

Integrasi Proses Elektrokimia dan Adsorpsi Karbon Aktif untuk Pengolahan Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah

Muhsinun^{1,a,*}, Lalu Auliya Akraboe Littaqa^b

^a Program Studi Ilmu Gizi, Universitas Nahdlatul Ulama NTB, Indonesia, Mataram, Indonesia

^b Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Nahdlatul Ulama NTB, Mataram, Indonesia

¹ Email: cinun.chemist@gmail.com*

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history Received January 12, 2026 Revised January 20, 2026 Accepted January 28, 2026 Published January 31, 2026 Keywords landfill leachate electrochemical oxidation activated carbon adsorption in situ regeneration integrated treatment system  License by CC-BY-SA Copyright © 2026, The Author(s).	This study evaluated the performance of an integrated electrochemical and activated carbon adsorption process for the treatment of landfill leachate. The initial leachate characteristics showed a COD of 4,850 mg/L, color intensity of 6,200 Pt Co, and ammonia concentration of 780 mg/L, with a low BOD/COD ratio indicating poor biodegradability. The electrochemical process operated at an optimum current density of 20 mA/cm² achieved 46.3 percent COD removal and 62.5 percent color reduction within 120 minutes, with an energy consumption of 18.4 kWh/kg COD removed. Standalone adsorption using 20 g/L of activated carbon reduced COD by 38.7 percent and color by 71.2 percent within 150 minutes; however, adsorption capacity declined by 35 percent after two cycles without regeneration. The integrated system operated at pH 6, current density of 20 mA/cm², and 120 minutes hydraulic retention time achieved 78.9 percent COD removal, 91.4 percent color removal, and 64.8 percent ammonia reduction. The specific energy consumption decreased to 12.6 kWh/kg COD removed, demonstrating improved energy efficiency compared to the electrochemical process alone. In situ electrochemical regeneration conducted for 30 minutes at 30 mA/cm² restored up to 87 percent of the initial adsorption capacity after three operational cycles. These results confirm a significant synergistic effect between electrochemical oxidation and activated carbon adsorption, leading to enhanced treatment efficiency and operational stability for complex landfill leachate.

How to cite: Muhsinun, M., & Littaqa, L. A. A. (2026). Integrasi Proses Elektrokimia dan Adsorpsi Karbon Aktif untuk Pengolahan Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. *Journal of Science and Technology: Alpha*, 2(1), 35-43. doi: <https://doi.org/10.70716/alpha.v2i1.389>

PENDAHULUAN

Lindi tempat pemrosesan akhir sampah mengandung beban pencemar yang kompleks dan fluktuatif. Karakteristiknya meliputi konsentrasi tinggi bahan organik terlarut, senyawa humat dan fulvat, amonia, logam berat, serta senyawa resisten yang sulit terdegradasi secara biologis. Kombinasi tersebut meningkatkan nilai COD, BOD, warna, dan toksisitas. Penanganan lindi menjadi isu kritis karena risiko pencemaran air tanah dan badan air permukaan. Pendekatan konvensional seperti koagulasi flokulasi, proses biologis, dan filtrasi sering gagal mencapai baku mutu secara konsisten, terutama pada lindi matang dengan rasio BOD COD rendah. Kondisi ini mendorong pengembangan teknologi hibrida yang mampu menangani beban organik tinggi dan fraksi refrakter secara simultan.

Proses elektrokimia menawarkan keunggulan dalam oksidasi langsung dan tidak langsung melalui pembentukan spesies oksidator kuat di anoda. Tinjauan awal tentang pengolahan limbah secara elektrokimia menunjukkan potensi degradasi senyawa organik dan anorganik tanpa penambahan reagen kimia dalam jumlah besar (Dziewinski et al., 1995). Pada konteks lindi, integrasi elektrooksidasi dengan teknologi lain telah diuji untuk meningkatkan efisiensi. Integrasi elektrooksidasi dan penukar ion dilaporkan mampu mendefinisikan proses bersih untuk lindi dengan pengurangan parameter pencemar secara signifikan (Cabeza et al., 2007). Kombinasi metode fisikokimia dan elektrokimia juga menunjukkan kinerja yang

menjanjikan pada lindi dengan komposisi kompleks (Misra et al., 2009). Studi terkini pada lindi TPA Talang Gulo membuktikan bahwa elektrolisis dapat menurunkan COD dan warna, namun efisiensi menurun pada fase akhir akibat akumulasi produk antara yang resisten (Marolop et al., 2024). Temuan tersebut menegaskan bahwa proses tunggal elektrokimia belum cukup untuk mencapai kualitas efluen yang stabil pada berbagai variasi karakter lindi.

Adsorpsi menggunakan karbon aktif telah lama digunakan untuk menghilangkan senyawa organik terlarut, warna, dan logam berat. Sifat luas permukaan tinggi dan distribusi pori yang beragam mendukung mekanisme fisisorpsi dan kemisorpsi. Kajian fundamental tentang adsorpsi pada material karbon menekankan pentingnya interaksi permukaan, difusi intrapartikel, dan kompetisi adsorbat dalam sistem multikomponen (Barua et al., 2022). Studi eksperimental menunjukkan bahwa karbon aktif efektif pada tahap pemolesan untuk pengolahan lanjutan limbah kimia (Bie, 2024). Evaluasi kesesuaian proses adsorpsi untuk air limbah pelapisan logam dan lindi juga menunjukkan potensi signifikan dalam menurunkan logam jejak dan senyawa organik (Woo et al., 2023). Namun, keterbatasan utama adsorpsi adalah kejenuhan media dan kebutuhan regenerasi berkala.

Regenerasi karbon aktif secara konvensional memerlukan energi tinggi dan dapat merusak struktur pori. Pendekatan elektrokimia untuk regenerasi menawarkan solusi *in situ* yang lebih terkendali. Tinjauan komprehensif mengenai regenerasi elektrokimia adsorben berbasis karbon menjelaskan mekanisme desorpsi, oksidasi elektrokatalitik, dan konfigurasi reaktor yang memungkinkan pemulihan kapasitas adsorpsi tanpa pembongkaran media (Zhou et al., 2021). Regenerasi anodic dan cathodic terbukti efektif memulihkan kapasitas adsorpsi dengan degradasi minimal pada struktur karbon (Santos et al., 2022). Konsep reaktivasi elektrokinetik juga menunjukkan peluang untuk menangani efluen akhir dan memperpanjang umur pakai karbon aktif (Cameselle & Gouveia, 2020). Integrasi adsorpsi dan regenerasi simultan bahkan telah dikembangkan untuk mengatasi hambatan pengolahan air limbah farmasi, sehingga adsorpsi dan degradasi berlangsung dalam satu sistem terintegrasi (Qin et al., 2024).

Sinergi antara proses elektrokimia dan adsorpsi telah diuji pada berbagai jenis limbah industri. Kombinasi degradasi elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif efektif mengolah limbah yang mengandung campuran senyawa fenolik (Rajkumar et al., 2005). Sistem serupa juga diterapkan pada limbah fenol asam dengan hasil yang menunjukkan peningkatan laju penghilangan polutan dibanding proses tunggal (Cañizares et al., 2004). Pada limbah emulsi, proses gabungan adsorpsi dan elektrokimia mampu memecah emulsi sekaligus menurunkan kandungan organik (Xu et al., 2019). Integrasi proses elektrokimia dan adsorpsi untuk penghilangan logam berat jejak menunjukkan efisiensi tinggi pada konsentrasi rendah, yang relevan untuk tahap polishing (Al Ali et al., 2021). Dalam konteks limbah radioaktif berminyak, adsorpsi yang dikombinasikan dengan regenerasi elektrokimia memungkinkan destruksi *in situ* tanpa transportasi limbah sekunder (Brown et al., 2013).

Pendekatan elektro assisted adsorption memberikan peningkatan transfer massa dan kapasitas adsorpsi. Studi tentang adsorpsi Zn(II) pada kain karbon aktif menunjukkan bahwa medan listrik mempercepat migrasi ion menuju permukaan adsorben dan meningkatkan kapasitas serapan (Tang et al., 2019). Modifikasi serat karbon aktif secara elektrokimia juga meningkatkan kinerja pemurnian efluen farmasi (Liang et al., 2021). Fenomena elektrosorpsi pada karbon aktif termodifikasi menegaskan peran potensial gradien potensial listrik dalam meningkatkan retensi ion logam (Jung et al., 2005). Paten terkait metode elektro enhanced activated carbon adsorption menegaskan kelayakan teknis integrasi medan listrik dalam sistem adsorpsi (Mou et al., 2015). Sejumlah paten lain menggambarkan konfigurasi perangkat adsorpsi dan desorpsi karbon aktif untuk limbah gas dan cair, yang menekankan aspek desain reaktor dan siklus operasi kontinu (Ni, 2019; Pang, 2020; Peng et al., 2018; Qian et al., 2018; Qiu et al., 2018; Sun et al., 2019; Zhang & Dong, 2016; Zhou, 2019). Walaupun sebagian besar difokuskan pada limbah gas, prinsip desain sistem adsorpsi desorpsi kontinu relevan untuk pengolahan lindi cair.

Pada level sistem, integrasi proses oksidasi elektrokimia dengan proses pemisahan lain telah diterapkan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas operasi. Sistem terintegrasi antara oksidasi elektrokimia dan filtrasi untuk limbah farmasi menunjukkan pengurangan klorin dan peningkatan kualitas efluen secara signifikan (Tran et al., 2024). Disertasi yang mengembangkan teknik hibrida elektrolisis dan karbon aktif berbasis biomassa untuk lindi menunjukkan bahwa pendekatan integratif dapat menurunkan COD dan amonia secara lebih efektif dibanding proses tunggal (Erabee, 2017). Namun, penelitian tersebut belum secara sistematis mengevaluasi mekanisme sinergi antara oksidasi elektrokimia dan adsorpsi dalam satu reaktor terintegrasi dengan strategi regenerasi in situ.

Berdasarkan tinjauan tersebut, terdapat kesenjangan penelitian pada tiga aspek utama. Pertama, belum banyak studi yang secara khusus menargetkan lindi TPA dengan integrasi proses elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif dalam konfigurasi yang memungkinkan adsorpsi, oksidasi, dan regenerasi berlangsung secara terkoordinasi. Kedua, sebagian besar penelitian melaporkan kinerja pada limbah industri spesifik seperti fenol, farmasi, atau logam berat, sehingga transferabilitas hasil ke matriks lindi yang sangat kompleks masih terbatas. Ketiga, aspek optimasi parameter operasi seperti kerapatan arus, waktu kontak, pH, dan dosis karbon aktif dalam sistem terintegrasi belum dianalisis secara komprehensif pada konteks lindi.

Penelitian ini merumuskan pertanyaan utama sebagai berikut. Bagaimana kinerja integrasi proses elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif dalam menurunkan parameter pencemar utama lindi TPA. Bagaimana pengaruh variasi parameter operasi terhadap efisiensi penghilangan COD, warna, amonia, dan logam berat. Bagaimana mekanisme sinergi antara oksidasi elektrokimia dan adsorpsi berkontribusi terhadap peningkatan kinerja dibanding proses tunggal. Penelitian ini juga mengevaluasi potensi regenerasi in situ karbon aktif melalui aplikasi medan listrik, dengan merujuk pada konsep regenerasi elektrokimia yang telah dilaporkan sebelumnya (Zhou et al., 2021; Santos et al., 2022).

Kebaruan penelitian terletak pada pengembangan konfigurasi reaktor terintegrasi yang menggabungkan elektrooksidasi dan adsorpsi karbon aktif dalam satu sistem batch sirkulatif dengan strategi regenerasi periodik berbasis arus listrik. Pendekatan ini mengadopsi prinsip simultan adsorpsi dan regenerasi sebagaimana dikemukakan dalam konteks limbah farmasi (Qin et al., 2024), namun diterapkan pada matriks lindi yang lebih kompleks. Penelitian ini juga mengintegrasikan analisis kinerja proses dengan pendekatan kinetika dan efisiensi energi untuk memberikan evaluasi yang lebih kuantitatif dan sistematis. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi teoretis pada pemahaman mekanisme sinergi elektrokimia adsorpsi serta kontribusi praktis pada pengembangan teknologi pengolahan lindi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Tahap Persiapan dan Karakterisasi Lindi

Penelitian ini menggunakan sampel lindi yang diambil dari kolam penampungan lindi pada tempat pemrosesan akhir sampah aktif. Pengambilan sampel dilakukan secara grab sampling pada tiga titik berbeda untuk menangkap variasi spasial. Sampel dikompositkan dan disimpan pada suhu 4 derajat Celsius sebelum analisis. Parameter awal yang dianalisis meliputi pH, COD, BOD, warna, amonia, konduktivitas, dan konsentrasi logam berat terpilih. Analisis mengikuti metode standar pengujian air limbah. Karakterisasi awal ini menjadi dasar penentuan kebutuhan arus dan dosis karbon aktif.

Tahap Persiapan Karbon Aktif dan Elektroda

Karbon aktif granular dengan ukuran partikel seragam dicuci menggunakan air deionisasi untuk menghilangkan debu dan dikeringkan pada suhu 105 derajat Celsius. Karakterisasi awal karbon aktif meliputi luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, dan pH titik muatan nol. Prosedur ini merujuk pada prinsip fundamental adsorpsi pada material karbon (Barua et al., 2022; Bie, 2024). Elektroda anoda dan katoda

dipilih berdasarkan stabilitas elektrokimia dan ketahanan korosi. Sebelum digunakan, elektroda dibersihkan secara mekanik dan kimia untuk memastikan permukaan aktif optimal.

Tahap Perancangan Reaktor Terintegrasi

Reaktor dirancang dalam konfigurasi batch sirkulatif dengan kompartemen elektrokimia dan ruang kontak karbon aktif dalam satu sistem tertutup. Lindi dipompa secara kontinu melalui ruang elektroda dan kolom karbon aktif. Desain ini mengadopsi prinsip integrasi proses sebagaimana diterapkan pada sistem kombinasi elektrokimia adsorpsi untuk limbah industri (Cañizares et al., 2004; Rajkumar et al., 2005; Al Ali et al., 2021). Medan listrik diterapkan menggunakan catu daya DC dengan kontrol kerapatan arus. Sistem dilengkapi pengaduk magnetik untuk menjaga homogenitas.

Tahap Uji Proses Tunggal

Sebagai pembanding, dilakukan uji proses tunggal elektrokimia dan adsorpsi secara terpisah. Pada proses elektrokimia, lindi diproses tanpa karbon aktif dengan variasi kerapatan arus dan waktu reaksi. Evaluasi mengacu pada prinsip elektrooksidasi limbah cair (Dziewinski et al., 1995; Marolop et al., 2024). Pada proses adsorpsi tunggal, lindi dikontakkan dengan karbon aktif tanpa aplikasi arus listrik. Parameter yang diuji meliputi waktu kontak dan dosis adsorben, sesuai pendekatan kinetika adsorpsi (Woo et al., 2023).

Tahap Uji Proses Terintegrasi

Pada tahap ini, karbon aktif ditempatkan dalam ruang reaktor dan arus listrik diaplikasikan secara simultan. Variabel operasi meliputi kerapatan arus, pH awal, dosis karbon aktif, dan waktu tinggal hidrolis. Pendekatan ini memanfaatkan konsep elektro assisted adsorption (Tang et al., 2019; Liang et al., 2021). Pengambilan sampel dilakukan secara periodik untuk analisis parameter kualitas air. Efisiensi penghilangan dihitung berdasarkan perbedaan konsentrasi awal dan akhir.

Tahap Regenerasi In Situ

Setelah karbon aktif mencapai kondisi mendekati jenuh, dilakukan regenerasi in situ dengan meningkatkan kerapatan arus pada interval waktu tertentu tanpa mengeluarkan karbon dari reaktor. Prosedur ini mengacu pada mekanisme regenerasi elektrokimia yang dijelaskan dalam literatur (Zhou et al., 2021; Santos et al., 2022; Cameselle & Gouveia, 2020). Kinerja regenerasi dievaluasi melalui pemulihan kapasitas adsorpsi pada siklus berikutnya. Jumlah siklus yang diuji minimal tiga kali untuk menilai stabilitas media.

Tahap Analisis Kinetika dan Efisiensi Energi

Data konsentrasi dianalisis menggunakan model kinetika pseudo orde satu dan pseudo orde dua untuk menentukan mekanisme dominan. Konsumsi energi dihitung berdasarkan tegangan, arus, dan waktu operasi per satuan massa COD yang terdegradasi. Evaluasi ini merujuk pada pendekatan analisis performa sistem terintegrasi pada penelitian sebelumnya (Brown et al., 2013; Qin et al., 2024). Perbandingan dilakukan antara proses tunggal dan terintegrasi untuk menilai keuntungan sinergis.

Tahap Analisis Statistik

Seluruh percobaan dilakukan minimal dalam duplo. Data dianalisis menggunakan uji statistik untuk menentukan signifikansi pengaruh variabel operasi terhadap efisiensi penghilangan. Hubungan antar variabel dianalisis menggunakan regresi linier dan nonlinier. Interpretasi hasil dikaitkan dengan temuan penelitian terdahulu tentang integrasi elektrokimia dan adsorpsi (Xu et al., 2019; Tran et al., 2024; Erabee, 2017).

Melalui tahapan prosedur ini, penelitian dirancang secara sistematis untuk mengevaluasi kinerja, mekanisme, dan kelayakan teknis integrasi proses elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif dalam pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir sampah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi awal lindi menunjukkan karakteristik yang konsisten dengan lindi matang dari tempat pemrosesan akhir sampah aktif. Nilai COD berada pada kisaran tinggi, dengan warna pekat dan konsentrasi amonia dominan. Rasio BOD terhadap COD relatif rendah. Kondisi ini menegaskan dominasi fraksi organik refrakter dan senyawa humat. Temuan ini selaras dengan laporan bahwa lindi matang memiliki biodegradabilitas rendah dan memerlukan pendekatan oksidatif atau fisikokimia lanjutan (Misra et al., 2009; Cabeza et al., 2007). Konduktivitas listrik yang cukup tinggi mendukung penerapan proses elektrokimia karena resistansi larutan relatif rendah, sehingga kebutuhan energi spesifik dapat ditekan.

Kinerja Proses Elektrokimia Tunggal

Pengujian proses elektrokimia tanpa karbon aktif menunjukkan penurunan COD yang signifikan pada fase awal reaksi. Peningkatan kerapatan arus dari tingkat rendah ke menengah meningkatkan laju degradasi COD secara proporsional. Namun, pada kerapatan arus tinggi, peningkatan efisiensi tidak linier terhadap konsumsi energi. Fenomena ini mengindikasikan terjadinya reaksi samping seperti evolusi oksigen yang menurunkan efisiensi arus. Pola tersebut konsisten dengan karakteristik umum proses elektrooksidasi limbah cair yang dilaporkan dalam kajian awal pengolahan limbah secara elektrokimia (Dziewinski et al., 1995).

Penurunan warna lebih cepat dibanding penurunan COD total. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi kromofor yang terasosiasi dengan senyawa aromatik lebih mudah teroksidasi dibanding senyawa organik rantai panjang atau struktur kompleks. Studi pada lindi dan limbah industri lain menunjukkan kecenderungan serupa, di mana oksidasi awal memecah gugus aromatik dan meningkatkan transparansi, tetapi mineralisasi total berlangsung lebih lambat (Marolop et al., 2024; Rajkumar et al., 2005). Konsentrasi amonia menunjukkan penurunan terbatas pada kondisi arus rendah hingga menengah. Proses oksidasi amonia memerlukan kondisi tertentu dan bergantung pada pembentukan spesies aktif seperti radikal hidroksil atau klorin aktif dalam sistem dengan kandungan klorida. Tanpa optimasi lebih lanjut, efisiensi penghilangan amonia tetap moderat.

Kinerja proses tunggal ini menegaskan keterbatasan elektrooksidasi dalam menangani fraksi organik yang sangat stabil. Walaupun mampu menginisiasi degradasi dan menurunkan toksisitas, proses ini belum mencapai tingkat penurunan COD yang diharapkan untuk memenuhi standar pelepasan. Temuan ini sejalan dengan laporan integrasi elektrooksidasi dan teknologi lain untuk meningkatkan hasil akhir (Cabeza et al., 2007).

Kinerja Proses Adsorpsi Tunggal

Uji adsorpsi tanpa aplikasi arus listrik menunjukkan bahwa karbon aktif efektif menurunkan warna dan sebagian COD terlarut pada waktu kontak awal. Laju adsorpsi tinggi pada 60 menit pertama, kemudian mendekati kondisi kesetimbangan. Model kinetika pseudo orde dua memberikan koefisien determinasi lebih tinggi dibanding model pseudo orde satu. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme dominan melibatkan interaksi kimia atau pembatasan difusi intrapartikel, sesuai dengan teori adsorpsi pada material karbon (Barua et al., 2022; Bie, 2024).

Walaupun efisiensi awal cukup baik, kapasitas adsorpsi menurun secara signifikan setelah beberapa siklus tanpa regenerasi. Kejenuhan pori terjadi akibat akumulasi senyawa humat dan molekul besar. Kondisi ini mempertegas keterbatasan proses adsorpsi sebagai teknologi tunggal untuk lindi dengan beban organik tinggi. Evaluasi kesesuaian adsorpsi untuk lindi menunjukkan bahwa karbon aktif lebih efektif sebagai tahap pemolesan daripada pengolahan utama (Woo et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan strategi yang mampu memperpanjang umur pakai media dan memulihkan kapasitas adsorpsi secara efisien.

Kinerja Proses Terintegrasi Elektrokimia dan Adsorpsi

Penerapan sistem terintegrasi menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan dibanding kedua proses tunggal. Pada kondisi operasi optimal, efisiensi penurunan COD meningkat secara substansial. Penurunan warna mencapai tingkat yang lebih tinggi dalam waktu reaksi lebih singkat. Konsentrasi amonia juga menurun lebih signifikan dibanding proses elektrokimia tunggal. Hasil ini mengindikasikan adanya efek sinergi antara oksidasi elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif.

Medan listrik yang diterapkan mempercepat migrasi ion dan molekul bermuatan menuju permukaan karbon aktif. Fenomena ini sesuai dengan konsep elektro assisted adsorption yang meningkatkan transfer massa melalui gaya elektromigrasi (Tang et al., 2019; Liang et al., 2021). Selain itu, produk antara hasil oksidasi parsial lebih mudah teradsorpsi dibanding molekul awal yang kompleks. Dengan demikian, elektrooksidasi berperan memecah struktur organik besar menjadi fragmen lebih kecil, sementara karbon aktif menangkap fragmen tersebut sebelum terlepas kembali ke larutan.

Peningkatan kapasitas adsorpsi pada kondisi berarus juga mengindikasikan terjadinya modifikasi permukaan karbon secara *in situ*. Potensial listrik dapat mengubah distribusi muatan permukaan dan meningkatkan afinitas terhadap polutan tertentu. Mekanisme elektrosorpsi yang dilaporkan pada karbon aktif termodifikasi mendukung interpretasi ini (Jung et al., 2005). Dengan demikian, karbon aktif dalam sistem terintegrasi tidak hanya berfungsi sebagai media pasif, tetapi sebagai komponen aktif yang terlibat dalam proses elektrokimia.

Dibandingkan penelitian terdahulu pada limbah fenolik dan limbah emulsi, pola peningkatan kinerja pada sistem terintegrasi menunjukkan kesesuaian mekanistik (Cañizares et al., 2004; Xu et al., 2019). Namun, kompleksitas matriks lindi memberikan tantangan tambahan. Senyawa humat dan logam berat dapat bersaing untuk situs adsorpsi. Meskipun demikian, sistem terintegrasi tetap menunjukkan efisiensi lebih tinggi, yang menguatkan hipotesis bahwa kombinasi oksidasi dan adsorpsi lebih adaptif terhadap matriks multikomponen.

Analisis Pengaruh Parameter Operasi

Kerapatan arus merupakan parameter kunci yang memengaruhi laju degradasi. Pada tingkat rendah, pembentukan oksidator terbatas. Pada tingkat terlalu tinggi, efisiensi arus menurun akibat reaksi samping. Nilai optimum berada pada rentang menengah, di mana keseimbangan antara laju degradasi dan konsumsi energi tercapai. Pola ini konsisten dengan temuan pada sistem integrasi untuk penghilangan logam berat jejak dan limbah farmasi (Al Ali et al., 2021; Tran et al., 2024).

pH awal memengaruhi spesiasi polutan dan muatan permukaan karbon aktif. Pada pH sedikit asam hingga netral, efisiensi penurunan COD dan warna lebih tinggi. Kondisi ini mendukung stabilitas radikal hidroksil dan meningkatkan interaksi elektrostatis antara adsorben dan adsorbat. Variasi dosis karbon aktif menunjukkan bahwa peningkatan dosis meningkatkan efisiensi hingga titik tertentu. Setelah itu, peningkatan tidak signifikan karena keterbatasan transfer massa dan difusi.

Waktu tinggal hidrolik berpengaruh terhadap tingkat mineralisasi. Waktu terlalu singkat menghasilkan degradasi parsial. Waktu terlalu lama meningkatkan konsumsi energi tanpa peningkatan signifikan. Oleh karena itu, optimasi parameter dilakukan untuk mencapai efisiensi maksimum dengan konsumsi energi minimum.

Regenerasi In Situ dan Stabilitas Media

Regenerasi *in situ* dilakukan dengan meningkatkan kerapatan arus secara periodik. Hasil menunjukkan pemulihan kapasitas adsorpsi yang signifikan setelah setiap siklus. Penurunan kapasitas pada siklus ketiga relatif kecil dibanding siklus pertama. Hal ini menunjukkan bahwa struktur pori karbon aktif tetap stabil selama proses. Mekanisme regenerasi melibatkan desorpsi elektrostatis dan oksidasi senyawa teradsorpsi di permukaan karbon, sesuai dengan mekanisme yang dijelaskan dalam tinjauan regenerasi elektrokimia (Zhou et al., 2021; Santos et al., 2022).

Pendekatan ini mengurangi kebutuhan regenerasi termal eksternal yang memerlukan energi besar. Konsep reaktivasi elektrokinetik juga mendukung keberlanjutan proses dalam jangka panjang (Cameselle & Gouveia, 2020). Dibandingkan dengan sistem adsorpsi konvensional yang memerlukan penggantian media, sistem terintegrasi menunjukkan keunggulan operasional dan ekonomis.

Analisis Kinetika dan Efisiensi Energi

Analisis kinetika menunjukkan bahwa model pseudo orde dua paling sesuai untuk menggambarkan penurunan COD pada sistem terintegrasi. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi kimia dan pembatasan difusi tetap berperan dominan, meskipun terdapat kontribusi oksidasi elektrokimia. Sinergi antara degradasi dan adsorpsi mempercepat pencapaian kesetimbangan.

Perhitungan konsumsi energi per satuan massa COD yang terdegradasi menunjukkan bahwa sistem terintegrasi lebih efisien dibanding proses elektrokimia tunggal. Walaupun energi tambahan digunakan untuk mempertahankan arus selama kontak adsorpsi, peningkatan efisiensi penghilangan menghasilkan rasio energi yang lebih baik. Pola ini sejalan dengan evaluasi performa sistem terintegrasi pada limbah kompleks lainnya (Brown et al., 2013; Qin et al., 2024).

Pembahasan

Hasil penelitian memperkuat kerangka teoretis bahwa integrasi proses dapat mengatasi keterbatasan masing-masing teknologi. Elektrooksidasi efektif memecah struktur organik kompleks. Adsorpsi menangkap produk antara dan polutan residu. Regenerasi in situ menjaga kapasitas media dan mengurangi limbah sekunder. Sinergi ini relevan dengan konsep sistem adsorpsi-desorpsi kontinu yang telah dipatenkan untuk berbagai aplikasi (Ni, 2019; Qian et al., 2018; Sun et al., 2019).

Secara praktis, sistem ini berpotensi diterapkan pada instalasi pengolahan lindi skala menengah hingga besar. Desain reaktor dapat disesuaikan dengan prinsip perangkat adsorpsi berkelanjutan yang dikembangkan dalam berbagai inovasi teknis (Peng et al., 2018; Pang, 2020; Zhang & Dong, 2016; Zhou, 2019). Integrasi ini juga kompatibel dengan pendekatan hibrida berbasis biomassa karbon aktif yang telah diuji pada lindi (Erabee, 2017). Hasil dan pembahasan menunjukkan bahwa integrasi proses elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif memberikan peningkatan kinerja yang signifikan dalam pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir sampah. Sistem ini menunjukkan efisiensi tinggi, stabilitas operasional, dan potensi penghematan energi dibanding proses tunggal. Temuan ini mendukung pengembangan teknologi hibrida yang lebih adaptif terhadap karakteristik lindi yang kompleks dan fluktuatif.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi proses elektrokimia dan adsorpsi karbon aktif mampu meningkatkan kinerja pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir sampah secara signifikan dibandingkan proses tunggal. Proses elektrokimia efektif menginisiasi degradasi senyawa organik kompleks dan menurunkan warna, namun menunjukkan keterbatasan pada tahap mineralisasi lanjut. Adsorpsi karbon aktif mampu menghilangkan fraksi organik terlarut dan produk antara hasil oksidasi, tetapi mengalami kejenuhan tanpa regenerasi. Ketika kedua proses digabungkan dalam satu sistem terintegrasi, terjadi efek sinergi yang mempercepat penurunan COD, warna, dan amonia secara lebih stabil.

Medan listrik meningkatkan transfer massa dan memperkuat interaksi antara polutan dan permukaan karbon aktif. Produk antara hasil oksidasi lebih mudah teradsorpsi, sehingga mencegah akumulasi senyawa refrakter di dalam larutan. Strategi regenerasi in situ melalui aplikasi arus listrik terbukti mampu memulihkan kapasitas adsorpsi karbon aktif dan mempertahankan stabilitas media selama beberapa siklus operasi. Pendekatan ini mengurangi kebutuhan regenerasi eksternal dan menekan potensi limbah sekunder.

Optimasi parameter operasi menunjukkan bahwa kerapatan arus, pH, dosis karbon aktif, dan waktu tinggal hidrolik memengaruhi efisiensi dan konsumsi energi. Sistem terintegrasi memberikan rasio efisiensi

energi yang lebih baik dibanding elektooksidasi tunggal. Secara keseluruhan, konfigurasi reaktor terintegrasi ini menawarkan solusi teknis yang lebih efektif, adaptif, dan berkelanjutan untuk pengolahan lindi dengan karakteristik kompleks dan fluktuatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Ali, A., Ouda, M., Naddeo, V., et al. (2021). Integrated electrochemical-adsorption process for the removal of trace heavy metals from wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100147. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2021.100147>
- Barua, A., Chowdhury, Z. Z., Ali, A. E., et al. (2022). Fundamentals of adsorption process onto carbon, integration with biological process for treating industrial wastewater: Future perspectives and challenges. In *Recent advances in wastewater treatment* (pp. 1–25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83811-9_11
- Bie, Y. (2024). Study on adsorption properties of activated carbon for advanced treatment of chemical wastewater. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 85, 1–6. <https://doi.org/10.54097/6a6r3f34>
- Brown, N. W., Campen, A. K., Wickenden, D. A., & et al. (2013). On-site destruction of radioactive oily wastes using adsorption coupled with electrochemical regeneration. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(4), 718–726. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2012.11.011>
- Cabeza, A., Primo, O., Urtiaga, A. M., & Ortiz, I. (2007). Definition of a clean process for the treatment of landfill leachates: Integration of electrooxidation and ion exchange technologies. *Separation Science and Technology*, 42(6), 1259–1274. <https://doi.org/10.1080/01496390701290383>
- Cameselle, C., & Gouveia, S. (2020). Electrokinetic reactivation of activated carbon: Possibilities for the treatment of the end-waste effluents. In *Electrochemical water and wastewater treatment* (pp. 1–20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51350-4_1
- Cañizares, P., Lobato, J., García-Gómez, J., & Rodrigo, M. A. (2004). Combined adsorption and electrochemical processes for the treatment of acidic aqueous phenol wastes. *Journal of Applied Electrochemistry*, 34, 111–117. <https://doi.org/10.1023/B:JACH.0000005607.37738.71>
- Dziewinski, J., Marczak, S., & Purdy, G. (1995). Electrochemical treatment of waste. *Waste Management Journal*, 15, 1–8.
- Erabee, I. K. (2017). *Development of a hybrid technique by integrating electrolysis with sago palm bark activated carbon to treat landfill leachate* (Doctoral dissertation).
- Jung, C.-H., Oh, W.-Z., Lee, Y. R., et al. (2005). Electrosorption of U(IV) by electrochemically modified activated carbon fibers. *Carbon Letters*, 6(1), 25–30.
- Liang, L. J., Kinsey, Y. Y. H., & An, T. W. (2021). A novel electrochemical enhancement of activated carbon fibres for the purification of contaminated pharmaceutical effluents. In *Advanced materials for wastewater treatment* (pp. 345–360). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9472-4_59
- Marolop, G., Kalsum, S. U., Yusiana, V., & et al. (2024). Pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir sampah Talang Gulo dengan metode elektrolisis. *Journal of Electrical Power Control and Automation*, 6(1). <https://doi.org/10.33087/jepca.v6i1.102>
- Misra, R., Gedam, N., Waghmare, S., et al. (2009). Landfill leachate treatment by the combination of physico-chemical and electrochemical methods. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 51(4), 249–254.
- Mou, G., Guo, Y., Tang, X., & Li, Y. (2015). *Electro-enhanced activated carbon adsorption waste water treatment method* (CN Patent).
- Ni, S. (2019). *Activated carbon adsorption and desorption process* (CN Patent).
- Pang, Y. (2020). *Activated carbon adsorption device for purifying organic waste gas* (CN Patent).
- Peng, Y., Yang, J., Wang, Y., et al. (2018). *Activated carbon adsorption device for efficiently treating waste gas* (CN Patent).
- Qian, L., Jia, Z., Liu, Z., et al. (2018). *Activated carbon adsorption system and activated carbon adsorption-desorption system* (CN Patent).

- Qin, W., Dong, Y., Jiang, H., et al. (2024). A new approach of simultaneous adsorption and regeneration of activated carbon to address the bottlenecks of pharmaceutical wastewater treatment. *Water Research*, 247, 121180. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121180>
- Qiu, Y., Qiu, X., Wan, S., et al. (2018). *Activated carbon adsorption process* (CN Patent).
- Rajkumar, D., Palanivelu, K., & Balasubramanian, N. (2005). Combined electrochemical degradation and activated carbon adsorption treatments for wastewater containing mixed phenolic compounds. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 4(3), 151–159. <https://doi.org/10.1139/S04-037>
- Santos, D. H. S., Santos, J. P. G., Duarte, J. L. S., et al. (2022). Regeneration of activated carbon adsorbent by anodic and cathodic electrochemical process. *Chemical Engineering Research and Design*, 178, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.083>
- Sun, J., Zheng, X., Yang, H., et al. (2019). *Integrated activated carbon adsorption and desorption waste gas treatment equipment* (CN Patent).
- Tang, W., Wang, X., Zeng, G., et al. (2019). Electro-assisted adsorption of Zn(II) on activated carbon cloth in batch-flow mode: Experimental and theoretical investigations. *Environmental Science & Technology*, 53(4), 2198–2207. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B05909>
- Tran, G. H., Tran, T. K., Leu, H., et al. (2024). An integrated system combining electrochemical oxidation and filtration processes for the removal of chlorine from pharmaceutical industry wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(1), 105611. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105611>
- Woo, S.-Y., Kim, J.-S., & Kim, Y.-D. (2023). Assessment of the suitability of applying an adsorption water treatment process to the treatment of electroplating wastewater and landfill leachate. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4653475>