



Analisis Kinerja Metode Kombinasi Elektrokoagulasi dan Adsorpsi dalam Penyisihan *Total Suspended Solid* (TSS) pada Air Lindi

Alinda Nur Rohmah¹, Ade Trisnawati^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknik Kimia, Universitas PGRI Madiun, Indonesia

*Penulis Korespondensi: adetrisnawati@unipma.ac.id

Abstract. Landfill leachate exhibits complex pollutant characteristics, necessitating effective and environmentally friendly treatment technologies before being discharged into receiving water bodies. Total Suspended Solids (TSS) is a critical parameter in leachate treatment because suspended solids can significantly degrade aquatic environmental quality. This study aimed to evaluate the performance of a combined electrocoagulation–adsorption process using coconut shell charcoal for TSS removal from landfill leachate in Madiun and to investigate the effects of applied voltage and treatment time on removal efficiency. An experimental approach was employed using aluminum electrodes with applied voltages of 3, 6, and 9 V and treatment times of 30 and 60 minutes. Electrocoagulation was performed first, followed by adsorption using non-chemically activated coconut shell charcoal. The results demonstrated that the combined electrocoagulation–adsorption process effectively reduced TSS concentrations under all treatment conditions, achieving removal efficiencies ranging from 74% to 82%. The highest removal efficiency (82%) was obtained at an applied voltage of 6 V with a treatment time of 30 minutes. These findings suggest that the integration of electrocoagulation and adsorption using locally available biomass offers a simple, cost-effective, and sustainable alternative for landfill leachate treatment.

Keywords: Leachate; Electrocoagulation; Adsorption; Coconut Shell Charcoal; Total Suspended Solid (TSS).

Abstrak. Air lindi dari TPA memiliki karakteristik pencemar yang kompleks sehingga diperlukan teknologi pengolahan yang efektif dan ramah lingkungan sebelum dibuang ke badan air. Salah satu parameter penting dalam pengolahan air lindi adalah *Total Suspended Solid* (TSS) karena keberadaan padatan tersuspensi dapat menurunkan kualitas lingkungan perairan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja metode kombinasi elektrokoagulasi–adsorpsi menggunakan arang tempurung kelapa dalam penyisihan TSS pada air lindi salah satu TPA di Madiun serta mengevaluasi pengaruh variasi tegangan dan waktu proses terhadap efektivitas penyisihan. Metode penelitian dilakukan secara eksperimen menggunakan elektroda aluminium dengan variasi tegangan 3 V, 6 V, dan 9 V serta waktu proses 30 dan 60 menit. Proses elektrokoagulasi dilakukan terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan dengan proses adsorpsi menggunakan arang tempurung kelapa tanpa aktivasi kimia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi elektrokoagulasi–adsorpsi mampu menurunkan kadar TSS pada seluruh kondisi perlakuan dengan efektivitas penyisihan sebesar 74–82%. Kondisi terbaik diperoleh pada tegangan 6 V dengan waktu proses 30 menit dengan efektivitas penyisihan sebesar 82%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi elektrokoagulasi dan adsorpsi menggunakan biomassa lokal berpotensi menjadi alternatif teknologi pengolahan air lindi yang sederhana, ekonomis, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Air Lindi; Elektrokoagulasi; Adsorpsi; Arang Tempurung Kelapa; Padatan tersuspensi total.

1. LATAR BELAKANG

Peningkatan aktivitas manusia dan pertumbuhan populasi menyebabkan peningkatan timbulan sampah perkotaan yang berdampak terhadap meningkatnya kebutuhan pengelolaan sampah melalui sistem pemrosesan akhir. Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) dengan metode landfill masih menjadi salah satu pendekatan yang banyak diterapkan karena mampu menampung sampah dalam jumlah besar. Namun, aktivitas landfill menghasilkan produk samping berupa air lindi yang memiliki karakteristik kompleks akibat proses perkolasi air melalui timbunan sampah dan proses biodegradasi material organik. Air lindi umumnya mengandung berbagai kontaminan seperti bahan organik, nitrogen amonia, logam berat,

senyawa anorganik, serta padatan tersuspensi yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dilakukan pengolahan sebelum dibuang ke badan air (Luo *et al.*, 2020). Karakteristik air lindi sangat bervariasi karena dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti umur landfill, komposisi sampah, kondisi iklim, temperatur, dan curah hujan, sehingga diperlukan strategi pengolahan yang mampu menyesuaikan dengan perubahan karakteristik limbah tersebut (Ma *et al.*, 2022).

Salah satu parameter penting dalam evaluasi kualitas air lindi adalah *Total Suspended Solid* (TSS), yaitu jumlah material padat tersuspensi yang terdapat dalam fase cair. Keberadaan TSS dengan konsentrasi tinggi dapat meningkatkan tingkat kekeruhan, menurunkan kualitas estetika air, menghambat penetrasi cahaya, serta berpotensi menjadi media pembawa berbagai kontaminan lain seperti senyawa organik dan logam berat. Dalam pengelolaan air lindi, penghilangan TSS menjadi tahap penting karena keberadaan partikel tersuspensi dapat menurunkan efektivitas proses pengolahan lanjutan. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi kandungan pencemar dalam air lindi, seperti proses biologis, koagulasi kimia, membran, oksidasi lanjut, dan proses fisika-kimia lainnya. Namun, beberapa metode konvensional masih memiliki keterbatasan, seperti kebutuhan bahan kimia yang tinggi, produksi lumpur dalam jumlah besar, biaya operasional yang relatif tinggi, serta efektivitas yang bergantung pada karakteristik limbah. Oleh karena itu, pengembangan metode pengolahan yang lebih efektif, sederhana, dan ramah lingkungan masih menjadi tantangan dalam pengelolaan air lindi (Emalya *et al.*, 2020; Luo *et al.*, 2020).

Salah satu teknologi alternatif yang banyak dikembangkan untuk pengolahan limbah cair adalah elektrokoagulasi. Elektrokoagulasi merupakan proses pengolahan berbasis elektrokimia yang menghasilkan ion koagulan melalui pelarutan elektroda, seperti aluminium atau besi, sehingga mampu mendestabilisasi partikel koloid dan membentuk flok yang lebih mudah dipisahkan. Penggunaan elektroda aluminium menghasilkan ion Al^{3+} yang selanjutnya membentuk senyawa hidroksida aluminium $[Al(OH)_3]$ yang berperan dalam mekanisme koagulasi melalui netralisasi muatan dan *sweep coagulation* terhadap partikel tersuspensi (Jing *et al.*, 2021). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa elektrokoagulasi memiliki kemampuan yang baik dalam menyisihkan berbagai kontaminan karena prosesnya tidak memerlukan penambahan koagulan kimia secara langsung dan memiliki sistem operasi yang relatif sederhana. Namun demikian, proses elektrokoagulasi masih memiliki keterbatasan, terutama pada kemungkinan tersisnya partikel berukuran kecil dan senyawa terlarut yang belum sepenuhnya terikat selama proses pembentukan flok. Oleh karena itu, kombinasi elektrokoagulasi dengan proses adsorpsi menjadi pendekatan yang potensial untuk

meningkatkan efisiensi penyisihan polutan melalui mekanisme penggabungan antara destabilisasi partikel dan penjerapan permukaan (Jing *et al.*, 2021; Magnisali *et al.*, 2022).

Proses adsorpsi menggunakan material berbasis karbon menjadi salah satu teknologi yang banyak dikaji karena memiliki kemampuan dalam menangkap berbagai jenis kontaminan melalui interaksi permukaan dan struktur pori adsorben. Salah satu material yang berpotensi digunakan adalah arang tempurung kelapa, yang merupakan biomassa dengan kandungan karbon tinggi dan ketersediaan melimpah. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material berbasis tempurung kelapa memiliki potensi sebagai adsorben alternatif untuk pengolahan air limbah karena karakteristik karbon berpori dan kemampuan adsorpsinya terhadap berbagai polutan (Chan *et al.*, 2022). Sebagian besar penelitian terdahulu menggunakan karbon aktif atau adsorben yang telah mengalami proses aktivasi kimia untuk meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi. Meskipun aktivasi dapat meningkatkan performa adsorben, proses tersebut membutuhkan tambahan bahan kimia, tahapan produksi lebih kompleks, dan biaya operasional yang lebih tinggi (Ajien *et al.*, 2023; Chan *et al.*, 2022). Dengan demikian, masih terdapat peluang penelitian untuk mengevaluasi kemampuan arang tempurung kelapa tanpa aktivasi kimia sebagai adsorben sederhana dan ekonomis dalam sistem pengolahan limbah cair.

Metode elektrokoagulasi maupun adsorpsi telah banyak digunakan secara terpisah dalam pengolahan air limbah, tetapi kajian mengenai kombinasi elektrokoagulasi–adsorpsi menggunakan arang tempurung kelapa tanpa aktivasi kimia untuk penyisihan TSS pada air lindi masih memiliki keterbatasan. Keterbatasan penelitian sebelumnya terletak pada penggunaan adsorben yang telah dimodifikasi secara kimia dan kurangnya kajian terhadap penerapan kombinasi proses menggunakan material lokal yang murah dan mudah diperoleh. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja aplikasi kombinasi elektrokoagulasi–adsorpsi menggunakan arang tempurung kelapa dalam penyisihan TSS pada air lindi dari salah satu TPA di Madiun. Kontribusi baru penelitian ini terletak pada penerapan sistem elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium dan adsorpsi menggunakan arang tempurung kelapa tanpa aktivasi kimia sebagai alternatif teknologi pengolahan air lindi yang lebih sederhana, ekonomis, dan berpotensi diterapkan pada skala pengelolaan limbah.

2. KAJIAN TEORITIS

Air Lindi dan *Total Suspended Solid* (TSS)

Air lindi merupakan air limbah yang terbentuk akibat proses infiltrasi air hujan melalui timbunan sampah yang menyebabkan terjadinya pelarutan dan perpindahan berbagai senyawa

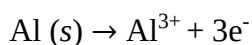
organik maupun anorganik dari material sampah menuju fase cair. Air lindi umumnya memiliki karakteristik kompleks karena mengandung bahan organik, nitrogen, logam berat, senyawa anorganik, serta padatan tersuspensi yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu (Luo *et al.*, 2020). Air lindi merupakan salah satu permasalahan utama dalam sistem landfill karena proses pembentukannya berlangsung secara terus-menerus selama proses degradasi sampah dan dapat memberikan dampak terhadap kualitas air tanah maupun badan air penerima (Fadhila & Purnama, 2022).

Salah satu parameter penting dalam evaluasi kualitas air lindi adalah *Total Suspended Solid* (TSS), yaitu jumlah partikel padatan yang tersuspensi dalam air dan tidak larut secara langsung. TSS merupakan parameter utama yang perlu dikendalikan dalam pengolahan limbah cair karena keberadaan padatan tersuspensi dapat menurunkan kualitas fisik maupun ekologis badan air penerima (Pramastya & Rosariawari, 2023). Penyisihan TSS menjadi salah satu indikator penting dalam menentukan keberhasilan proses pengolahan air limbah.

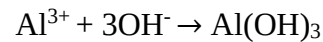
Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengurangi kandungan pencemar dalam air lindi, seperti proses biologis, filtrasi, koagulasi, adsorpsi, dan teknologi elektrokimia. Namun, karakteristik air lindi yang kompleks menyebabkan satu metode pengolahan sering kali belum mampu menghasilkan efisiensi penyisihan yang optimal. Oleh karena itu, kombinasi beberapa metode pengolahan menjadi pendekatan yang banyak dikembangkan untuk memperoleh efektivitas penyisihan yang lebih baik dengan kebutuhan energi dan bahan kimia yang lebih rendah.

Elektrokoagulasi dalam Pengolahan Air Limbah

Elektrokoagulasi merupakan salah satu metode pengolahan air limbah berbasis elektrokimia yang memanfaatkan arus listrik untuk menghasilkan koagulan secara langsung melalui pelarutan elektroda. Berbeda dengan proses koagulasi konvensional yang membutuhkan penambahan bahan kimia eksternal, elektrokoagulasi menghasilkan ion logam koagulan secara *in situ*, sehingga penggunaan bahan kimia tambahan dan pembentukan residu dapat dikurangi (Jo *et al.*, 2024). Metode ini banyak diaplikasikan pada berbagai jenis limbah karena mampu menyisihkan partikel tersuspensi, senyawa organik, warna, maupun logam berat melalui mekanisme destabilisasi partikel dan pembentukan flok. Pada penggunaan elektroda aluminium, proses elektrokoagulasi diawali dengan reaksi oksidasi pada anoda yang menghasilkan ion aluminium:



Ion aluminium yang terbentuk selanjutnya mengalami reaksi hidrolisis menghasilkan aluminium hidroksida:



Senyawa $\text{Al}(\text{OH})_3$ berperan sebagai koagulan yang mampu mengikat partikel tersuspensi melalui mekanisme netralisasi muatan (*charge neutralization*) dan pembentukan flok (*sweep coagulation*). Flok yang terbentuk kemudian mengalami proses pengendapan sehingga kandungan TSS dalam air mengalami penurunan. Mekanisme tersebut menjadikan elektrokoagulasi efektif untuk menghilangkan partikel koloid dan padatan tersuspensi dalam air limbah (Graça & Rodrigues, 2022).

Kinerja elektrokoagulasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis elektroda, tegangan atau kuat arus listrik, waktu kontak, jarak antar elektroda, serta karakteristik limbah yang diolah. Peningkatan tegangan atau arus listrik umumnya meningkatkan laju pelepasan ion logam dari elektroda sehingga jumlah koagulan yang terbentuk semakin besar. Namun, kondisi operasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan konsumsi energi dan menyebabkan ketidakstabilan flok akibat terbentuknya gelembung gas berlebih. Penelitian Joning *et al.* (2022) menunjukkan bahwa variasi kondisi operasi seperti tegangan dan waktu proses memberikan pengaruh terhadap kemampuan elektrokoagulasi dalam menurunkan TSS dan kontaminan lain pada limbah cair.

Adsorpsi dan Integrasi Elektrokoagulasi–Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses pemisahan dengan memanfaatkan kemampuan suatu material padat (*adsorben*) untuk menangkap molekul atau partikel tertentu pada permukaannya. Mekanisme adsorpsi dapat berlangsung melalui interaksi fisik seperti gaya *Van der Waals* maupun interaksi kimia melalui pembentukan ikatan antara permukaan adsorben dan adsorbat. Material berbasis karbon banyak digunakan sebagai adsorben karena memiliki struktur berpori dan luas permukaan yang mendukung proses penjerapan berbagai jenis kontaminan.

Arang tempurung kelapa merupakan salah satu material biomassa yang berpotensi digunakan sebagai adsorben alternatif karena memiliki kandungan karbon tinggi, mudah diperoleh, serta berasal dari sumber daya terbarukan. Penggunaan adsorben berbasis biomassa menjadi perhatian dalam pengolahan limbah karena dapat mendukung konsep pengolahan yang lebih ekonomis dan berkelanjutan. Berbeda dengan karbon aktif yang membutuhkan proses aktivasi kimia atau fisika untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi, penggunaan arang tanpa aktivasi memberikan keuntungan berupa proses produksi yang lebih sederhana dan biaya yang lebih rendah, meskipun karakteristik adsorpsinya perlu dievaluasi lebih lanjut.

Kombinasi elektrokoagulasi dan adsorpsi merupakan pendekatan teknologi yang menggabungkan keunggulan kedua proses. Elektrokoagulasi berperan dalam mendestabilisasi partikel dan membentuk flok melalui reaksi elektrokimia, sedangkan adsorpsi berfungsi menangkap partikel atau senyawa yang masih tersisa setelah proses koagulasi. Graça & Rodrigues (2022) menjelaskan bahwa integrasi elektrokoagulasi–adsorpsi dapat meningkatkan efisiensi pengolahan dibandingkan penggunaan metode tunggal karena masing-masing proses mampu mengatasi keterbatasan proses lainnya.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan keberhasilan kombinasi elektrokoagulasi–adsorpsi dalam menurunkan parameter pencemar. Fadhila & Purnama (2022) melaporkan bahwa kombinasi elektrokoagulasi dan adsorpsi zeolit pada air lindi mampu menghasilkan penyisihan TSS yang tinggi melalui pengaruh tegangan dan kondisi elektroda. Takwanto *et al.* (2018) juga menunjukkan bahwa kombinasi elektrokoagulasi dan adsorpsi karbon aktif efektif dalam menurunkan parameter pencemar pada air lindi, termasuk TSS. Penelitian lain menggunakan kombinasi elektrokoagulasi–adsorpsi pada limbah tahu dan limbah laundry juga menunjukkan bahwa integrasi kedua proses mampu meningkatkan penyisihan TSS dibandingkan penggunaan satu metode saja (Pramastya & Rosariawari, 2023; Wahyuni *et al.*, 2023). (Syawalian *et al.*, 2019).

Berdasarkan penelitian terdahulu kombinasi elektrokoagulasi–adsorpsi masih menggunakan adsorben komersial seperti karbon aktif atau zeolit. Penggunaan arang tempurung kelapa tanpa aktivasi sebagai adsorben pendukung dalam sistem elektrokoagulasi untuk pengolahan air lindi masih relatif terbatas. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih sederhana, ekonomis, dan memanfaatkan material lokal berbasis biomassa.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Universitas PGRI Madiun pada bulan April-Mei 2026. Alat yang digunakan adalah *furnace*, oven, ayakan 80 mesh, ember plastik, botol plastik untuk air lindi, gelas kimia 500 mL, gelas kimia 1000 mL, kabel penghubung, DC *power supply*, timbangan analitik, corong, pipet tetes, labu ukur, gelas ukur, desikator, erlenmeyer dan *shaker*. Bahan yang digunakan yaitu air lindi yang diambil dari salah satu TPA di Madiun, kertas saring, tempurung kelapa dan plat elektroda alumunium.

Tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Pembuatan arang tempurung kelapa yang dilakukan sesuai dengan standar SNI 01-1682-1996 Arang Tempurung Kelapa,

(2) Pengambilan sampel air lindi yang sesuai dengan standar SNI 6989.59:2008 bagian 59 metode pengambilan contoh air limbah, (3) Pengukuran TSS awal sampel air lindi sesuai dengan SNI 06-6989.3-2004 cara uji padatan tersuspensi total (TSS), (4) Proses elektrokoagulasi-adsorpsi yang mengacu pada penelitian Syawalian et al., 2019) dan Bedmohata et al (2015), (5) Pengukuran TSS akhir setelah perlakuan yang sesuai dengan SNI 06-6989.3-2004 cara uji padatan tersuspensi total (TSS). Proses elektrokoagulasi dilakukan terlebih dahulu sebelum proses adsorpsi dengan menggunakan adsorben arang tempurung kelapa yang tidak dilakukan aktivasi kimia. Variasi waktu yang digunakan pada proses elektrokoagulasi adalah 30 menit dan 60 menit, sedangkan variasi tegangan yang digunakan adalah 3V, 6V dan 9 V. Teknik analisis data yang digunakan yaitu analisis deskripsi nilai kadar TSS sebelum dan sesudah diberi perlakuan metode elektrokoagulasi dan kombinasi elektrokoagulasi-adsorpsi dengan arang tempurung kelapa sehingga diketahui perbedaan penurunan kadar TSS pada setiap tahap.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil nilai TSS air lindi sebelum dan sesudah diberi perlakuan proses elektrokoagulasi diberikan pada Tabel 1 dan data hasil nilai TSS air lindi sebelum dan sesudah diberi perlakuan gabungan proses elektrokoagulasi dan adsorpsi diberikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Nilai TSS Air Lindi Proses Elektrokoagulasi berdasarkan Variasi Waktu dan Tegangan

Tegangan (V)	Waktu (menit)	Nilai TSS Awal (mg/L)	Nilai TSS Akhir (mg/L)	% Efisiensi
3	30	2,59	2,16	17%
	60	2,59	1,7	34%
6	30	2,59	1,23	53%
	60	2,59	0,97	63%
9	30	2,59	0,42	84%
	60	2,59	0,96	63%

Tabel 2. Hasil Nilai TSS Air Lindi pada Proses Elektrokoagulasi-Adsorpsi berdasarkan Variasi Waktu dan Tegangan

Tegangan (V)	Waktu (menit)	Nilai TSS Awal (mg/L)	Nilai TSS Akhir (mg/L)	% Efisiensi
3	30	2,59	0,62	76%
	60	2,59	0,5	81%
6	30	2,59	0,46	82%
	60	2,59	0,52	80%
9	30	2,59	0,67	74%
	60	2,59	0,55	79%



Gambar 1. Proses Elektrokoagulasi dan Adsorpsi

Pengaruh Variasi Tegangan dan Waktu Elektrokoagulasi terhadap Penyisihan TSS Air Lindi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses elektrokoagulasi mampu menurunkan kadar TSS pada air lindi dibandingkan kondisi awal. Konsentrasi TSS awal sebesar 2,59 mg/L mengalami penurunan pada seluruh variasi tegangan dan waktu proses. Pada proses elektrokoagulasi tanpa adsorpsi, efisiensi penyisihan TSS meningkat seiring dengan peningkatan tegangan listrik. Pada tegangan 3 V selama 30 menit, kadar TSS mengalami penurunan menjadi 2,16 mg/L dengan efisiensi penyisihan sebesar 17%. Peningkatan tegangan pada 6 V menghasilkan penurunan TSS menjadi 1,23 mg/L dengan efisiensi 53%, sedangkan kondisi terbaik diperoleh pada tegangan 9 V selama 30 menit dengan kadar TSS akhir sebesar 0,42 mg/L dan efisiensi penyisihan mencapai 84%.

Peningkatan kemampuan penyisihan TSS akibat kenaikan tegangan dapat dijelaskan melalui mekanisme elektrokimia selama proses elektrokoagulasi. Pada elektroda aluminium, peningkatan tegangan menyebabkan peningkatan laju oksidasi anoda sehingga jumlah ion aluminium (Al^{3+}) yang dilepaskan ke dalam larutan semakin besar. Ion Al^{3+} kemudian mengalami reaksi hidrolisis membentuk spesies hidroksida aluminium seperti $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang berfungsi sebagai koagulan alami. Senyawa hidroksida tersebut mampu menetralkan muatan permukaan partikel koloid dan membentuk flok melalui mekanisme *charge neutralization* dan *sweep coagulation*, sehingga partikel tersuspensi lebih mudah dipisahkan dari fase cair (Jing *et al.*, 2021). Mekanisme tersebut menjelaskan mengapa peningkatan tegangan dari 3 V hingga 9 V menghasilkan kecenderungan peningkatan efisiensi penyisihan TSS.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Sudrajat *et al.* (2025) yang melaporkan bahwa penggunaan elektroda aluminium pada proses elektrokoagulasi mampu meningkatkan penyisihan TSS akibat peningkatan pembentukan flok hidroksida aluminium. Peningkatan kondisi operasi elektrokoagulasi memberikan pengaruh terhadap jumlah koagulan yang

terbentuk dan kemampuan pengikatan partikel tersuspensi. Penelitian lain oleh Kaloka *et al.* (2025) juga menunjukkan bahwa elektrokoagulasi menggunakan elektroda aluminium efektif dalam menurunkan TSS berbagai jenis air limbah karena proses pembentukan flok selama elektrolisis mampu mengurangi partikel penyebab kekeruhan. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat konsep bahwa pengaruh tegangan energi listrik merupakan faktor penting yang menentukan kinerja proses elektrokoagulasi.

Berdasarkan hasil penelitian ini pula dapat diketahui bahwa peningkatan waktu kontak tidak selalu meningkatkan efisiensi penyisihan TSS. Pada tegangan 9 V, waktu kontak 30 menit menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 84%, sedangkan waktu 60 menit mengalami penurunan menjadi 63%. Fenomena ini menunjukkan bahwa terdapat kondisi optimum dalam proses elektrokoagulasi. Waktu elektrolisis yang terlalu lama dapat menyebabkan terbentuknya flok berlebih, peningkatan turbulensi akibat pelepasan gas hidrogen pada katoda, serta kemungkinan terjadinya pecahnya flok sehingga sebagian partikel kembali tersuspensi dalam larutan. Kondisi tersebut menyebabkan efektivitas penyisihan mengalami penurunan meskipun jumlah ion koagulan yang dihasilkan meningkat.

Penurunan efisiensi pada waktu kontak yang lebih lama juga dilaporkan dalam beberapa penelitian elektrokoagulasi. Jing *et al.* (2021) menjelaskan bahwa waktu kontak yang terlalu panjang dapat meningkatkan konsumsi energi tanpa selalu meningkatkan efisiensi penghilangan polutan karena sistem dapat mencapai kondisi kesetimbangan antara pembentukan dan penghancuran flok. Optimasi waktu proses menjadi aspek penting dalam penerapan elektrokoagulasi agar diperoleh efisiensi maksimum dengan konsumsi energi yang lebih rendah.

Kinerja Metode Kombinasi Elektrokoagulasi–Adsorpsi Menggunakan Arang Tempurung Kelapa

Penggabungan proses elektrokoagulasi dengan adsorpsi menggunakan arang tempurung kelapa memberikan peningkatan kemampuan penyisihan TSS dibandingkan beberapa kondisi elektrokoagulasi tunggal. Pada proses gabungan, seluruh variasi perlakuan menghasilkan nilai TSS akhir di bawah 0,70 mg/L dengan efektivitas penyisihan berkisar antara 74–82%. Kondisi terbaik diperoleh pada tegangan 6 V dengan waktu kontak 30 menit, yaitu nilai TSS akhir sebesar 0,46 mg/L dan efisiensi penyisihan sebesar 82%.

Peningkatan kinerja pada metode kombinasi menunjukkan adanya efek sinergis antara proses elektrokoagulasi dan adsorpsi (Twizerimana & Wu, 2024). Pada tahap awal, elektrokoagulasi berperan dalam mendestabilisasi partikel tersuspensi melalui pembentukan

flok $\text{Al}(\text{OH})_3$. Flok yang terbentuk kemudian meningkatkan peluang interaksi dengan permukaan arang tempurung kelapa. Selanjutnya, proses adsorpsi berperan dalam menangkap partikel sisa yang belum terendapkan melalui mekanisme penyerapan pada permukaan karbon dan struktur pori adsorben.

Arang tempurung kelapa memiliki kandungan karbon yang tinggi serta struktur berpori yang memungkinkan terjadinya proses adsorpsi terhadap berbagai kontaminan. Walaupun adsorben pada penelitian ini tidak melalui aktivasi kimia, keberadaan pori alami pada material karbon tetap memungkinkan terjadinya interaksi antara permukaan adsorben dengan partikel tersuspensi. Penelitian mengenai pemanfaatan biomassa berbasis tempurung kelapa menunjukkan bahwa material karbon dari limbah pertanian memiliki potensi sebagai adsorben alternatif karena ketersediaannya yang melimpah dan sifat permukaannya yang mendukung proses adsorpsi (Chan *et al.*, 2022).

Hasil penelitian ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Luo *et al.* (2020) yang menunjukkan bahwa penggunaan material karbon berbasis tempurung kelapa mampu meningkatkan kemampuan pengolahan air lindi melalui mekanisme adsorpsi terhadap kontaminan residual. Namun, penelitian tersebut umumnya menggunakan karbon aktif hasil aktivasi untuk meningkatkan luas permukaan adsorben. Perbedaan penelitian ini terletak pada penggunaan arang tempurung kelapa tanpa aktivasi kimia, sehingga memberikan pendekatan yang lebih sederhana dan ekonomis.

Perbandingan Penurunan Kadar TSS pada Elektrokoagulasi Tunggal dan Kombinasi Elektrokoagulasi-Adsorpsi

Berdasarkan data pada Tabel 1 dan Tabel 2, proses elektrokoagulasi tunggal menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 84% pada kondisi 9 V selama 30 menit, sedangkan metode gabungan menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 82% pada kondisi lebih rendah yaitu 6 V selama 30 menit. Walaupun nilai efisiensi elektrokoagulasi tunggal sedikit lebih tinggi, metode kombinasi memiliki keuntungan dari segi kebutuhan energi listrik. Sistem kombinasi mampu menghasilkan penyisihan TSS yang relatif tinggi pada tegangan lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan adsorben dapat membantu meningkatkan proses pemisahan sehingga kebutuhan energi elektrokoagulasi dapat dikurangi.

Norra & Radjenovic (2021) melaporkan bahwa kombinasi proses elektrokimia dengan material karbon dapat menghasilkan efek sinergis melalui peningkatan kemampuan adsorpsi dan degradasi kontaminan. Penggunaan kombinasi metode pengolahan dapat mengatasi keterbatasan masing-masing proses. Elektrokoagulasi efektif dalam menghilangkan partikel

tersuspensi melalui pembentukan flok, tetapi kurang optimal terhadap partikel berukuran sangat kecil. Sebaliknya, adsorpsi mampu menangkap kontaminan yang tersisa melalui interaksi permukaan. Pendekatan teknologi gabungan seperti ini juga telah banyak dikembangkan dalam pengolahan limbah karena mampu meningkatkan efisiensi dibandingkan penggunaan satu metode saja.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kombinasi metode elektrokoagulasi dan adsorpsi menggunakan arang tempurung kelapa mampu meningkatkan penyisihan TSS pada air lindi. Variasi tegangan dan waktu proses memengaruhi kinerja penyisihan, dengan kondisi terbaik diperoleh pada tegangan 6 V selama 30 menit dengan efektivitas penyisihan sebesar 82%. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan arang tempurung kelapa tanpa aktivasi kimia berpotensi menjadi alternatif adsorben berbasis biomassa dalam pengolahan air lindi. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada variasi parameter operasi dan belum mengevaluasi karakteristik adsorben, konsumsi energi, maupun parameter pencemar lain seperti COD, BOD, amonia, dan logam berat. Penelitian lanjutan diperlukan untuk melakukan optimasi proses, karakterisasi adsorben, serta evaluasi penerapan pada skala yang lebih besar.

DAFTAR REFERENSI

- Ajien, A., Idris, J., Md Sofwan, N., Husen, R., & Seli, H. (2023). Coconut shell and husk biochar: A review of production and activation technology, economic, financial aspect and application. *Waste Management and Research*, 41(1), 37–51. <https://doi.org/10.1177/0734242X221127167>;JOURNAL:JOURNAL:WMRA;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Bedmohata, R. A., Chaudhari, A. R., Singh, S. P., & Choudhary, M. D. (2015). Adsorption Capacity of Activated Carbon Prepared by Chemical Activation of Lignin for the Removal of Methylene Blue Dye. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, 2(8), 1–13. <https://arcjournals.org>
- Chan, A. A., Buthiyappan, A., Raman, A. A. A., & Ibrahim, S. (2022). Recent advances on the coconut shell derived carbonaceous material for the removal of recalcitrant pollutants: A review. *Korean Journal of Chemical Engineering* 2022 39:10, 39(10), 2571–2593. <https://doi.org/10.1007/S11814-022-1201-5>
- Emalya, N., Munawar, E., Rinaldi, W., & Yunardi, Y. (2020). Landfill Leachate Management in Indonesia: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 845(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/845/1/012032>
- Fadhila, A. N., & Purnama, H. (2022). Pengaruh Jarak Elektroda dan Tegangan terhadap Efektivitas Pengolahan Air Lindi dengan Metode Elektrokoagulasi-Adsorpsi Zeolit. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 11(1), 21–27. <https://doi.org/10.32734/JTK.V11I1.8284>

- Graça, N. S., & Rodrigues, A. E. (2022). The Combined Implementation of Electrocoagulation and Adsorption Processes for the Treatment of Wastewaters. *Clean Technologies* 2022, Vol. 4, Pages 1020-1053, 4(4), 1020–1053. <https://doi.org/10.3390/CLEANTECHNOL4040063>
- Jing, G., Ren, S., Pooley, S., Sun, W., Kowalczyk, P. B., & Gao, Z. (2021). Electrocoagulation for industrial wastewater treatment: An updated review. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 7(7), 1177–1196. <https://doi.org/10.1039/D1EW00158B>
- Jo, S., Kadam, R., Jang, H., Seo, D., & Park, J. (2024). Recent Advances in Wastewater Electrocoagulation Technologies: Beyond Chemical Coagulation. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 5863, 17(23), 5863. <https://doi.org/10.3390/EN17235863>
- Joning, M., Melawaty, L., Sira Sarungallo, R., & Studi Teknik Kimia, P. (2022). Metode Elektrokoagulasi Untuk Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Yang Mengandung Logam-Logam Berat. *Paulus Chem Engineering Journal*, 1(1). <https://ojs.ukipaulus.ac.id/index.php/pcj/article/view/416>
- Kaloka, A. I., Faizah, N., Arifin, R., Aulia, A. F., Putra, M. B. A., Wati, N., & Prayadi, I. N. (2025). Application of Electrocoagulation in Stabilizing pH and Removing Pollutants from Domestic and Urban Wastewater Using Aluminum Electrodes. *IPTEK The Journal of Engineering*, 11(2), 108–120. <https://doi.org/10.12962/J23378557.V11I2.A22816>
- Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of The Total Environment*, 703, 135468. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135468>
- Ma, S., Zhou, C., Pan, J., Yang, G., Sun, C., Liu, Y., Chen, X., & Zhao, Z. (2022). Leachate from municipal solid waste landfills in a global perspective: Characteristics, influential factors and environmental risks. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130234. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.130234>
- Magnisali, E., Yan, Q., & Vayenas, D. V. (2022). Electrocoagulation as a revived wastewater treatment method-practical approaches: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 97(1), 9–25. <https://doi.org/10.1002/JCTB.6880;CTYPE:STRING:JOURNAL>
- Norra, G. F., & Radjenovic, J. (2021). Removal of persistent organic contaminants from wastewater using a hybrid electrochemical-granular activated carbon (GAC) system. *Journal of Hazardous Materials*, 415. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125557>
- Pramastya, C. R., & Rosariawari, F. (2023). Modifikasi Kombinasi Elektrokoagulasi – Adsorpsi untuk Menyisihkan Fosfat dan TSS pada Limbah Laundry. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.32672/JSE.V8I4.6728>
- Sudrajat, A. A., Murniati, A., Hardian, A., Yani, J. A., Terusan, J., Sudirman, J., & Cimahi, I. (2025). Efficiency of Electrocoagulation for Laboratory Wastewater Treatment Using Aluminum Electrodes. *Journal of Chemistry and Environment*, 27–40. <https://doi.org/10.56946/JCE.V4I1.488>
- Syawalain, M. A. R., Yohana, Y., & Kahar, A. (2019). Pengaruh Kuat Arus dan Tegangan Terhadap Perubahan Kandungan Logam pada Lindi TPA Sampah dengan Metode Elektrolisis. *Jurnal Chemurgy*, 3(1), 6–10. <https://doi.org/10.30872/CMG.V3I1.2596>

- Takwanto, A., Mustain, A., & Sudarminto, H. P. (2018). Penurunan Kandungan Polutan pada Lindi dengan Metode Elektrokoagulasi-Adsorpsi Karbon Aktif. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 2(1), 11–16. <https://doi.org/10.33795/JTKL.V2I1.37>
- Twizerimana, P., & Wu, Y. (2024). Overview of integrated electrocoagulation-adsorption strategies for the removal of heavy metal pollutants from wastewater. *Discover Chemical Engineering 2024 4:1*, 4(1), 14-. <https://doi.org/10.1007/S43938-024-00053-W>
- Wahyuni, N. L. E., Nurcahyo, Leoangraini, U., Sudarman, R., Soeswanto, B., Muhari, E. H., Ngatin, A., & Sihombing, R. P. (2023). Pengolahan Air Limbah Tahu Menggunakan Metode Elektrokoagulasi dan Adsorpsi Secara Kontinyu: *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 9(2), 140–150. <https://doi.org/10.22487/KOVALEN.2023.V9.I2.16446>