

Pengaruh *Current Density* Terhadap Penurunan Logam Berat Pb, Cd dan Ni Pada Proses Elektrokoagulasi

Fernando Romadhoni¹, Muhrinsyah Fatimura^{2*}, Rully Masriatini³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang
Jl. Jend. A. Yani Lorong Gotong Royong, Palembang, Sumatera Selatan 30116

*Corresponding Email: m.fatimura@univpgri-palembang.ac.id

Abstrak

Pencemaran air akibat limbah yang mengandung logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan nikel (Ni) menjadi permasalahan lingkungan yang serius karena bersifat toksik, non-biodegradable, serta dapat terakumulasi dalam rantai makanan. Salah satu metode pengolahan yang potensial untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah proses elektrokoagulasi, yang memanfaatkan pelarutan elektroda secara elektrokimia untuk menghasilkan koagulan in situ. Parameter operasi yang sangat menentukan kinerja proses ini adalah current density karena memengaruhi laju pembentukan koagulan, pembentukan gelembung gas, serta efisiensi penghilangan kontaminan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi current density terhadap efisiensi penurunan logam berat Pb, Cd, dan Ni pada limbah artifisial menggunakan elektroda aluminium dalam reaktor batch. Variasi current density yang digunakan yaitu 13, 26, dan 40 mA/cm² dengan kondisi operasi dijaga konstan pada pH awal 9 dan waktu proses 60 menit. Konsentrasi awal masing-masing logam sebesar 20 mg/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan current density meningkatkan efisiensi penurunan logam berat secara signifikan. Current density optimum 13 mA/cm² menunjukkan kinerja terbaik dalam penelitian ini karena menghasilkan efisiensi penurunan logam berat yang paling tinggi dibandingkan variasi arus lainnya, yaitu rata-rata sebesar >97%, di mana dalam kondisi tunggal penurunan Pb, Cd, dan Ni berturut-turut adalah sebesar 93,20%, 99,85%, dan 99,39%, sedangkan dalam kondisi simultan Pb, Cd, dan Ni berturut-turut adalah sebesar 94,71%, 99,65%, dan 98,81%.

Kata kunci: current density, elektrokoagulasi, limbah artifisial, logam berat.

Abstract

Water pollution from wastewater containing heavy metals, such as lead (Pb), cadmium (Cd), and nickel (Ni), is a serious environmental concern because these contaminants are toxic, non-biodegradable, and capable of accumulating in the food chain. Electrocoagulation is a promising treatment method that uses the electrochemical dissolution of electrodes to generate coagulants in situ. Current density is a critical operating parameter because it influences coagulant generation, gas-bubble formation, and contaminant removal efficiency. This study investigated the effect of current density on the removal efficiencies of Pb, Cd, and Ni from synthetic wastewater using aluminium electrodes in a batch reactor. Current densities of 13, 26, and 40 mA/cm² were tested at an initial pH of 9 and a treatment time of 60 minutes. The initial concentration of each metal was 20 mg/L. The results demonstrated that current density significantly affected heavy-metal removal. Among the tested conditions, 13 mA/cm² provided the best performance, achieving an average removal efficiency above 97%. Under single-metal conditions, the removal efficiencies of Pb, Cd, and Ni were 93.20%, 99.85%, and 99.39%, respectively. Under simultaneous-metal conditions, the corresponding efficiencies were 94.71%, 99.65%, and 98.81%. These findings confirm the effectiveness of aluminium-electrode electrocoagulation for treating heavy-metal-contaminated wastewater.

Keywords: current density; electrocoagulation; synthetic wastewater; heavy metals.

1. PENDAHULUAN

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat vital bagi kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, kualitas air banyak mengalami penurunan akibat meningkatnya aktivitas industri dan domestik yang menghasilkan berbagai jenis limbah, termasuk limbah yang mengandung logam berat. Logam berat merupakan unsur logam dengan massa

jenis tinggi yang bersifat toksik meskipun dalam konsentrasi rendah. Contoh logam berat yang umum mencemari lingkungan antara lain timbal (Pb), kadmium (Cd), dan nikel (Ni). Logam-logam tersebut tidak dapat terdegradasi secara alami dan cenderung terakumulasi dalam rantai makanan sehingga menimbulkan dampak toksik bagi manusia dan biota perairan (Hawaas et al., 2023).

Pengelolaan limbah yang mengandung Pb, Cd, dan Ni menuntut teknologi pengolahan yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan. Berbagai metode fisiko-kimia dan biologis telah dikembangkan (presipitasi kimia, adsorpsi, pertukaran ion, filtrasi membran, bioremediasi), namun masing-masing memiliki keterbatasan, misalnya biaya operasi tinggi, produksi lumpur sekunder yang banyak, atau sensitivitas terhadap kondisi air baku, sehingga dicari alternatif yang lebih adaptif untuk berbagai kondisi konsentrasi dan komposisi air limbah (Hawaas et al., 2023).

Limbah yang mengandung logam berat umumnya berasal dari kegiatan industri seperti elektroplating, peleburan logam, pabrik baterai, industri cat, serta proses kimia lain yang menggunakan atau menghasilkan ion logam dalam limbah cair. Keberadaan logam berat dalam air limbah menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Paparan timbal (Pb) dapat menyebabkan gangguan sistem saraf dan penurunan kecerdasan, kadmium (Cd) dapat menimbulkan kerusakan ginjal dan tulang, sedangkan nikel (Ni) berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan serta bersifat karsinogenik. Oleh karena itu, penanganan limbah logam berat menjadi hal yang sangat penting untuk mencegah pencemaran dan melindungi ekosistem perairan (Mehri & Fallah, 2021).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan logam berat dari air limbah, seperti presipitasi kimia, adsorpsi, pertukaran ion, filtrasi membran, dan bioremediasi. Namun, metode-metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan, seperti biaya operasional yang tinggi, produksi lumpur sekunder yang berlebihan, serta sensitivitas terhadap variasi pH dan komposisi air limbah. Elektrokogulasi muncul sebagai salah satu teknologi elektrokimia yang menjanjikan untuk pengolahan air limbah logam berat. Prinsip kerjanya melibatkan pelarutan terkontrol elektroda (umumnya aluminium atau besi) menghasilkan spesies koagulan in situ ($\text{Al}(\text{OH})_3$ atau $\text{Fe}(\text{OH})_3$) yang mengadsorpsi atau mengikat ion logam, diikuti oleh pemisahan melalui pengendapan atau flotasi yang dibantu gelembung gas hidrogen/oksigen dari reaksi elektrolisis. Keunggulannya meliputi konsumsi bahan kimia eksternal yang rendah, operasi pada kondisi pH yang tidak ekstrem, serta efisiensi yang baik pada rentang konsentrasi tertentu (Hawaas et al., 2023).

Salah satu parameter operasi EC yang paling menentukan kinerja dan biaya proses adalah *current density* (kepadatan arus listrik yang diterapkan, biasanya dinyatakan mA/cm^2 atau A/m^2). *Current density* mengontrol laju pelarutan elektroda (jumlah koagulan yang terbentuk per satuan luas elektroda dan waktu), laju pembentukan gelembung gas (mempengaruhi mekanisme flotasi vs sedimentasi), serta kinetika pembentukan flok hidroksi-logam yang berperan dalam penghilangan kontaminan. Oleh karena itu, variasi *current density* dapat berakibat langsung pada efisiensi penghilangan Pb, Cd, dan Ni, konsumsi energi, serta massa elektroda yang terkorosi (biaya operasional dan dampak lumpur) (Khan et al., 2023).

Literatur eksperimental menunjukkan tren umum bahwa peningkatan *current density* biasanya meningkatkan laju dan persentase penghilangan logam berat hingga titik tertentu; namun, kenaikan arus juga meningkatkan konsumsi energi dan laju korosi elektroda sehingga menimbulkan trade-off antara efisiensi penghilangan dan biaya operasi. Beberapa studi melaporkan efisiensi >90% untuk Pb, Cd atau Ni pada *current density* dalam rentang tertentu (contoh: 2–30 mA/cm^2 atau ekuivalen 20–300 A/m^2 pada kondisi spesifik), tetapi kondisi optimum sangat bergantung pada jenis elektroda (Al atau Fe), pH awal, waktu kontak, jarak elektroda, serta komposisi matriks air (keberadaan ion pesaing, konduktivitas) (Mustapha, 2025).

Mekanisme spesifik penghilangan tiap logam juga memengaruhi respons terhadap densitas arus. Misalnya, penghilangan Cd dan Ni sering kali melibatkan adsorpsi pada partikel hidroksida besi/aluminium dan pertukaran ion (dengan kontribusi kinetika sorpsi yang bisa mengikuti model orde satu pertama atau kedua tergantung pada kondisi), sedangkan Pb, selain teradsorpsi, dapat membentuk kompleks hidroksida yang cepat mengendap pada kondisi pH tertentu. Oleh karena itu, *current density* yang memengaruhi jumlah dan jenis hidroksida yang terbentuk akan memodulasi efisiensi penghilangan antarunsur logam tersebut (Mehri & Fallah, 2021).

Di sisi praktik, optimasi *current density* perlu mempertimbangkan tujuan pengolahan (mis. pengurangan konsentrasi sampai ambang regulasi atau pemulihan logam), biaya energi dan elektroda, serta kualitas lumpur hasil pengolahan. Beberapa penelitian menyarankan

rentang *current density* relatif rendah untuk efisiensi energi (mis. beberapa mA/cm²) pada limbah dengan konduktivitas tinggi, sedangkan arus lebih tinggi dibutuhkan untuk air yang bersifat sulit (konsentrasi logam tinggi atau matriks kompleks) untuk mencapai penghilangan yang layak dalam waktu operasi terbatas (Gök & Can, 2025).

Walaupun banyak studi telah membuktikan bahwa *current density* adalah parameter kunci, terdapat variasi hasil dan rekomendasi operasional yang signifikan antarpencapaian akibat perbedaan desain reaktor, material elektroda, kondisi pH, konsentrasi awal logam, dan metode analisis. Hal ini menegaskan kebutuhan penelitian terstruktur yang mengevaluasi pengaruh variasi *current density* secara sistematis terhadap penurunan Pb, Cd, dan Ni pada kondisi percobaan yang terkontrol dan dikaitkan dengan parameter biaya (energi dan konsumsi elektroda) serta karakteristik lumpur.

2. METODOLOGI PENELITIAN

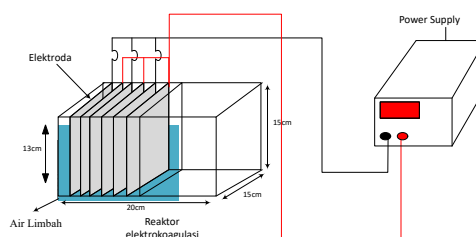
2.1 Desain Rangkaian Alat

Reaktor elektrokoagulasi yang digunakan pada penelitian ini dibuat dari bahan kaca transparan. Reaktor memiliki dimensi 20 cm × 15 cm × 15 cm. Bagian dalam reaktor berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses elektrokoagulasi. Di dalam reaktor dipasang beberapa pelat elektroda yang disusun secara vertikal dan sejajar satu sama lain. Elektroda-elektroda ini diletakkan berbaris dengan jarak yang seragam, membentuk rangkaian pelat berlapis seperti yang terlihat pada ilustrasi. Setiap elektroda dihubungkan ke rangkaian kabel yang keluar dari bagian atas reaktor. Kabel-kabel tersebut tersambung ke sebuah power supply DC, yang pada gambar ditampilkan dengan indikator voltmeter (V) dan ammeter (A) di bagian depan. Kutub positif dan negatif dari power supply dihubungkan ke elektroda melalui kabel berwarna merah dan hitam.

2.2 Percobaan Penelitian

Limbah artifisial dibuat menggunakan senyawa Pb(NO₃)₂, Cd(NO₃)₂·4H₂O, dan Ni(NO₃)₂·6H₂O dengan konsentrasi awal masing-masing 20 mg/L pada volume larutan sebanyak 2 L. Larutan kemudian dihomogenkan menggunakan akuades dan pH diatur menjadi 9. Variasi *current density* yang diterapkan yaitu 13,

26, dan 40 mA/cm². Reaktor elektrokoagulasi menggunakan dua elektroda aluminium yang dipasang sejajar dengan jarak ±2 cm dan dihubungkan dengan sumber arus searah (DC power supply) sebesar 2 A, 4 A, dan 6 A sesuai variasi *current density*. Proses elektrokoagulasi dilakukan selama 60 menit pada suhu ruang (±27°C), kemudian larutan didiamkan selama 30–60 menit hingga flok mengendap. Sampel supernatan selanjutnya dianalisis untuk menentukan konsentrasi Pb, Cd, Ni, sedangkan konsumsi energi dan perubahan massa elektroda dicatat selama proses berlangsung.



Gambar 1. Rangkaian Alat

Data hasil percobaan selanjutnya dianalisis untuk mengetahui kinerja proses elektrokoagulasi dalam menurunkan konsentrasi logam berat serta kebutuhan energi selama proses berlangsung. Efisiensi penurunan logam berat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$n = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

di mana η adalah efisiensi penurunan (%), C_0 adalah konsentrasi awal (mg/L), dan C_t adalah konsentrasi akhir (mg/L).

Selain itu, konsumsi energi listrik selama proses elektrokoagulasi dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$E = \frac{V \times I \times t}{v} \quad (2)$$

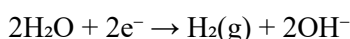
di mana E adalah konsumsi energi (kWh/m³), V adalah tegangan (Volt), I adalah arus (Ampere), t adalah waktu proses (jam), dan v adalah volume larutan (m³).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

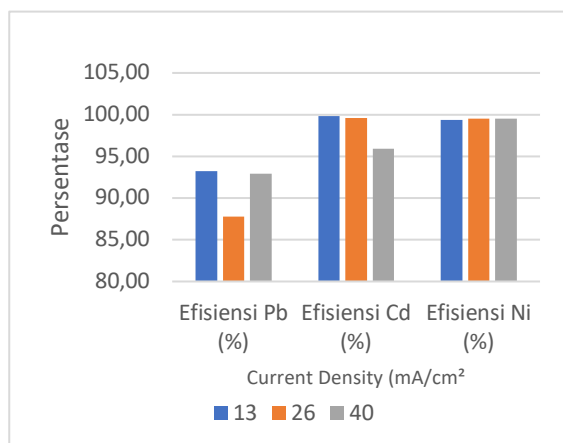
3.1. Current Density Terhadap Pereduksi Logam Berat Keadaan Tunggal

Gambar 2 menunjukkan bahwa setiap logam memiliki respons yang berbeda terhadap variasi *current density* 13 mA/cm², 26 mA/cm² dan 40 mA/cm². Pada *current density* 13

mA/cm^2 , konsentrasi akhir Pb sebesar 1,3602 mg/L, penurunan sebesar 93,20% dari konsentrasi awal 20 mg/L. Namun, terlihat di Gambar 2, pada *current density* 26 mA/cm^2 terjadi kenaikan konsentrasi Pb menjadi 2,4427 mg/L yaitu penurunan sebesar 87,79%. Kenaikan pada hasil analisis ini mengindikasikan bahwa arus menengah memicu pembentukan gelembung gas yang lebih intens, menyebabkan flok mudah terangkat ke permukaan atau mengalami kerusakan (*floc breakup*) sebelum mengadsorpsi Pb secara sempurna. Produksi gelembung gas berasal dari reaksi reduksi air:



Hal ini dijelaskan oleh Khan et al., (2023) dalam *Sustainability*, yang menegaskan bahwa arus menengah sering menciptakan ketidakstabilan karena peningkatan turbulensi dalam reaktor. Selanjutnya, konsentrasi Pb kembali menurun pada 40 mA/cm^2 menjadi 1,4135 mg/L yaitu penurunan sebesar 92,93%.



Gambar 2 menunjukkan bahwa setiap logam memiliki respons yang berbeda terhadap variasi *current density* 13 mA/cm^2 , 26 mA/cm^2 dan 40 mA/cm^2 .

Hasil ini menunjukkan bahwa Cd sangat sensitif terhadap kondisi pH dan pembentukan hidroksida. Pada arus rendah, pH lokal relatif stabil sehingga Cd^{2+} mudah bereaksi dengan ion hidroksida membentuk endapan $\text{Cd}(\text{OH})_2$ yang tidak larut ($\text{Cd}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2(\text{s})$). Hasil ini sejalan dengan penelitian Castro et al. (2023) yang melaporkan bahwa Cd mencapai removal tertinggi pada kondisi arus dan pH yang stabil. Namun, pada *current density* 26 mA/cm^2 , konsentrasi Cd meningkat menjadi 0,0781 mg/L dengan efisiensi penurunan 99,61%. Penurunan

kinerja ini diduga akibat perubahan spesiasi Cd karena peningkatan pH lokal yang lebih basa, sehingga sebagian Cd berubah menjadi bentuk $\text{Cd}(\text{OH})^+$ yang lebih larut. Temuan ini sesuai dengan Aljaberi & Hawaas, (2023) yang menyatakan bahwa Cd merupakan logam yang paling sensitif terhadap fluktuasi pH dan kondisi lokal reaktor.

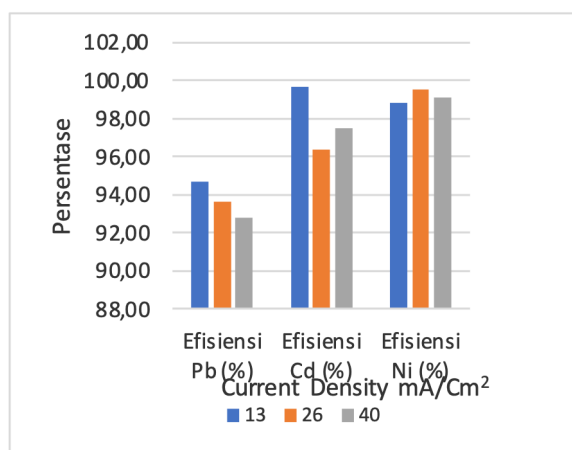
Pada logam Ni, hasil penelitian menunjukkan perilaku yang relatif stabil dibandingkan dengan Pb dan Cd. Pada *current density* 13 mA/cm^2 , konsentrasi Ni sebesar 0,1218 mg/L dengan efisiensi penurunan 99,39%, kemudian menurun menjadi 0,0980 mg/L (99,51%) pada 26 mA/cm^2 , dan tetap stabil pada 0,0989 mg/L (99,50%) pada 40 mA/cm^2 . Kondisi ini menunjukkan bahwa Ni memiliki rentang pH optimum yang lebih luas dengan spesies $\text{Ni}(\text{OH})_2$ yang relatif stabil pada kondisi basa ($\text{Ni}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2(\text{s})$). Stabilitas penurunan Ni pada berbagai *current density* tersebut konsisten dengan kajian eksperimental Bakry et al. (2024), yang melaporkan bahwa Ni menunjukkan respons penghilangan yang minim fluktuasi pada rentang arus operasi menengah. Ketahanan $\text{Ni}(\text{OH})_2$ terhadap perubahan pH juga menyebabkan Ni tidak mudah kembali larut sehingga proses elektrokoagulasi berlangsung lebih stabil.

3.2. *Current Density* Terhadap Pereduksi Logam Berat Simultan

Pada Gambar 3, hasil uji simultan pada *current density* 13 mA/cm^2 menunjukkan efisiensi penghilangan logam berat yang sangat tinggi untuk ketiga unsur yang diuji. Dari konsentrasi awal 20 mg/L, diperoleh konsentrasi akhir masing-masing: Pb adalah 1,0586 mg/L (efisiensi 94,71%), Cd adalah 0,0701 mg/L (efisiensi 99,65%), dan Ni adalah 0,2370 mg/L (efisiensi 98,82%). Nilai-nilai ini memperlihatkan bahwa pada densitas arus rendah (*current density* 13 mA/cm^2) elektrokoagulasi mampu menyediakan koagulan yang cukup untuk mengendapkan/menangkap ion logam secara efektif sehingga menghasilkan pengurangan konsentrasi yang signifikan (Hawaas et al., 2023).

Pada Gambar 3, hasil uji simultan pada *current density* 26 mA/cm^2 menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi (EC) masih memberikan efisiensi penghilangan logam berat yang tinggi untuk ketiga unsur (Pb, Cd, Ni). Dari konsentrasi awal 20 mg/L diperoleh konsentrasi akhir

masing-masing: Pb sebesar 1,2715 mg/L (efisiensi 93,64%), Cd 0,7232 mg/L (efisiensi 96,38%), dan Ni 0,0980 mg/L (efisiensi 99,51%). Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa pada densitas arus menengah (*current density* 26 mA/cm²) EC masih mampu menyediakan koagulan yang cukup untuk mengendapkan atau mengadsorpsi ion logam secara simultan sehingga terjadi penurunan konsentrasi yang signifikan.



Gambar 3. Grafik pengaruh *Current Density* terhadap pereduksi logam berat dalam keadaan simultan

Pada Gambar 3 hasil uji simultan pada *current density* 40 mA/cm² menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi masih mampu menurunkan konsentrasi logam berat secara signifikan pada ketiga unsur yang diuji. Dari konsentrasi awal 20 mg/L, diperoleh konsentrasi akhir masing-masing: Pb sebesar 1,4490 mg/L (efisiensi 92,76%), Cd sebesar 0,4985 mg/L (efisiensi 97,51%), dan Ni sebesar 0,1730 mg/L (efisiensi 99,13%). Nilai-nilai ini memperlihatkan bahwa pada densitas arus tinggi (*current density* 40 mA/cm²) elektrokoagulasi masih dapat menghasilkan jumlah koagulan yang besar sehingga mampu mengikat ion logam secara efektif, meskipun kondisi hidrodinamika menjadi lebih intens akibat produksi gelembung gas yang meningkat (Muhibbu-din et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi *current density* (*current density* 13 mA/cm², *current density* 26 mA/cm², dan *current density* 40 mA/cm²) terhadap proses

elektrokoagulasi menggunakan elektroda aluminium dalam menurunkan kadar logam berat Pb, Cd, Ni, serta COD pada limbah artifisial, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi *current density* memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi penurunan logam berat (Pb, Cd, dan Ni) serta COD. Setiap peningkatan arus menyebabkan meningkatnya jumlah koagulan Al(OH)₃ yang terbentuk, sehingga proses adsorpsi dan *sweep flocculation* menjadi lebih efektif. Namun demikian, respon masing-masing logam berbeda pada tiap kondisi arus, sehingga efektivitas total proses tidak selalu meningkat secara linear dengan bertambahnya *current density*.
2. Nilai *current density* sebesar 13 mA/cm² menunjukkan kinerja terbaik dalam penelitian ini karena menghasilkan efisiensi penurunan logam berat yang paling tinggi dibandingkan dengan variasi arus lainnya, yaitu rata-rata sebesar >97%. Pada kondisi ini pembentukan flok berlangsung lebih intensif sehingga proses pengikatan dan pengendapan logam berat menjadi lebih optimal. Ini merupakan kondisi paling optimal untuk mencapai performa penyisihan logam tertinggi secara keseluruhan pada pH 9 dan waktu elektrokoagulasi 60 menit.
3. Variasi *current density* berbanding lurus dengan konsumsi energi dan laju pelarutan elektroda aluminium. Semakin tinggi arus yang diberikan, semakin besar massa elektroda yang terkorosi dan semakin tinggi energi yang dibutuhkan. Pada *current density* 40 mA/cm², laju pelarutan elektroda tercatat paling besar, sedangkan pada *current density* 13 mA/cm² nilai korosi elektroda lebih kecil. Dengan demikian, pemilihan *current density* harus mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi penurunan logam dan kebutuhan energi serta biaya material elektroda.

DAFTAR PUSTAKA

- Aljaberi, F. Y., & Hawaas, Z. A. (2023). Methodsx Electrocoagulation Removal Of Pb , Cd , And Cu Ions From Wastewater Using A New Configuration Of Electrodes. *Methodsx*, 10(September 2022), 101951. <https://doi.org/10.1016/J.Mex.2022.101951>
- Bakry, S. A., Matta, M. E., Noureldin, A. M., & Zaher, K. (2024). Performance Evaluation Of Electrocoagulation Process For Removal Of Heavy Metals From Wastewater Using Aluminum Electrodes Under Variable Operating Conditions. *Desalination And Water Treatment*, 318(May), 100396. <https://doi.org/10.1016/J.Dwt.2024.100396>
- Castro, J. E., Principe, D. Y., Quiñones, C. E., Johnny, E., Siccha, F. P., Cruz, J. A., & Moreno, W. (2023). Simultaneous Removal Of Cadmium And Copper In Aqueous Solution By Electrocoagulation : Influence Of Ph And Electric Current Density. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 103(September), 925–930. <https://doi.org/10.3303/CET23103155>
- Gök, Z., & Can, H. (2025). Preliminary Laboratory Assessment Of The Removal Of Heavy Metals From Metal Plating Wastewater By Electrocoagulation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(6), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S11270-025-07979-Z>
- Hawaas, Z. A., Aljaberi, F. Y., Rushdi, S., & Hatam, D. F. (2023a). Removal Of Heavy Metals Using Electrocoagulation. *AIP Conference Proceedings*, 040005.
- Khan, S. U., Khalid, M., Hashim, K., Jamadi, M. H., Mousazadeh, M., Basheer, F., & Farooqi, I. H. (2023). *Efficacy Of Electrocoagulation Treatment For The Abatement Of Heavy Metals : An Overview Of Critical Processing Factors , Kinetic Models And Cost Analysis*.
- Mehri, M., & Fallah, N. (2021). Mechanisms Of Heavy Metal And Oil Removal From Synthetic Saline Oil Field Produced Water By Electrocoagulation. *Npj Clean Water*. <https://doi.org/10.1038/S41545-021-00135-0>
- Muhibbu-Din, I. E., Jimoh, H. O., Kehinde, D. P., & I, F. A. (2023). Purification Of Heavy Metals Contaminated Groundwater By Electro-Coagulation Process Using Graphite Electrodes. *Journal Of Advances In Environmental Health Research*, 11(2), 82–88. <https://doi.org/10.34172/Jaehr.2023.10>
- Mustapha, B. (2025). *Asian Journal Of Green Chemistry Original Research Article Evaluation Of Electrocoagulation Effectiveness For Lead Removal In Lead Refining Effluent*. 9, 775–793. <https://doi.org/10.48309/AJGC.2025.525543.1746>