

Pengaruh Waktu Reaksi Terhadap Efisiensi Penghilangan Logam Berat Pb, Cd, dan Ni Pada Proses Elektrokoagulasi

Nurmetania [□], Muhammad Bakrie, dan Muhrinsyah Fatimura

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang Jl. Jend. A. Yani Lorong Gotong Royong, 9/10 Ulu, Kec. Seberang Ulu II, Kota Palembang, Sumatera Selatan 30116, Indonesia

Info Artikel

Diterima: 09-04-2026

Disetujui: 09-06-2026

Dipublikasikan: 03-08-2026

Keywords:

*elektrokoagulasi
logam berat
waktu reaksi
air limbah artifisial
single komponen*

Abstrak

Pencemaran air merupakan salah satu permasalahan lingkungan utama yang disebabkan oleh aktivitas industri, terutama akibat keberadaan logam berat yang bersifat toksik, persisten, dan sulit terdegradasi. Logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan nikel (Ni) termasuk pencemar prioritas karena berpotensi terakumulasi dalam lingkungan perairan dan membahayakan kesehatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh waktu reaksi terhadap kinerja proses elektrokoagulasi dalam menghilangkan logam berat pada air limbah artifisial sistem single komponen. Proses elektrokoagulasi dilakukan secara batch menggunakan elektroda aluminium dengan variasi waktu reaksi 15, 30, 45, 60, dan 75 menit pada kondisi operasi tetap. Parameter yang dianalisis meliputi konsentrasi akhir logam berat, efisiensi penghilangan, perubahan pH, dan konsumsi energi listrik. Konsentrasi logam berat dianalisis menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu reaksi berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penghilangan logam berat hingga mencapai kondisi optimum pada waktu reaksi 60 menit. Efisiensi penghilangan pada sistem single komponen mencapai lebih dari 90% untuk Pb serta mendekati 100% untuk Cd dan Ni. Hasil ini menunjukkan bahwa elektrokoagulasi berpotensi sebagai teknologi pengolahan air limbah yang efektif dan aplikatif.

Abstract

Water pollution is one of the major environmental problems caused by industrial activities, particularly due to the presence of toxic, persistent, and non-biodegradable heavy metals. Heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), and nickel (Ni) are classified as priority pollutants because of their potential accumulation in aquatic environments and harmful impacts on human health. This study aims to evaluate the effect of reaction time on the performance of the electrocoagulation process in reducing heavy metal concentrations in artificial wastewater under a single-component system. The electrocoagulation process was conducted in batch mode using aluminum electrodes with reaction time variations of 15, 30, 45, 60, and 75 minutes under constant operating conditions. The analyzed parameters included final heavy metal concentration, removal efficiency, pH variation, and electrical energy consumption. Heavy metal concentrations were measured using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results showed that increasing reaction time significantly enhanced heavy metal removal efficiency, reaching optimum conditions at a reaction time of 60 minutes. Removal efficiencies in the single-component system exceeded 90% for Pb and approached 100% for Cd and Ni. These findings indicate that electrocoagulation is a promising and effective technology for wastewater treatment from both environmental and chemical engineering perspectives.

Pendahuluan

Pencemaran air merupakan kondisi ketika berbagai zat berbahaya seperti logam berat, pestisida, serta limbah industri dan domestik masuk ke dalam sumber maupun badan air. Masuknya bahan pencemar tersebut menyebabkan penurunan kualitas air yang berdampak pada terganggunya fungsi ekosistem perairan, seperti sungai, danau, dan sumber air tanah. Selain merusak keseimbangan ekologis, pencemaran air juga menimbulkan ancaman serius bagi kesehatan manusia, karena banyak senyawa kimia beracun yang dapat terakumulasi dalam rantai makanan (Logam *et al.* 2024).

Dalam industri kimia modern, pengolahan limbah merupakan aspek penting yang wajib diterapkan dalam setiap tahapan proses produksi, terutama melalui pembangunan dan pengoperasian instalasi pengolahan air limbah (IPAL) guna meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan menjaga keberlanjutan industri (Fatimura *et al.* 2025). Berbagai metode pengolahan limbah telah dikembangkan untuk mengurangi konsentrasi polutan dalam air limbah, antara lain flokulasi, sedimentasi, adsorpsi, dan filtrasi membran. salah satu teknologi pengolahan air limbah yang banyak dikembangkan untuk menghilangkan kandungan logam berat adalah elektrokoagulasi (EC). Metode ini memanfaatkan arus listrik untuk melarutkan ion logam dari elektroda, yang kemudian membentuk flok atau gumpalan partikel yang mampu mengikat dan mengendapkan logam berat dari air limbah.

Metode elektrokoagulasi adalah proses pemisahan yang melibatkan pengendapan dan penggabungan partikel-partikel halus dalam air dengan memanfaatkan energi listrik. Metode ini merupakan kombinasi dari proses koagulasi, flokulasi, dan elektrokimia. Keunggulan elektrokoagulasi terletak pada efektivitasnya yang lebih tinggi dan teknologi yang lebih modern dibandingkan metode konvensional (Masthura, Husnah, and Panggabean 2022). elektrokoagulasi semakin banyak diteliti sebagai alternatif efektif dalam pengolahan limbah industri yang mengandung logam berat seperti Pb, Cd, dan Ni. Efisiensi proses elektrokoagulasi sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi seperti pH, kerapatan arus, jarak antar elektroda, konsentrasi awal logam, berat elektroda yang larut, serta waktu reaksi. Parameter terakhir ini sangat penting karena menentukan jumlah koagulan yang terbentuk, stabilitas flok, dan lamanya kontak antara ion koagulan dengan polutan logam.

Penelitian lain telah menunjukkan bahwa waktu operasi elektrokoagulasi merupakan salah satu parameter kritis: pada durasi 10 menit awal, tingkat penghilangan logam berat cenderung tinggi, namun setelah periode optimum tertentu, peningkatan waktu tidak selalu meningkatkan efisiensi dan bahkan dapat menurun akibat pembentukan lapisan pasif pada permukaan elektroda atau pelepasan ion kembali ke dalam larutan (Gök and Can 2025). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa peningkatan waktu reaksi dapat meningkatkan efisiensi penghilangan logam berat secara signifikan (Aljaberi and Hawaas 2023). melaporkan bahwa pada waktu reaksi 60 menit dan pH 10, proses elektrokoagulasi mampu menghilangkan Pb sebesar 99,73% dan Cd sebesar 98,54% dengan konsumsi energi dan elektroda yang rendah. Metode elektrokoagulasi terbukti efektif dalam menghilangkan beragam kontaminan seperti logam berat, senyawa organik, dan mikroorganisme patogen. Penggunaan elektroda aluminium dalam proses ini dilaporkan mampu menghasilkan efisiensi penyisihan inhibitor hidrat kinetik dalam air limbah hingga mencapai 95% (Fatimura *et al.* 2025).

Berbagai penelitian melaporkan bahwa kinerja elektrokoagulasi dipengaruhi oleh waktu kontak dan jenis elektroda, di mana penggunaan elektroda aluminium-aluminium (Al-Al) dengan waktu kontak yang lebih lama mampu meningkatkan efisiensi penyisihan besi (Fe) hingga 100% dan mangan (Mn) hingga 96% pada kondisi optimum 180 menit (Putri *et al.* 2023). Selain waktu reaksi, nilai pH larutan memengaruhi pembentukan flok hidroksida logam serta kestabilan hasil pengendapan. Pada kondisi basa (pH 8–10), penghilangan logam berat lebih efisien karena terbentuknya kompleks $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang memiliki kemampuan adsorptif tinggi. Parameter lain seperti berat elektroda dan konsentrasi ion pendukung (NaCl) juga berperan penting dalam menentukan nilai COD dan efisiensi pengolahan limbah (Aljaberi and Hawaas 2023).

Selain elektrokoagulasi, beberapa penelitian juga memperlihatkan kombinasi proses seperti elektrokoagulasi diikuti adsorpsi menggunakan karbon aktif dapat meningkatkan penurunan logam Pb(II) secara signifikan dalam limbah cair karena adsorben aktif membantu mengikat logam yang terlepas dari elektroda (Setiawan, Ramadani, and Hanastasia 2020). Dalam konteks pengolahan limbah industri, parameter lain seperti Chemical Oxygen Demand (COD) dan konsumsi energi juga menjadi bagian penting dalam evaluasi kinerja sistem. Proses elektrokoagulasi telah terbukti memiliki kemampuan untuk menurunkan COD limbah secara efektif karena flok-flok koagulan mampu mengikat bahan organik serta partikel terlarut lainnya, sehingga berkontribusi pada perbaikan kualitas air yang diolah. (Wastewater, Using, and Methods 2019).

Berdasarkan latar belakang di atas tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian yang akan dilakukan adalah untuk mengetahui pengaruh variasi waktu reaksi terhadap efisiensi penghilangan logam berat Pb, Cd, dan Ni pada proses elektrokoagulasi, serta menentukan waktu reaksi optimum yang menghasilkan efisiensi tertinggi dengan konsumsi energi yang efisien.

Metode

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi reaktor elektrokoagulasi skala laboratorium yang terbuat dari bahan akrilik dengan dimensi 20 cm × 16,5 cm × 15 cm, ketebalan dinding 7 mm, dan kapasitas operasi 2 liter. Reaktor dilengkapi dengan elektroda aluminium berbentuk plat berukuran 15 cm × 12 cm dengan ketebalan 1 mm yang dipasang sejajar pada jarak antar elektroda 1,5 cm dan tinggi elektroda terendam 10 cm. Sumber arus listrik yang digunakan berupa power supply DC dengan rentang tegangan 0–30 Volt dan arus maksimum 0–5 Ampere, yang selama penelitian dioperasikan pada tegangan 20 Volt dan arus 2 Ampere.

Peralatan pendukung lainnya terdiri atas 2 buah gelas ukur kaca borosilikat dengan kapasitas masing-masing 1000 mL dan ketelitian ±1 mL, gelas beaker berbahan borosilikat berkapasitas 500 mL dan 2000 mL, serta 2 buah gelas erlenmeyer dengan kapasitas masing-masing 250 mL. Penambahan larutan dilakukan menggunakan pipet tetes kaca, sedangkan pengambilan dan pengadukan bahan kimia padat menggunakan spatula stainless steel. Pengukuran derajat keasaman dilakukan menggunakan pH meter digital dengan rentang pengukuran pH 0–14 dan akurasi ±0,01. Waktu proses elektrokoagulasi diukur menggunakan stopwatch digital dengan ketelitian 0,01 detik.

Sampel hasil penelitian disimpan dalam jerigen plastik HDPE berkapasitas 1 liter. Penimbangan bahan dan elektroda dilakukan menggunakan neraca analitik digital dengan kapasitas 220 gram dan ketelitian ±0,0001 gram. Proses pengeringan elektroda dilakukan menggunakan oven laboratorium dengan rentang suhu 30–250°C. Untuk mendukung keselamatan kerja digunakan sarung tangan nitril tahan bahan kimia. Analisis konsentrasi logam Pb, Cd, dan Ni dilakukan menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) dengan panjang gelombang masing-masing 283,3 nm untuk Pb, 228,8 nm untuk Cd, dan 232,0 nm untuk Ni.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi timbal nitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) dengan kemurnian ≥99% pro analysis (PA) sebagai sumber ion Pb^{2+} , kadmium nitrat tetrahidrat ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) dengan kemurnian ≥98% pro analysis (PA) sebagai sumber ion Cd^{2+} , serta nikel nitrat heksahidrat ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dengan kemurnian ≥98% pro analysis (PA) sebagai sumber ion Ni^{2+} . Pelarut yang digunakan berupa air akuades sebanyak 2 liter dengan konduktivitas rendah untuk pembuatan larutan artifisial logam berat. Pengaturan pH larutan dilakukan menggunakan larutan natrium hidroksida (NaOH) 0,1 M untuk menaikkan pH dan larutan asam klorida (HCl) 0,1 M untuk menurunkan pH.

Pada tahap preparasi sampel analisis AAS digunakan asam nitrat (HNO_3) pro analysis dengan konsentrasi 65%. Analisis COD dilakukan menggunakan kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) sebagai larutan oksidator, asam sulfat pekat (H_2SO_4) dengan konsentrasi 95–98%, serta perak sulfat (Ag_2SO_4) sebagai katalis, yang seluruhnya berkualitas pro analysis (PA). Sebelum analisis logam berat menggunakan AAS, sampel disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 42 dengan ukuran pori ±2,5 µm. Selain itu, digunakan larutan standar logam 1000 mg/L sebagai larutan induk dalam pembuatan kurva kalibrasi untuk analisis logam Pb, Cd, dan Ni menggunakan metode AAS.

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental skala laboratorium yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu reaksi elektrokoagulasi terhadap efisiensi penghilangan logam berat Pb, Cd, dan Ni. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah waktu reaksi elektrokoagulasi, yaitu 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah efisiensi penghilangan logam berat Pb, Cd, dan Ni. Parameter pengujian dilakukan pada konsentrasi awal logam sebesar 20 mg/L, pH awal 9, tegangan 20 V, arus 2 A, volume larutan 2 L, jarak antar elektroda ±1,5 cm, tinggi elektroda terendam 10 cm, dan suhu ruang ±27 °C.

Prosedur penelitian diawali dengan menyiapkan seluruh alat dan bahan yang akan digunakan. Senyawa logam berat ditimbang menggunakan neraca analitik, yaitu Pb sebanyak 0,06 g untuk memperoleh konsentrasi logam sebesar 20 mg/L. Senyawa Pb yang telah ditimbang dimasukkan ke dalam gelas beaker, kemudian ditambahkan 2 liter air akuades. Campuran diaduk secara merata menggunakan spatula hingga seluruh senyawa logam terlarut sempurna dan menghasilkan larutan homogen. Nilai pH awal larutan diukur menggunakan pH meter, kemudian disesuaikan hingga mencapai pH 9. Penyesuaian pH dilakukan secara bertahap dengan menambahkan larutan NaOH untuk menaikkan pH atau larutan HCl untuk menurunkan pH hingga diperoleh kondisi pH yang stabil. Elektroda aluminium yang digunakan sebagai anoda dan katoda ditimbang terlebih dahulu menggunakan neraca analitik, kemudian hasil penimbangan

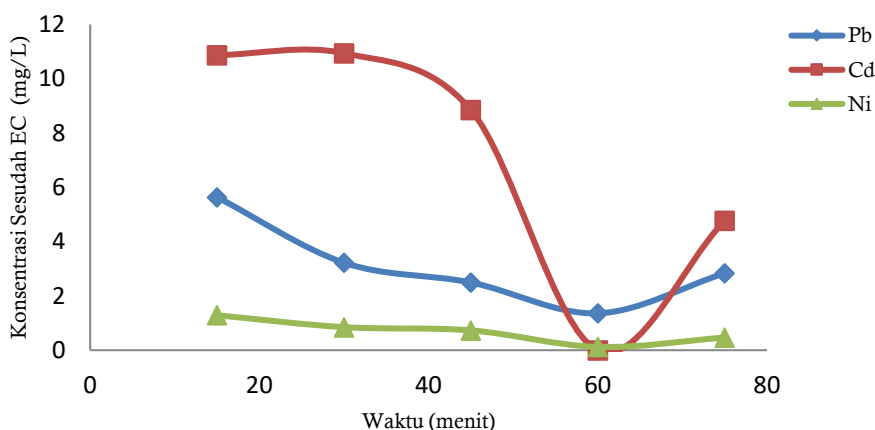
dicatat sebagai massa awal elektroda sebelum proses elektrokoagulasi berlangsung. Larutan logam berat Pb dimasukkan ke dalam reaktor elektrokoagulasi, kemudian elektroda aluminium dipasang secara sejajar di dalam reaktor dengan jarak antar elektroda 1,5 cm dan tinggi elektroda terendam 10 cm. Elektroda dihubungkan dengan power supply DC yang diatur pada tegangan 20 Volt dan arus 2 Ampere. Proses elektrokoagulasi dijalankan dengan variasi waktu reaksi selama 15, 30, 45, 60, dan 75 menit yang diukur menggunakan stopwatch.

Selama proses elektrokoagulasi berlangsung, dilakukan pengamatan visual terhadap perubahan warna larutan, pembentukan flok dan tingkat kejernihan larutan sebagai indikator terjadinya proses koagulasi dan flokulasi. Setelah waktu reaksi tercapai, parameter akhir operasi dicatat dan *power supply* DC dimatikan. Sampel hasil elektrokoagulasi diambil secara hati-hati menggunakan gelas ukur, kemudian dilakukan pengukuran pH akhir larutan. Sampel didiamkan selama 15–60 menit hingga flok mengendap sempurna. Setelah proses pengendapan selesai, bagian cairan jernih di atas endapan (supernatan) diambil secara hati-hati dan disimpan dalam jerigen tertutup untuk analisis lebih lanjut.

Setelah percobaan selesai, reaktor dan elektroda dibersihkan menggunakan air mengalir. Elektroda kemudian dikeringkan selama ± 15 menit menggunakan oven dan ditimbang kembali untuk memperoleh massa akhir elektroda sebagai data pendukung penelitian. Sampel hasil elektrokoagulasi dianalisis untuk menentukan nilai COD serta konsentrasi akhir logam Pb, Cd, dan Ni menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) sesuai prosedur standar laboratorium. Prosedur pembuatan larutan artifisial logam berat Cd dan Ni dilakukan dengan tahapan yang sama seperti pada larutan Pb, dengan perbedaan pada jenis dan massa senyawa logam yang digunakan, yaitu Cd sebanyak 0,11 g dan Ni sebanyak 0,19 g.

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi waktu reaksi terhadap efisiensi penghilangan logam berat Pb, Cd, dan Ni menggunakan metode elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium pada konsentrasi awal masing-masing 20 mg/L. Waktu reaksi divariasikan selama 15, 30, 45, 60, dan 75 menit pada kondisi arus dan tegangan konstan. Hasil Pengaruh waktu reaksi terhadap konsentrasi akhir Pb, Cd, dan Ni serta waktu reaksi terhadap COD akhir dapat dilihat pada Gambar 1, dan Gambar 2.



Gambar 1. Pengaruh Waktu Reaksi terhadap Konsentrasi akhir Pb, Cd, dan Ni

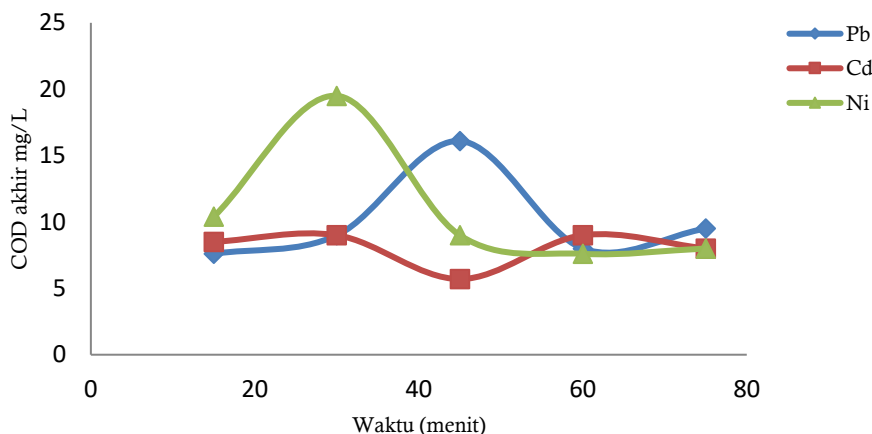
Pada Gambar 1. Logam berat Pb, konsentrasi awal 20 mg/L menurun menjadi 5,6367 mg/L pada menit ke-15 dan terus menurun hingga mencapai nilai terendah 1,3602 mg/L pada menit ke-60. Namun, pada menit ke-75 konsentrasi kembali meningkat menjadi 2,8330 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa waktu 60 menit merupakan kondisi optimum untuk penghilangan Pb.

Pada logam berat Cd, konsentrasi awal 20 mg/L menurun menjadi 10,87 mg/L pada menit ke-15 dan mencapai nilai terendah <0,0300 mg/L pada menit ke-60. Akan tetapi, pada menit ke-75 konsentrasi meningkat kembali menjadi 4,769 mg/L. Penurunan signifikan hingga di bawah batas deteksi pada menit ke-60 menunjukkan efektivitas tinggi proses elektrokoagulasi terhadap Cd.

Sementara itu, pada logam berat Ni, konsentrasi awal 20 mg/L menurun menjadi 1,2872 mg/L pada menit ke-15 dan terus berkurang hingga 0,1218 mg/L pada menit ke-60. Pada menit ke-75 terjadi sedikit

peningkatan menjadi 0,4656 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa Ni juga mencapai kondisi optimum pada waktu reaksi 60 menit.

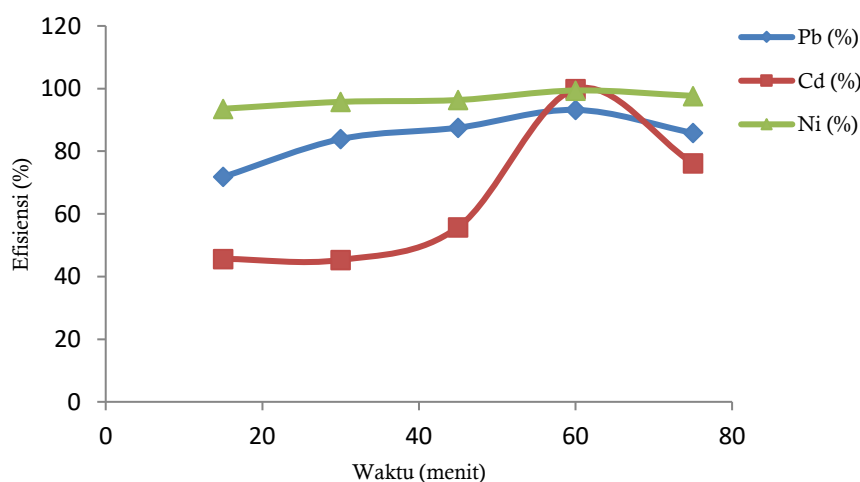
Secara umum, peningkatan waktu reaksi hingga 60 menit meningkatkan pembentukan ion Al^{3+} dari elektroda yang kemudian bereaksi membentuk flok $\text{Al}(\text{OH})_3$. Flok tersebut berperan dalam mekanisme adsorpsi, ko-presipitasi, serta destabilisasi partikel logam di dalam larutan. Namun, perpanjangan waktu hingga 75 menit menyebabkan penurunan kinerja yang diduga akibat kejenuhan sistem, restabilisasi partikel, atau pecahnya flok yang telah terbentuk.



Gambar 2. Pengaruh waktu reaksi terhadap COD akhir mg/L

Pada Gambar 2. Nilai COD akhir pada masing-masing logam terhadap variasi waktu reaksi, data tersebut menunjukkan bahwa COD mengalami fluktuasi selama proses elektrokoagulasi berlangsung dan tidak menunjukkan tren penurunan yang sepenuhnya linier. Pada logam Pb, COD akhir berkisar antara 7,6–16,1 mg/L. Pada logam Cd, COD akhir berada pada rentang 5,7–9,0 mg/L. Sementara pada logam Ni, COD akhir berkisar antara 7,6–19,5 mg/L. Perubahan nilai COD menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi tidak hanya berperan dalam penghilangan logam berat, tetapi juga memengaruhi kandungan zat organik dalam larutan. Variasi COD selama proses dapat dipengaruhi oleh pembentukan flok, degradasi senyawa organik, maupun pelepasan kembali partikel akibat ketidakstabilan sistem pada waktu reaksi yang lebih lama.

Menurut (Garcia-segura *et al.* 2017) waktu kontak merupakan parameter penting dalam elektrokoagulasi karena memengaruhi jumlah ion Al^{3+} yang terbentuk serta kestabilan flok yang dihasilkan. Hasil pengaruh variasi waktu reaksi terhadap efisiensi penghilangan logam berat Pb, Cd, dan Ni pada proses elektrokoagulasi dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Gambar 3. Pengaruh waktu reaksi terhadap Efisiensi Penghilangan Pb, Cd, dan Ni

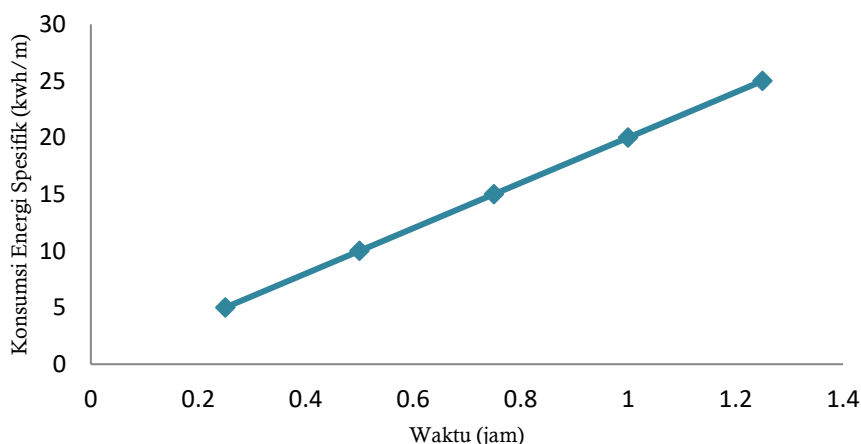
Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan waktu reaksi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi penghilangan logam Pb, Cd, dan Ni menggunakan metode elektrokoagulasi. Pada waktu reaksi 15 menit, efisiensi penghilangan Pb, Cd, dan Ni masing-masing sebesar 71,82%, 45,65%, dan 93,56%. Seiring bertambahnya waktu reaksi menjadi 30 menit, efisiensi meningkat menjadi 83,88% untuk Pb, 45,30% untuk Cd, dan 95,76% untuk Ni. Pada waktu 45 menit, efisiensi penghilangan kembali meningkat menjadi 87,52% untuk Pb, 55,74% untuk Cd, dan 96,35% untuk Ni. Kondisi optimum diperoleh pada menit ke-60 dengan efisiensi penghilangan tertinggi, yaitu 93,20% untuk Pb, 99,85% untuk Cd, dan 99,39% untuk Ni. Namun, setelah waktu reaksi diperpanjang hingga 75 menit, efisiensi penghilangan mengalami penurunan menjadi 85,84% untuk Pb, 76,16% untuk Cd, dan 97,67% untuk Ni.

Peningkatan efisiensi penghilangan logam seiring bertambahnya waktu reaksi menunjukkan bahwa semakin lama proses elektrokoagulasi berlangsung, semakin banyak ion Al^{3+} yang terlarut dari elektroda aluminium dan membentuk flok $Al(OH)_3$ sebagai koagulan aktif. Flok tersebut berperan dalam mengadsorpsi ion logam berat serta membantu proses presipitasi hidroksida logam. Pada logam Pb, peningkatan efisiensi terjadi secara bertahap hingga mencapai kondisi optimum pada menit ke-60. Setelah melewati kondisi tersebut, efisiensi menurun yang diduga disebabkan oleh restabilisasi partikel, pecahnya flok akibat turbulensi, serta passivasi permukaan elektroda yang menghambat pelepasan ion aluminium. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Jo *et al.* 2024) yang melaporkan bahwa waktu optimum penghilangan Pb pada elektrokoagulasi aluminium berada pada rentang 45–60 menit. (Al-Qodah, Tawalbeh, dan Al-Shannag 2020) juga menyatakan bahwa waktu reaksi yang terlalu lama dapat menyebabkan kejenuhan sistem sehingga efisiensi proses menurun.

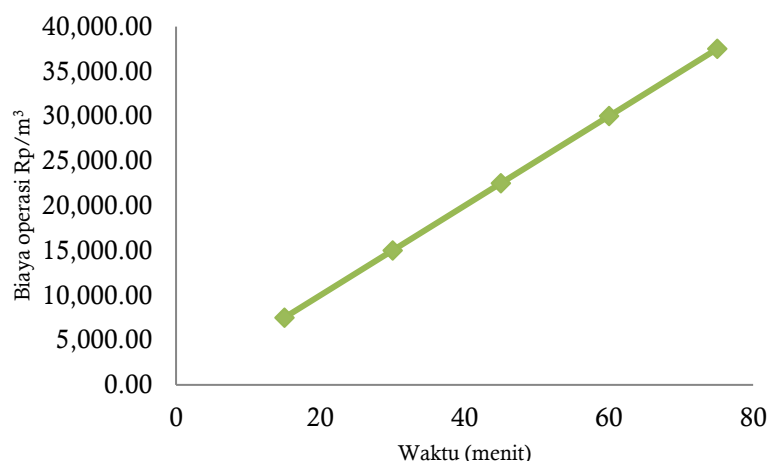
Pada logam Cd, peningkatan efisiensi berlangsung lebih signifikan terutama setelah menit ke-45 hingga mencapai 99,85% pada menit ke-60. Tingginya efisiensi tersebut menunjukkan bahwa Cd mudah teradsorpsi pada flok $Al(OH)_3$ dan mengalami presipitasi sebagai $Cd(OH)_2$ pada kondisi pH yang sesuai. Akan tetapi, efisiensi menurun pada menit ke-75 akibat kejenuhan flok, pelepasan kembali ion yang terikat lemah, serta ketidakseimbangan pembentukan koagulan. Temuan ini sesuai dengan penelitian (Garcia-Segura *et al.* 2017) yang menyebutkan bahwa waktu optimum penghilangan Cd berada pada kisaran 50–60 menit. Selain itu, (Khan *et al.* 2023) menjelaskan bahwa penambahan waktu reaksi di luar kondisi optimum tidak selalu meningkatkan efisiensi, tetapi dapat meningkatkan konsumsi energi proses.

Sementara itu, logam Ni menunjukkan efisiensi penghilangan yang relatif tinggi sejak awal proses dan terus meningkat hingga mencapai 99,39% pada menit ke-60. Hal ini menunjukkan bahwa Ni lebih responsif terhadap proses elektrokoagulasi dibandingkan Cd pada kondisi operasi yang sama. Mekanisme penghilangan Ni terjadi melalui presipitasi sebagai $Ni(OH)_2$, adsorpsi oleh flok $Al(OH)_3$, serta ko-presipitasi bersama hidroksida aluminium. Menurut (Al-Qodah, Tawalbeh, dan Al-Shannag 2020), efisiensi penghilangan Ni meningkat cepat hingga mencapai kondisi optimum sebelum mengalami kestabilan atau sedikit penurunan akibat kejenuhan flok.

Secara keseluruhan, waktu reaksi optimum pada proses elektrokoagulasi diperoleh pada menit ke-60 dengan efisiensi penghilangan tertinggi untuk seluruh logam yang diuji, yaitu 93,20% untuk Pb, 99,85% untuk Cd, dan 99,39% untuk Ni. Setelah melewati kondisi optimum tersebut, penambahan waktu reaksi tidak memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan dan cenderung menurunkan kinerja proses akibat kejenuhan sistem serta ketidakstabilan flok.



Gambar 4. Pengaruh waktu reaksi terhadap konsumsi energi spesifik (kWh/m^3)



Gambar 5. Pengaruh waktu reaksi terhadap biaya operasi Rp/m³

Data konsumsi energi selama proses elektrokoagulasi pada berbagai variasi waktu reaksi menunjukkan adanya peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya waktu operasi.

Pada gambar 4. waktu reaksi 15 menit, konsumsi energi tercatat sebesar 0,01 kWh dengan konsumsi energi spesifik 5 kWh/m³. Nilai ini meningkat secara bertahap menjadi 0,02; 0,03; 0,04; hingga 0,05 kWh masing-masing pada 30, 45, 60, dan 75 menit. Konsumsi energi spesifik juga meningkat secara linier dari 5 kWh/m³ menjadi 25 kWh/m³ pada menit ke-75.

Peningkatan ini terjadi karena arus (2 A) dan tegangan (20 V) dijaga konstan selama proses berlangsung. Berdasarkan prinsip dasar perhitungan energi listrik ($E = V \times I \times t$), energi yang digunakan berbanding lurus dengan waktu operasi. Oleh karena itu, semakin lama proses elektrokoagulasi dilakukan, semakin besar energi yang dikonsumsi.

Pada Gambar 5. biaya operasi meningkat seiring bertambahnya waktu reaksi, dari Rp 7.500/m³ pada 15 menit menjadi Rp 37.500/m³ pada 75 menit. Selama proses elektrokoagulasi, nilai kerapatan arus sebesar 133,33 A/m² dengan arus 2 A dan tegangan 20 V. Dengan nilai kerapatan arus yang sama pada setiap variasi waktu, peningkatan biaya terutama dipengaruhi oleh lamanya proses elektrolisis yang menyebabkan konsumsi energi listrik meningkat.

Meskipun konsumsi energi dan biaya operasi meningkat secara linear terhadap waktu reaksi, efisiensi penghilangan logam tidak mengalami peningkatan signifikan setelah menit ke-60. Oleh karena itu, waktu 60 menit dinyatakan sebagai kondisi optimum berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomi.

Menurut (Khan et al. 2023), evaluasi konsumsi energi merupakan faktor utama dalam menentukan kelayakan implementasi elektrokoagulasi pada skala industri.

Simpulan

Variasi waktu reaksi elektrokoagulasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja penghilangan logam berat. Efisiensi penghilangan Pb, Cd, dan Ni cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu reaksi elektrokoagulasi dari 15 hingga 60 menit. Peningkatan efisiensi tersebut terjadi karena semakin banyak ion Al^{3+} yang terlarut dari elektroda aluminium selama proses elektrokoagulasi dan membentuk flok $Al(OH)_3$ yang berperan dalam mekanisme adsorpsi, ko-presipitasi, serta destabilisasi partikel logam di dalam larutan. Pada waktu reaksi elektrokoagulasi 60 menit diperoleh efisiensi penghilangan tertinggi, yaitu sebesar 93,20% untuk Pb, 99,85% untuk Cd, dan 99,39% untuk Ni. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada waktu tersebut proses elektrokoagulasi telah mencapai kondisi optimum, yang ditandai dengan terbentuknya koagulan dalam jumlah yang cukup, pertumbuhan flok yang stabil, serta proses sedimentasi yang berlangsung secara efektif. Perpanjangan waktu reaksi elektrokoagulasi hingga 75 menit tidak memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan dan bahkan menunjukkan kecenderungan penurunan. Hal ini diduga disebabkan oleh terjadinya kejenuhan sistem, restabilisasi partikel, pecahnya flok yang telah terbentuk, serta kemungkinan terbentuknya lapisan pasif pada permukaan elektroda aluminium yang dapat menurunkan efektivitas proses elektrokoagulasi. Selain memengaruhi efisiensi penghilangan logam berat, peningkatan waktu reaksi elektrokoagulasi juga menyebabkan konsumsi energi listrik semakin besar. Konsumsi energi spesifik meningkat secara linier karena arus dan tegangan dijaga konstan selama

proses berlangsung. Meskipun pada waktu reaksi elektrokoagulasi 75 menit efisiensi penghilangan masih tergolong tinggi, peningkatan konsumsi energi tidak sebanding dengan peningkatan kinerja proses yang diperoleh. Oleh karena itu, waktu reaksi elektrokoagulasi selama 60 menit ditetapkan sebagai kondisi optimum, baik dari segi efisiensi penghilangan logam berat maupun efisiensi penggunaan energi listrik. Secara keseluruhan, optimasi waktu reaksi elektrokoagulasi merupakan parameter penting dalam proses elektrokoagulasi sistem single component untuk memperoleh penghilangan logam berat yang maksimal dengan konsumsi energi yang tetap terkendali.

Daftar Referensi

- Al-qodah, Zakaria, Muhammad Tawalbeh, and Mohammad Al-shannag. 2020. "Science of the Total Environment Combined Electrocoagulation Processes as a Novel Approach for Enhanced Pollutants Removal: A State-of-the-Art Review." *Science of the Total Environment* 744: 140806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140806>.
- Aljaberi, Forat Yasir, and Zahraa Alaa Hawaas. 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>.
- Fatimura, Muhrinsyah, Tuty Emilia, Ian Kurniawan, Rully Masriatini, and Reno Fitriyanti. 2025. "Evaluation of Electrocoagulation Process Efficiency in Laboratory Wastewater Treatment with Various Current Densities" 10 (1): 1–9.
- Garcia-segura, Sergi, Maria Maesia S G Eiband, Jailson Vieira De, and Carlos Alberto Martínez-huitle. 2017. "Electrocoagulation and Advanced Electrocoagulation Processes: A General Review about the Fundamentals, Emerging Applications and Its Association with Other Technologies." *Journal of Electroanalytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>.
- Gök, Zehra, and Hüseyin Can. 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>.
- Jo, Sangyeol, Rahul Kadam, Heewon Jang, and Dongyun Seo. 2024. "Recent Advances in Wastewater Electrocoagulation Technologies: Beyond Chemical Coagulation."
- Khan, Saif Ullah, Mohammad Khalid, Khalid Hashim, Mehdi Hassanvand Jamadi, Milad Mousazadeh, Farrukh Basheer, and Izharul Haq Farooqi. 2023. "Efficacy of Electrocoagulation Treatment for the Abatement of Heavy Metals: An Overview of Critical Processing Factors, Kinetic Models and Cost Analysis."
- Logam, Pencemaran, Beberapa Sungai, Indonesia Tinjauan Literatur, M A Fatwa, Adelia Wulandari, and Rony Irawanto. 2024. "Environmental Pollution Journal" 4 (April): 959–71.
- Masthura, Masthura, Miftahul Husnah, and Dwi Utami Panggabean. 2022. "Jurnal Phi BOD, COD, Dan Fe Pada Air Sungai Batang" 8 (2): 70–75.
- Putri, Andini Adi, Ika Meicahayanti, Searphin Nugroho, Febrina Zulya, Program Studi, Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, and Kalimantan Timur. 2023. "Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan" 15 (2): 124–28.
- Setiawan, Adhi, Tarikh Azis Ramadani, and Rizka Lutfita Hanastasia. 2020. "Jurnal Presipitasi Pengolahan Logam Pb (II) Pada Limbah Cair Menggunakan" 17 (2): 96–103.
- Wastewater, Batik, Treatment Using, and Combination Methods. 2019. "PENGOLAHAN LIMBAH CAIR BATIK MENGGUNAKAN KOMBINASI" 7 (3): 358–69.