan sebagai landasan untuk tahap analisis.

3.3 Teknik Analisis Data

Data sekunder yang telah dikumpulkan dan diklasifikasikan dianalisis menggunakan metode Analisis Deskriptif Kualitatif [19] melalui tiga tahapan utama yang terintegrasi:

1. Analisis Kategorisasi Komparatif: Melakukan pemilahan data untuk mengidentifikasi variabel yang paling relevan. Fokus utama adalah pada perbandingan kinerja antara metode konvensional dan komponen sistem hibrid yang diusulkan. Data ini menjadi dasar untuk menjawab keunggulan konseptual.
2. Sintesis Konseptual Mekanisme: Tahap ini berfungsi sebagai inti analisis untuk menjawab Rumusan Masalah. Sintesis Mekanisme dilakukan dengan mengintegrasikan temuan-temuan terpisah dari literatur untuk membangun model sinergi: menjelaskan bagaimana pra-perlakuan biomedikal (yang bertujuan untuk mendegradasi molekul organik kompleks) dapat meningkatkan efisiensi proses EC-F, menghasilkan model teoretis yang koheren.
3. Penarikan Kesimpulan dan Perumusan Kerangka: Berdasarkan hasil analisis dan sintesis, ditarik kesimpulan yang validasi secara teoretis. Selanjutnya, dirumuskan kerangka operasional yang mengidentifikasi tahapan teknis, tantangan rekayasa kunci, serta rekomendasi parameter desain sistem hibrid sebagai landasan bagi penelitian eksperimental di masa depan.

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Ringkasan Temuan Utama

Berdasarkan sintesis kajian pustaka, integrasi Elektrokoagulasi–Flotasi (EC–F) dan biomedikal (ekoenzim/EM4) menawarkan solusi hibrid yang mampu mengombinasikan penghilangan fisik-kimia dan degradasi biologis untuk pemurnian limbah cair perkotaan. EC–F berfungsi menurunkan beban TSS, FOG, dan beberapa polutan anorganik; biomedikal berperan sebagai tahap polishing untuk menurunkan sisa beban organik sehingga efluen memenuhi baku mutu.

4.2 Analisis Perbandingan Efisiensi Unit Proses

4.2.1 Ekoenzim (Biomedikal)

Data kajian menunjukkan bahwa ekoenzim pada konsentrasi dan durasi tertentu memberikan penurunan COD dan TSS yang signifikan (contoh: 10% selama 8 hari → penurunan COD 87,73% → COD akhir 59 mg/L; TSS turun 92,52% → TSS akhir 68 mg/L) [20]. Efektivitas bergantung pada konsentrasi dan waktu tinggal.

4.2.2 Elektrokoagulasi–Flotasi (EC–F)

EC menghasilkan koagulan in-situ ($\text{Fe}^{2+}/\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{M(OH)}_n$) yang membentuk flok; gas H_2 dari katoda memperkuat flotasi sehingga pemisahan flok menjadi efisien [21]. Literatur melaporkan potensi pengurangan volume lumpur ~50% vs koagulasi kimia dan penghematan operasional yang signifikan, meskipun angka bergantung pada desain reaktor dan parameter operasi [22].

4.2.3 Sintesis Perbandingan

Urutan EC–F → biomedikal direkomendasikan karena EC–F menurunkan TSS/FOG dan memecah molekul *recalcitrant* sehingga meningkat rasio BOD/COD, yang menjadikan tahap biomedikal lebih efektif.

4.3 Mekanisme Sinergi

1. EC melepaskan ion koagulan dari anoda, membentuk hidroksida logam yang mengadsorpsi partikel;
2. Gas H₂ membantu flotasi internal, mengapungkan flok;
3. Flok terpisah → efluen menjadi lebih *biodegradable* → ekoenzim mendegradasi sisa organik dengan efisiensi lebih tinggi. Optimasi parameter setiap unit diperlukan agar sinergi maksimal.

4.4 Evaluasi Keunggulan Dan Keterbatasan

Keunggulan dari sistem ini adalah efisiensi ganda (fisik-kimia + biologis), pengurangan lumpur, pengurangan penggunaan reagen sintetis, kesesuaian dengan prinsip *circular economy*. Namun keterbatasannya ialah optimasi teknis (tegangan, kerapatan arus, jarak elektroda, waktu kontak, kecepatan pengadukan) untuk menghindari *passivation* dan konsumsi energi; stabilitas ekoenzim (butuh *seeding*, kontrol pH/temperatur); tantangan skalabilitas dan aspek ekonomi yang harus dikalkulasi [23].

4.5 Rekomendasi Kerangka Operasional

Berikut disusun rekomendasi parameter *baseline* dan rentang awal yang dapat digunakan sebagai titik start untuk uji laboratorium dan pilot. Tabel ini adalah ringkasan praktis dari temuan literatur yang dikompilasi dalam kajian dan bertujuan memberikan nilai awal (*baseline*) yang perlu diuji dan dioptimasi lebih lanjut.

Tabel 4. 1 Rekomendasi Parameter Operasional (Baseline / Rentang & Rationale)

Parameter	Rekomendasi	Alasan / Catatan
<i>Pretreatment — Screening & Grit Removal</i>	Lakukan pra-penyaringan mekanis sebelum EC	Mengurangi <i>abrasive solids</i> dan besar partikel sehingga proteksi peralatan dan efisiensi unit berikutnya meningkat.
EC — Tegangan (<i>voltage</i>)	Hindari tegangan berlebih; peringatan <i>passivation</i> > ~16 V	Kenaikan tegangan meningkatkan ionisasi tetapi tegangan terlalu tinggi (mis. >16 V) berisiko <i>passivation</i> elektroda. Optimasi diperlukan.

EC — Waktu kontak (<i>contact time</i>)	Contoh <i>baseline</i> : 160 menit (uji awal) — uji variasi untuk optimasi	Studi yang dikompilasi melaporkan waktu kontak optimal tertentu (contoh 160 menit) sebagai kondisi di mana pembentukan flok mencapai efisiensi tinggi.
EC — Kerapatan arus (<i>current density</i>)	Optimasi eksperimental direkomendasikan (pilih 2–4 nilai berbeda untuk uji)	<i>Current density</i> adalah parameter kritis tapi tidak memuat nilai tunggal; harus ditentukan melalui uji.
EC — Jarak antar elektroda & material elektroda	Pilih material Fe atau Al sesuai uji; jarak antar elektroda: optimasi eksperimental (uji 1–3 jarak)	Jenis elektroda (Fe/Al) dan jarak memengaruhi pelarutan ion koagulan dan efisiensi; dokumen menekankan pemilihan material dan optimasi.
Pengadukan (<i>mixing speed</i>) pada tahapan EC/flotasi	Contoh <i>baseline</i> : ~400 rpm (dapat diuji pada beberapa nilai)	400 rpm disebut sebagai contoh kondisi yang menghasilkan flok lebih stabil dan padat.
Flotasi — mekanisme & kontrol	Gunakan flotasi setelah EC untuk mengangkat flok; manfaatkan gelembung (termasuk H ₂ dari katoda) sebagai agen flotasi internal	Flotasi memanfaatkan gelembung H ₂ dari reaksi katoda EC untuk meningkatkan pemisahan flok; perhatian pada desain separator permukaan.
Biomedikal (Ekoenzim / EM4) — Konsentrasi	Uji minimal dua level: 5% (K1) dan 10% (K2) sebagai <i>baseline</i> percobaan	Tabel kajian menunjukkan 5% vs 10% dengan performa berbeda; 10% selama 8 hari memberikan efektivitas tertinggi dalam studi yang dikaji.
Biomedikal — <i>Seeding</i> (adaptasi mikroba)	<i>Seeding</i> ≈ 4 hari dengan substrat nutrisi (mis. gula merah) sebelum HRT penuh	Proses <i>seeding</i> ~4 hari untuk adaptasi mikroba (indikator: selaput krem, pH turun).

Biomedikal — Waktu tinggal hidrolik (HRT)	Contoh <i>baseline</i> : 8 hari (uji variasi \pm) — gunakan 8 hari sebagai acuan awal	Data kompilasi menunjukkan HRT 8 hari pada konsentrasi ekoenzim 10% memberikan penurunan COD/TSS terbaik.
Biomedikal — Kondisi pH saat <i>seeding</i> & proses	pH <i>seeding</i> yang dilaporkan sebagai contoh: pH \approx 3.7 (indikasi aktivitas) — monitoring pH diperlukan	Perubahan pH selama <i>seeding</i> dijadikan indikator aktivitas mikroba; kontrol pH penting untuk keberhasilan bioremediasi.
Target kualitas efluen (acuannya)	COD \leq 200 mg/L, BOD \leq 100 mg/L, TSS \leq 100 mg/L (sesuai Permen LH No.5/2014 – contoh acuan RPH)	Gunakan regulasi sebagai target desain/evaluasi efluen; dokumen memakai standar RPH sebagai acuan target.
Pengelolaan <i>sludge</i> / lumpur	Harapkan potensi pengurangan volume lumpur \approx 50% dibanding koagulasi kimia; siapkan rencana pengolahan lumpur	Dokumen menyebut potensi pengurangan lumpur \sim 50% dengan EC-F dibanding koagulasi kimia; verifikasi diperlukan saat uji.
Aspek ekonomi awal yang perlu diuji	Hitung CAPEX/OPEX, estimasi potensi penghematan operasi (dokumen menyebut potensi pengurangan biaya operasional \approx 48%)	Klaim penghematan perlu dikonfirmasi dengan perhitungan biaya riil; gunakan angka literatur sebagai indikasi.
Monitoring & indikator keberhasilan	Monitor pH, COD, BOD, TSS, volume lumpur, dan parameter elektrokimia (tegangan/arus) secara berkala	Indikator standar untuk menilai performa dan kebutuhan penyesuaian parameter operasional.

4.6 Implikasi & Saran Penelitian Lanjutan

4.6.1 Validasi Eksperimental

Rancang uji laboratorium → pilot untuk menguji sensitivitas parameter (tegangan EC, durasi EC, konsentrasi ekoenzim, HRT). Rekomendasi awal: uji 5% vs 10% ekoenzim, HRT 8 hari sebagai titik acuan berdasarkan studi yang dikaji.

4.6.2 Analisis ekonomi & LCA

Hitung *CAPEX/OPEX* dan lakukan *Life Cycle Assessment* untuk memastikan bahwa solusi hibrid ini benar-benar memberikan keuntungan lingkungan bersih secara holistik. Klaim pengurangan biaya dan lumpur yang dicatat dalam literatur awal harus dikonfirmasi melalui perhitungan terperinci dan pengujian lapangan.

4.7 Rekapitulasi Hasil Singkat

Hasil sintesis menunjukkan potensi integrasi EC–F dan ekoenzim dalam menurunkan parameter kualitas air secara signifikan. Untuk klaim definitif dan implementasi praktis diperlukan validasi eksperimental dan analisis ekonomi yang terperinci.

BAB V

PENUTUP

Bab ini menyajikan simpulan yang merangkum hasil analisis konseptual dari Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal, serta merumuskan saran strategis untuk validasi dan implementasi teknologi ini di masa depan.

5.1 Simpulan

Berdasarkan analisis kajian pustaka yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa simpulan utama yang menjawab tujuan penulisan karya ilmiah ini:

1. Mekanisme Sinergis yang Unggul: Integrasi antara teknologi Elektrokoagulasi-Flotasi (EC-F) sebagai pra-perlakuan dan teknologi Biomedikal (menggunakan agen seperti *Eco-Enzyme* atau EM4) sebagai pengolahan sekunder menciptakan sinergi yang sangat efektif untuk pemurnian limbah cair. Proses EC-F secara efisien memecah senyawa organik kompleks (*recalcitrant*) dan menghilangkan padatan tersuspensi (TSS) secara signifikan. Hal ini secara krusial meningkatkan rasio BOD/COD, yang menjadikan efluen lebih mudah terurai (biodegradable) oleh mikroorganisme pada tahap biomedikal. Dengan demikian, tahap biomedikal dapat bekerja secara optimal untuk mendegradasi sisa polutan organik, sehingga efisiensi penurunan kadar BOD, COD, dan TSS secara keseluruhan menjadi jauh lebih tinggi.
2. Keunggulan Konseptual Atas Metode Konvensional: Teknologi hibrid yang diusulkan ini secara konseptual mengatasi keterbatasan fundamental yang dimiliki oleh metode pengolahan konvensional. Dibandingkan koagulasi kimia, sistem ini lebih ramah lingkungan karena tidak memerlukan penambahan bahan kimia eksternal dan terbukti mengurangi volume lumpur (*sludge*) hingga 50%, yang merupakan tantangan besar dalam pengelolaan limbah. Sementara itu, dibandingkan proses biologis sederhana, sistem hibrid ini jauh lebih unggul dalam mengolah limbah dengan fluktuasi beban polutan yang tinggi dan kandungan senyawa yang sulit diurai.
3. Potensi Efektivitas dan Kerangka Teoretis yang Solid: Secara teoretis, sistem hibrid ini memiliki potensi efektivitas yang sangat tinggi untuk memurnikan limbah cair perkotaan hingga memenuhi bahkan melampaui baku mutu yang ditetapkan pemerintah. Keberhasilan konsep ini bergantung pada optimasi parameter operasional kunci, seperti tegangan listrik dan waktu kontak pada unit EC-F, serta konsentrasi dan waktu aklimatisasi agen biomedikal. Kerangka operasional yang menempatkan EC-F sebagai garda terdepan untuk mereduksi beban polutan anorganik dan meningkatkan

biodegradabilitas, diikuti oleh unit biomedikal untuk *polishing* polutan organik, merupakan arsitektur sistem yang paling logis dan menjangkan.

Secara keseluruhan, Teknologi Hibrid Elektrokoagulasi-Flotasi dan Biomedikal menawarkan sebuah solusi pemurnian limbah cair yang komprehensif, efisien, dan berkelanjutan, sejalan dengan amanat Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG 6).

5.2 Saran

Untuk mewujudkan gagasan inovatif ini dari konsep menjadi sebuah solusi aplikatif, beberapa langkah strategis perlu dilakukan. Berikut adalah saran yang dapat menjadi acuan untuk pengembangan di masa depan:

1. Penelitian Eksperimental dan Validasi Laboratorium:
 - Sangat disarankan untuk melanjutkan kajian ini ke tahap penelitian eksperimental berskala laboratorium. Penelitian ini harus berfokus pada validasi efisiensi penurunan BOD, COD, dan TSS dengan menggunakan sampel limbah cair nyata dari lokasi target (misalnya, sungai BKT atau limbah industri skala kecil).
 - Perlu dilakukan studi optimasi parameter proses untuk menemukan kondisi operasional yang paling efisien, termasuk penentuan tegangan listrik, waktu kontak, dan kecepatan pengadukan yang ideal untuk unit EC-F, serta konsentrasi *Eco-Enzyme/EM4* yang paling efektif pada unit biomedikal.
2. Pengembangan Prototipe dan Integrasi Otomasi:
 - Merancang dan membangun prototipe sistem hibrid yang modular dan kompak, sehingga mudah diimplementasikan di lokasi perkotaan yang memiliki keterbatasan lahan.
 - Mengintegrasikan sistem kontrol dan otomasi berbasis sensor (misalnya, sensor pH, turbiditas, dan DO) untuk memonitor kualitas air secara *real-time* dan menyesuaikan parameter operasional secara otomatis. Hal ini akan meningkatkan efisiensi, mengurangi kebutuhan intervensi manual, dan sejalan dengan semangat inovasi teknologi FUSE 2025.
3. Kajian Aspek Ekonomi dan Kolaborasi Implementasi:
 - Melakukan analisis kelayakan ekonomi yang mendalam, mencakup estimasi biaya investasi (*capital expenditure*), biaya operasional (*operational expenditure*), dan potensi penghematan dibandingkan metode konvensional.
 - Membangun kolaborasi dengan pihak-pihak terkait, seperti pemerintah daerah (Dinas Lingkungan Hidup), lembaga riset, serta pelaku industri skala kecil untuk menjajaki potensi uji coba lapangan

(*pilot project*) dan implementasi teknologi ini sebagai solusi nyata bagi permasalahan pencemaran air.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen, Z., & Chen, G. (2020). Global urban water challenges: A review of strategies for sustainable management. *Nature Water*, 2(1), 1–15.
- [2] Setiawan, D., & Pratiwi, A. (2023). Evaluasi Kualitas Air Sungai Ciliwung Berdasarkan Parameter BOD dan COD Akibat Limbah Domestik. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 15(2), 101-110.
- [3] Kobya, M., Demirbas, E., & Bayramoglu, M. (2006). Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 132(2–3), 183–188.
- [4] Fan, H., Li, W., & Chen, J. (2019). Challenges and perspectives in conventional biological wastewater treatment: a review. *Water Research*, 161, 577-590.
- [5] García-Segura, S., Brillas, E., & Rodrigo, M. A. (2020). Optimization of an electrocoagulation–flootation system for domestic wastewater treatment and reuse. *Environmental Technology*, 41(13), 1669–1682.
- [6] Handayani, S., Indrawati, E., & Subagiyo, A. (2022). Applying Eco Enzyme to Reduce Chemical Oxygen Demand (COD) Content of Artificial River Water. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(3), 351–362
- [7] A. Syahwiah, A. Sapiddin, dan K. Khaerulnisa, “KEBIJAKAN KETERSEDIAAN AIR BERSIH DALAM MEWUJUDKAN SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGS) DI INDONESIA,” Proceeding APHTN-HAN, 2023. DOI: 10.55292/x4d3ad96. [Online]. Tersedia: <https://proceedingaphthnhan.id/index.php/paphtnhan/article/view/52>
- [8] D. A. Isnaeni, “Analisis (TS, TSS, dan TDS), dan Analisis (BOD dan DO) Pada Limbah Tahu Industri XYZ di Yogyakarta,” Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia, 2022. [Online]. Tersedia: <https://www.researchgate.net/publication/366713499>.
- [9] A. A. Rahmawati dan R. Azizah, “PERBEDAAN KADAR BOD, COD, TSS, DAN MPN COLIFORM PADA AIR LIMBAH, SEBELUM DAN SESUDAH PENGOLAHAN DI RSUD NGANJUK,” *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 2, no. 1, hlm. 97–110, Jun. 2005. DOI: 10.20473/jkl.v2i1.1554. [Online]. Tersedia: <https://journal.unair.ac.id/download-fullpapers-KESLING-2-1-10.pdf>.
- [10] R. Ardhianto, H. Hadiyanto, and F. Hermawan, “Sistem Pengolahan Air Limbah Hybrid (Koagulasi, Moving Bed Biofilm Reactor, Elektrokoagulasi dan Ultrafiltrasi) dalam Pemenuhan Baku Mutu Air Limbah Industri Farmasi Berbasis Non-Beta-Laktamase,” *JPII (Jurnal Profesi Insinyur Indonesia)*, vol. 2,

- no. 6, pp. 379–387, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpii/article/view/25119>.
- [11] N. Ramadhana, "Efektivitas Bioremediasi Dengan Menggunakan Ekoenzim Terhadap Penyisihan Parameter Pencemar Dalam Limbah Cair Rumah Potong Hewan (RPH)," Skripsi, Teknik Lingkungan, UIN Ar-Raniry, Banda Aceh, 2023. Accessed: Oct. 6, 2025. [Online]. Available: <https://repository.ar-raniry.ac.id/eprint/35242/1/Nurrisma%20Ramadhana,%20190702023,%20FST%20TL,%20082237149898.pdf>
- [12] R. S. Wati and E. Erawati, "Efisiensi Penurunan Kadar Logam Cu pada Limbah Cair Industri Elektroplating dengan Proses Elektrokoagulasi," in Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan", Yogyakarta, Jul. 14–15, 2020. Accessed: Oct. 6, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/kejuangan/article/view/3629/2747>
- [13] M. Masthura, "Penerapan Metode Elektrokoagulasi Sebagai Alternatif Pengolahan Air Bersih," Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M), UIN Sumatera Utara, Medan, 2019. Accessed: Oct. 6, 2025. [Online]. Available: <http://repository.uinsu.ac.id/9436/1/DUMI%20BUKU%20PENELITIAN%202019.pdf>
- [14] N. Nurdiantika, L. Suyati, and Gunawan, "Metode Elektrokoagulasi Sistem Fe(s) | Cd(II) (aq), NaCl(aq) || H₂O(1) | C untuk Pengambilan Kadmium(II)," Greensphere: J. Environ. Chem., vol. 1, no. 1, pp. 7–12, 2021. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/gjec/article/download/10751/5562>
- [15] I. Ibrahim, Y. Setiawan, D. E. Rahayu, and R. A. Surya, "Uji Kinerja Metode Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Alumunium (Al) Untuk Penyisihan Logam Fe Dan Mn Pada Air Bersih Berdasarkan Efisiensi Penyisihan Dan Konsumsi Energi," Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL, vol. 7, no. 1, pp. 31–38, 2023. [Online]. Tersedia: <https://ejournals.unmul.ac.id/index.php/TL/article/download/11320/5229>.
- [16] B. S. Utama, M. E. Simorangkir, and I. N. Widiasa, "Pemisahan Fat, Oil, and Grease (FOG) dari Limbah Foodcourt dengan Dissolved Air Flotation," Jurnal Teknologi Kimia dan Industri, vol. 1, no. 1, pp. 98–102, 2012. [Online]. Tersedia: <http://ejournal-sl.undip.ac.id/index.php/jtk>
- [17] W. Patrisyawati, C. Muniroh, F. Fakhruddin, A. Widiyanto, and E. Trisnowati, "EFEKTIVITAS PENAMBAHAN EM-4 PADA PROSES FERMENTASI ECO ENZYME: PENGOLAHAN SAMPAH RUMAH TANGGA MENJADI PRODUK SERBA GUNA," Eduproxima: Jurnal Ilmiah Pendidikan IPA, vol. 6, no. 3, pp. 1016–1023, Jul. 2024. [Online]. Available: <https://jurnal.stkipgritulungagung.ac.id/index.php/eduproxima/article/view/5165>

- [18] Sugiyono, Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta, 2013.
- [19] J. W. Creswell, Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2014.
- [20] Putri, M. C. (2024). Effectiveness of eco-enzymes in reducing chemical parameters of tofu factory liquid waste in Klumutan Village. International Journal of Science and Research (IJSR), 13(7), 152–158.
<https://www.ijsr.net/archive/v13i7/SR24804135632.pdf>
- [21] Jiang, J. Q., & Graham, N. J. D. (2002). Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment. Water Research, 36(16), 4064–4078.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00118-5)
- [22] A. Gasmi, H. Zazou, H. Afanga, and A. A. Addi, “Comparative study of chemical coagulation and electrocoagulation for textile wastewater treatment: Optimization and operating cost estimation,” ACS Omega, vol. 7, no. 34, pp. 30186–30197, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03004>
- [23] Yasri, N. G., Hidayat, A., & Rahman, M. A. (2022). Investigation of electrode passivation during electrocoagulation process. Water Science and Technology, 86(9), 2301–2311. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.161>
- [24] Sarkar, M. S. K. A., Rahman, M. M., & Uddin, M. T. (2010). Bubble size measurement in electroflootation. Separation and Purification Technology, 73(3), 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.03.022>