

Variasi pH terhadap Kinerja Elektrokoagulasi dan Efisiensi Penyisihan Logam Berat Pb, Cd, dan Ni dari Limbah Artifisial

Agung Nasrullah¹, Muhrinsyah Fatimura^{1*}, Reno Fitriyanti¹

¹Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang,
Jl. Lorong Gotong, 11 Ulu, Kec. Seberang Ulu II, Kota Palembang, Sumatera Selatan, 30265.

Penulis untuk Korespondensi/E-mail: m.fatimura@univpgri-palembang.ac.id

Abstract - Liquid waste containing heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), and nickel (Ni) is a serious environmental problem because it is toxic and difficult to degrade naturally. One effective method to overcome this problem is electrocoagulation using aluminum electrodes. The purpose of this study was to determine the effect of pH variations on the removal efficiency of Pb, Cd, and Ni metals using the electrocoagulation method on artificial waste. The study was conducted with pH variations of 3, 5, 7, 9, and 11, with an initial concentration of each metal of 20 mg/L. The parameters analyzed included the final concentration and metal removal efficiency. The results showed that pH significantly affected the performance of electrocoagulation, with optimum efficiency obtained at pH 9. The highest removal efficiency for each metal was Pb at 99.35%, Cd at 97.50%, and Ni at 99.70%. Under these conditions, $Al(OH)_3$ species are formed, which act as active coagulants in the adsorption and flocculation of heavy metals. These results indicate that the electrocoagulation method is highly effective for treating waste containing heavy metals.

Abstrak - Limbah cair yang mengandung logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd) dan nikel (Ni) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang serius karena bersifat toksik dan sulit terdegradasi secara alami. Salah satu metode yang efektif untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah elektrokoagulasi menggunakan elektroda aluminium. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi pH terhadap efisiensi penyisihan logam Pb, Cd, dan Ni menggunakan metode elektrokoagulasi pada limbah artifisial. Penelitian dilakukan dengan variasi pH 3, 5, 7, 9, dan 11, dengan konsentrasi awal masing-masing logam sebesar 20 mg/L. Parameter yang dianalisis meliputi konsentrasi akhir dan efisiensi penyisihan logam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH berpengaruh signifikan terhadap kinerja elektrokoagulasi, dengan efisiensi optimum diperoleh pada pH 9. Efisiensi penyisihan tertinggi masing-masing logam adalah Pb sebesar 99,35%, Cd sebesar 97,50% dan Ni sebesar 99,70%. Pada kondisi ini, terbentuk spesies $Al(OH)_3$ yang berperan sebagai koagulan aktif dalam proses adsorpsi dan flokulasi logam berat. Hasil ini menunjukkan bahwa metode elektrokoagulasi sangat efektif untuk pengolahan limbah yang mengandung logam berat.

Keywords - Aluminum, Electrocoagulation, Heavy Metals, Ph, Removal Efficiency.

PENDAHULUAN

Air merupakan sumber daya alam yang memiliki peranan sangat penting dalam menunjang kehidupan manusia, kegiatan domestik, pertanian, serta berbagai aktivitas industri. Ketersediaan air yang berkualitas menjadi salah satu faktor utama dalam menjaga kesehatan masyarakat dan

keberlangsungan ekosistem. Namun, seiring dengan pesatnya perkembangan sektor industri, jumlah limbah yang dihasilkan juga mengalami peningkatan yang signifikan. Limbah industri yang dibuang tanpa pengolahan yang memadai berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, terutama pada badan air seperti sungai, danau, maupun air tanah. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan kualitas air serta

mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, sehingga diperlukan upaya pengelolaan dan pengolahan limbah yang efektif sebelum dibuang ke lingkungan [1]. Keberadaan logam berat menjadi perhatian karena bersifat tidak terdegradasi secara alami dan cenderung mengalami akumulasi dalam ekosistem. Maka dari itu diperlukannya pengolahan air limbah. Pengolahan limbah biasanya mengacu pada standar baku mutu air limbah atau layak buang ke lingkungan. Menurut PERMEN Lingkungan Hidup NO. 05 Tahun 2014 [2].

Beberapa logam berat yang umum ditemukan dalam limbah cair industri adalah timbal (Pb), kadmium (Cd), dan nikel (Ni). Akumulasi logam berat di perairan dapat menimbulkan dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia [3]. Logam berat Pb diketahui dapat menyebabkan gangguan atau menurunkan pengendalian dari sistem saraf, sedangkan Cd berpotensi menyebabkan kerusakan ginjal dan gangguan metabolisme tulang. Sementara itu, paparan Ni dalam jangka panjang dapat memicu gangguan pernapasan serta memiliki sifat karsinogenik. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan yang mampu menurunkan konsentrasi logam berat sebelum limbah dibuang ke lingkungan.

Berbagai metode telah diterapkan untuk mengolah limbah yang mengandung logam berat, seperti koagulasi-flokulasi, adsorpsi, pertukaran ion, dan teknologi membran. Namun, metode tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan berupa biaya operasional yang relatif tinggi, kebutuhan bahan kimia yang besar, serta pembentukan lumpur sekunder yang memerlukan penanganan lanjutan.

Meskipun metode-metode tersebut telah banyak digunakan, penerapannya masih menghadapi sejumlah keterbatasan, antara lain tingginya biaya operasional, penggunaan bahan kimia dalam jumlah besar, serta produksi lumpur sekunder yang sulit dikelola [4]. Selain itu, efektivitas metode konvensional sangat bergantung pada karakteristik air limbah, sehingga kurang fleksibel terhadap variasi konsentrasi dan jenis logam berat yang terkandung di dalamnya [5].

Sebagai alternatif, teknologi elektrokoagulasi berkembang karena mampu menghasilkan koagulan secara langsung melalui pelarutan elektroda selama proses elektrolisis. Pada penggunaan elektroda aluminium, ion Al^{3+} yang terbentuk akan bereaksi dengan ion hidroksida membentuk $Al(OH)_3$ yang berfungsi sebagai koagulan aktif dalam

mengadsorpsi dan mengendapkan kontaminan logam berat. Meskipun metode-metode tersebut telah diaplikasikan secara luas, penerapannya sering menghadapi sejumlah kendala, seperti biaya operasional yang relatif tinggi, kebutuhan bahan kimia dalam jumlah besar, serta produksi lumpur sekunder yang sulit dikelola [6]. Adapun penggunaan bahan aluminium pada anoda dan katoda sebagai elektroda didasari oleh kemampuannya yang efisien dalam menghasilkan *flok* untuk penyisihan polutan disamping oleh harganya yang murah.

Elektrokoagulasi merupakan salah satu teknologi pengolahan limbah yang saat ini banyak dikembangkan karena memiliki kemampuan yang baik dalam menyisihkan berbagai jenis kontaminan, termasuk logam berat. Proses elektrokoagulasi bekerja melalui reaksi elektrokimia yang menghasilkan koagulan secara *in situ* dari pelarutan elektroda, sehingga penggunaan bahan kimia tambahan dapat dikurangi. Pada penggunaan elektroda aluminium, ion Al^{3+} yang terbentuk selama proses elektrolisis akan bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) dan membentuk aluminium hidroksida ($Al(OH)_3$). Senyawa tersebut berperan sebagai koagulan aktif yang mampu mengadsorpsi, mendestabilisasi, serta mengendapkan ion logam berat dari dalam larutan. Selain itu, proses elektrokoagulasi juga melibatkan mekanisme flotasi akibat terbentuknya gelembung gas hidrogen yang membantu pemisahan *flok* dari fase cair [7].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa elektrokoagulasi memiliki kemampuan yang baik dalam menyisihkan logam berat dari air limbah. Mekanisme utama proses ini terjadi melalui pelarutan elektroda yang menghasilkan koagulan aktif secara *in-situ*, pembentukan *flok*, serta presipitasi ion logam. Efektivitas elektrokoagulasi dipengaruhi oleh beberapa parameter operasi seperti kuat arus, tegangan, waktu reaksi, jenis elektroda, serta kondisi larutan pH. Diantara parameter tersebut, pH merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap keberhasilan proses elektrokoagulasi karena menentukan bentuk spesiasi logam dan stabilitas pembentukan *flok* hidroksida. Pada kondisi asam, ion logam cenderung tetap berada dalam bentuk terlarut sehingga efisiensi penyisihan relatif rendah. Sebaliknya, pada kondisi netral hingga basah, terbentuk spesiasi hidroksida yang lebih stabil sehingga meningkatkan proses adsorpsi dan pengendapan logam [8].

Dalam penelitian ini digunakan limbah artifisial sebagai sampel uji untuk menciptakan kondisi eksperimen yang lebih terkontrol. Penggunaan limbah artifisial memungkinkan konsentrasi awal logam Pb, Cd, dan Ni dapat diatur secara seragam sehingga pengaruh variasi pH terhadap proses elektrokoagulasi dapat diamati dengan lebih akurat. Selain itu, penggunaan limbah artifisial bertujuan untuk meminimalkan pengaruh zat pengotor lain yang umumnya terdapat pada limbah industri nyata, sehingga mekanisme penyisihan logam berat selama proses elektrokoagulasi dapat dianalisis secara lebih spesifik. Dengan kondisi yang lebih terkontrol, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran dasar mengenai kinerja elektrokoagulasi sebelum diaplikasikan pada limbah industri nyata [9].

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa variasi pH memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi penyisihan logam berat menggunakan metode elektrokoagulasi. Penelitian yang dilakukan oleh AlJaberi dan Hawaas menunjukkan bahwa penyisihan logam berat Pb dan Cd menggunakan elektroda aluminium menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi pada kondisi basa dibandingkan kondisi asam. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pH mampu mempercepat pembentukan *flok* dan meningkatkan interaksi antara koagulan dengan ion logam di dalam larutan [10]. Selain itu, penelitian lainnya yang mengemukakan hasil penelitian menunjukkan bahwa metode elektrokoagulasi secara batch mampu menurunkan kadar krom (Cr) dalam limbah cair industri penyamakan kulit dengan efisiensi yang tinggi, umumnya mencapai lebih dari 80% hingga 95% pada kondisi optimum.

Efisiensi penyisihan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu operasi dan kuat arus listrik. Selain itu, kondisi pH netral hingga sedikit basa memberikan hasil terbaik karena mendukung pembentukan *flok* hidroksida logam yang efektif dalam mengadsorpsi krom dari larutan. Dengan demikian, elektrokoagulasi terbukti efektif dalam mereduksi konsentrasi Cr hingga memenuhi baku mutu yang ditetapkan [11]. Adapun penelitian yang dilakukan oleh Khan menjelaskan bahwa optimasi parameter operasi elektrokoagulasi tidak hanya meningkatkan efisiensi penyisihan kontaminan, tetapi juga berperan dalam mengendalikan konsumsi energi selama proses berlangsung [12].

Berdasarkan uraian tersebut, masih diperlukan kajian mengenai pengaruh variasi pH terhadap proses penyisihan logam berat Pb, Cd, dan Ni

menggunakan metode elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi pH terhadap efisiensi penyisihan logam berat timbal (Pb), kadmium (Cd), dan nikel (Ni) pada limbah artifisial menggunakan metode elektrokoagulasi. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan kondisi pH optimum yang menghasilkan efisiensi penyisihan tertinggi, serta mengetahui besarnya konsumsi energi listrik dan biaya operasional pada setiap kondisi pH yang digunakan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kondisi operasi yang efektif dan efisien dalam proses elektrokoagulasi serta menjadi dasar pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan Metode Eksperimen Laboratorium dengan memanfaatkan limbah artifisial sebagai sampel uji untuk mengevaluasi pengaruh variasi pH terhadap efisiensi proses elektrokoagulasi dalam penyisihan logam berat timbal (Pb), kadmium (Cd) dan nikel (Ni). Penelitian dilakukan dengan mempertahankan kondisi operasi yang tetap, sedangkan variabel yang diubah adalah nilai pH larutan. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi akhir logam berat, efisiensi penyisihan, konsumsi energi listrik, konsumsi elektroda, serta biaya operasional proses.

Secara umum, penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan yang dimulai dari persiapan limbah artifisial, pengaturan pH sesuai variasi yang ditentukan, pelaksanaan proses elektrokoagulasi, pengambilan sampel hasil pengolahan, analisis laboratorium, hingga pengolahan dan interpretasi data. Tahapan tersebut disusun untuk memastikan seluruh perlakuan dilakukan secara konsisten sehingga hasil penelitian dapat direplikasi pada kondisi yang serupa.

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih dua minggu. Kegiatan eksperimen dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Universitas PGRI Palembang, Sementara itu, pengujian analisa sampel hasil pengolahan dilakukan di Balai Labkesmas Palembang dan BSPJI Palembang.

Bahan dan Alat

Penelitian ini menggunakan metode perancangan alat dan metode eksperimen laboratorium dengan memanfaatkan limbah artifisial sebagai sampel uji untuk mengetahui pengaruh pH terhadap efisiensi penyisihan logam berat Pb, Cd, dan Ni melalui proses elektrokoagulasi. Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi reaktor elektrokoagulasi, DC power supply, gelas beaker berkapasitas 500 mL, gelas Erlenmeyer berkapasitas 250 mL, pipet tetes, spatula, pH meter, timbangan massa, gelas ukur berkapasitas 1000 mL, serta *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) yang digunakan untuk menganalisis konsentrasi logam berat sebelum dan sesudah proses pengolahan.

Adapun bahan yang digunakan terdiri atas aquades, $(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2)$, $(\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$, $(\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$, Asam Klorida (HCl), natrium hidroksida (NaOH), asam nitrat (HNO_3)

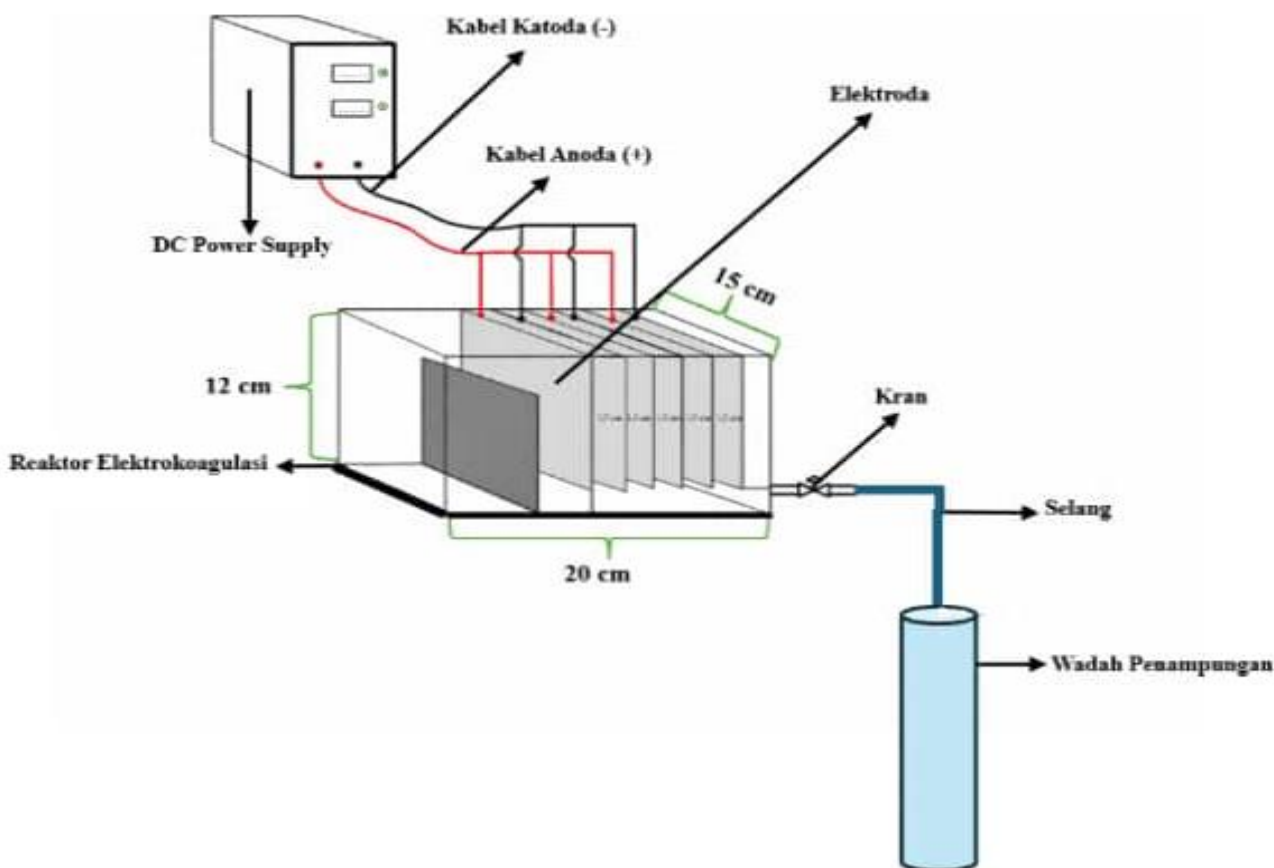
Bahan-bahan tersebut digunakan untuk membuat limbah artifisial yang mengandung logam berat serta

mengatur kondisi pH selama proses elektrokoagulasi berlangsung.

Desain Alat

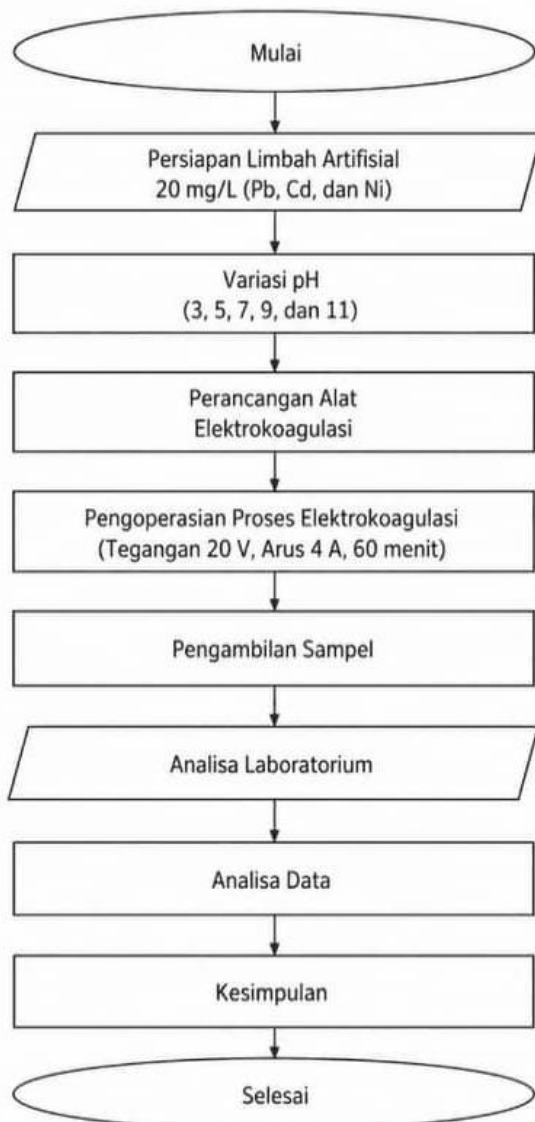
Sistem yang digunakan terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu reaktor elektrokoagulasi berbahan akrilik, rangkaian elektroda aluminium yang disusun sejajar, serta sumber arus listrik berupa DC *power supply* yang dihubungkan melalui kabel anoda dan katoda.

Reaktor dilengkapi dengan kran sebagai saluran keluaran yang terhubung dengan selang menuju wadah penampungan hasil pengolahan. Susunan alat ini dirancang untuk memastikan proses elektrokoagulasi berlangsung secara efektif, dengan distribusi arus yang merata serta memudahkan pengambilan sampel setelah proses berlangsung. Sebelum pelaksanaan kegiatan eksperimen, terlebih dahulu dilakukan perancangan alat elektrokoagulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Alat Elektrokoagulasi

Prosedur Penelitian



Gambar 2. Prosedur Penelitian

Sesuai tahapan pada Gambar 2, proses penelitian diawali dengan menyiapkan Limbah artifisial yang mengandung logam Pb, Cd, dan Ni dengan konsentrasi masing-masing 20 mg/L dibuat berdasarkan perhitungan stoikiometri. Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh massa senyawa sebesar 0,064 g untuk Pb, 0,1098 g untuk Cd dan 0,198 g untuk Ni dalam volume larutan 2 L. Masing-masing senyawa ditimbang menggunakan neraca analitik, kemudian dilarutkan dalam aquades dan diaduk hingga homogen. Selanjutnya, pH larutan diatur pada variasi 3, 5, 7, 9 dan 11 menggunakan pH meter, dengan penambahan larutan HCl sebagai asam dan NaOH sebagai basa hingga mencapai kondisi yang diinginkan dan pH 7 digunakan sebagai kondisi netral.

Proses elektrokoagulasi dilakukan menggunakan reaktor berbahan akrilik yang dilengkapi enam elektroda aluminium yang disusun secara monopolar dengan jarak antar elektroda sebesar 1,5 cm. Sebanyak 2 L limbah artifisial dimasukkan ke dalam reaktor, kemudian pH diatur sesuai variasi yang telah ditentukan, yaitu 3, 5, 7, 9 dan 11, menggunakan larutan HCl dan NaOH. Elektroda terlebih dahulu dicuci, dikeringkan dan ditimbang sebelum serta setelah proses untuk mengetahui perubahan massa elektroda.

Proses elektrokoagulasi dijalankan menggunakan *DC power supply* pada kondisi operasi konstan yaitu tegangan 20 V, arus 4 A dan waktu reaksi selama 60 menit. Setelah proses selesai, sampel diambil dengan cara mengalirkan larutan melalui kran pada reaktor ke dalam wadah penampungan secara perlahan. Selanjutnya dilakukan pengukuran pH akhir menggunakan pH meter sebagai data pengamatan. Larutan kemudian didiamkan sejenak untuk memungkinkan proses pengendapan sebelum dilakukan pemisahan.

Analisis konsentrasi akhir logam Pb, Cd, dan Ni dilakukan menggunakan Metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Selain itu, dilakukan perhitungan konsumsi energi listrik serta perubahan massa elektroda untuk mengevaluasi efisiensi penyisihan, konsumsi energi, dan biaya operasional pada proses elektrokoagulasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Limbah Artifisial

Limbah artifisial pada penelitian ini dibuat untuk menghasilkan kondisi percobaan yang terkontrol sehingga pengaruh variasi pH terhadap proses elektrokoagulasi dapat diamati secara jelas. Limbah disiapkan dengan konsentrasi awal logam berat sebesar 20 mg/L menggunakan pelarut aquades, kemudian diatur pH-nya menjadi 3, 5, 7, 9, dan 11 menggunakan asam klorida (HCl) dan natrium hidroksida (NaOH).

Penggunaan limbah artifisial bertujuan untuk meminimalkan pengaruh senyawa pengganggu yang umumnya terdapat pada limbah nyata, sehingga proses penyisihan logam berat dapat dianalisis secara lebih akurat dan konsisten. Selain itu, pendekatan ini memungkinkan pengendalian konsentrasi awal logam secara seragam selama penelitian berlangsung.

Dengan kondisi yang terkontrol tersebut, variasi pH dapat dievaluasi secara objektif terhadap efisiensi penyisihan logam berat. Variasi pH yang mencakup kondisi asam, netral dan basa digunakan untuk menentukan pH optimum dalam proses elektrokoagulasi.

Pengamatan Visual

Pengamatan dalam penelitian ini juga difokuskan pada perubahan kondisi larutan secara visual selama proses elektrokoagulasi berlangsung. Parameter yang diamati meliputi perubahan nilai pH sebelum dan setelah proses, pembentukan endapan (*flok*), serta tingkat kejernihan larutan. Pengamatan visual ini penting untuk memberikan gambaran langsung mengenai mekanisme yang terjadi selama proses elektrokoagulasi, khususnya yang berkaitan dengan pembentukan koagulan dan pemisahan kontaminan dari larutan.

Perubahan pH setelah proses elektrokoagulasi diamati untuk mengidentifikasi kecenderungan reaksi yang terjadi di dalam sistem, mengingat proses ini melibatkan reaksi elektrokimia yang dapat menghasilkan ion hidroksida (OH^-) dan mempengaruhi tingkat keasaman larutan. Selain itu, terbentuknya *flok* serta peningkatan kejernihan larutan digunakan sebagai indikator keberhasilan proses koagulasi dan pengendapan logam berat [13].

Berdasarkan hasil pengamatan visual (Tabel 1), proses elektrokoagulasi menunjukkan perubahan

signifikan terhadap kondisi larutan, terutama pada nilai pH, pembentukan *flok* dan tingkat kejernihan. Secara umum, nilai pH meningkat setelah proses elektrokoagulasi akibat terbentuknya ion OH^- selama proses elektrolisis yang mendukung pembentukan koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Pada pH awal rendah (pH 3), larutan masih terlihat keruh dan belum terbentuk *flok* secara optimal yang menunjukkan bahwa proses koagulasi belum berlangsung dengan baik. Pada pH 5 dan 7 mulai terbentuk *flok* dalam jumlah sedikit dengan kondisi larutan yang masih agak keruh. Sementara itu, pada pH 9 dan 11 terbentuk *flok* dalam jumlah lebih banyak dan larutan menjadi lebih jernih untuk seluruh logam Pb, Cd dan Ni. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efektivitas elektrokoagulasi sangat dipengaruhi oleh kondisi pH larutan. Semakin optimal pembentukan *flok* yang terjadi, maka semakin baik kemampuan sistem dalam mengadsorpsi dan mengendapkan ion logam berat dari dalam limbah.

Pembentukan *flok* $\text{Al}(\text{OH})_3$ dalam jumlah besar pada kondisi basa mampu meningkatkan proses destabilisasi partikel dan penjerapan ion logam sehingga kualitas efluen menjadi lebih jernih.

Dengan demikian, metode elektrokoagulasi terbukti efektif dalam menurunkan konsentrasi logam berat sekaligus memperbaiki karakteristik fisik limbah cair, terutama tingkat kejernihan larutan.

Tabel 1. Hasil Data Pengamatan Visual

Komponen	Tingkat	Tingkat	Pengamatan Visual	
	Keasaman (pH) Sebelum proses	Keasaman (pH) Setelah Proses	Endapan (<i>Flok-flok</i>)	Tingkat Kejernihan
Timbal (Pb)	3	4,3	tidak ada	keruh
	5	5,9	sedikit	sedikit keruh
	7	7,1	sedikit	sedikit keruh
	9	9,2	banyak	jernih
	11	11,2	banyak	sangat jernih
Kadmium (Cd)	3	4,6	tidak ada	keruh
	5	5,5	sedikit	sedikit keruh
	7	6,1	sedikit	sedikit keruh
	9	8,8	banyak	jernih
	11	11,1	banyak	sangat jernih
Nikel (Ni)	3	4,6	tidak ada	keruh
	5	5,8	sedikit	sedikit keruh
	7	4,7	sedikit	keruh
	9	8,6	banyak	jernih
	11	10,7	banyak	sangat jernih

Efisiensi Penyisihan Logam berat

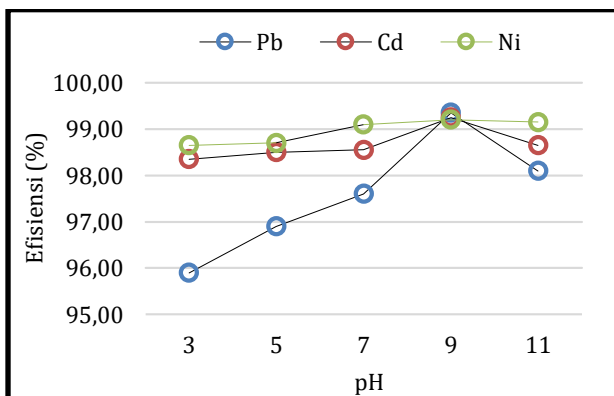
Efisiensi penyisihan logam berat pada penelitian ini dianalisis terhadap Penyisihan logam berat Pb, Cd, dan Ni memiliki konsentrasi awal sebesar 20 mg/L dari limbah artifisial. Setelah dilakukannya analisa laboratorium diperoleh data Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisa laboratorium

Komponen	pH	C ₀ (mg/L)	C _t (mg/L)
Pb	3	20	0,82
	5		2,38
	7		0,48
	9		0,13
	11		0,80
Cd	3	20	3,30
	5		4,33
	7		3,29
	9		0,15
	11		0,07
Ni	3	20	0,07
	5		0,16
	7		0,18
	9		0,16
	11		0,15

Sumber: (Lebkesmas & BSPJI, 2026)

Grafik penyisihan logam berat hasil analisis pengujian efisiensi terhadap variasi pH setelah pengolahan secara elektrokoagulasi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Variasi pH terhadap Efisiensi

Berdasarkan grafik efisiensi penyisihan logam berat terhadap variasi pH, terlihat bahwa proses elektrokoagulasi mampu menyisihkan logam berat Pb, Cd, dan Ni dengan efisiensi yang sangat tinggi yaitu di atas 95% pada seluruh kondisi pH, namun masing-masing logam berat menunjukkan pola perubahan efisiensi yang berbeda terhadap peningkatan pH.

Efisiensi penyisihan logam berat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \% \tag{1}$$

Keterangan:

C₀= Konsentrasi Awal Logam (mg/L)

C_t= Konsentrasi Akhir Logam (mg/L)

Logam berat Pb menunjukkan peningkatan efisiensi yang cukup signifikan seiring meningkatnya pH. Pada pH 3 efisiensi penyisihan Pb sebesar 95,9%, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai optimum pada pH 9 sebesar 99,35%. Setelah itu, efisiensi mengalami sedikit penurunan pada pH 11 menjadi 98,10%. Kondisi ini menunjukkan bahwa kondisi basa lebih mendukung pembentukan *flok* Al(OH)₃ yang efektif dalam mengadsorpsi ion Pb. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pada kondisi pH netral hingga basa, spesies aluminium dominan berupa Al(OH)₃ yang bersifat amorf dan memiliki luas permukaan tinggi, sehingga sangat efektif dalam proses adsorpsi dan koagulasi ion logam berat seperti Pb. Pada pH rendah, keberadaan ion H⁺ yang tinggi cenderung menghambat pembentukan *flok* hidroksida, sedangkan pada pH yang terlalu tinggi dapat terjadi pembentukan spesies terlarut seperti Al(OH)₄⁻ yang mengurangi efektivitas proses koagulasi. Oleh karena itu, pH optimum umumnya berada pada kisaran netral hingga sedikit basa yang memungkinkan terbentuknya *flok* stabil dan efisien dalam menyisihkan logam Pb dari larutan [14].

Pada logam berat Cd, efisiensi penyisihan relatif stabil pada pH 3–7 dengan nilai berkisar antara 97–98%, kemudian meningkat tajam pada pH 9 dan 11. Efisiensi tertinggi diperoleh pada pH 11 sebesar 99,65%. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi basa sangat mempengaruhi proses presipitasi dan pengendapan Cd dalam bentuk hidroksida logam. Hasil ini juga dibuktikan pada penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pada kondisi basa, ion Cd²⁺ cenderung mengalami reaksi presipitasi membentuk senyawa yang tidak larut seperti Cd(OH)₂, sehingga meningkatkan efisiensi penyisihan dari larutan. Selain itu, pada pH tinggi terjadi peningkatan konsentrasi ion OH⁻ yang mempercepat pembentukan endapan hidroksida logam serta memperbesar ukuran *flok*, sehingga proses pemisahan menjadi lebih efektif. Pada pH rendah, spesies Cd lebih stabil dalam bentuk terlarut sehingga efisiensi penyisihan relatif lebih rendah dibandingkan kondisi basa. Oleh karena itu,

peningkatan pH hingga kondisi basa kuat memberikan kontribusi signifikan terhadap mekanisme presipitasi dan koagulasi logam Cd dalam proses elektrokoagulasi [15].

Sementara itu, logam berat Ni menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi dibandingkan logam lainnya pada hampir seluruh variasi pH. Efisiensi penyisihan Ni berada pada rentang 99,1–99,7%, dengan nilai optimum terjadi pada pH 9. Tingginya efisiensi pada seluruh kondisi pH menunjukkan bahwa elektrokoagulasi menggunakan elektroda aluminium sangat efektif dalam menyisihkan ion Ni dari larutan. Hal tersebut sama dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi sangat efektif dalam menyisihkan ion Ni dengan efisiensi yang tinggi pada berbagai kondisi pH, terutama karena kombinasi mekanisme adsorpsi oleh *flok* $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan presipitasi dalam bentuk $\text{Ni}(\text{OH})_2$. Selain itu, pada kondisi netral hingga basa, spesies Ni cenderung membentuk hidroksida yang tidak larut sehingga mudah terpisahkan dari larutan [16].

Fenomena ini juga didukung oleh penelitian terbaru yang melaporkan bahwa elektrokoagulasi mampu mencapai efisiensi penyisihan Ni hingga mendekati 100% pada kondisi operasi tertentu, serta menunjukkan bahwa kondisi pH berpengaruh terhadap pembentukan hidroksida logam sebagai mekanisme utama penghilangan Ni [17].

Secara umum, grafik pada gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan pH hingga kondisi basa mampu meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat. Kondisi optimum proses elektrokoagulasi diperoleh pada pH 9 karena memberikan efisiensi penyisihan tertinggi pada logam berat Pb dan Ni, sedangkan logam Cd menunjukkan efisiensi tertinggi pada pH 11. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa kondisi netral hingga basa mendukung pembentukan koagulan hidroksida yang lebih stabil, sehingga proses adsorpsi dan pengendapan logam berat berlangsung lebih efektif.

Analisa Kerapatan Arus

Kerapatan arus (*current density*) merupakan parameter penting dalam proses elektrokoagulasi karena secara langsung mempengaruhi jumlah koagulan yang terbentuk dari pelarutan anoda, laju reaksi elektrokimia, serta ukuran dan jumlah gelembung gas yang dihasilkan selama proses. Variasi kerapatan arus akan berdampak pada efisiensi penyisihan logam berat Pb, Cd dan Ni, sehingga parameter ini perlu dianalisis secara tepat.

Kerapatan arus dihitung menggunakan persamaan (2).

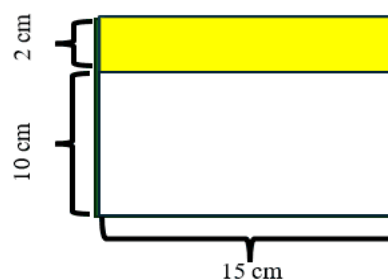
$$J = I / A \quad (2)$$

Keterangan :

J : Kerapatan Arus (*Current Density*) : ... (A/m^2)

I : Arus Listrik (*Current*) : ... (A)

A: Luas Penampang Konduktor : ... (m^2)



Gambar 4. Bentuk dan Ukuran Elektroda

Kerapatan arus dihitung berdasarkan luas permukaan elektroda yang diperoleh dari perhitungan luas persegi panjang ($10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$) sebesar 150 cm^2 (Gambar 4). Dengan arus listrik 4 A, diperoleh nilai kerapatan arus sebesar $0,0266 \text{ A}/\text{cm}^2$ atau $26,6 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Nilai ini menunjukkan jumlah arus listrik per satuan luas elektroda yang mempengaruhi pelarutan anoda aluminium dan pembentukan koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$, yang berperan dalam penyisihan logam berat Pb, Cd dan Ni. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa peningkatan kerapatan arus dapat meningkatkan pembentukan koagulan dan efisiensi penyisihan, namun juga berpotensi meningkatkan konsumsi energi jika terlalu tinggi. Dengan nilai $26,6 \text{ mA}/\text{cm}^2$, kondisi operasi berada pada rentang optimal. Dalam penelitian ini, kerapatan arus dijaga konstan sehingga analisis difokuskan pada pengaruh variasi pH (3, 5, 7, 9, dan 11) terhadap efisiensi elektrokoagulasi.

Analisa Konsumsi Elektroda

Secara teoritis, konsumsi elektroda dalam proses elektrokoagulasi dapat dihitung berdasarkan Hukum Faraday yang menyatakan bahwa jumlah massa logam yang terlarut sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dialirkan selama proses. Persamaan (3a) yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$m = \frac{I.t.M}{z.F} \quad (3a)$$

Jika dinyatakan dalam satuan per volume larutan, maka konsumsi elektroda dapat dihitung menggunakan persamaan (3b).

$$C_e = m / V \quad (3b)$$

Keterangan :

- m = Massa Elektroda yang Terlarut (gram)
- I = Kuat Arus Listrik (Ampere)
- t = Waktu Operasi (detik)
- M = Massa Molar Logam Elektroda (g/mol)
- z = Jumlah Elektron yang Terlibat Dalam Reaksi (untuk Al = 3, Fe = 2)
- F = Konstanta Faraday (96.500 C/mol elektron)
- C_e = Konsumsi Elektroda per Volume (g/m³)
- V = Volume Air Limbah yang Diolah (m³)

Dalam penelitian ini, perhitungan konsumsi elektroda digunakan untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan material elektroda selama proses elektrokoagulasi dalam menyisihkan logam berat Pb, Cd dan Ni, sehingga dapat diketahui hubungan antara kondisi operasi (arus, waktu dan pH) dengan kebutuhan elektroda serta kinerja proses secara keseluruhan.

Analisa Konsumsi Energi

Konsumsi energi merupakan salah satu parameter penting dalam proses elektrokoagulasi karena berkaitan langsung dengan efisiensi operasi dan biaya pengolahan limbah. Dalam penelitian ini, proses elektrokoagulasi dilakukan menggunakan arus listrik sebesar 4 A dengan waktu operasi selama 60 menit pada volume limbah sebesar 2 L (0,002 m³). Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai konsumsi energi spesifik sebesar 40 kWh/m³. Nilai tersebut menunjukkan besarnya energi listrik yang dibutuhkan untuk mengolah setiap satu meter kubik limbah menggunakan kondisi operasi yang diterapkan pada penelitian ini.

$$E = V \times I \times t \quad (4)$$

Sedangkan konsumsi energi spesifik dihitung menggunakan persamaan (5).

$$E_s = \frac{V \times I \times t}{V_{limbah}} \quad (5)$$

Keterangan:

- E = Konsumsi Energi Listrik (kWh/m³)
- V = Tegangan Listrik (Volt)
- I = Kuat Arus Listrik (Ampere)
- t = Waktu Operasi (jam)
- U = Volume Air Limbah yang Diolah (m³)
- E_s = Konsumsi Energi Spesifik (kWh/m³)
- V_{limbah} = Volume Air Limbah (m³)

Secara mekanisme, peningkatan arus listrik akan meningkatkan jumlah elektron yang mengalir dalam sistem sehingga reaksi oksidasi pada anoda dan reaksi reduksi pada katoda berlangsung lebih cepat. Pada anoda aluminium terjadi pelarutan elektroda yang menghasilkan ion Al³⁺, sedangkan pada katoda terjadi pembentukan ion OH⁻. Ion Al³⁺ kemudian bereaksi dengan ion OH⁻ membentuk *flok* aluminium hidroksida Al(OH)₃ yang berfungsi sebagai koagulan aktif dalam proses elektrokoagulasi. Semakin besar arus listrik yang diberikan, maka jumlah koagulan yang terbentuk juga semakin meningkat sehingga proses destabilisasi partikel, adsorpsi dan pengendapan logam berat Pb, Cd dan Ni berlangsung lebih efektif.

Peningkatan jumlah *flok* Al(OH)₃ mampu mempercepat mekanisme *sweep flocculation* dan adsorpsi ion logam berat, sehingga efisiensi penyisihan kontaminan menjadi lebih tinggi. Akan tetapi, peningkatan arus listrik juga menyebabkan konsumsi energi meningkat karena energi listrik merupakan hasil perkalian antara tegangan, arus dan waktu operasi. Selain itu, semakin lama waktu operasi yang digunakan maka total energi listrik yang dibutuhkan juga akan semakin besar.

Jika ditinjau dari aspek volume pengolahan, nilai konsumsi energi spesifik pada penelitian ini tergolong cukup tinggi. Kondisi tersebut disebabkan penelitian dilakukan pada skala laboratorium dengan volume limbah yang relatif kecil yaitu sebesar 0,002 m³. Pada volume kecil, rasio penggunaan energi terhadap volume limbah menjadi lebih besar sehingga nilai konsumsi energi spesifik meningkat. Pada skala industri, konsumsi energi spesifik umumnya lebih rendah karena volume pengolahan yang lebih besar memungkinkan distribusi energi berlangsung lebih efisien.

Selain konsumsi energi, penelitian ini juga menganalisis konsumsi elektroda selama proses elektrokoagulasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi elektroda pada seluruh variasi pH relatif kecil yang menandakan bahwa proses berlangsung cukup efisien dari aspek penggunaan material elektroda. Perubahan massa elektroda yang terjadi masih berada dalam batas wajar dan dipengaruhi oleh kondisi operasi, seperti pH limbah, besar arus listrik dan waktu reaksi. Semakin tinggi arus listrik dan semakin lama waktu operasi, maka laju pelarutan elektroda cenderung meningkat akibat berlangsungnya reaksi elektrokimia pada permukaan elektroda.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara efisiensi penyisihan logam berat dengan konsumsi energi dan konsumsi elektroda pada proses elektrokoagulasi. Peningkatan arus listrik dapat meningkatkan pembentukan koagulan dan efisiensi penyisihan kontaminan, namun di sisi lain juga meningkatkan kebutuhan energi dan laju konsumsi elektroda. Oleh karena itu, diperlukan optimasi kondisi operasi, khususnya terhadap arus listrik dan waktu reaksi, agar diperoleh kondisi optimum yang mampu menghasilkan efisiensi penyisihan logam berat yang tinggi dengan konsumsi energi dan penggunaan elektroda yang tetap ekonomis serta berkelanjutan.

Biaya Operasional Proses EC

Kinerja proses elektrokoagulasi tidak hanya dievaluasi berdasarkan efisiensi penyisihan pencemar, tetapi juga berdasarkan konsumsi energi listrik dan konsumsi elektroda. Kedua parameter tersebut sangat penting karena berkaitan langsung dengan aspek teknis dan ekonomi dalam penerapan proses elektrokoagulasi [18]. Biaya operasional proses elektrokoagulasi berkaitan langsung dengan besarnya energi listrik yang digunakan selama proses pengolahan limbah. Secara teoretis, biaya operasional dihitung menggunakan persamaan (6).

$$\alpha = E \times T \quad (6)$$

keterangan:

- α = Biaya Operasional (Rp/kWh)
- E = energi listrik yang digunakan (kWh)
- T = tarif listrik (Rp/kWh)

Berdasarkan hasil perhitungan, biaya operasional listrik pada proses elektrokoagulasi dapat ditentukan dari hubungan antara konsumsi energi listrik dan tarif listrik yang berlaku. Dengan penggunaan energi listrik sebesar 40 kWh dan tarif listrik sebesar Rp1.445/kWh, diperoleh biaya operasional sebesar Rp57.800 untuk satu kali proses pengolahan.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan biaya listrik dalam proses elektrokoagulasi relatif masih berada pada kisaran yang terjangkau, terutama jika dikaitkan dengan kemampuan proses dalam menyisihkan kontaminan secara efektif. Hal ini mengindikasikan bahwa metode elektrokoagulasi memiliki potensi yang cukup baik untuk diterapkan sebagai alternatif pengolahan limbah cair dari sisi ekonomi.

Perlu diperhatikan bahwa besarnya biaya operasional sangat dipengaruhi oleh konsumsi

energi listrik yang bergantung pada kondisi operasi, seperti besar arus listrik dan waktu reaksi. Peningkatan kedua parameter tersebut dapat meningkatkan efisiensi penyisihan pencemar, tetapi di sisi lain juga akan meningkatkan biaya operasional. Oleh karena itu, diperlukan optimasi kondisi operasi untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi proses dan biaya yang dikeluarkan.

Selain itu, pada skala laboratorium, biaya operasional per volume limbah cenderung lebih tinggi dibandingkan skala industri. Hal ini disebabkan oleh volume pengolahan yang relatif kecil sehingga distribusi energi menjadi kurang efisien. Dengan demikian, pada skala yang lebih besar, biaya operasional per satuan volume limbah berpotensi menjadi lebih rendah, sehingga metode elektrokoagulasi semakin layak secara ekonomis untuk diterapkan.

Proses elektrokoagulasi yang menghasilkan konsumsi energi sebesar 40 kWh/m³ dapat ditentukan biaya operasional Rp57.788/m³. Nilai ini masih tergolong kompetitif karena tidak memerlukan bahan kimia tambahan, sehingga lebih efisien secara operasional

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa pH merupakan parameter kunci yang secara fundamental mengendalikan kinerja proses elektrokoagulasi dalam penyisihan logam berat Pb, Cd, dan Ni. Variasi pH tidak hanya mempengaruhi efisiensi penyisihan, tetapi juga menentukan mekanisme dominan melalui pengaturan spesiasi aluminium dan pembentukan koagulan aktif Al(OH)₃. Berdasarkan hasil analisis terhadap masing-masing logam secara terpisah, kondisi pH 9 diidentifikasi sebagai pH optimum yang menghasilkan pembentukan *flok* paling stabil dan reaktif sehingga meningkatkan efektivitas mekanisme adsorpsi dan *sweep flocculation*.

Lebih lanjut, hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja penyisihan untuk setiap logam (Pb, Cd, dan Ni) dipengaruhi secara konsisten oleh perubahan pH, meskipun karakteristik penyisihannya dapat berbeda sesuai sifat masing-masing logam. Selain itu, peningkatan efisiensi penyisihan berkorelasi dengan meningkatnya konsumsi energi listrik dan laju pelarutan elektroda yang menunjukkan adanya *trade-off* antara kinerja teknis dan efisiensi

operasional. Hal ini menegaskan pentingnya optimasi parameter operasi secara menyeluruh.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada satu jenis logam atau hanya mengevaluasi efisiensi penyisihan, penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dengan menganalisis pengaruh pH terhadap masing-masing logam secara individual serta mengaitkannya dengan konsumsi energi dan elektroda. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dalam memperkuat pemahaman mekanisme proses sekaligus aspek operasionalnya.

Secara keseluruhan, elektrokoagulasi memiliki potensi yang kuat sebagai metode pengolahan limbah logam berat yang efektif dan berkelanjutan, namun keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada pengendalian parameter operasi, khususnya pH, arus listrik dan waktu reaksi guna mencapai keseimbangan optimal antara efisiensi penyisihan dan kelayakan operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas PGRI Palembang atas dukungan fasilitas penelitian serta kepada dosen pembimbing atas bimbingan yang diberikan.

REFERENSI

- [1] W. Rustiah, I. Musdalifah, D. Arisanti, Muawanah, S. Normawati, and H. Mahdania, "Peningkatan Pemahaman Masyarakat Dan Pencegahan Akan Paparan Logam Berat Terhadap Resiko Penyakit Degeneratif," *Lontara Abdimas J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 6, no. 2, pp. 15–22, 2025, doi: 10.53861/lomas.v6i2.663.
- [2] KLHK, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia," <https://jdih.maritim.go.id/>, pp. 1–83, 2014, [Online]. Available: <https://jdih.maritim.go.id/en/peraturan-menteri-negara-lingkungan-hidup-no-5-tahun-2014>.
- [3] M. Meyrita, F. S. Sandria, I. Najmi, F. Firdus, A. Rizki, and M. Nasir, "Kontaminasi Logam Berat pada Air Sumur Warga Akibat Air Lindi dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)," *J. Teknol. Lingkung. Lahan Basah*, vol. 11, no. 2,

- pp. 425–433, 2023, doi: 10.26418/jtllb.v11i2.64052.
- [4] S. U. Khan *et al.*, "Efficacy of Electrocoagulation Treatment for the Abatement of Heavy Metals: An Overview of Critical Processing Factors, Kinetic Models and Cost Analysis," *Sustain.*, vol. 15, no. 2, 2023, doi: 10.3390/su15021708.
- [5] Z. Al-Qodah and M. Al-Shannag, "Heavy metal ions removal from wastewater using electrocoagulation processes: A comprehensive review," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 17, pp. 2649–2676, 2017, doi: 10.1080/01496395.2017.1373677.
- [6] E. Wiyanto, B. Harsono, A. Makmur, R. Pangputra, J. Julita, and M. S. Kurniawan, "Penerapan Elektrokoagulasi Dalam Proses Penjernihan Limbah Cair," *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, no. October, 2017, doi: 10.25105/jetri.v12i1.1449.
- [7] N. H. A. Hamid *et al.*, "A state-of-art review on the sustainable technologies for cadmium removal from wastewater," *Water Reuse*, vol. 14, no. 3, pp. 312–341, 2024, doi: 10.2166/wrd.2024.143.
- [8] Kobya, "Treatment performance and energy consumption of electrocoagulation process for heavy metals removal," *J. Environ. Manage.*, vol. 237, pp. 386–494, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101373>.
- [9] U. Fadilah *et al.*, "Greensphere ;," *J. Environ. Chem.*, vol. 3, no. 1, pp. 26–31, 2023, doi: doi.org/10.14710/gjec.2023.19363.
- [10] F. Y. AlJaberi and Z. A. Hawaas, "Electrocoagulation removal of Pb, Cd, and Cu ions from wastewater using a new configuration of electrodes," *MethodsX*, vol. 10, no. September 2022, p. 101951, 2023, doi: 10.1016/j.mex.2022.101951.
- [11] L. S. Romadhona, S. Radinta, S. T. Kholisoh, and T. Mahargiani, "Penurunan Kadar Krom (Cr) dalam Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit dengan Metode Elektrokoagulasi secara Batch," *Pros. Semin. Nas. Tek. Kim. Kejuangan*, no. 51, pp. 1–7, 2016. <https://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/kejuangan/article/view/1565>.
- [12] M. A. Mahtab, A. Bari, S. Khan, M. Ahteshaam, S. U. Khan, and I. H. Farooqi, "Nickel (II) removal from real electroplating wastewater in an electrocoagulation reactor: parametric optimization by response surface methodology," *Water Sci. Technol.*, vol. 90, no. 8, pp. 2266–2275, 2024, doi: 10.2166/wst.2024.331.

- [13] C. O. Handayani, Sukarjo, and T. Dewi, "Distribusi Logam Berat Pb, Cd, Cr, Ni dan Risiko Kesehatan Akibat Paparan Logam Berat Melalui Saluran Pencernaan di Lahan Sawah Sekitar Kawasan Industri Kabupaten Bandung," *J. Tanah dan Iklim*, vol. 46, no. 1, pp. 47–59, 2022, doi: 10.21082/jti.v46n1.2022.47-59.
- [14] D. T. et al. Moussa, "A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment," *J. Environ. Manage.*, vol. 186, pp. 26–41, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>
- [15] M. alameen Salem and N. Majeed, "Removal of Cadmium from Industrial Wastewater using Electrocoagulation Process," *J. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 24–34, 2019, doi: 10.31026/j.eng.2020.01.03.
- [16] O. A. Shaker, S. M. Safwat, and M. E. Matta, "Nickel removal from wastewater using electrocoagulation process with zinc electrodes under various operating conditions: performance investigation, mechanism exploration, and cost analysis," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 26650–26662, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-24101-6.
- [17] T. K. C. Phu, P. L. Nguyen, and T. V. B. Phung, "Recent progress in highly effective electrocoagulation-coupled systems for advanced wastewater treatment," *iScience*, vol. 28, no. 3, p. 111965, 2025, doi: 10.1016/j.isci.2025.111965.
- [18] M. Ebba, P. Asaithambi, and E. Alemayehu, "Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation process for wastewater treatment," *Appl. Water Sci.*, vol. 11, no. 11, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01517-y.