



Artikel Penelitian

Studi Penurunan Konsentrasi Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) pada Air Lindi Menggunakan Metode Elektrokoagulasi dengan Elektroda Alumunium

Fery Setiyono*, Rosdiana Rosdiana, Dwiprayogo Wibowo

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Kendari, Jl. KH. Ahmad Dahlan No. 10 Kendari – Sulawesi Tenggara, Indonesia.

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 24 November 2025

Revisi Akhir: 30 November

Diterbitkan Online: 31 Desember 2025

KATA KUNCI

Lindi; Elektrokoagulasi; Tegangan;
Besi; Tembaga; Elektroda

KORESPONDENSI

Telepon: +62 812-4433-5398

E-mail: fery.setiyono17@gmail.com

ABSTRACT

In processing leachate, various biological processing processes have been carried out, however processing is needed to reduce inorganic content such as heavy metals in leachate water. Electrocoagulation is an alternative liquid waste treatment that uses the principles of electrolysis, coagulation and flocculation. The aim of the research is to analyze the effect of electrical voltage using aluminum electrodes on reducing the concentration of Fe and Cu metals in leachate water, then calculate the efficiency of reducing Fe and Cu metals from each electrical voltage treatment given in this study, namely 6, 12 and 18 volts with a contact time of 60 minutes. The method used in this research is quantitative, experimental on a laboratory scale. The research results showed that the optimum metal content reduction reached 0.0288 mg/L and 0.0086 mg/L with an efficiency of 97.75% and 82.05% for Fe and Cu parameters respectively at a treatment voltage of 18 volts. These results show that the leachate treatment process using electrocoagulation techniques has great efficiency.

1. PENDAHULUAN

Tempat Pemrosesan Akhir sampah (TPA) merupakan fasilitas yang umum ditemukan di kota-kota besar di Indonesia. Sayangnya, banyak dari TPA ini hanya berfokus pada pengolahan sampah dan kurang memperhatikan penanganan lindi (*leachate*). Lindi adalah cairan yang terbentuk ketika air meresap melalui tumpukan sampah dan melarutkan berbagai zat dari proses dekomposisi. Jika tidak ditangani dengan benar, lindi dapat menimbulkan dampak negatif yang signifikan, karena mengandung konsentrasi polutan organik dan anorganik yang tinggi (Dimiati & Hadi, 2017).

Untuk wilayah Kota Kendari adanya TPA Puuwatu yang memiliki empat zona, yaitu A, B, dan C saat ini aktif digunakan untuk mengelola sampah yang diangkat dari berbagai TPS di Kota Kendari, sementara Zona D sudah tidak aktif (Ayatullah et al., 2021). Air lindi yang dihasilkan pada TPA Puuwatu berasal dari timbulan sampah dan kegiatan dalam proses *landfill*, yang terbentuk oleh rembesan kadar air dalam sampah maupun berbagai sumber dari luar seperti pengaruh drainase, air hujan dan lain sebagainya yang melalui tumpukan sampah.

Metode pengolahan lindi yang umum digunakan di banyak TPA di Indonesia adalah sistem kolam yang meliputi kolam

penampungan, kolam anaerobik, kolam aerobik, dan kolam stabilisasi. Namun, metode ini memiliki kelemahan yaitu membutuhkan waktu pengolahan yang lama sekitar 30 hingga 50 hari dan memerlukan lahan yang sangat luas (Said & Hartaja, 2015). Salah satu solusi yang dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan ini adalah dengan pengolahan air limbah metode elektrokoagulasi. Elektrokoagulasi merupakan teknik alternatif pengolahan limbah cair yang menggunakan prinsip elektrolisis, koagulasi dan flokulasi. Prinsip kerjanya cukup sederhana yakni dengan mengalirkan arus listrik melalui dua elektroda logam anoda dan katoda, untuk menghasilkan ion-ion yang berperan sebagai koagulan dan kemudian mengikat kontaminan yang ada di dalam air (Dura, A, 2013).

Metode elektrokoagulasi memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode konvensional biasa, dimana waktu retensinya relatif singkat dan tidak memerlukan lahan yang luas. Kemudian dalam prosesnya tidak membutuhkan bahan kimia tambahan sehingga lebih ramah lingkungan. Salah satu faktor yang mempengaruhi elektrokoagulasi adalah bahan yang digunakan sebagai elektroda, untuk pemilihan bahan elektroda mengacu pada deret volta yang berfungsi sebagai acuan apakah logam tersebut dapat bereaksi dengan ion logam lain (Alqodah & Al-Shannag, 2017). Alumunium lebih direkomendasikan sebagai

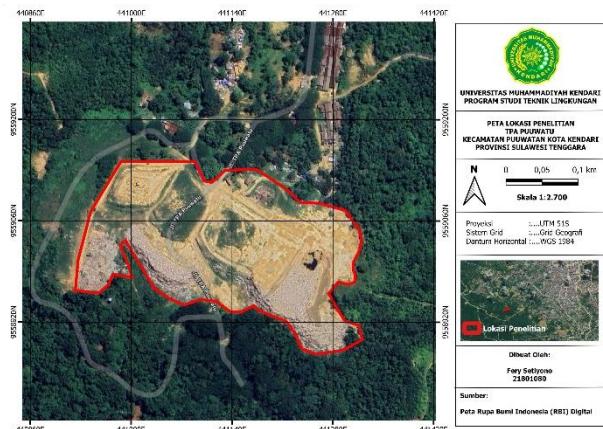
bahan elektroda, dikarenakan semakin ke kiri kedudukan suatu logam maka semakin reaktif logam tersebut dalam melepaskan elektron dan semakin bersifat reduktor yang kuat.

Sebagian besar TPA di Indonesia, pengolahan lindinya masih menggunakan sistem kolam dengan berbagai proses biologis. Namun cara ini sering kali tidak cukup efektif untuk mengurangi kandungan anorganik seperti logam berat pada air lindi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tegangan listrik dengan elektroda aluminium terhadap penurunan konsentrasi logam Fe dan Cu, kemudian mengetahui efisiensi dari setiap perlakuan tegangan listrik yang diberikan menggunakan metode elektrokoagulasi pada air lindi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memproyeksikan tentang alternatif pengolahan air lindi yang lebih optimal dan ramah lingkungan.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Kendari. Pengambilan sampel berupa air lindi diambil dari inlet kolam penampungan lindi di TPA Puuwatu Kota Kendari.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

2.2. Metode Penelitian

Penelitian ini bersifat studi eksperimental yang dilakukan di laboratorium, pendekatan yang digunakan adalah metode kuantitatif. Fokus utama dari penelitian ini adalah efisiensi penurunan konsentrasi Besi (Fe) dan Tembaga (Cu) dalam air lindi menggunakan metode elektrokoagulasi berbasis elektroda alumunium dengan perlakuan variasi tegangan listrik.

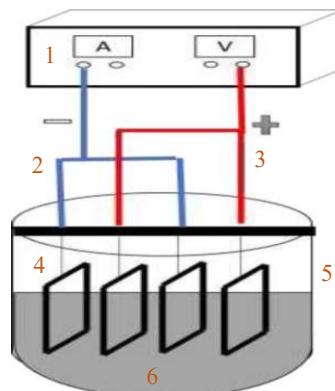
2.3. Pengambilan Sampel

Proses pengambilan sampel dilaksanakan sesuai dengan pedoman yang diatur dalam SNI 6989.59:2008, yaitu standar nasional untuk Metode Pengambilan Contoh Air Limbah. Sampel air lindi yang diambil dari inlet kolam penampungan lindi di TPA Puuwatu yaitu sebanyak 3500 mL.

2.4. Desain Elektrokoagulasi

Penelitian ini menggunakan teknik elektrokoagulasi berbasis elektroda alumunium dengan pengaturan elektroda sistem

monopolar secara pararel dan penggunaan sumber tegangan dari arus listrik searah (DC). Terdiri dari wadah berupa *beaker glass* 1000 mL dengan empat buah plat elektroda aluminium ukuran 10 cm x 5 cm dengan tebal 1 mm. Adapun desain alat untuk penelitian ini ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. Rangkaian Alat Elektrokoagulasi
(Sumber: Tambunan, 2020)

2.5. Teknik Analisis Data

2.5.1. Pengujian Sampel

Dalam penelitian ini prinsip pengujian konsentrasi logam Fe dan Cu berpedoman pada SNI 6989.4-2009 dengan alat uji menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (AAS). Pengujian yang dilakukan berupa analisis konsentrasi awal (sebelum perlakuan) dan akhir (setelah perlakuan) logam Fe dan Cu dalam air lindi pada masing-masing sampel sesuai dengan variasi tegangan listrik yang diterapkan.

2.5.2. Efisiensi

Dalam penelitian ini akan membandingkan efisiensi pengolahan air lindi dengan perlakuan variasi tegangan listrik terhadap penurunan konsentrasi logam Fe dan Cu. Efisiensi reduksi setiap parameter akan dihitung dengan membandingkan konsentrasi logam sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi. Hasilnya akan dinyatakan dalam persentase (%) menggunakan rumus efisiensi sebagai berikut:

$$E = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \right) \times 100\% \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

Keterangan:

E = Efisiensi

C1 = Konsentrasi awal logam sebelum perlakuan

C2 = Konsentrasi akhir logam setelah perlakuan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Lokasi pengambilan air lindi berada di TPA Puuwatu yang terletak di Jalan TPA Puuwatu, Kelurahan Watulondo, Kecamatan Puuwatu, Kota Kendari. Awalnya, TPA Puuwatu menggunakan sistem *Open Dumping* (penimbunan terbuka), namun sistem ini tidak dianjurkan karena berpotensi menyebabkan longsor dan pencemaran. Saat ini TPA Puuwatu

menggunakan metode *Controlled Landfill*, di mana sampah ditimbun, diratakan, dipadatkan, dan ditutup secara berkala dengan tanah untuk mengurangi pencemaran lingkungan. Limbah cair atau lindi yang dihasilkan dari sampah juga dikelola di TPA Puuwatu melalui kolam lindi dengan sistem biologis untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan.

3.2. Analisis Konsentrasi Logam Fe dan Cu

Penelitian ini memanfaatkan air lindi dari inlet kolam penampungan lindi TPA Puuwatu Kota Kendari. Lindi dipilih sebagai objek studi karena kompleksitasnya yang jauh lebih tinggi dibanding limbah cair lainnya, menjadikannya sangat sulit diolah. Setelah dilakukan pengujian sampel di laboratorium, diperoleh nilai konsentrasi Fe dan Cu pada air lindi yang dapat dilihat pada tabel berikut:

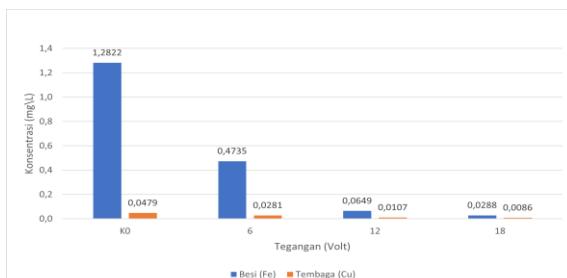
Tabel 1. Hasil Uji Konsentrasi Logam Fe dan Cu

Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu
Fe	mg/L	1,2822	5,0
Cu	mg/L	0,0479	2,0

Hasil pengujian konsentrasi logam Fe dan Cu pada air lindi yang bersumber dari kolam penampungan lindi TPA Puuwatu Kota Kendari menunjukkan kadar yang masih berada di bawah standar baku mutu yang ditetapkan oleh PerMen LH No. 5 Tahun 2014, sebagaimana tertera pada Tabel 1. Hal ini dipengaruhi oleh karakteristik sampah di TPA Puuwatu yang didominasi oleh limbah domestik dengan proporsi kandungan organik yang jauh lebih tinggi dibandingkan anorganik, serta minimnya sumber logam berat akibat ketiadaan kontribusi limbah industri yang biasanya mengandung berbagai mineral logam kompleks seperti yang ditemukan pada TPA berbasis industri.

3.3. Perlakuan Variasi Tegangan Listrik Terhadap Penurunan Konsentrasi Logam Fe dan Cu

Pada proses elektrokoagulasi, tegangan listrik berperan penting dalam mereduksi ion logam berat seperti Fe dan Cu pada air lindi. Dalam penelitian ini, tegangan listrik searah (DC) yang diuji adalah 6 volt, 12 volt dan 18 volt dengan waktu kontak selama 60 menit pada setiap perlakuan tegangan. Berdasarkan data yang diperoleh, peningkatan tegangan pada setiap perlakuan proses elektrokoagulasi menurunkan konsentrasi awal logam Fe 1,2822 mg/L, mengalami penurunan hingga 0,4735 mg/L, 0,0649 mg/L, dan 0,0288 mg/L untuk setiap tingkatan tegangan. Sementara itu, untuk logam Cu dengan konsentrasi awal 0,0479 mg/L, terjadi penurunan hingga 0,0281 mg/L, 0,0107 mg/L, dan 0,0086 mg/L seiring dengan perlakuan tegangan yang sama.



Gambar 2. Grafik Analisis Variasi Tegangan

Berdasarkan grafik pada Gambar 2, menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi logam Fe dan Cu yang signifikan seiring dengan peningkatan tegangan listrik yang dialirkan melalui elektroda, maka konsentrasi logam yang berkurang juga akan meningkat. Hal ini terjadi karena tegangan listrik yang lebih tinggi menyebabkan pelepasan ion dari elektroda menjadi lebih banyak. Ion-ion ini kemudian akan mengikat kontaminan logam berat dalam air, membentuk gumpalan (*floc*) yang akan mengendap ke dasar reaktor (Setianingrum et al., 2017).

Menurut teori yang ada (Barrera-Díaz et al., 2018), proses elektrolisis air menghasilkan hidroksida yang bereaksi dengan ion logam, membentuk kompleks hidroksi. Kompleks ini menyerap polutan dan membentuk koagulan, yang kemudian dapat dipisahkan melalui proses koagulasi dan flokulasi. Penurunan konsentrasi logam terendah tercatat pada tegangan 6 volt, dengan penurunan Fe sebesar 0,4735 mg/L dan Cu sebesar 0,0281 mg/L. Hal ini disebabkan oleh laju pelepasan ion elektroda dan pembentukan flok yang kurang optimal. Sebaliknya, penurunan terbesar terjadi pada tegangan 18 volt, dengan penurunan Fe mencapai 0,0288 mg/L dan Cu sebesar 0,0086 mg/L.

3.3.1. Pengaruh Perlakuan Variasi Tegangan Listrik Terhadap Laju Kecepatan Penyisihan

Selain efek dari peningkatan tegangan listrik akan memperbesar penyisihan konsentrasi logam, tegangan listrik juga akan mempengaruhi laju kecepatan reduksi konsentrasi logam berat pada air lindi. Dalam konteks kinetika reaksi, laju kecepatan reduksi dapat diketahui melalui persamaan pseudo orde pertama. Rumus integral kinetika pseudo orde pertama adalah sebagai berikut:

$$K = -\frac{1}{t} \ln \left(\frac{C_t}{C_0} \right) \dots \quad (2)$$

Pjimana:

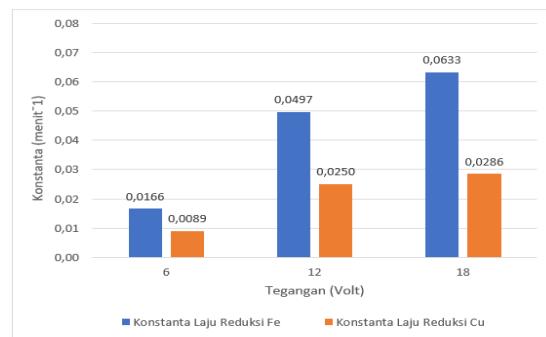
K = Konstanta laju reaksi pseudo orde pertama (menit⁻¹)

C_0 = Konsentrasi awal logam (mg/L)

C_t = Konsentrasi logam pada waktu t (mg/L)

t = Waktu perlakuan (menit)

Berdasarkan hasil perhitungan kinetika laju kecepatan penyisihan logam Fe dan Cu dengan metode elektrokoagulasi pada air lindi, diperoleh hasil konstanta pseudo orde pertama untuk setiap variasi tegangan disajikan pada gambar berikut:



Gambar 3. Grafik Kinetika Laju Kecepatan Penyisihan untuk $t:60$ menit

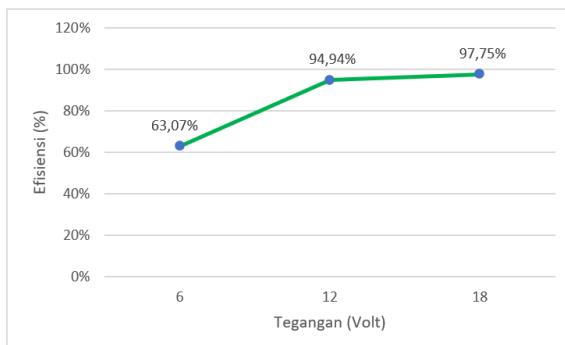
Pada Gambar 3, menunjukkan peningkatan tegangan secara langsung meningkatkan konstanta laju reduksi, yang berarti

mempercepat laju penyisihan konsentrasi logam Fe dan Cu. Hal ini disebabkan oleh peningkatan beda potensial akan berbanding lurus dengan kuat arus yang meningkat guna mempercepat produksi Al(OH)_3 sebagai koagulan untuk pembentukan flok, serta akan meningkatkan laju produksi gas H_2 untuk flotasi. Sehingga keseluruhan proses pengendapan dan penyisihan logam berlangsung lebih cepat dan efisien pada tegangan yang lebih tinggi hingga titik optimal tertentu.

3.4. Analisis Efisiensi Penurunan Konsentrasi Logam Besi (Fe)

Meskipun besi (Fe) penting bagi organisme dalam jumlah kecil, kadar yang berlebihan dapat berbahaya. Besi terlarut juga dapat muncul sebagai senyawa tersuspensi seperti Fe(OH)_3 , FeO , dan Fe_2O_3 . Konsentrasi besi yang terlalu tinggi dalam air dapat menimbulkan masalah teknis (korosi), fisik (perubahan warna, bau, rasa), dan kesehatan.

Hasil penelitian menunjukkan kenaikan efisiensi reduksi logam Fe seiring peningkatan tegangan, dengan capaian terendah pada 6 volt dengan persentase 63,07% dan tertinggi pada 18 volt yaitu 97,75%. Namun, kenaikan efisiensi dari 12 volt sebesar 94,94% menuju 18 volt tidaklah terlalu signifikan dikarenakan terjadinya kejemuhan dipermukaan elektroda oleh pembentukan flog yang menghambat produksi ion logam di anoda dalam menghasilkan Al(OH)_3 sebagai koagulan.

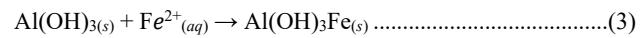


Gambar 4. Grafik Analisa Perlakuan Tegangan Terhadap Efisiensi Reduksi Logam Fe

Terlihat dari grafik pada Gambar 4, efisiensi penurunan konsentrasi besi meningkat seiring dengan peningkatan tegangan. Peningkatan tegangan pada elektroda memicu pembentukan ion hidrosil lebih banyak, yang kemudian bereaksi dengan Al^{3+} untuk menghasilkan koagulan Al(OH)_3 . Berdasarkan penelitian Pusfitasari. dkk (2018), pemberian tegangan yang lebih tinggi selama elektrokoagulasi secara langsung berkorelasi dengan percepatan proses reduksi dan penghilangan konsentrasi pencemar dalam air.

Reaksi antara ion Al^{3+} yang berasal dari anoda dengan ion OH^- dari katoda menghasilkan koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Koagulan ini lalu mengikat partikel-partikel koloid di sekitarnya dan membentuk flok yang kemudian mengendap di dasar reaktor. Selain itu, gas H_2 yang dihasilkan dari reduksi H_2O oleh katoda juga berperan mengangkat partikel-partikel kecil ke permukaan air yang sedang diolah. Koagulan berbentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ berfungsi untuk mengikat polutan berupa ion Fe^{2+} yang kemudian membentuk senyawa $\text{Al}(\text{OH})_3\text{Fe}$, sehingga hal ini dapat menurunkan konsentrasi besi yang terkandung dalam air lindi.

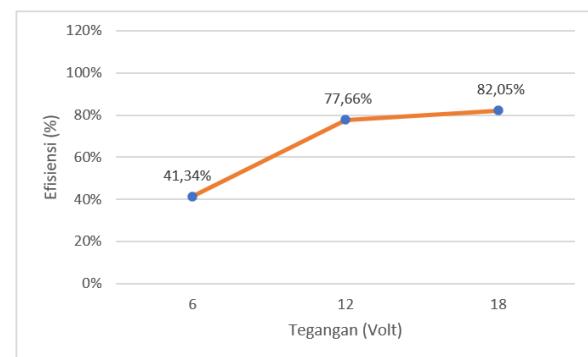
Adapun reaksi yang terjadi dalam pengikatan polutan tersebut adalah sebagai berikut:



3.5. Analisis Efisiensi Penurunan Konsentrasi Logam Tembaga (Cu)

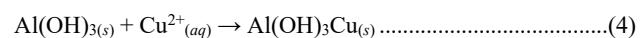
Tembaga (Cu) adalah unsur mikro esensial yang penting bagi kehidupan mikroorganisme di darat dan air, mirip dengan zat besi (Fe). Namun jika jumlahnya berlebihan, tembaga bisa menjadi racun. Pencemaran tembaga ini berasal dari proses penguraian limbah padat di tempat pembuangan sampah, seperti barang elektronik, kabel, dan pipa (Sari et al., 2017). Selain dari sampah elektronik, keberadaan tembaga dalam air lindi juga dapat dipengaruhi oleh aktivitas industri dan proses pelapukan alami di sekitar TPA.

Hasil penelitian menunjukkan korelasi positif antara tegangan listrik dengan efisiensi penyisihan logam Cu, di mana peningkatan tegangan dari 6 volt ke 12 volt selama 60 menit menaikkan efisiensi secara signifikan dari 41,34% menjadi 77,66%. Peningkatan ini terjadi akibat besarnya daya yang memacu oksidasi anoda untuk melepas ion Al^{3+} dan bereaksi dengan OH^- membentuk koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Namun, perlakuan 18 volt hanya meningkatkan efisiensi menjadi 82,05%, yang mengindikasikan bahwa proses telah memasuki batas optimal sehingga penambahan beda potensial tidak lagi memberikan efisiensi penyisihan yang signifikan.



Gambar 5. Grafik Analisa Perlakuan Tegangan Terhadap Efisiensi Reduksi Logam Cu

Seperti yang terlihat pada Gambar 5, grafik efisiensi penurunan konsentrasi logam Cu mengalami peningkatan yang cukup signifikan seiring dengan peningkatan tegangan listrik. Peningkatan tegangan listrik dalam proses elektrokoagulasi mempercepat pembentukan flok yang menempel pada katoda. Kondisi ini menunjukkan bahwa reaksi redoks pada elektroda berjalan efektif, sehingga efisiensi dalam menurunkan kadar pencemar pun meningkat (Veronika T, dkk., 2018). Koagulan berbentuk Al(OH)_3 yang berfungsi untuk mengikat polutan berupa ion Cu^{2+} yang kemudian membentuk senyawa $\text{Al(OH)}_3\text{Cu}$ sehingga hal ini dapat menurunkan konsentrasi tembaga yang terkandung dalam air lindi. Adapun reaksi yang terjadi dalam pengikatan polutan tersebut adalah sebagai berikut:



4. KESIMPULAN

Metode elektrokoagulasi dengan elektroda alumunium terbukti efektif dalam menurunkan konsentrasi logam berat besi (Fe) dan tembaga (Cu) pada air lindi, efisiensi meningkat seiring dengan peningkatan perlakuan varisai tegangan listrik. Efisiensi tertinggi tercapai pada tegangan 18 volt dengan persentase 97,75% untuk logam Fe dan 82,05% untuk logam Cu, sedangkan efisiensi terendah terjadi pada tegangan 6 volt sebesar 63,07% untuk logam Fe dan 41,34% untuk logam Cu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan dan saran konstruktif selama proses penelitian. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Qodah, Z., & Al-Shannag, M. (2017). *Heavy Metal Ions Removal from Wastewater Using Electrocoagulation Processes: A Comprehensive review. Separation Science and Technology*, 52(17), 2649–2676. <https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1373677>
- Ayatullah, A., Alchamdani, A., & Waldah, A. (2021). Analisis Kadar Hydrogen Sulfida dan Keluhan Pernapasan pada Pemulung di TPA Puuwatu Kota Kendari. *Jurnal Pendidikan Lingkungan dan Pembangunan Berkelanjutan*, 22(1), 1–15. <https://doi.org/10.21009/PLPB.221.01>
- Barrera-Díaz, C. E., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., & Sáez, C. (2018). *Electrochemical Advanced Oxidation Processes: An Overview of the Current Applications to Remove Harmful Pollutants from Water. Journal of Environmental Management*, 217, 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.078>
- Dimiati, A., & Hadi, W. (2017). Penyisihan Logam Berat Tembaga (Cu) pada Lindi TPA Benowo dengan Metode Elektrokoagulasi. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), F328–F333. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25689>
- Dura, A. (2013). *Electrocoagulation for Water Treatment: The Removal of Pollutants Using Aluminium Alloys, Stainless Steels and Iron Anodes* [Master's Thesis, Dublin Institute of Technology].
- Pusfitasari, M. D., Yogaswara, R. R., Jiwantara, D. M., Daud, D., & Anggara, I. R. (2018). Penurunan Kadungan Besi (Fe) dalam Air Tanah dengan Metode Elektrokoagulasi. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(2), 64–70.
- Said, N. I., & Hartaja, D. R. K. (2015). Pengolahan Air Lindi dengan Proses Biofilter Anaerob-aerob dan Denitrifikasi. *Jurnal Air Indonesia*, 8(1), 1–20. <https://doi.org/10.29122/jai.v8i1.2380>
- Sari, D., Indrayanti, E., & Anggoro, S. (2017). Analisis Status Pencemaran Logam Berat di Wilayah Pesisir (Studi Kasus Pembuangan Limbah Cair dan Tailing Padat/Slag Pertambangan Nikel Pomalaa). *Journal of Marine Research*, 6(1), 72–80.
- Setianingrum, A., Budi, C., & Wibowo, D. (2017). Aplikasi Elektrokoagulasi untuk Pengolahan Logam Berat dalam Air Limbah dengan Variasi Tegangan Listrik. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 24(1), 1–8. <https://doi.org/10.1234/jtl.2017.24.1.1>
- Tambunan, A. K. (2020). Studi Penurunan Kadar Besi (Fe), Tembaga (Cu), dan Timbal (Pb) pada Air Lindi dengan Metode Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Besi (Fe) (Tesis sarjana, Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Sumatera Utara).
- Veronika, T., Simanjuntak, H. T., & Tarigan, I. A. (2018). Pengaruh Tegangan Listrik terhadap Kecepatan Pembentukan Flok dan Efisiensi Penyisihan Polutan dalam Reaktor Elektrokoagulasi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 15(2), 100–115.