

PERBANDINGAN ELEKTRODA Fe-SS DAN Al-SS DALAM MENURUNKAN TSS DAN KEKERUHAN LIMBAH LAUNDRY MELALUI PROSES ELEKTROKOAGULASI

Diana Novita Sari, Prayitno, Aisyah Meuthiara Aqiyla, Mirza Nafidz Ramadhan,
Quenessindy Ulfa Aulia, Saiful Efendi, Shafana Senjakyla, Yunia Tri Winata

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

*Corresponding author: Diana Novita Sari

*Email: diana.novita@polinema.ac.id

Abstrak

Limbah cair *laundry* mengandung padatan tersuspensi dan partikel koloid yang menyebabkan tingginya nilai *total suspended solids* (TSS) dan kekeruhan, sehingga berpotensi mencemari lingkungan apabila dibuang tanpa pengolahan yang memadai. Elektrokoagulasi merupakan metode pengolahan limbah cair yang memanfaatkan pembentukan koagulan secara elektrokimia dari elektroda logam untuk menyisihkan partikel pencemar. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja elektroda besi–*stainless steel* (Fe–SS) dan aluminium–*stainless steel* (Al–SS) dalam menurunkan TSS dan kekeruhan limbah *laundry*. Proses elektrokoagulasi dilakukan pada skala laboratorium dengan variasi tegangan 1,5; 3; dan 4,5 V serta waktu kontak hingga 60 menit pada kondisi pH netral. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tegangan dan waktu kontak meningkatkan efisiensi penurunan TSS dan kekeruhan pada kedua jenis elektroda. Pada kondisi optimum, yaitu tegangan 4,5 V dan waktu kontak 60 menit, elektroda Fe–SS mampu menurunkan TSS hingga 67,14% dan kekeruhan sebesar 54,55%, sedangkan elektroda Al–SS menghasilkan efisiensi penurunan TSS sebesar 64,29% dan kekeruhan hingga 62,68%. Perbedaan kinerja ini berkaitan dengan karakteristik koagulan yang terbentuk selama proses elektrokoagulasi. Elektroda Fe–SS menghasilkan flok $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang lebih padat dan berat sehingga lebih efektif mengendapkan padatan tersuspensi penyumbang TSS. Sebaliknya, elektroda Al–SS menghasilkan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang bersifat amorf dengan luas permukaan lebih besar, sehingga lebih efektif mengadsorpsi partikel koloid halus penyebab kekeruhan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis elektroda berpengaruh terhadap parameter pencemar yang dapat disisihkan secara optimal pada pengolahan limbah *laundry*.

Kata kunci : elektrokoagulasi, Fe-SS, Al-SS, *Total Suspended Solid*, kekeruhan

Abstract

Laundry wastewater contains suspended solids and colloidal particles that lead to high levels of total suspended solids (TSS) and turbidity, which may cause environmental pollution if discharged without proper treatment. Electrocoagulation is a wastewater treatment method that utilizes the in situ formation of coagulants through electrochemical reactions at metal electrodes. This study aims to compare the performance of iron–stainless steel (Fe–SS) and aluminum–stainless steel (Al–SS) electrodes in reducing TSS and turbidity in laundry wastewater. Electrocoagulation experiments were conducted at laboratory scale using voltage variations of 1.5, 3, and 4.5 V with a contact time of up to 60 minutes under neutral pH conditions. The results show that increasing voltage and contact time improved the removal efficiency of both TSS and turbidity for both electrode configurations. Under optimum conditions (4.5 V and 60 minutes), the Fe–SS electrode achieved a TSS removal efficiency of 67.14% and a turbidity reduction of 54.55%, while the Al–SS electrode resulted in a TSS removal of 64.29% and a turbidity reduction of 62.68%. These differences are attributed to the characteristics of the generated coagulants during the electrocoagulation process. The Fe–SS electrode produces $\text{Fe}(\text{OH})_3$ flocs that are denser and heavier, making them more effective in settling suspended solids contributing to TSS. In contrast, the Al–SS electrode forms amorphous $\text{Al}(\text{OH})_3$ with a larger surface area, which enhances the adsorption of fine

colloidal particles responsible for turbidity. This study indicates that electrode selection influences the effectiveness of pollutant removal in laundry wastewater electrocoagulation.

Keywords : electrocoagulation, Fe-SS, Al-SS, Total Suspended Solid, turbidity

Pendahuluan

Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas domestik di kawasan perkotaan dan wilayah sekitarnya berbanding lurus dengan meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap berbagai jasa penunjang kehidupan sehari-hari, salah satunya adalah jasa pencucian pakaian atau *laundry*. Perubahan gaya hidup masyarakat yang menuntut kepraktisan serta keterbatasan waktu mendorong pertumbuhan usaha *laundry* skala rumah tangga hingga komersial, yang pada akhirnya berdampak pada meningkatnya volume limbah cair yang dihasilkan setiap hari. Beberapa studi melaporkan bahwa air limbah *laundry* merupakan salah satu komponen utama *domestic greywater* yang volumenya cukup signifikan dibandingkan sumber limbah domestik lainnya (López Zavala & Estrada, 2016; Procházková & Máša, 2022).

Limbah cair *laundry* memiliki karakteristik pencemar yang khas dan berbeda dari limbah domestik biasa. Air limbah ini umumnya mengandung padatan tersuspensi (*total suspended solids*, TSS), residu deterjen, surfaktan anionik dan nonionik, serta partikel koloid halus yang berkontribusi terhadap tingginya nilai kekeruhan. López Zavala & Estrada melaporkan bahwa penggunaan deterjen pada proses pencucian pakaian berkontribusi signifikan terhadap peningkatan TSS dan komponen surfaktan pada *laundry greywater*. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa kekeruhan pada limbah *laundry* terutama disebabkan oleh keberadaan partikel koloid halus yang stabil secara kimia dan sulit dihilangkan dengan proses pengolahan sederhana (Yaseen et al., 2019).

Apabila limbah *laundry* dibuang langsung ke badan air tanpa pengolahan yang memadai, dampak negatif terhadap lingkungan perairan tidak dapat dihindari. Kandungan TSS dan kekeruhan yang tinggi dapat mengganggu penetrasi cahaya ke dalam air, sehingga menghambat proses fotosintesis organisme akuatik (Gupta & Nafees, 2022). Selain itu, akumulasi senyawa pencemar seperti surfaktan dan bahan organik terlarut dapat mengubah karakter fisik dan kimia perairan serta menurunkan kualitas ekosistem secara keseluruhan (Bashir et al., 2020). Oleh karena itu,

pengolahan limbah *laundry* sebelum dibuang ke lingkungan menjadi kebutuhan yang mendesak.

Pada praktiknya, pengolahan limbah *laundry* di tingkat masyarakat hingga usaha kecil masih didominasi oleh metode konvensional, seperti pengendapan sederhana, filtrasi, atau pengenceran sebelum pembuangan. Metode-metode tersebut relatif mudah diterapkan dan membutuhkan biaya operasional yang rendah. Namun, efektivitasnya dalam menyisihkan partikel koloid dan padatan halus sering kali terbatas, sehingga efluen yang dihasilkan masih memiliki nilai TSS dan kekeruhan yang tinggi dan berpotensi tidak memenuhi baku mutu lingkungan. Penggunaan koagulasi kimia dengan penambahan koagulan eksternal, seperti tawas atau besi klorida, dapat meningkatkan efisiensi pengolahan, tetapi pendekatan ini memiliki kelemahan berupa kebutuhan bahan kimia tambahan, peningkatan volume lumpur, serta potensi residu kimia pada air hasil olahan (Aragaw & Bogale, 2023; Diver et al., 2023; Melián et al., 2023).

Elektrokoagulasi berkembang sebagai alternatif teknologi pengolahan limbah cair yang lebih sederhana dan fleksibel dibandingkan metode konvensional. Proses elektrokoagulasi memanfaatkan arus listrik searah untuk melarutkan elektroda logam aktif sehingga menghasilkan koagulan secara *in situ*. Ion logam yang dilepaskan dari anoda selanjutnya bereaksi dengan air membentuk hidroksida logam yang berperan dalam mendestabilisasi muatan partikel, mengadsorpsi senyawa pencemar, dan membentuk flok yang dapat dipisahkan melalui pengendapan atau flotasi akibat pembentukan gas hidrogen di katoda (Al-Ajmi et al., 2025; Joning et al., 2022). Kombinasi mekanisme elektrokimia dan fisik ini menjadikan elektrokoagulasi efektif untuk mengolah limbah dengan karakter kompleks, termasuk limbah *laundry*.

Kinerja proses elektrokoagulasi dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi, antara lain jenis elektroda, besar tegangan atau densitas arus listrik, waktu kontak, pH, serta konduktivitas larutan. Parameter-parameter tersebut menentukan laju reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan elektroda serta mempengaruhi jumlah dan karakteristik koagulan yang terbentuk selama proses berlangsung. Secara umum, arus listrik searah yang dialirkan ke dalam sistem akan menyebabkan terjadinya reaksi oksidasi pada anoda dan reaksi reduksi pada katoda, yang menjadi dasar utama

mekanisme elektrokoagulasi (Boinpally et al., 2023; López-Guzmán et al., 2021; Medina Collana et al., 2024).

Pada elektroda anoda, logam aktif mengalami pelarutan elektrokimia dan melepaskan ion logam ke dalam larutan. Ion-ion logam ini kemudian bereaksi dengan air membentuk spesies hidroksida logam yang berperan sebagai koagulan. Sementara itu, pada elektroda katoda terjadi reaksi reduksi air yang menghasilkan gas hidrogen dan ion hidroksida. Gas hidrogen yang terbentuk dapat membantu proses pemisahan flok melalui mekanisme flotasi, sedangkan ion hidroksida berperan dalam menjaga kondisi reaksi yang mendukung pembentukan hidroksida logam. Kombinasi reaksi oksidasi–reduksi inilah yang membedakan elektrokoagulasi dari koagulasi kimia konvensional (Ammar et al., 2023; Amri et al., 2020).

Jenis elektroda yang digunakan menentukan spesies ion logam dan hidroksida yang terbentuk, sehingga mempengaruhi mekanisme interaksi antara koagulan dan partikel pencemar. Elektroda besi dan aluminium merupakan material yang paling umum digunakan karena sifat elektrokimianya yang sesuai serta ketersediaannya yang relatif mudah. Masing-masing material elektroda memiliki karakteristik reaksi dan produk elektrokimia yang berbeda, sehingga pemilihan elektroda menjadi aspek penting dalam perancangan proses elektrokoagulasi untuk berbagai jenis limbah cair.

Dari sisi aplikasi, elektrokoagulasi memiliki sejumlah kelebihan dibandingkan metode konvensional, antara lain tidak memerlukan penambahan koagulan kimia eksternal, proses yang relatif sederhana, serta fleksibilitas dalam pengoperasian. Namun demikian, metode ini juga memiliki beberapa keterbatasan, seperti kebutuhan energi listrik, kemungkinan terjadinya pasivasi elektroda, serta pembentukan lumpur yang tetap memerlukan penanganan lanjutan. Oleh karena itu, pemahaman yang baik terhadap mekanisme reaksi, peran elektroda, serta faktor operasi sangat diperlukan sebelum elektrokoagulasi diterapkan sebagai teknologi pengolahan limbah cair (Alazaiza et al., 2022; Al-Marri et al., 2023).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh material elektroda terhadap kinerja elektrokoagulasi pada limbah *laundry* dan limbah domestik sejenis. Tabash et al. (2024) meneliti optimasi proses elektrokoagulasi berbasis besi untuk pengolahan *laundry greywater*, yang dilaporkan menyumbang hingga 38% dari total *domestic*

greywater dan memiliki karakteristik pencemar kompleks berupa surfaktan, deterjen, serta padatan tersuspensi. Dalam penelitian tersebut digunakan pendekatan *response surface methodology* (RSM) untuk mengevaluasi pengaruh rasio luas permukaan elektroda terhadap volume reaktor (A/V), densitas arus listrik, waktu elektrolisis, dan waktu pengendapan terhadap kinerja pengolahan. Hasil optimasi menunjukkan bahwa kondisi operasi terbaik dicapai pada rasio A/V $30 \text{ m}^2/\text{m}^3$, densitas arus $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$, waktu elektrolisis 50 menit, dan waktu pengendapan 12 jam, dengan efisiensi penyisihan kekeruhan mencapai 94,26% dan COD sebesar 99,64%. Model regresi yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi yang sangat baik untuk prediksi kekeruhan ($R^2 = 94,16\%$) dan cukup baik untuk COD ($R^2 = 75,90\%$), serta menunjukkan bahwa interaksi antara rasio A/V dan waktu elektrolisis merupakan faktor dominan dalam menentukan kinerja sistem elektrokoagulasi, sehingga menegaskan pentingnya optimasi parameter operasi dalam perancangan sistem pengolahan limbah *laundry* yang efisien dan berkelanjutan.

Riyanto & Hidayatillah (2014) telah mengkaji penerapan elektrokoagulasi untuk pengolahan limbah deterjen dengan menggunakan elektroda aluminium berbentuk *wire netting*. Dalam penelitian tersebut, proses elektrokoagulasi dilakukan menggunakan sistem dua elektroda, di mana aluminium *wire netting* berfungsi sebagai anoda dan katoda. Limbah deterjen yang digunakan dikarakterisasi berdasarkan konsentrasi *chemical oxygen demand* (COD) serta spektrum serapan menggunakan spektrofotometer UV–Visible. Percobaan elektrokoagulasi dilakukan dalam sel elektrokimia berisi 100 mL limbah deterjen tanpa penambahan elektrolit pendukung, dengan variasi tegangan listrik sebesar 5, 10, 15, dan 20 V serta variasi waktu elektrolisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan elektroda aluminium *wire netting* mampu menghasilkan tingkat degradasi limbah deterjen yang tinggi, sehingga menegaskan potensi material elektroda aluminium dalam meningkatkan efektivitas proses elektrokoagulasi untuk pengolahan limbah yang mengandung deterjen.

Hermida et al. (2024) melakukan penelitian proses elektrokoagulasi untuk pengolahan limbah cair *laundry* menggunakan reaktor *batch recycle* dengan enam elektroda aluminium yang disusun secara bipolar. Penelitian tersebut memfokuskan pada pengaruh variasi parameter operasi, khususnya tegangan listrik dan kondisi pH

limbah, terhadap kinerja penyisihan kekeruhan, *chemical oxygen demand* (COD), dan fosfat. Untuk menentukan kondisi operasi yang paling efektif, digunakan rancangan percobaan *fractional factorial Taguchi*, sehingga pengaruh masing-masing parameter dapat dievaluasi secara sistematis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan listrik merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap efisiensi penurunan kekeruhan, COD, dan fosfat, demikian pula pengaturan pH limbah pada nilai 4, 6, dan 8 yang secara signifikan mempengaruhi kinerja proses. Kondisi operasi optimum dilaporkan tercapai pada tegangan listrik 13,8 V dengan jarak antar elektroda 0,5 cm, pH 4, laju alir 800 L/jam, dan waktu pengolahan selama 2 jam. Pada kondisi tersebut, proses elektrokoagulasi mampu menurunkan kekeruhan hingga 93,53%, COD sebesar 75%, dan fosfat mencapai 95,06%, yang menunjukkan potensi elektroda aluminium dalam meningkatkan efektivitas pengolahan limbah cair *laundry*.

Penelitian eksperimental lain oleh Ammar et al. (2023) mengevaluasi pengaruh jenis elektroda, tegangan, dan waktu kontak terhadap kinerja elektrokoagulasi pada air limbah sintesis. Studi tersebut menggunakan elektroda besi dan aluminium dengan konfigurasi identik dan melaporkan bahwa efisiensi penyisihan polutan meningkat seiring bertambahnya waktu kontak, dengan kondisi optimum umumnya dicapai pada 40–60 menit. Namun demikian, sebagian besar studi yang mereka tinjau menggunakan tegangan relatif tinggi (>10 V), yang meskipun menghasilkan efisiensi tinggi, berdampak pada konsumsi energi yang signifikan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, elektroda besi dan aluminium menunjukkan karakteristik kinerja yang berbeda, yang dipengaruhi oleh jenis parameter pencemar serta kondisi operasi yang diterapkan. Meskipun demikian, kajian komparatif yang mengevaluasi kinerja elektroda besi–*stainless steel* (Fe–SS) dan aluminium–*stainless steel* (Al–SS) pada kondisi operasi yang sama masih terbatas, terutama pada penggunaan tegangan rendah dan pengamatan pengaruh waktu kontak secara bertahap. Keterbatasan ini menunjukkan adanya kebutuhan penelitian yang secara sistematis membandingkan kedua konfigurasi elektroda tersebut dalam pengolahan limbah *laundry*. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perbandingan kinerja elektroda Fe–SS dan Al–SS melalui proses elektrokoagulasi skala laboratorium, dengan mengevaluasi pengaruh variasi tegangan listrik sebesar 1,5; 3; dan 4,5 V serta

waktu kontak hingga 60 menit terhadap efisiensi penyisihan TSS dan kekeruhan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah dalam menentukan pemilihan jenis elektroda dan kondisi operasi yang lebih efektif dan efisien untuk aplikasi pengolahan limbah *laundry*.

Metode

Alat dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi reaktor elektrokoagulasi skala laboratorium dengan sistem *batch*, sumber arus searah (DC *power supply*) untuk pengaturan tegangan proses, serta seperangkat elektroda besi–*stainless steel* (Fe–SS) dan aluminium–*stainless steel* (Al–SS). Peralatan analisis meliputi turbidimeter untuk pengukuran kekeruhan, perangkat filtrasi vakum yang dilengkapi kertas saring, oven pengering, desikator, neraca analitik, serta pH meter digital. Peralatan pendukung lainnya meliputi gelas beker, gelas ukur, dan *stopwatch*.

Bahan utama yang digunakan adalah limbah cair *laundry* yang diperoleh dari usaha jasa pencucian pakaian skala kecil. Limbah digunakan sebagai sampel uji tanpa penambahan elektrolit pendukung. Akuades digunakan untuk keperluan pembilasan peralatan, sedangkan larutan asam atau basa digunakan bila diperlukan untuk penyesuaian pH awal sampel.

Desain Percobaan

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental menggunakan reaktor elektrokoagulasi skala laboratorium untuk membandingkan kinerja dua konfigurasi elektroda, yaitu Fe–SS dan Al–SS, dalam menurunkan parameter *total suspended solids* (TSS) dan kekeruhan limbah *laundry*. Setiap percobaan menggunakan volume limbah sebesar 5 L. Sebelum proses elektrokoagulasi dilakukan, limbah *laundry* yang memiliki pH awal sebesar 10 disesuaikan menjadi pH 7 menggunakan penambahan larutan asam agar kondisi operasi pada seluruh perlakuan tetap seragam.

Elektroda dipasang secara vertikal di dalam reaktor dan dihubungkan dengan sumber arus searah. Proses elektrokoagulasi dijalankan dengan variasi tegangan listrik sebesar 1,5; 3; dan 4,5 V. Waktu kontak divariasikan hingga 60 menit, dengan

pengambilan sampel secara berkala setiap 10 menit. Sampel diambil dari bagian tengah reaktor untuk dianalisis parameter TSS dan kekeruhan.

Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi jenis elektroda (Fe–SS dan Al–SS), tegangan listrik (1,5; 3; dan 4,5 V), serta waktu kontak hingga 60 menit. Variabel kontrol meliputi pH limbah (dipertahankan pada pH 7), volume limbah (5 L), dan suhu lingkungan. Variabel terikat yang diamati adalah penurunan TSS dan kekeruhan.

Setiap kondisi perlakuan dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan ($n = 3$), dan hasil yang disajikan merupakan nilai rata-rata pengukuran. Variabilitas data dinyatakan dalam bentuk standar deviasi dan ditampilkan pada grafik menggunakan *error bar* untuk menunjukkan reliabilitas hasil percobaan.

Analisis Statistik

Data hasil penelitian dianalisis menggunakan analisis varians dua arah (*Two-Way ANOVA*) pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$) untuk mengevaluasi pengaruh jenis elektroda dan tegangan terhadap konsentrasi TSS dan kekeruhan akhir limbah *laundry*. Sebelum analisis dilakukan, asumsi homogenitas varians diuji menggunakan uji Levene.

Analisis Kekeruhan

Analisis kekeruhan dilakukan menggunakan metode turbidimetri. Turbidimeter dikalibrasi terlebih dahulu menggunakan standar sesuai rentang pengukuran. Sampel dimasukkan ke dalam kuvet, kemudian diukur nilai kekeruhannya. Hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan NTU.

Analisis *Total Suspended Solids* (TSS)

Analisis TSS dilakukan menggunakan metode gravimetri. Kertas saring dikeringkan pada suhu 105°C hingga berat konstan, kemudian digunakan untuk menyaring sampel limbah sebanyak 30 mL. Kertas saring yang mengandung padatan dikeringkan kembali hingga berat konstan. Nilai TSS ditentukan berdasarkan selisih massa kertas saring sebelum dan sesudah penyaringan.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Limbah *Laundry* Awal

Karakteristik awal limbah *laundry* menjadi dasar penting dalam mengevaluasi keberhasilan proses elektrokoagulasi, karena nilai awal parameter pencemar menentukan tingkat pengolahan yang harus dicapai. Sampel limbah yang digunakan dalam penelitian ini diambil pada tahap pencucian utama (*washing stage*), yaitu fase yang umumnya menghasilkan konsentrasi pencemar tertinggi. Secara visual, limbah tampak sangat keruh dan berwarna keabu-abuan, disertai busa tipis di permukaan yang mengindikasikan keberadaan surfaktan dan deterjen.

Hasil pengukuran awal menunjukkan bahwa limbah *laundry* memiliki nilai *total suspended solids* (TSS) sebesar 700 mg/L dan kekeruhan sebesar 418 NTU. Nilai ini tergolong sangat tinggi dan mencerminkan keberadaan padatan tersuspensi, partikel koloid halus, serta residu deterjen dan kotoran pakaian yang terlepas selama proses pencucian. Padatan tersebut berasal dari serat kain, debu, dan material organik, sedangkan partikel koloid umumnya distabilkan oleh surfaktan sehingga sulit mengendap secara alami.

Nilai pH awal limbah *laundry* sebelum perlakuan tercatat sebesar 10, yang menunjukkan karakter limbah bersifat basa akibat kandungan deterjen dan surfaktan dari proses pencucian pakaian. Sebelum proses elektrokoagulasi dilakukan, pH limbah disesuaikan menjadi pH 7 menggunakan penambahan larutan asam agar kondisi operasi pada seluruh perlakuan tetap seragam dan mendukung pembentukan hidroksida logam selama proses elektrokoagulasi.

Penelitian ini difokuskan pada parameter *total suspended solids* (TSS) dan kekeruhan karena kedua parameter tersebut merepresentasikan keberadaan padatan tersuspensi dan partikel koloid yang dominan pada limbah *laundry*. Selain itu, tujuan utama penelitian adalah membandingkan kemampuan elektroda Fe–SS dan Al–SS dalam proses destabilisasi partikel dan pembentukan flok selama elektrokoagulasi.

Parameter lain seperti COD, BOD, surfaktan, TDS, dan fosfat belum dianalisis pada penelitian ini sehingga karakteristik limbah belum dievaluasi secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengkaji pengaruh elektrokoagulasi terhadap parameter pencemar lainnya pada limbah *laundry*.

Jika dibandingkan dengan baku mutu air limbah untuk kegiatan yang menghasilkan beban padatan tinggi, seperti industri tekstil, nilai TSS yang diperbolehkan umumnya berada pada kisaran 50 mg/L. Dengan kondisi awal sebesar 700 mg/L, maka diperlukan penurunan TSS sekitar 92,9% agar limbah memenuhi ambang tersebut. Untuk parameter kekeruhan, meskipun tidak terdapat satu nilai baku yang seragam, pelepasan efluen ke badan air umumnya disyaratkan tidak menyebabkan peningkatan kekeruhan yang signifikan, dan pada banyak aplikasi nilai kekeruhan target berada di bawah 25 NTU. Dengan kekeruhan awal 418 NTU, maka diperlukan efisiensi penurunan sekitar 94% agar limbah dapat dianggap aman untuk dibuang ke lingkungan perairan.

Tingginya TSS dan kekeruhan menunjukkan bahwa limbah *laundry* memiliki karakter yang sulit diolah dengan metode konvensional sederhana, seperti pengendapan alami atau filtrasi. Keberadaan surfaktan memperkuat stabilitas partikel koloid dengan membentuk lapisan bermuatan di permukaan partikel, sehingga partikel-partikel tersebut tetap terdispersi dalam air. Kondisi ini menyebabkan proses penggumpalan alami menjadi tidak efektif, dan diperlukan mekanisme destabilisasi muatan untuk memungkinkan partikel saling berikatan dan membentuk flok yang dapat dipisahkan.

Selain berdampak pada kualitas visual air, padatan tersuspensi dalam jumlah tinggi juga berpotensi menurunkan penetrasi cahaya di badan air penerima, mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik, serta menyebabkan pengendapan sedimen di dasar perairan. Oleh karena itu, limbah *laundry* dengan karakteristik seperti ini tidak dapat dibuang langsung tanpa pengolahan yang memadai, karena berisiko menurunkan kualitas lingkungan perairan.

Berdasarkan kondisi awal tersebut, elektrokoagulasi dipilih sebagai metode pengolahan karena mampu menghasilkan koagulan secara langsung di dalam sistem melalui pelarutan elektroda. Ion logam yang terbentuk akan bereaksi dengan air membentuk hidroksida logam yang berfungsi menetralkan muatan partikel, mengadsorpsi kontaminan, dan membentuk flok berukuran lebih besar. Flok ini selanjutnya dapat dipisahkan melalui pengendapan atau flotasi. Dengan karakteristik

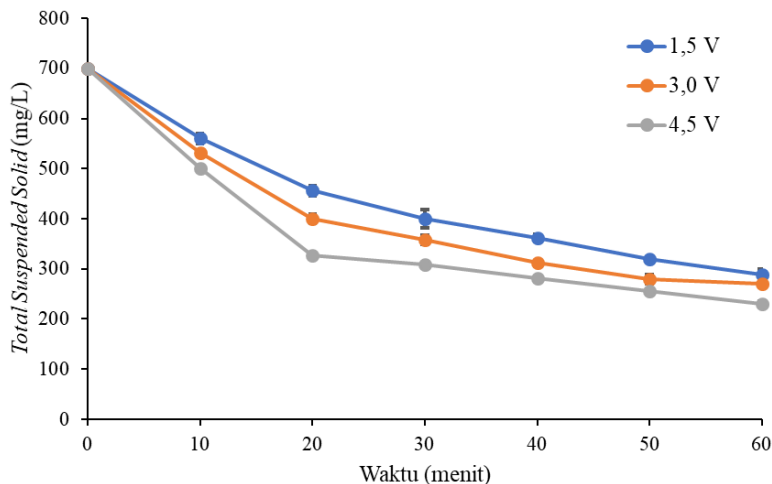
limbah *laundry* yang kaya akan partikel koloid dan padatan tersuspensi, pendekatan ini dinilai lebih sesuai dibandingkan metode konvensional.

Nilai TSS dan kekeruhan awal yang tinggi juga menjadi acuan dalam mengevaluasi kinerja konfigurasi elektroda Fe–SS dan Al–SS pada berbagai variasi tegangan dan waktu kontak. Seluruh hasil pengolahan selanjutnya dibandingkan terhadap kondisi awal ini, sehingga efektivitas masing-masing elektroda dalam menurunkan TSS dan kekeruhan dapat dianalisis secara objektif dan aplikatif untuk pengolahan limbah *laundry* skala kecil.

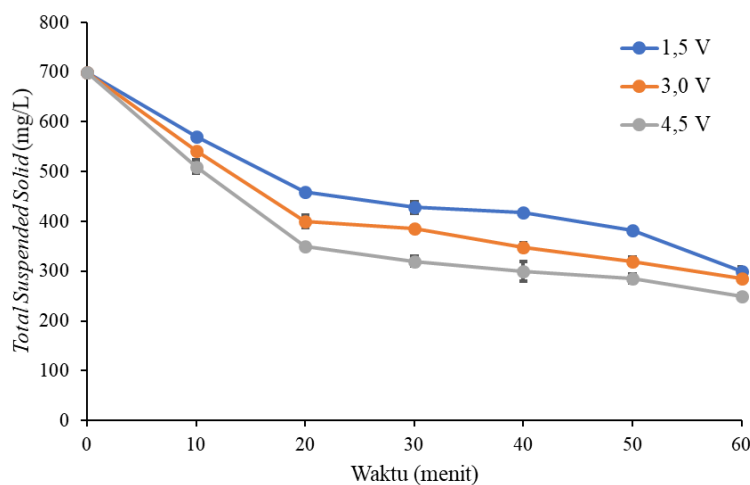
Pengaruh Tegangan dan Waktu Kontak terhadap Penurunan *Total Suspended Solids* (TSS)

Parameter *total suspended solids* (TSS) digunakan sebagai indikator utama keberhasilan proses elektrokoagulasi dalam menyisihkan padatan tersuspensi dari limbah *laundry*. Dengan konsentrasi awal sebesar 700 mg/L, evaluasi perubahan TSS pada berbagai variasi tegangan dan waktu kontak menjadi penting untuk menentukan kondisi operasi yang paling efektif sekaligus aplikatif untuk skala kecil.

Perubahan konsentrasi TSS selama proses elektrokoagulasi ditunjukkan pada Gambar 1(a) untuk elektroda Fe–SS dan Gambar 1(b) untuk Al–SS. Secara umum, TSS menurun seiring bertambahnya waktu kontak dan peningkatan tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan koagulan berlangsung secara progresif, sehingga meningkatkan penyisihan partikel tersuspensi. *Error bar* pada Gambar 1 menunjukkan nilai standar deviasi dari tiga kali pengulangan percobaan. Secara umum, ukuran *error bar* yang relatif kecil menunjukkan bahwa hasil pengukuran memiliki tingkat variasi yang rendah dan reproduktibilitas yang baik, sehingga tren penurunan TSS yang diamati dapat dianggap konsisten antar pengulangan.



(a)



(b)

Gambar 1. Pengaruh tegangan dan waktu kontak terhadap konsentrasi TSS menggunakan elektroda (a) Fe-SS dan (b) Al-SS. Data merupakan rata-rata dari tiga kali pengulangan ($n = 3$), sedangkan *error bar* menunjukkan standar deviasi

Pada konfigurasi Fe-SS, penurunan TSS berlangsung cepat pada 30 menit pertama, terutama pada tegangan yang lebih tinggi, kemudian cenderung melambat. Pada tegangan 1,5 V, TSS menurun hingga sekitar 210–250 mg/L pada menit ke-60 dengan efisiensi $\pm 58,71\%$. Peningkatan tegangan menjadi 3 V dan 4,5 V meningkatkan efisiensi menjadi sekitar 61,29% dan 67,14%.

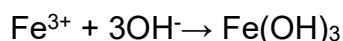
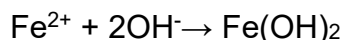
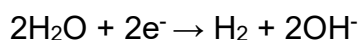
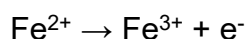
Pada konfigurasi Al–SS, penurunan TSS menunjukkan pola yang serupa, yaitu dipengaruhi oleh waktu kontak dan tegangan. Efisiensi penyisihan pada tegangan 1,5 V sebesar 57,14%, kemudian meningkat menjadi 59,29% pada 3 V dan mencapai 64,29% pada 4,5 V.

Tabel 1. Hasil analisis varians dua arah (*Two-Way ANOVA*) terhadap konsentrasi TSS

Faktor	F	p-value	Keterangan
Elektroda	19,286	<0,001	Signifikan
Tegangan	89,267	<0,001	Signifikan
Elektroda × Tegangan	0,600	0,564	Tidak signifikan

Berdasarkan Tabel 1, hasil analisis varians dua arah (*Two-Way ANOVA*) menunjukkan bahwa jenis elektroda dan tegangan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap konsentrasi TSS ($p < 0,001$). Tegangan memberikan pengaruh yang lebih dominan dibandingkan jenis elektroda dengan nilai F masing-masing sebesar 89,267 dan 19,286. Sebaliknya, interaksi antara jenis elektroda dan tegangan tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap TSS ($p = 0,564$), yang mengindikasikan bahwa peningkatan tegangan memberikan pola pengaruh yang relatif serupa pada kedua jenis elektroda.

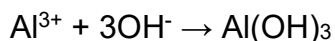
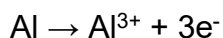
Perbedaan kinerja kedua konfigurasi elektroda ini berkaitan erat dengan mekanisme pembentukan koagulan. Pada elektroda besi, pelarutan anoda menghasilkan ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} yang selanjutnya bereaksi dengan ion hidroksida membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_2$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$:



Hidroksida besi yang terbentuk cenderung menghasilkan flok yang padat dan bermassa relatif besar, sehingga efektif menjebak padatan tersuspensi melalui mekanisme *sweep flocculation*. Flok ini juga mudah mengendap, yang menjelaskan mengapa Fe–SS

menunjukkan penurunan TSS yang lebih cepat dan lebih besar, terutama pada fase awal proses.

Pada elektroda aluminium, reaksi utama yang terjadi adalah:



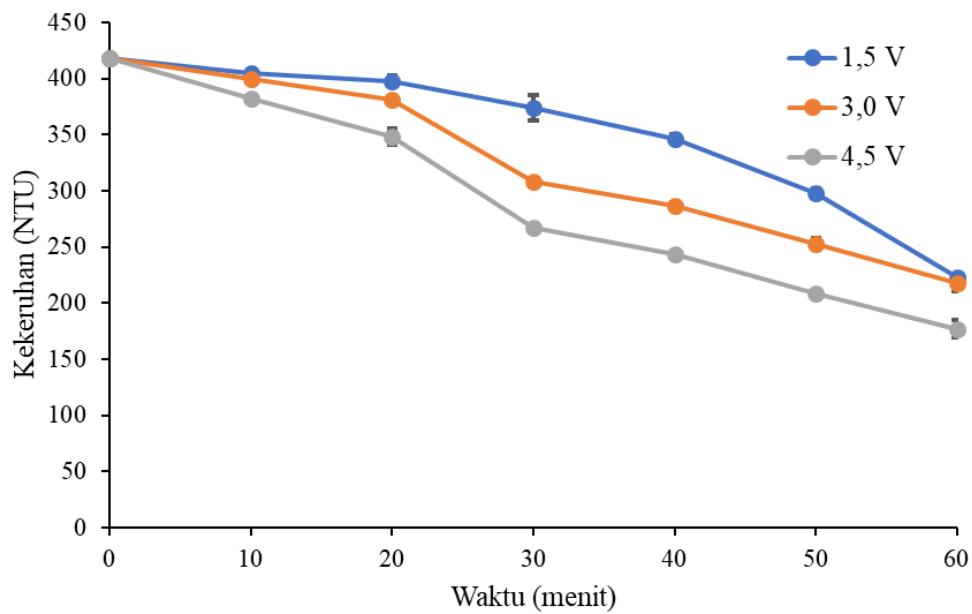
Produk $\text{Al}(\text{OH})_3$ bersifat amorf dan memiliki luas permukaan besar, sehingga sangat efektif untuk mengadsorpsi partikel koloid halus. Namun, flok aluminium yang terbentuk relatif lebih ringan dibandingkan flok besi, sehingga kontribusinya terhadap penghilangan padatan tersuspensi berukuran mikro berlangsung lebih lambat. Hal ini menjelaskan mengapa Al-SS lebih unggul dalam penurunan kekeruhan, tetapi kurang efektif dibandingkan Fe-SS dalam menurunkan TSS (Ghernaout et al., 2019).

Pembentukan $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, dan $\text{Al}(\text{OH})_3$ selama proses elektrokoagulasi diperkirakan terjadi melalui mekanisme yang telah banyak dilaporkan dalam literatur. Spesies hidroksida tersebut berperan sebagai koagulan yang membantu proses netralisasi muatan, adsorpsi, dan pembentukan flok sehingga mendukung penyisihan kontaminan dari limbah *laundry*. Meskipun demikian, penelitian ini tidak melakukan karakterisasi flok sehingga keberadaan spesies hidroksida yang terbentuk tidak dapat dikonfirmasi secara langsung. Oleh karena itu, interpretasi mekanisme pada penelitian ini digunakan untuk menjelaskan kecenderungan hasil yang diperoleh dan bukan sebagai bukti langsung terbentuknya spesies hidroksida tertentu

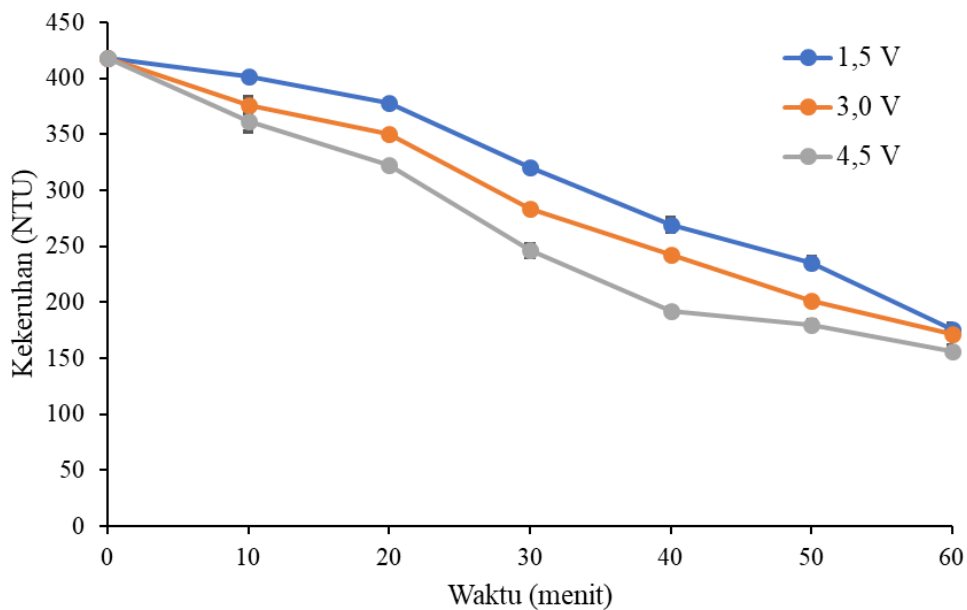
Pengaruh Tegangan dan Waktu Kontak terhadap Penurunan Kekeruhan

Perubahan kekeruhan limbah *laundry* selama proses elektrokoagulasi pada berbagai variasi tegangan dan waktu kontak ditunjukkan pada Gambar 2(a) untuk konfigurasi elektroda Fe-SS dan Gambar 2(b) untuk Al-SS. Secara umum, kedua sistem menunjukkan tren penurunan kekeruhan yang konsisten seiring bertambahnya waktu kontak dan peningkatan tegangan. Hal ini mengindikasikan bahwa pembentukan spesies koagulan berlangsung secara progresif sehingga meningkatkan proses destabilisasi dan agregasi partikel koloid. *Error bar* pada Gambar 2 menunjukkan standar deviasi dari tiga kali pengulangan percobaan. Nilai *error bar* yang relatif kecil

menunjukkan bahwa variasi data antar pengulangan tidak terlalu besar, sehingga hasil penurunan kekeruhan yang diperoleh memiliki tingkat keandalan yang baik.



(a)



(b)

Gambar 2. Pengaruh tegangan dan waktu kontak terhadap kekeruhan menggunakan elektroda (a) Fe-SS dan (b) Al-SS. Data merupakan rata-rata dari tiga kali pengulangan ($n = 3$), sedangkan *error bar* menunjukkan standar deviasi

Pada konfigurasi Fe–SS, penurunan kekeruhan berlangsung secara bertahap dengan laju yang relatif moderat. Efisiensi penyisihan yang diperoleh masing-masing sebesar 46,65% pada tegangan 1,5 V, meningkat menjadi 49,52% pada 3 V, dan mencapai 54,55% pada 4,5 V. Peningkatan tegangan memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi, namun tidak menunjukkan lonjakan yang signifikan, yang mengindikasikan keterbatasan sistem dalam menangkap partikel koloid halus.

Sebaliknya, konfigurasi Al–SS menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam menurunkan kekeruhan. Efisiensi penyisihan tercatat sebesar 57,89% pada 1,5 V, meningkat menjadi 59,09% pada 3 V, dan mencapai 62,68% pada 4,5 V. Tren ini menunjukkan bahwa peningkatan tegangan berpengaruh positif terhadap pembentukan koagulan aluminium yang lebih efektif dalam mengadsorpsi partikel penyebab kekeruhan.

Tabel 2. Hasil analisis varians dua arah (*Two-Way ANOVA*) terhadap kekeruhan

Faktor	F	p-value	Keterangan
Elektroda	166,91	<0,001	Signifikan
Tegangan	47,99	<0,001	Signifikan
Elektroda × Tegangan	8,47	0,005	Signifikan

Berdasarkan Tabel 2, hasil analisis varians dua arah (*Two-Way ANOVA*) menunjukkan bahwa jenis elektroda, tegangan, dan interaksi antara keduanya memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekeruhan limbah *laundry* ($p < 0,05$). Nilai F tertinggi diperoleh pada faktor jenis elektroda ($F = 166,91$), yang menunjukkan bahwa pemilihan material elektroda memiliki pengaruh yang sangat kuat terhadap efisiensi penurunan kekeruhan. Signifikansi interaksi antara elektroda dan tegangan ($p = 0,005$) mengindikasikan bahwa pengaruh peningkatan tegangan terhadap penurunan kekeruhan berbeda pada masing-masing jenis elektroda.

Perbedaan kinerja antara kedua elektroda tersebut berkaitan dengan karakteristik hidroksida logam yang terbentuk selama proses elektrokoagulasi. Hidroksida aluminium cenderung membentuk flok amorf dengan luas permukaan tinggi sehingga lebih efektif dalam mengadsorpsi partikel koloid halus. Sebaliknya, hidroksida besi umumnya

membentuk flok yang lebih padat dan berat, sehingga lebih dominan dalam menangkap partikel berukuran lebih besar dibandingkan partikel koloid.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa elektroda Al–SS lebih unggul dibandingkan Fe–SS dalam penurunan kekeruhan limbah *laundry* pada seluruh variasi tegangan yang diuji. Namun demikian, peningkatan efisiensi seiring kenaikan tegangan cenderung tidak linier, sehingga pemilihan kondisi operasi perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kinerja penyisihan dan konsumsi energi listrik.

Tabel 3. Konsumsi energi proses elektrokoagulasi pada berbagai tegangan operasi

Tegangan (V)	Konsumsi Energi (kWh/m ³)
1,5	0,60
3,0	1,20
4,5	1,80

Konsumsi energi proses elektrokoagulasi meningkat seiring dengan kenaikan tegangan operasi. Pada tegangan 1,5 V konsumsi energi tercatat sebesar 0,60 kWh/m³, kemudian meningkat menjadi 1,20 kWh/m³ pada 3,0 V dan mencapai 1,80 kWh/m³ pada 4,5 V. Peningkatan konsumsi energi tersebut sejalan dengan meningkatnya efisiensi penyisihan TSS dan kekeruhan yang diperoleh pada penelitian ini. Meskipun tegangan 4,5 V memberikan kinerja pengolahan terbaik, kebutuhan energi yang lebih tinggi perlu menjadi pertimbangan dalam penerapan pada skala yang lebih besar. Oleh karena itu, pemilihan kondisi operasi tidak hanya mempertimbangkan efisiensi penyisihan kontaminan, tetapi juga konsumsi energi dan biaya operasional proses. Nilai konsumsi energi yang diperoleh pada penelitian ini masih relatif rendah karena proses dioperasikan pada rentang tegangan yang rendah, yaitu 1,5–4,5 V.

Efisiensi penyisihan TSS dan kekeruhan yang diperoleh pada penelitian ini masih lebih rendah dibandingkan beberapa penelitian terdahulu yang melaporkan efisiensi penyisihan di atas 90%. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh variasi kondisi operasi dan konfigurasi sistem yang digunakan. Tabash et al., 2024 melaporkan penyisihan kekeruhan sebesar 94,26% menggunakan densitas arus 10 mA/cm², waktu elektrolisis 50 menit, dan waktu pengendapan 12 jam, sedangkan Hermida et al., 2024

memperoleh efisiensi penurunan kekeruhan sebesar 93,53% pada tegangan 13,8 V dengan waktu pengolahan 2 jam. Sebaliknya, penelitian ini menggunakan rentang tegangan yang relatif rendah, yaitu 1,5–4,5 V, dengan waktu kontak maksimum 60 menit. Kondisi tersebut menyebabkan jumlah ion logam dan koagulan yang terbentuk selama proses elektrokoagulasi lebih terbatas dibandingkan penelitian terdahulu. Meskipun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan tegangan rendah tetap mampu menurunkan TSS dan kekeruhan secara signifikan dengan konsumsi energi yang relatif rendah, sehingga berpotensi diterapkan pada pengolahan limbah *laundry* skala kecil. Selain tegangan dan waktu kontak, perbedaan efisiensi juga dapat dipengaruhi oleh konfigurasi elektroda, karakteristik limbah, luas permukaan elektroda, serta kondisi operasi lain yang berbeda pada setiap penelitian.

Selain tegangan dan waktu kontak, kondisi permukaan elektroda juga berpotensi memengaruhi kinerja proses elektrokoagulasi. Selama percobaan, permukaan elektroda mengalami perubahan warna menjadi kecokelatan setelah proses berlangsung. Perubahan tersebut mengindikasikan kemungkinan terbentuknya lapisan oksida atau hidroksida hasil reaksi elektrokimia pada permukaan elektroda. Keberadaan lapisan tersebut dapat mengurangi aktivitas permukaan elektroda dan menghambat pelepasan ion logam ke dalam larutan, yang sering dikaitkan dengan fenomena pasivasi elektroda. Meskipun penelitian ini tidak melakukan karakterisasi permukaan elektroda setelah proses, kecenderungan laju penurunan TSS dan kekeruhan yang mulai melambat pada waktu kontak yang lebih lama dapat menunjukkan bahwa peningkatan pembentukan koagulan tidak berlangsung secara proporsional selama proses elektrokoagulasi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang mencakup analisis morfologi dan karakteristik permukaan elektroda diperlukan untuk mengevaluasi pengaruh pasivasi terhadap kinerja proses secara lebih mendalam.

Kesimpulan

Proses elektrokoagulasi menggunakan elektroda Fe–SS dan Al–SS mampu menurunkan konsentrasi TSS dan kekeruhan limbah *laundry* pada seluruh kondisi operasi yang diuji. Peningkatan tegangan dari 1,5 V menjadi 4,5 V meningkatkan efisiensi penyisihan pada kedua jenis elektroda, dengan kondisi terbaik diperoleh pada

tegangan 4,5 V dan waktu kontak 60 menit. Pada kondisi tersebut, elektroda Fe–SS menghasilkan efisiensi penurunan TSS tertinggi sebesar 67,14%, sedangkan elektroda Al–SS menghasilkan efisiensi penurunan kekeruhan tertinggi sebesar 62,68%. Hasil analisis Two-Way ANOVA menunjukkan bahwa jenis elektroda dan tegangan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan TSS dan kekeruhan ($p < 0,05$). Pada parameter TSS, faktor tegangan memberikan pengaruh yang lebih dominan dibandingkan jenis elektroda, sedangkan pada parameter kekeruhan terdapat pengaruh signifikan dari interaksi antara jenis elektroda dan tegangan. Pada kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini, elektroda Fe–SS menghasilkan efisiensi penyisihan TSS yang lebih tinggi dibandingkan elektroda Al–SS, sedangkan elektroda Al–SS menghasilkan efisiensi penyisihan kekeruhan yang lebih tinggi dibandingkan elektroda Fe–SS. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jenis elektroda memengaruhi parameter pencemar yang dapat disisihkan selama proses elektrokoagulasi limbah *laundry*.

Daftar Referensi

- Al-Ajmi, F., Al-Marri, M., & Almomani, F. (2025). Electrocoagulation Process as an Efficient Method for the Treatment of Produced Water Treatment for Possible Recycling and Reuse. *Water (Switzerland)*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/w17010023>
- Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. A. M., Bashir, M. J. K., Nassani, D. E., Al Maskari, T., Abu Amr, S. S., & Abujazar, M. S. S. (2022). Application of Natural Coagulants for Pharmaceutical Removal from Water and Wastewater: A Review. In *Water (Switzerland)* (Vol. 14, Number 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/w14020140>
- Al-Marri, J. S., Abouedwan, A. B., Ahmad, M. I., & Bensalah, N. (2023). Electrocoagulation using aluminum electrodes as a sustainable and economic method for the removal of kinetic hydrate inhibitor (polyvinyl pyrrolidone) from produced wastewaters. *Frontiers in Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1305347>
- Ammar, M., Yousef, E., Mahmoud, M. A., Ashraf, S., & Baltrusaitis, J. (2023). A Comprehensive Review of the Developments in Electrocoagulation for the Removal

- of Contaminants from Wastewater. In *Separations* (Vol. 10, Number 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/separations10060337>
- Amri, I., Destinefa, P., & Zultiniar, Z. (2020). Pengolahan limbah cair tahu menjadi air bersih dengan metode elektrokoagulasi secara kontinyu. *CHEMPUBLISH JOURNAL*, 5(1), 57–67. <https://doi.org/10.22437/chp.v5i1.7651>
- Aragaw, T. A., & Bogale, F. M. (2023). Role of coagulation/flocculation as a pretreatment option to reduce colloidal/bio-colloidal fouling in tertiary filtration of textile wastewater: A review and future outlooks. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 11). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1142227>
- Bashir, I., Lone, F. A., Bhat, R. A., Mir, S. A., Dar, Z. A., & Dar, S. A. (2020). Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems. In *Bioremediation and Biotechnology: Sustainable Approaches to Pollution Degradation* (pp. 1–26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_1
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. In *Water Cycle* (Vol. 4, pp. 26–36). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Diver, D., Nhapi, I., & Ruziwa, W. R. (2023). The potential and constraints of replacing conventional chemical coagulants with natural plant extracts in water and wastewater treatment. In *Environmental Advances* (Vol. 13). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100421>
- Ghernaout, D., Alghamdi, A., & Ghernaout, B. (2019). Electrocoagulation Process: A Mechanistic Review at the Dawn of its Modeling. *Journal of Environmental Science and Allied Research*, (1).
- Gupta, N., & Nafees, S. M. (2022). *Study on Detergent Pollution in River Chambal in the City Kota of Rajasthan, India*. <http://www.centralasianstudies.orghttp://cajmns.centralasianstudies.org>
- Hermida, L., Agustian, J., & Anggraini, D. S. (2024). Pengolahan Limbah Cair Laundry Melalui Proses Elektrokoagulasi Sistem Batch Recycle Menggunakan Elektroda Aluminium yang disusun Secara Bipolar. *Jurnal Teknologi Dan Inovasi Industri (JTII)*, 5(2). <https://doi.org/10.23960/jtii.v5i2.101>

- Joning, M., Melawaty, L., Sira Sarungallo, R., & Studi Teknik Kimia, P. (2022). Metode Elektrokoagulasi Untuk Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Yang Mengandung Logam-Logam Berat Electrocoagulation Method For The Treatment Of Laboratory Wastewater Containing Heavy Metals. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 1, Number 1).
- López Zavala, M. Á., & Estrada, E. E. (2016). The contribution of the type of detergent to domestic laundry graywater composition and its effect on treatment performance. *Water (Switzerland)*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/w8050214>
- López-Guzmán, M., Flores-Hidalgo, M. A., & Reynoso-Cuevas, L. (2021). Electrocoagulation process: An approach to continuous processes, reactors design, pharmaceuticals removal, and hybrid systems—a review. In *Processes* (Vol. 9, Number 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr9101831>
- Medina Collana, J. T., Ayllon Ormeño, M., Julca Meza, C., Moreyra Cuadros, G., Carrasco Venegas, L. A., Ancieta Dextre, C. A., Rodríguez Taranco, O. J., Avelino Carhuaricra, C., Diaz Bravo, P., & Montaña Pisfil, J. A. (2024). Processes Coupled to Electrocoagulation for the Treatment of Distillery Wastewaters. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Number 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16156383>
- Melián, E. P., Santiago, D. E., León, E., Reboso, J. V., & Herrera-Melián, J. A. (2023). Treatment of laundry wastewater by different processes: Optimization and life cycle assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109302>
- Procházková, M., & Máša, V. (2022). Sustainable Wastewater Management in Industrial Laundries. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 577–582. <https://doi.org/10.3303/CET2294096>
- Riyanto, & Hidayatillah, A. (2014). Electrocoagulation of Detergent Wastewater Using Aluminium Wire Netting Electrode (AWNE).
- Tabash, I., Elnakar, H., & Khan, M. F. (2024). Optimization of iron electrocoagulation parameters for enhanced turbidity and chemical oxygen demand removal from laundry greywater. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67425-8>

Yaseen, Z. M., Zigale, T. T., Tiyyasha, D, R. K., Salih, S. Q., Awasthi, S., Tung, T. M., Al-Ansari, N., & Bhagat, S. K. (2019). Laundry wastewater treatment using a combination of sand filter, bio-char and teff straw media. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54888-3>