

Prospective LCA Sistem Integrasi Elektrokoagulasi-Filtrasi Air Baku di SDN 008 Balikpapan Utara

Ika Bayu Kartikasari^{1*}, Sekar Inggar Rengganis¹, Noneng Dewi Zannaria¹, Reno Pratiwi², Galuh Boyo Munanto¹

¹*Teknik Lingkungan, Universitas Balikpapan, Jl. Pupuk Raya, Kelurahan Gunung Bahagia, Kota Balikpapan 76114, Kalimantan Timur, Indonesia*

²*Teknik Sipil, Universitas Balikpapan, Jl. Pupuk Raya, Kelurahan Gunung Bahagia, Kota Balikpapan 76114, Kalimantan Timur, Indonesia*

**Email: ika.bayu.k@uniba-bpn.ac.id*

Abstrak

Kualitas air baku di SDN 008 Balikpapan Utara belum memenuhi standar air bersih karena tingginya kekeruhan dan keberadaan partikel koloid yang sulit disisihkan melalui filtrasi konvensional. Penelitian ini bertujuan menganalisis penerapan sistem elektrokoagulasi-filtrasi serta mengevaluasi dampak lingkungannya menggunakan pendekatan prospective life cycle assessment (pLCA). Penelitian dilakukan melalui pengujian elektrokoagulasi skala laboratorium yang dikembangkan menjadi rancangan skala lapangan berkapasitas 1.200 L. Analisis life cycle inventory (LCI) dilakukan berdasarkan konsumsi energi listrik, peluruhan anoda aluminium, pembentukan lumpur, dan emisi gas hidrogen, sedangkan penilaian dampak lingkungan menggunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint. Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektrokoagulasi mampu menurunkan kekeruhan dari 19,31 NTU menjadi 0,09 NTU, meningkatkan pH dari 5,66 menjadi 8,68, dan meningkatkan dissolved oxygen dari 1,70 mg/L menjadi 6,33 mg/L. Kebutuhan energi listrik sistem sebesar 2,88 kWh/siklus dengan konsumsi anoda aluminium sebesar 30,2 g/siklus. Hasil LCIA menunjukkan kategori dampak terbesar berasal dari agricultural land occupation dan climate change. Environmental hotspot utama sistem berasal dari konsumsi energi listrik dan penggunaan anoda aluminium sehingga diperlukan optimasi operasional untuk meningkatkan keberlanjutan sistem pengolahan air.

Kata kunci: *Elektrokoagulasi; filtrasi; life cycle assessment; pengolahan air baku; ReCiPe 2016*

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan air bersih merupakan kebutuhan utama untuk menjaga kesehatan dan kenyamanan di lingkungan sekolah. Di Kota Balikpapan, pemenuhan kebutuhan air bersih menggunakan air permukaan, Salah satu sumber air permukaan utama yang dimanfaatkan secara luas adalah Waduk Sungai Wain. Salah satu metode pengolahan air yang umum digunakan pada skala sederhana adalah filtrasi menggunakan media pasir silika dan karbon aktif. Sistem ini relatif mudah

dioperasikan dan memiliki biaya operasional yang rendah. Namun, efektivitas filtrasi konvensional sangat dipengaruhi oleh karakteristik partikel pencemar dalam air baku. Partikel koloid berukuran sangat kecil dan bermuatan stabil umumnya sulit dipisahkan hanya melalui mekanisme penyaringan fisik, sehingga efisiensi penurunan kekeruhan menjadi terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses filtrasi tunggal sering kali belum mampu menghasilkan kualitas air yang memenuhi baku mutu, terutama pada air permukaan dengan kandungan koloid tinggi. Sebagai alternatif teknologi pengolahan lanjutan, dilakukan penambahan unit elektrokoagulasi (*electrocoagulation/EC*) sebagai metode efektif untuk menyisihkan partikel tersuspensi, koloid, logam berat, maupun senyawa organik dari air dan air limbah. Proses elektrokoagulasi bekerja melalui pelarutan anoda logam, umumnya aluminium atau besi, yang menghasilkan ion koagulan secara *in situ*. Ion tersebut kemudian mengalami hidrolisis, membentuk flok hidroksida yang mampu mendestabilisasi partikel koloid dan meningkatkan proses flokulasi. Selain itu, pembentukan gelembung gas hidrogen pada katoda turut membantu mekanisme flotasi sehingga mempercepat pemisahan kontaminan dari air. Dibandingkan dengan koagulasi kimia konvensional, elektrokoagulasi memiliki beberapa keunggulan, antara lain kebutuhan bahan kimia yang lebih rendah, produksi lumpur yang relatif lebih sedikit, serta efisiensi penyisihan polutan yang tinggi (Mollah *et al.*, 2001; Chen, 2004; Mollah *et al.*, 2004; Holt *et al.*, 2005; Emamjomeh & Sivakumar, 2009; Moussa *et al.*, 2017).

Meskipun teknologi elektrokoagulasi telah banyak diteliti untuk pengolahan air dan air limbah, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi parameter operasional, seperti kuat arus, tegangan, jenis elektroda, waktu kontak, dan efisiensi penyisihan polutan (Khandegar & Saroha, 2013; Hakizimana *et al.*, 2017; Ammar *et al.*, 2023). Di sisi lain, studi yang mengintegrasikan kinerja teknis elektrokoagulasi dengan evaluasi dampak lingkungan menggunakan pendekatan *life cycle assessment* (LCA) masih relatif terbatas, khususnya pada sistem pengolahan air baku skala kecil yang diterapkan pada fasilitas pendidikan. Sebagian besar penelitian LCA pada elektrokoagulasi dilakukan pada pengolahan limbah industri atau air limbah domestik dengan kondisi operasional yang berbeda dari pengolahan air baku permukaan. Meskipun demikian, penerapan elektrokoagulasi juga memerlukan perhatian terhadap aspek keberlanjutan lingkungan. Konsumsi energi listrik dan penggunaan material anoda aluminium berpotensi menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan, khususnya terkait emisi gas rumah kaca, konsumsi sumber daya mineral, dan pembentukan residu lumpur. Oleh karena itu, evaluasi sistem pengolahan air tidak cukup hanya ditinjau dari aspek efisiensi penyisihan polutan, tetapi juga perlu mempertimbangkan beban lingkungan yang ditimbulkan selama proses operasional. Pendekatan LCA menjadi metode yang relevan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi dampak lingkungan suatu sistem secara komprehensif berdasarkan aliran energi dan material yang digunakan. LCA merupakan metode analisis berbasis daur hidup yang digunakan untuk mengukur potensi dampak lingkungan suatu produk atau proses mulai dari input material hingga output emisi dan limbah. Dalam penelitian pengolahan air, pendekatan LCA memungkinkan identifikasi *environmental hotspot* yang berasal dari konsumsi energi, penggunaan material, maupun timbunan residu proses. Metode ReCiPe 2016 Midpoint banyak digunakan dalam studi LCA karena mampu mengonversi data inventori menjadi berbagai kategori dampak lingkungan secara sistematis dan terukur (Huijbregts *et al.*, 2017). Dengan demikian, integrasi antara kajian teknis pengolahan air dan evaluasi lingkungan menjadi penting untuk menghasilkan sistem pengolahan yang efektif sekaligus berkelanjutan.

Penelitian terdahulu umumnya menggunakan pendekatan terhadap sistem yang telah beroperasi, sedangkan kajian mengenai penerapan *prospective life cycle assessment* (pLCA) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem elektrokoagulasi yang masih berada pada tahap perencanaan dan pengembangan masih sangat terbatas. Pendekatan pLCA relevan untuk teknologi yang masih berkembang karena memungkinkan proyeksi kinerja dari skala laboratorium menuju skala yang lebih representatif, dengan tetap menyatakan asumsi dan ketidakpastian secara transparan (Cucurachi *et al.*, 2018; Thonemann *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2023). Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya

mengevaluasi efektivitas elektrokoagulasi dalam meningkatkan kualitas air baku, tetapi juga mengidentifikasi potensi dampak lingkungan sejak tahap desain sistem melalui pendekatan pLCA. Dengan demikian, penelitian ini memberikan informasi yang lebih komprehensif dalam mendukung pengambilan keputusan terkait pengembangan teknologi pengolahan air yang berkelanjutan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan unit elektrokoagulasi sebagai pengolahan lanjutan pada sistem filtrasi air baku di SDN 008 Balikpapan Utara serta mengevaluasi dampak lingkungannya menggunakan pendekatan pLCA. Analisis dilakukan melalui penyusunan *Life Cycle Inventory* (LCI) berdasarkan kebutuhan energi listrik, konsumsi anoda aluminium, pembentukan lumpur, dan emisi gas hidrogen, kemudian dilanjutkan dengan penilaian dampak lingkungan menggunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint untuk mengidentifikasi kategori dampak dominan dan environmental hotspot pada sistem pengolahan air yang dikembangkan.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Studi

Penelitian ini menggunakan pendekatan pLCA, yaitu metode evaluasi dampak lingkungan pada teknologi yang masih berada dalam tahap pengembangan untuk mengidentifikasi potensi dampak dan *hotspot* sejak tahap desain (Thonemann *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2023). Pengolahan air baku di SDN 008 Balikpapan Utara dilakukan melalui integrasi elektrokoagulasi dan filtrasi. Secara eksisting, pengolahan yang diterapkan adalah filtrasi menggunakan media karbon aktif dan pasir silika.



Gambar 1. Pengolahan air baku SDN 008 Balikpapan Utara.

Data primer terkait kualitas air dan efisiensi penyisihan polutan diperoleh melalui eksperimen elektrokoagulasi skala laboratorium. Pengujian dilakukan pada sampel air baku untuk mengukur penurunan konsentrasi *total suspended solids* (TSS) dan pembentukan flok, sehingga diperlukan *scale-up modelling* berdasarkan pengujian empiris skala laboratorium. Penelitian ini menggunakan data inventori yang didasarkan pada kondisi operasi optimum yang diperoleh dari hasil pengujian laboratorium. Dalam penerapan di lapangan, beberapa parameter seperti konsumsi energi listrik, laju peluruhan anoda aluminium, dan konsentrasi TSS dapat berubah seiring dengan variasi kualitas air baku maupun kondisi operasional. Oleh karena itu, hasil *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) yang diperoleh dalam penelitian ini menggambarkan kondisi dasar (*baseline*) berdasarkan asumsi dan data yang tersedia. Selain itu, penelitian ini belum mencakup analisis sensitivitas untuk menilai sejauh mana perubahan parameter inventori dapat memengaruhi hasil penilaian dampak lingkungan. Dengan demikian, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan *sensitivity analysis* dan *uncertainty analysis* agar tingkat keandalan serta ketepatan hasil LCA dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

Inventori Unit Elektrokoagulasi

Untuk mengubah data kinetika dari skala laboratorium menjadi rancangan pada skala lapangan (± 1.200 L), diperlukan perhitungan kebutuhan energi listrik dan material anoda menggunakan persamaan dasar elektrokimia. Parameter-parameter tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan *Life Cycle Inventory* (LCI).

1. Perhitungan Konsumsi Energi Listrik

Kebutuhan energi listrik pada proses elektrokoagulasi per siklus (*batch*) dihitung dengan mengacu pada Hukum Joule untuk arus searah (DC). Besarnya konsumsi energi (E) ditentukan berdasarkan tegangan (V), kuat arus yang digunakan (I), serta waktu detensi atau lama proses (t). Hubungan ketiga parameter tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut (Khan *et al.*, 2026):

$$E = \frac{V \times I \times t}{1.000} \quad 1)$$

Keterangan:

E = energi spesifik (kWh);

V = tegangan listrik (volt);

I = kuat arus (Ampere); dan

t = waktu operasi per siklus (jam)

2. Perhitungan Peluruhan Anoda (Hukum Faraday)

Anoda aluminium (Al) yang larut ke dalam air selama proses elektrokoagulasi dapat diperkirakan menggunakan Hukum Faraday. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan dilakukan secara kuantitatif berdasarkan hubungan antara arus listrik dan jumlah zat yang teroksidasi. Massa teoritis anoda yang terlarut (m) dinyatakan dengan persamaan berikut (Holt *et al.*, 2005):

$$m = \frac{I \times t_{sec} \times M}{z \times F} \quad 2)$$

Keterangan:

m = massa aluminium yang larut (g);

I = kuat arus (Ampere);

t_{sec} = waktu elektrolisis (detik);

M = massa molar aluminium (26,98 g/mol);

z = jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi (untuk aluminium, $z = 3$ pada pembentukan Al^{3+} dan untuk H_2 , $z = 2$);

F = konstanta Faraday (96.485 C/mol)

3. Penentuan Jumlah Pelat Elektroda

Pada skala lapangan dilakukan dengan mengacu pada parameter rapat arus (*current density*, j) yang telah diidentifikasi sebagai kondisi optimal pada pengujian skala laboratorium. Parameter ini digunakan untuk memastikan distribusi arus tetap efektif tanpa menimbulkan passivasi berlebih pada permukaan elektroda. Luas permukaan aktif total (A_{total}) yang dibutuhkan untuk mengalirkan arus sebesar 20 A dapat dihitung dengan persamaan (Chen, 2004):

$$A_{total} = \frac{I}{j} \quad 3)$$

Setelah nilai luas permukaan total diperoleh, jumlah pelat elektroda efektif (n) yang diperlukan dalam reaktor dapat ditentukan berdasarkan dimensi fisik pelat, yaitu panjang tercelup (p) dan lebar (l). Pada konfigurasi monopolar, dengan asumsi kedua sisi pelat berperan aktif dalam proses elektrolisis, jumlah pelat dihitung menggunakan persamaan:

$$n = \frac{A_{total}}{2 \times (p \times l)} \quad 4)$$

Pendekatan ini memastikan bahwa luas permukaan elektroda yang tersedia cukup untuk mendukung proses elektrokimia secara optimal sesuai dengan kondisi operasi yang direncanakan.

4. Prinsip Kesetaraan *Scale-Up* Berdasarkan Rasio A/V dan *Hydraulic Retention Time* (HRT)
Ketika ukuran reaktor diperbesar dari skala laboratorium ke skala lapangan, luas permukaan pelat per satuan volume air (rasio A/V) biasanya akan mengecil secara drastis. Agar efisiensi penyisihan polutan di lapangan tetap sama dengan di laboratorium pada kondisi kuat arus yang konstan, waktu operasi hidrolis di lapangan ($t_{lapangan}$) harus diperpanjang secara proporsional. Secara teknis, perpanjangan waktu kontak ini berfungsi sebagai kompensasi atas berkurangnya kerapatan geometri elektroda di dalam reaktor besar. Mengacu pada prinsip kesetaraan elektrokimia dari Chen (2004), nilai $t_{lapangan}$ dapat dihitung secara langsung menggunakan persamaan hubungan terbalik berikut:

$$\text{Rasio Kompensasi} = \frac{(A/V)_{lapangan}}{(A/V)_{lab}}$$

$$t_{lapangan} = \frac{t_{lab}}{\text{Rasio Kompensasi}}$$

Keterangan:

- $t_{lapangan}$ = waktu operasi reaktor skala lapangan (jam atau menit);
- t_{lab} = waktu operasi reaktor skala laboratorium (jam atau menit);
- $(A/V)_{lab}$ = rasio luas permukaan aktif elektroda per volume air di laboratorium (m^2/m^3); dan
- $(A/V)_{lapangan}$ = rasio luas permukaan aktif elektroda per volume air di lapangan (m^2/m^3)

Melalui pendekatan kompensasi langsung ini, jumlah flok aluminium hidroksida $[Al(OH)_3]$ yang diproduksi secara elektrokimia untuk setiap liter air di lapangan dijamin akan tetap setara dengan kondisi optimum di laboratorium. Hal ini memberikan dasar perhitungan yang valid dan konsisten saat menyusun data energi dan material pada tahapan *Life Cycle Inventory* (LCI).

5. Justifikasi Penggunaan Kesetaraan Densitas Arus (*Current Density*)
Penelitian ini menggunakan prinsip kesetaraan densitas arus (*current density similitude*) secara konstan sebagai basis utama dalam pemodelan *scale-up*. Nilai densitas arus (j) dipertahankan sama antara skala laboratorium dan lapangan untuk memastikan bahwa laju peluruhan logam

anoda per satuan luas permukaan elektroda tidak berubah. Oleh karena itu, ketika kuat arus lapangan dinaikkan menjadi 20 A untuk mengompensasi volume reaktor yang membesar (1.200 L), luas permukaan aktif total elektroda (A_{lapangan}) disesuaikan secara proporsional menjadi $1,056 \text{ m}^2$. Pendekatan ini menghasilkan nilai densitas arus yang ekuivalen dengan kondisi optimum di laboratorium, yaitu sebesar:

$$j = \frac{I_{\text{lapangan}}}{A_{\text{lapangan}}} = \frac{20 \text{ A}}{1,056 \text{ m}^2} \approx 18,94 \text{ A/m}^2$$

Dengan menerapkan kesetaraan densitas arus ini, karakteristik elektrokimia sistem hulu terjamin tetap konsisten, sehingga validitas data emisi serta kebutuhan material hulu yang dihitung dalam *Life Cycle Inventory* (LCI).

Tujuan dan Ruang Lingkup LCA (*Goal and Scope Definition*)

Tujuan studi LCA adalah menilai potensi dampak lingkungan yang timbul selama proses pengolahan air. Penetapan tujuan, ruang lingkup, unit fungsional, dan batas sistem mengacu pada prinsip LCA dalam ISO 14040 dan ISO 14044 (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Ruang lingkup analisis dibatasi pada pendekatan gate-to-gate, mulai dari air baku, proses elektrolisis, hingga tahap penyaringan akhir. Unit fungsional (functional unit, FU) yang digunakan adalah produksi 1 m^3 air terolah. Kondisi operasional dievaluasi untuk periode 1 tahun. Penampungan air berkapasitas 1.200 L diasumsikan memenuhi kebutuhan air selama 2 hari, sehingga sistem diperkirakan beroperasi sebanyak 182,5 siklus atau setara dengan pengolahan sekitar 219 m^3 air baku per tahun.

Analisis Inventori Daur Hidup (*Life Cycle Inventory/LCI*)

Data inventori disusun berdasarkan pendekatan neraca massa (*mass balance*). Konsumsi energi listrik pada unit elektrokagulasi ditentukan secara matematis berdasarkan spesifikasi daya aktual peralatan, sedangkan kebutuhan energi pada unit filtrasi sebesar 0 kWh karena memanfaatkan gaya gravitasi. Selanjutnya, perhitungan peluruhan material dilakukan dengan menghitung massa anoda aluminium yang terlarut serta pembentukan gas hidrogen (H_2) di katoda menggunakan pendekatan Hukum Faraday, sehingga diperoleh estimasinya. Adapun timbunan limbah padat (*sludge*) diperkirakan melalui analisis stoikiometri pembentukan aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$), yang kemudian dikaitkan dengan efisiensi penyisihan total suspended solids (TSS) dari air baku permukaan.

Penilaian Dampak Lingkungan (*Life Cycle Impact Assessment/LCIA*)

Konversi data inventori ke dalam kategori dampak lingkungan dilakukan menggunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint. Selanjutnya, hasil karakterisasi dinormalisasi menggunakan faktor normalisasi yang tersedia dalam metode ReCiPe untuk mengidentifikasi kontribusi relatif setiap kategori dampak serta menentukan titik kritis (hotspot) utama dalam sistem yang dianalisis (Huijbregts *et al.*, 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kinerja Unit Pengolahan dan Karakteristik Air Baku

Air bersih di SDN 008 Balikpapan Utara memanfaatkan air baku dari Waduk Sungai Wain. Lokasi sekolah yang berdekatan dengan waduk memungkinkan distribusi air secara langsung. Namun, ketiadaan unit pengolahan awal mengakibatkan kualitas air tidak memenuhi standar. Hasil pengujian awal menunjukkan parameter kekeruhan, *Dissolved Oxygen* (DO) dan *Total Suspended Solids* (TSS) yang signifikan, melampaui ambang batas baku mutu yang ditetapkan.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kualitas Air Baku Eksisting (SDN 008 Balikpapan Utara)

Parameter	Satuan	Hasil Uji Lapangan	Baku Mutu*	Keterangan
TDS	mg/L	7	300	Memenuhi
pH	-	5,66	6,5 – 8,5	Tidak Memenuhi
Suhu	°C	29,53	Udara $\pm$ 3	Memenuhi
DO	mg/L	1,7	> 4**	Tidak Memenuhi
Kekeruhan	NTU	19,31	3	Tidak Memenuhi

*Sumber: Permenkes RI No. 2 Tahun 2023

**Sumber: Kelas II PP No. 22 Tahun 2021 (Air permukaan)

Upaya peningkatan kualitas air dilakukan melalui penerapan sistem *upflow filter* dengan media pasir silika dan karbon aktif. Perancangan unit filtrasi ini didasarkan pada perhitungan kebutuhan massa media untuk mencapai laju filtrasi yang optimal. Namun, hasil pengamatan setelah implementasi menunjukkan bahwa unit filtrasi tersebut belum mampu menurunkan tingkat kekeruhan secara signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa polutan dalam air baku didominasi oleh partikel koloid yang stabil dan bermuatan, dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan pori-pori media filtrasi. Akibatnya, mekanisme penyaringan secara fisik maupun proses adsorpsi tidak berlangsung secara efektif.

Perencanaan dan Perhitungan Massa Media Filtrasi

Penentuan jumlah media filter dilakukan melalui pendekatan matematis berdasarkan geometri tabung reaktor dan karakteristik fisik material. Drum yang digunakan berkapasitas 200 L dengan diameter sebesar 57 cm dan tinggi sebesar 90 cm. Untuk tinggi media yang direncanakan sebesar 40 cm, sehingga diperoleh volume lapisan media sebesar 102.020 cm³. Untuk menentukan massa pasir silika, terlebih dahulu dihitung nilai kerapatan curah (*bulk density*/ ρ_b) dengan mempertimbangkan nilai porositas (ϵ) sebesar 40 dan kerapatan partikel (ρ_p) sebesar 2,6 g/cm³ (Metcalf & Eddy, 2014), sebagai berikut:

$$\rho_b = \rho_p \times (1 - \epsilon) \quad 5)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai ρ_b pasir silika sebesar 1,56 g/cm³. Massa total media (m) kemudian dihitung dengan mengalikan volume dengan kerapatan curah:

$$m = V \times \rho_b \quad 6)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, total massa pasir silika yang digunakan adalah 160,069 kg. Menggunakan prosedur yang sama dengan nilai *bulk density* spesifik 0,45 g/cm³, diperoleh massa karbon aktif sebesar 45,91 kg. Data massa total media ini selanjutnya diintegrasikan ke dalam analisis *Life Cycle Inventory* (LCI).

Pengembangan Unit Elektrokoagulasi sebagai Solusi Pengolahan Lanjutan

Implementasi awal sistem filtrasi menunjukkan bahwa unit tersebut belum efektif dalam menyisihkan kekeruhan air baku Waduk Sungai Wain. Meskipun desain unit filtrasi telah dihitung secara matematis, tidak tereduksinya kekeruhan mengindikasikan dominasi partikel koloid stabil berukuran mikro yang tidak dapat dipisahkan melalui mekanisme filtrasi konvensional. Partikel koloid ini memerlukan proses destabilisasi muatan, seperti koagulasi atau elektrokoagulasi, agar dapat membentuk flok dan dipisahkan secara efektif (Ammar *et al.*, 2023; Abfertiawan *et al.*, 2024).



Gambar 2. Perbandingan Hasil Elektrokoagulasi.

Sebagai upaya mengatasi hal tersebut, diterapkan unit elektrokoagulasi (EC) sebagai proses lanjutan. Pada proses ini, anoda aluminium mengalami pelarutan menghasilkan ion Al^{3+} yang kemudian mengalami hidrolisis membentuk $Al(OH)_3$. Yang berperan sebagai koagulan aktif yang mampu menetralkan muatan partikel koloid dan memicu pembentukan flok yang lebih besar dan mudah dipisahkan. Berbeda dengan filtrasi yang hanya mengandalkan penyaringan fisik, elektrokoagulasi bekerja melalui kombinasi mekanisme koagulasi, flokulasi, dan flotasi akibat terbentuknya gelembung gas hidrogen di katoda (Chen, 2004; Ammar *et al.*, 2023). Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa penerapan elektrokoagulasi mampu menurunkan kekeruhan secara signifikan dibandingkan dengan filtrasi saja. Flok yang terbentuk selama proses EC memiliki ukuran lebih besar dan struktur yang lebih mudah tertahan pada media filtrasi tahap akhir. Selain itu, proses elektrolisis juga memberikan efek peningkatan pH menuju kondisi netral, yang menguntungkan mengingat karakteristik awal air baku yang cenderung asam.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Percobaan Elektrokoagulasi

Parameter	Hasil Pengujian	
	Awal	Akhir
pH	5,66	8,68
DO (mg/L)	1,70	6,33
Kekeruhan (NTU)	19,31	0,09

Dalam proses elektrokoagulasi, *Specific Electrical Charge* (q_{unit}) digunakan sebagai parameter untuk memastikan bahwa kinerja penyisihan polutan pada skala lapangan tetap konsisten dengan hasil pada skala laboratorium. Perhitungan *scale-up* dilakukan dengan asumsi bahwa efisiensi proses pada skala laboratorium tetap terjaga pada skala operasional. Parameter ini merepresentasikan jumlah muatan listrik yang diberikan per satuan volume air yang secara sistematis dinyatakan dalam persamaan:

$$q_{unit} = \frac{I \times t}{V}$$

Berdasarkan optimasi di laboratorium dengan kuat arus (I) 10A, waktu kontak (t) 600 detik (10 menit), dan volume air (V) 0,25 L, diperoleh nilai q_{unit} sebesar 24.000 Coulomb/Liter. Untuk menerapkan nilai muatan yang sama pada unit 1.200 L, dilakukan penyesuaian berdasarkan rasio luas permukaan elektroda terhadap volume air (A/V). Pada skala laboratorium, rasio (A/V) adalah $24 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Sedangkan pada unit 1.200 L, dengan rencana menggunakan 10 plat aluminium berukuran $80 \text{ cm} \times 6,6 \text{ cm}$ (luas total $1,056 \text{ m}^2$), diperoleh rasio A/V sebesar $0,88 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Kompensasi waktu

operasional ($t_{lapangan}$) untuk mencapai muatan spesifik yang setara dihitung melalui rasio perbandingan A/V sebagai berikut:

$$\text{Rasio Kompensasi} = \frac{(A/V)_{lapangan}}{(A/V)_{lab}} = \frac{0,88}{24} = 0,0367$$

Maka, waktu operasional yang dibutuhkan di lapangan adalah:

$$t_{lapangan} = \frac{t_{lab}}{\text{Rasio Kompensasi}} = \frac{10 \text{ menit}}{0,0367} \approx 272,7 \text{ menit}$$

Kebutuhan listrik yang dibutuhkan dalam 1 kali siklus:

$$E = \frac{32 \text{ V} \times 20 \text{ A} \times 4,5 \text{ jam}}{1.000} = 2,88 \text{ Kwh}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk mengolah 1.200 L air dengan efisiensi yang setara dengan skala lab, diperlukan waktu operasional selama 4,5 jam. Serta untuk menghitung kebutuhan listrik yang digunakan dalam 1 siklus sebesar 2,88 Kwh atau sebesar 525,6 Kwh/Tahun. Durasi operasional selama 4,5 jam per siklus ini kemudian dapat dikonversi menjadi kebutuhan listrik dalam analisis *Life Cycle Assessment* (LCA). Massa aluminium yang luruh dari anoda merupakan parameter krusial yang menentukan efisiensi koagulasi sekaligus menjadi kontributor utama beban lingkungan dalam analisis LCA. Pelarutan ini terjadi akibat oksidasi elektroda aluminium pada sisi anoda yang melepaskan ion Al^{3+} ke dalam larutan. Berdasarkan perhitungan menggunakan Hukum Faraday I, massa aluminium yang terlarut dari anoda selama satu siklus pengolahan ($1,2 \text{ m}^3$) dengan arus 20 A dan waktu operasi 4,5 jam adalah sebesar 30,2 g. Pelarutan ini merupakan mekanisme utama dalam proses elektrokoagulasi, di mana anoda aluminium menghasilkan ion Al^{3+} yang kemudian berperan sebagai koagulan aktif untuk mendestabilisasi partikel koloid dalam air baku. Dengan demikian, jumlah aluminium yang terlarut secara langsung menentukan efektivitas proses penyisihan kekeruhan (Chen, 2004; Ammar *et al.*, 2023).

$$m = \frac{20 \times (4,5 \times 3600) \times 26,98}{3 \times 96485} = 30,2 \text{ gram}$$

Secara operasional, nilai ini juga merepresentasikan konsumsi elektroda per siklus pengolahan. Jika diakumulasikan dalam satu tahun operasi dengan total volume air terolah sebesar 219 m^3 , maka total peluruhan aluminium diperkirakan mencapai 5,51 kg/tahun. Dalam perspektif *Life Cycle Assessment* (LCA), konsumsi aluminium ini menjadi kontributor penting terhadap kategori dampak *mineral resource scarcity*, mengingat produksi aluminium primer dikenal sangat intensif energi dan melibatkan proses ekstraksi bauksit yang berdampak signifikan terhadap lingkungan (Norgate & Haque, 2010). Selain itu, pelarutan aluminium juga berimplikasi pada pembentukan lumpur berupa aluminium hidroksida. Meskipun proses ini efektif dalam menurunkan kekeruhan hingga lebih dari 99%, akumulasi lumpur yang mengandung residu logam berpotensi berkontribusi terhadap kategori dampak toksisitas, baik terhadap manusia maupun ekosistem perairan. Oleh karena itu, pengendalian parameter operasional seperti kuat arus dan waktu kontak menjadi aspek yang krusial, tidak hanya untuk mencapai efisiensi pengolahan yang optimal, tetapi juga untuk meminimalkan beban lingkungan akibat konsumsi material anoda yang merupakan salah satu *hotspot* utama dalam sistem elektrokoagulasi (Holt *et al.*, 2005; Ammar *et al.*, 2023).

Analisis Timbulan Lumpur dan Produk Samping Gas Hidrogen

Selain menghasilkan air terolah, proses elektrokoagulasi juga menghasilkan dua aliran keluaran utama yang perlu diperhitungkan dalam analisis *Life Cycle Inventory* (LCI), yaitu residu padat (lumpur) dan emisi gas. Lumpur fisik merepresentasikan partikel tersuspensi yang berhasil dipisahkan dari air baku. Berdasarkan nilai kekeruhan awal sebesar 19,31 NTU, dilakukan konversi ke *Total Suspended Solids* (TSS) menggunakan faktor empiris 1,5, sehingga diperoleh konsentrasi sekitar 28,97 mg/L. Pendekatan ini mengacu pada hubungan empiris yang umum digunakan pada air permukaan dengan tingkat kekeruhan rendah hingga sedang, di mana rasio TSS terhadap NTU umumnya berada pada rentang 1–2 mg/L per NTU (Bilotta & Brazier, 2008). Nilai tersebut digunakan sebagai pendekatan konservatif untuk kebutuhan penyusunan *Life Cycle Inventory* (LCI), mengingat pengukuran TSS secara langsung tidak dilakukan pada penelitian ini. Dengan kapasitas reaktor 1.200 L, beban polutan yang tersisihkan per siklus adalah sekitar 34,76 g. Dengan asumsi efisiensi pengendapan sebesar 95%, maka massa lumpur fisik yang terbentuk diperkirakan sebesar 33,02 g per siklus, atau sekitar 6,03 kg/Tahun. Selain itu, terbentuk pula lumpur kimia yang berasal dari reaksi ion aluminium (Al^{3+}) hasil pelarutan anoda dengan ion hidroksil (OH^-) di dalam air, membentuk flok aluminium hidroksida $Al(OH)_3$. Secara stoikiometri, massa flok yang terbentuk sebanding dengan massa aluminium terlarut. Berdasarkan pelarutan aluminium sebesar 30,2 g per siklus, diperoleh estimasi pembentukan lumpur kimia sebesar 87,24 g per siklus.

$$m_{flok} = \frac{BM\ Al(OH)_3}{BM\ Al} \times m_{Al} = \frac{78}{27} \times 30,2 = 87,24\ gram$$

Dengan demikian, total residu padat yang dihasilkan merupakan kombinasi antara lumpur fisik dan kimia, yaitu sekitar 120,26 g/siklus atau setara dengan 21,95 kg/tahun. Dalam konteks LCA, akumulasi lumpur ini menjadi parameter penting, terutama dalam kategori dampak ekotoksitas, karena mengandung konsentrasi polutan dan residu logam dari proses pengolahan (Holt *et al.*, 2005; Ammar *et al.*, 2023).

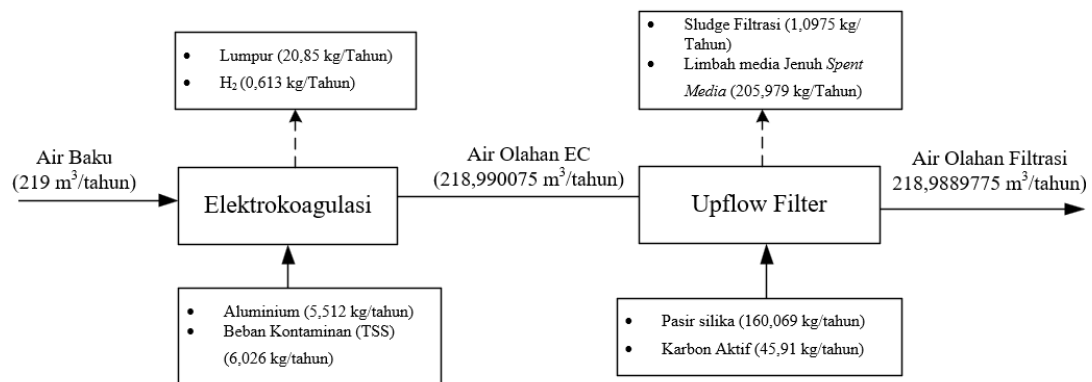
$$m = \frac{20 \times (4,5 \times 3600) \times 2}{2 \times 96485} = 3,36\ gram$$

Selain residu padat, proses elektrokoagulasi juga menghasilkan emisi gas hidrogen (H_2) sebagai produk samping dari reaksi reduksi di katoda. Berdasarkan perhitungan menggunakan Hukum Faraday, massa gas hidrogen yang dihasilkan adalah sekitar 3,36 g per siklus atau sekitar 0,613 kg/Tahun. Meskipun jumlahnya relatif kecil, penghitungan emisi ini tetap penting untuk memastikan keseimbangan neraca massa sistem serta memberikan transparansi dalam inventarisasi emisi udara pada analisis daur hidup (Chen, 2004; Moussa *et al.*, 2017).

Analisis Inventori Daur Hidup (*Life Cycle Inventory* - LCI)

Tahap *Life Cycle Inventory* (LCI) dalam penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi seluruh aliran *input* dan *output* yang terjadi selama operasional. Inventori disusun berdasarkan pendekatan neraca massa (*mass balance*). Aliran *input* meliputi listrik yang digunakan pada unit elektrokoagulasi serta konsumsi material anoda aluminium sebagai sumber koagulan *in-situ*. Konsumsi energi dihitung berdasarkan parameter operasional berupa tegangan, kuat arus, dan waktu proses, sedangkan peluruhan anoda ditentukan menggunakan Hukum Faraday yang menghubungkan jumlah muatan listrik dengan massa logam yang terlarut. Pendekatan ini memungkinkan estimasi kebutuhan energi dan material dilakukan secara terukur sesuai kondisi operasi sistem (Chen, 2004; Jing *et al.*, 2021; Ammar *et al.*, 2023; Jo *et al.*, 2024).

Sementara itu, aliran keluaran terdiri atas air terolah, lumpur, dan emisi gas. Lumpur mencakup dua komponen utama, yaitu lumpur fisik yang berasal dari partikel tersuspensi dalam air baku, serta lumpur kimia berupa aluminium hidroksida ($Al(OH)_3$) hasil reaksi koagulasi. Pembentukan lumpur kimia dihitung secara stoikiometri berdasarkan massa aluminium yang terlarut, sedangkan lumpur fisik diperkirakan dari konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) yang tersisihkan selama proses. Selain itu, emisi gas hidrogen (H_2) yang terbentuk di katoda juga dihitung menggunakan pendekatan elektrokimia untuk memastikan keseimbangan neraca massa sistem. Seluruh data inventori kemudian dinormalisasi terhadap unit fungsional, yaitu produksi 1 m³ air bersih, sehingga memungkinkan perbandingan yang konsisten dengan studi lain. Dengan pendekatan ini, LCI tidak hanya memberikan gambaran kuantitatif mengenai konsumsi sumber daya dan timbunan limbah, tetapi juga menjadi dasar utama dalam tahap penilaian dampak lingkungan (*Life Cycle Impact Assessment – LCIA*) untuk mengidentifikasi kontribusi setiap komponen terhadap beban lingkungan sistem (Holt *et al.*, 2005; Huijbregts *et al.*, 2017).



Gambar 3. Diagram Neraca Massa pada Sistem Elektrokoagulasi–Upflow Filter.

Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Tahap *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) dilakukan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari seluruh aliran material dan energi yang telah diidentifikasi pada tahap LCI. Melalui metode ReCiPe 2016 Midpoint (*Hierarchist*), setiap aliran inventori dikonversi ke dalam kategori dampak lingkungan tertentu sehingga kontribusi masing-masing komponen sistem dapat dianalisis secara kuantitatif. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi *environmental hotspot* pada proses pengolahan air berbasis elektrokoagulasi, khususnya yang berkaitan dengan konsumsi energi listrik, penggunaan material anoda aluminium, pembentukan lumpur, serta emisi hasil proses elektrokimia. Dengan demikian, hasil LCIA tidak hanya memberikan gambaran mengenai besarnya dampak lingkungan yang dihasilkan, tetapi juga menjadi dasar dalam menentukan strategi optimasi sistem yang lebih berkelanjutan (Chen, 2004; Huijbregts *et al.*, 2017).

Tabel 5. Hasil Kategori dan Nilai Dampak Lingkungan Berdasarkan Metode ReCiPe 2016

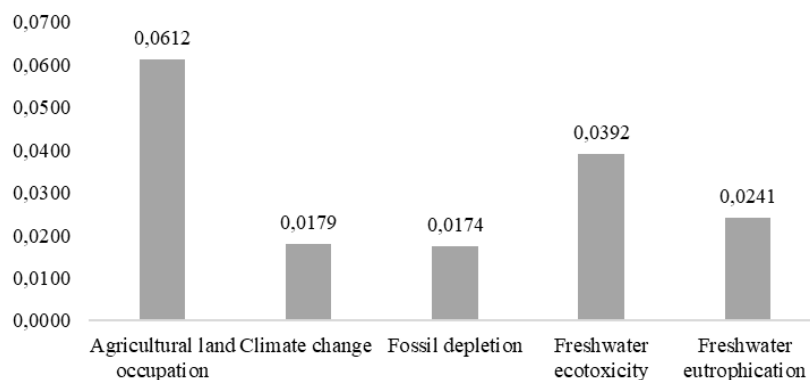
No	Kategori Dampak	Hasil	Satuan
1	Agricultural land occupation	332,641	m ² a
2	Climate change	98,889	kg CO ₂ eq
3	Fossil depletion	22,40	kg oil eq
4	Freshwater ecotoxicity	0,178	kg 1,4-DB eq
5	Freshwater eutrophication	0,007	kg P eq

Hasil *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) menunjukkan bahwa terdapat lima kategori dampak dengan nilai terbesar, yaitu *Agricultural land occupation*, *Climate change*, *Fossil depletion*,

Freshwater ecotoxicity, dan *Freshwater eutrophication*, sedangkan kategori lainnya memberikan kontribusi yang relatif kecil. Kategori dampak lingkungan dengan nilai terbesar adalah *Agricultural Land Occupation* sebesar 332,64 m²a. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan air memiliki keterkaitan tidak langsung terhadap penggunaan lahan produktif, yang terutama berasal dari proses produksi material pendukung, khususnya aluminium, karbon aktif, pasir silika, dan energi listrik. Dalam konteks elektrokoagulasi, tingginya nilai kategori ini dapat dikaitkan dengan rantai pasok bahan baku aluminium yang melibatkan aktivitas pertambangan dan proses industri intensif sumber daya lahan. Tingginya nilai *Agricultural Land Occupation* menunjukkan bahwa rantai pasok material, khususnya produksi aluminium, memberikan kontribusi lingkungan yang lebih besar dibandingkan operasi filtrasi itu sendiri. Hasil ini konsisten dengan penelitian Norgate & Haque (2010) yang menyebutkan bahwa ekstraksi bauksit dan produksi aluminium primer merupakan proses yang intensif sumber daya dan penggunaan lahan. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi konsumsi elektroda berpotensi memberikan pengurangan dampak lingkungan yang lebih besar dibandingkan peningkatan efisiensi unit filtrasi.

Pada kategori dampak terbesar berikutnya adalah *Climate Change* sebesar 98,89 kg CO₂ eq. Indikasikan penggunaan konsumsi energi listrik selama proses elektrokoagulasi menjadi kontributor utama emisi gas rumah kaca. Beban emisi tersebut terutama berasal dari penggunaan arus listrik yang relatif tinggi selama waktu operasi 4,5 jam per siklus, serta konsumsi anoda aluminium yang diproduksi melalui proses elektrolisis dengan intensitas energi tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa kebutuhan energi operasional merupakan salah satu *environmental hotspot* utama dalam sistem. Nilai *Climate Change* sebesar 98,89 kg CO₂ eq menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik dan penggunaan anoda aluminium menjadi sumber utama emisi gas rumah kaca dalam sistem. Jika dibandingkan dengan studi elektrokoagulasi untuk pengolahan air limbah industri yang dilaporkan oleh Ammar *et al.*, (2023), nilai emisi pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang sebanding, mengingat konsumsi energi listrik merupakan hotspot utama pada sebagian besar sistem elektrokoagulasi. Dibandingkan dengan koagulasi kimia konvensional, kebutuhan energi elektrokoagulasi relatif lebih tinggi, namun penggunaan bahan kimia eksternal dapat diminimalkan sehingga menghasilkan timbunan lumpur yang lebih rendah. Sementara itu, teknologi membran seperti ultrafiltrasi (UF) dan *reverse osmosis* (RO) umumnya memiliki konsumsi energi yang lebih tinggi terutama akibat kebutuhan tekanan operasi dan penggantian membran secara berkala. Oleh karena itu, meskipun kontribusi terhadap perubahan iklim masih signifikan, sistem elektrokoagulasi-filtrasi dapat menjadi alternatif yang kompetitif untuk pengolahan air baku skala kecil hingga menengah.

Pada kategori *Fossil Depletion*, diperoleh nilai sebesar 22,40 kg oil eq. Dampak ini menunjukkan adanya ketergantungan sistem terhadap sumber energi berbasis bahan bakar fosil, baik secara langsung melalui konsumsi listrik maupun secara tidak langsung melalui proses produksi material anoda. Semakin besar kebutuhan energi listrik dalam proses elektrokoagulasi, maka semakin tinggi pula potensi deplesi sumber daya fosil yang terjadi. Nilai *Freshwater Ecotoxicity* sebesar 0,178 kg 1,4-DB eq mengindikasikan adanya potensi dampak toksik terhadap ekosistem perairan tawar. Dampak ini umumnya berkaitan dengan residu logam dan lumpur hasil proses elektrokoagulasi, terutama yang mengandung aluminium hidroksida (Al(OH)₃). Meskipun nilainya relatif lebih kecil dibanding kategori perubahan iklim, kategori ini tetap penting karena berkaitan langsung dengan potensi akumulasi polutan pada lingkungan perairan apabila lumpur tidak dikelola dengan baik. Sementara itu, kategori *Freshwater Eutrophication* menunjukkan nilai paling rendah, yaitu 0,0069 kg P eq. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi sistem terhadap peningkatan nutrisi di badan air relatif kecil. Rendahnya nilai eutrofikasi mengindikasikan bahwa proses pengolahan tidak menghasilkan pelepasan fosfor atau senyawa penyebab eutrofikasi dalam jumlah signifikan.



Gambar 4. Hasil Normalisasi *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA).

Hasil normalisasi menunjukkan bahwa kategori *Agricultural land occupation* memiliki kontribusi dampak lingkungan tertinggi dengan nilai sebesar 0,0612, yang mengindikasikan bahwa penggunaan sumber daya dan material, terutama energi listrik dan anoda aluminium, memberikan tekanan terbesar terhadap penggunaan lahan. Kategori berikutnya yang cukup dominan adalah *Freshwater ecotoxicity* sebesar 0,0392, yang menunjukkan potensi dampak toksik terhadap ekosistem perairan akibat residu lumpur dan material logam dari proses elektrokoagulasi. Sementara itu, kategori *Freshwater eutrophication* memiliki nilai 0,0241, sedangkan *Climate change* dan *Fossil depletion* masing-masing sebesar 0,0179 dan 0,0174. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik selama proses operasi turut berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca dan penggunaan sumber daya fosil, meskipun kontribusinya relatif lebih rendah dibandingkan dengan dampak penggunaan lahan dan ekotoksitas. Secara keseluruhan, hasil normalisasi mengindikasikan bahwa *environmental hotspot* utama sistem pengolahan air berbasis elektrokoagulasi berada pada konsumsi material serta potensi dampaknya terhadap lingkungan perairan.

Tabel 3. Persentase Kategori Dampak dan Kontributor Utama

Kategori Dampak	Nilai	Kontributor Utama	Persentase (%)
<i>Agricultural Land Occupation</i>	332,6 m ² a	Karbon aktif	99,85
<i>Climate Change</i>	98,89 kg CO ₂ eq	Unit EC (terutama aluminium)	68,69
<i>Fossil Depletion</i>	22,40 kg oil eq	Unit EC (terutama aluminium)	80,74
<i>Freshwater Ecotoxicity</i>	0,178 kg 1,4-DB eq	Karbon aktif	62,32
<i>Freshwater Ecotoxicity</i>	0,178 kg 1,4-DB eq	Pasir silika	30,16
<i>Freshwater Ecotoxicity</i>	0,178 kg 1,4-DB eq	Aluminium	7,52

Analisis kontribusi menunjukkan bahwa setiap kategori dampak memiliki hotspot yang berbeda. Pada kategori *Climate Change* sebesar 98,89 kg CO₂ eq, unit elektrokoagulasi memberikan kontribusi terbesar yaitu 68,69% dari total dampak. Kontribusi tersebut terutama berasal dari produksi anoda aluminium yang menghasilkan 67,92 kg CO₂ eq. Hasil ini menunjukkan bahwa proses produksi aluminium merupakan faktor dominan dalam pembentukan emisi gas rumah kaca pada sistem yang dikaji. Pada kategori *Fossil Depletion* sebesar 22,40 kg oil eq, kontribusi terbesar juga berasal dari unit elektrokoagulasi, yaitu sebesar 80,74%. Tingginya dampak ini berkaitan dengan kebutuhan energi dan sumber daya fosil selama proses ekstraksi serta pemurnian aluminium. Dengan demikian, pengurangan konsumsi anoda berpotensi menjadi strategi utama untuk menurunkan dampak perubahan iklim dan deplesi sumber daya fosil. Berbeda dengan kategori sebelumnya, *Freshwater Ecotoxicity* sebesar 0,178 kg 1,4-DB eq didominasi oleh produksi karbon aktif (62,32%) dan pasir silika (30,16%). Hasil ini

menunjukkan bahwa dampak ekotoksitas lebih banyak dipengaruhi oleh rantai pasok media filtrasi dibandingkan dengan penggunaan anoda aluminium. Secara keseluruhan, hasil LCIA menunjukkan bahwa dampak lingkungan utama sistem pengolahan air berbasis elektrokoagulasi lebih didominasi oleh konsumsi energi listrik dan penggunaan material anoda aluminium dibandingkan oleh emisi limbah cairnya. Oleh karena itu, strategi optimasi yang dapat dilakukan meliputi pengurangan waktu operasi, optimasi kuat arus, peningkatan efisiensi elektroda, serta pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk menekan kontribusi terhadap kategori perubahan iklim dan deplesi bahan bakar fosil.

KESIMPULAN

Integrasi unit elektrokoagulasi pada sistem filtrasi air baku Waduk Sungai Wain di SDN 008 Balikpapan Utara terbukti efektif mengatasi keterbatasan filtrasi konvensional dalam menyisihkan partikel koloid, ditandai dengan penurunan kekeruhan dari 19,31 NTU menjadi 0,09 NTU serta perbaikan pH (5,66→8,68) dan *dissolved oxygen* (1,70→6,33 mg/L). Evaluasi menggunakan pendekatan pLCA pada skala lapangan 1.200 L, dengan kebutuhan energi 525,6 kWh/tahun dan konsumsi anoda aluminium 5,51 kg/tahun, mengidentifikasi *Agricultural Land Occupation*, *Climate Change*, dan *Fossil Depletion* sebagai kategori dampak lingkungan dominan. Analisis kontribusi menunjukkan bahwa kategori *Climate Change* dan *Fossil Depletion* terutama dipengaruhi oleh unit elektrokoagulasi, khususnya produksi anoda aluminium, sedangkan *Agricultural Land Occupation* terutama dipengaruhi oleh rantai pasok media filtrasi. Oleh karena itu, optimasi konsumsi material dan efisiensi energi menjadi strategi kunci bagi pengembangan sistem pengolahan air baku skala kecil yang berkelanjutan. Penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis sensitivitas dan ketidakpastian untuk memperkuat keandalan hasil pLCA.

DAFTAR PUSTAKA

- Abfertiawan, M.S., Syafila, M., Handajani, M., *et al.*, 2024. *Batch Electrocoagulation Process for the Removal of High Colloidal Clay from Open-Cast Coal Mine Water Using Al and Fe Electrodes*. *Mine Water Environ.* 43: 516–528. <https://doi.org/10.1007/s10230-024-01004-1>.
- Ammar, M., Yousef, E., Mahmoud, M. A., Ashraf, S., and Baltrusaitis, J., 2023. *A Comprehensive Review of the Developments in Electrocoagulation for the Removal of Contaminants from Wastewater*. *Separations*. 10(6): 337. <https://doi.org/10.3390/separations10060337>.
- Bilotta, G.S., and Brazier, R.E., 2008. *Understanding the Influence of Suspended Solids on Water Quality and Aquatic Biota*. *Water Research*. 42(12): 2849–2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>.
- Chen, G., 2004. *Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment*. *Separation and Purification Technology*. 38(1): 11–41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>.
- Cucurachi, S., van der Giesen, C., and Guinée, J., 2018. *Ex-ante LCA of Emerging Technologies*. *Procedia CIRP*. 69: 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.005>.
- Emamjomeh, M.M., and Sivakumar, M., 2009. *Review of Pollutants Removed by Electrocoagulation and Electrocoagulation/Flotation Processes*. *Journal of Environmental Management*. 90(5): 1663–1679. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.011>.
- Hakizimana, J.N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., and Naja, J., 2017. *Electrocoagulation Process in Water Treatment: A Review of Electrocoagulation Modeling Approaches*. *Desalination*. 404: 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.
- Holt, P.K., Barton, G.W., and Mitchell, C.A., 2005. *The Future for Electrocoagulation as A Localised Water Treatment Technology*. *Chemosphere*. 59(3): 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.023>.

- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., *et al.*, 2017. *Recipe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level*. Int J Life Cycle Assess. 22: 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. Geneva: ISO.
- Jing, G., Ren, S., Pooley, S., Sun, W., Kowalczyk, P.B., and Gao, Z., 2021. *Electrocoagulation for Industrial Wastewater Treatment: An Updated Review*. Environmental Science: Water Research & Technology. 7(7): 1177–1196. <https://doi.org/10.1039/D1EW00158B>.
- Jo, S., Kadam, R., Jang, H., Seo, D., and Park, J., 2024. *Recent Advances In Wastewater Electrocoagulation Technologies: Beyond Chemical Coagulation*. Energies. 17(23): 5863. <https://doi.org/10.3390/en17235863>.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. 2023. *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan*.
- Khandegar, V., and Saroha, A.K., 2013. *Electrocoagulation for the Treatment of Textile Industry Effluent—A Review*. Journal of Environmental Management. 128: 949–963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>.
- Khan, M.H.R.B., Islam, N., Ahmed, T., *et al.*, 2026. *Optimization of Voltage and Retention Time for Enhanced Textile Wastewater Treatment Using Electrocoagulation With Stainless-Steel Electrodes*. Clean Technologies and Environmental Policy. 28: 40. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03347-x>.
- Metcalf and Eddy. 2014. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.)*. McGraw-Hill, New York.
- Mollah, M.Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., and Cocke, D.L., 2001. *Electrocoagulation (EC)—Science and Applications*. Journal of Hazardous Materials. 84(1): 29–41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5).
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J., and Cocke, D.L., 2004. *Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation*. Journal of Hazardous Materials. 114(1–3): 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>.
- Moussa, D.T., El-Naas, M.H., Nasser, M., and Al-Marri, M.J., 2017. *A Comprehensive Review of Electrocoagulation for Water Treatment: Potentials and Challenges*. Journal of Environmental Management. 186: 24–41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>.
- Norgate, T., and Haque, N., 2010. *Energy and Greenhouse Gas Impacts of Mining and Mineral Processing Operations*. Journal of Cleaner Production. 18(3): 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>.
- Pemerintah Republik Indonesia. 2021. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Sun, Y., Bai, S., Wang, X., Ren, N., and You, S. (2023). *Prospective Life Cycle Assessment for the Electrochemical Oxidation Wastewater Treatment Process: From Laboratory to Industrial Scale*. Environmental Science & Technology. 57: 1970–1981. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04185>.
- Thonemann, N., Schulte, A., and Maga, D., 2020. *How to Conduct Prospective Life Cycle Assessment for Emerging Technologies? A Systematic Review and Methodological Guidance*. Sustainability. 12(3): 1192. <https://doi.org/10.3390/su12031192>.