

PENGARUH SUHU DAN RASIO MASSA TERHADAP EFISIENSI ADSORPSI LOGAM BERAT Fe DAN Pb MENGGUNAKAN ADSORBEN SERBUK BATANG KELAPA (*COCOS NUCIFERA L*)

Andi Artiningsih¹, La Ifa², Fitra Jaya³, Syarwan Hamid⁴, Trislan Fitri Rahim⁵,
Muhammad Rayhan Laranja⁶

andi.artiningsih@umi.ac.id¹, la.ifa@umi.ac.id², fitra.jaya@umi.ac.id³,
syarwanhamid46@umi.ac.id⁴, trislanfitri@gmail.com⁵, laranjarehan053@gmail.com⁶

Universitas Muslim Indonesia

ABSTRAK

Limbah cair laboratorium yang mengandung logam berat Fe dan Pb berpotensi mencemari lingkungan perairan apabila dibuang tanpa pengolahan terlebih dahulu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu dan rasio massa adsorben terhadap efisiensi adsorpsi logam Pb dan Fe menggunakan adsorben serbuk batang kelapa (*Cocos nucifera L*). Proses adsorpsi dilakukan secara batch dengan variasi rasio massa adsorben sebesar 1,0 sampai 2,5 gram per 50 mL limbah dan variasi suhu sebesar 30 sampai 70°C, kemudian konsentrasi logam sisa diukur menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (AAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi awal Pb sebesar 3,426 ppm dan Fe sebesar 2,5894 ppm berhasil diturunkan secara signifikan setelah melalui proses adsorpsi. Pada variasi rasio massa, konsentrasi Pb terus menurun seiring bertambahnya massa adsorben dan mencapai nilai terendah sebesar 0,0001 ppm pada massa 2,0 dan 2,5 gram, sedangkan konsentrasi Fe mencapai titik terendah sebesar 0,0314 ppm pada massa 1,0 gram lalu meningkat kembali pada massa yang lebih besar akibat fenomena desorpsi. Pada variasi suhu, efisiensi penyerapan Pb paling baik diperoleh pada suhu 40°C dengan konsentrasi sisa 0,0366 ppm, sedangkan efisiensi penyerapan Fe paling baik diperoleh pada suhu 30°C dengan konsentrasi sisa 0,0314 ppm, dan keduanya menurun cukup tajam pada suhu yang lebih tinggi karena proses adsorpsi bersifat eksotermik. Massa adsorben 1,0 gram per 50 mL limbah ditetapkan sebagai kondisi optimum karena hasil akhirnya sudah memenuhi baku mutu air limbah yang berlaku dengan penggunaan bahan baku paling minimal. Penelitian ini membuktikan bahwa serbuk batang kelapa berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben alternatif yang murah, mudah didapat, dan ramah lingkungan untuk menurunkan kadar logam berat Fe dan Pb dalam limbah cair laboratorium.

Kata Kunci: Adsorpsi, Suhu, Massa.

ABSTRACT

Laboratory wastewater containing heavy metals Fe and Pb has the potential to pollute the aquatic environment if it is discharged without prior treatment. This study aims to analyze the effect of temperature and adsorbent mass ratio variation on the adsorption efficiency of Pb and Fe using coconut trunk powder (*Cocos nucifera L*) as the adsorbent. The adsorption process was carried out in batch mode with adsorbent mass ratio varied from 1.0 to 2.5 grams per 50 mL of wastewater and temperature varied from 30 to 70°C, after which the residual metal concentration was measured using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results showed that the initial concentrations of Pb at 3.426 ppm and Fe at 2.5894 ppm were significantly reduced after the adsorption process. In the mass ratio variation, the Pb concentration continued to decrease as the adsorbent mass increased and reached its lowest value of 0.0001 ppm at 2.0 and 2.5 grams, while the Fe concentration reached its lowest point of 0.0314 ppm at 1.0 gram before rising again at higher adsorbent masses due to desorption. In the temperature variation, the best Pb removal was obtained at 40°C with a residual concentration of 0.0366 ppm, while the best Fe removal was obtained at 30°C with a residual concentration of 0.0314 ppm, and both decreased sharply at higher temperatures because the adsorption process is exothermic in nature. An adsorbent mass of 1.0 gram per 50 mL of wastewater was established as the optimum condition since it already met the applicable wastewater quality standard while using the least amount of adsorbent material. This study demonstrates that coconut trunk powder has strong potential as a low cost and

environmentally friendly alternative adsorbent for reducing Fe and Pb heavy metal content in laboratory wastewater.

Keywords: Adsorption, Temperature, Mass.

PENDAHULUAN

Kebutuhan air dengan kualitas yang layak bagi kehidupan terus meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk dan pesatnya pertumbuhan sektor industri di Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS 2023), jumlah penduduk Indonesia telah mencapai lebih dari 277 juta jiwa dan tekanan terhadap sumber daya air bersih semakin besar akibat aktivitas industri yang menghasilkan limbah cair dalam jumlah yang signifikan. Kondisi ini tidak hanya meningkatkan permintaan air bersih tetapi juga meningkatkan risiko pencemaran lingkungan perairan akibat pelepasan limbah cair yang belum diolah secara memadai (Angraini dkk., 2022).

Air limbah yang tidak diolah secara optimal dan masih mengandung beragam polutan dapat mencemari ekosistem perairan. Pencemaran ini menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan keseimbangan ekosistem akibat kandungan bahan berbahaya di dalamnya. Salah satu sumber pencemaran yang sering diabaikan adalah limbah cair dari aktivitas laboratorium. Air limbah laboratorium tergolong limbah B3 karena mengandung senyawa organik dan anorganik seperti Cd, Pb, Cu, Hg, Cr, Zn, dan Fe yang sangat berpotensi mencemari lingkungan jika dibuang tanpa pengolahan lebih lanjut (Angraini dkk., 2022).

Logam berat Fe dan Pb dipilih sebagai fokus penelitian ini karena keduanya merupakan parameter pencemaran yang paling dominan dan konsisten terdeteksi dalam limbah cair laboratorium perguruan tinggi Indonesia. Komposisi limbah cair laboratorium yang reaktif dan berbahaya mengandung logam berat Pb dan Fe serta memiliki nilai COD yang tinggi sehingga sulit untuk terurai secara alami apabila dibuang langsung ke air (Agustin dan Apriani, 2024). Hal ini dipertegas oleh hasil pengukuran langsung di lapangan di mana berdasarkan hasil uji pendahuluan pada limbah laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Tanjungpura, konsentrasi ion logam Fe terdeteksi sebesar 19,4 mg/L dan logam Pb sebesar 22,9 mg/L. Kedua nilai tersebut jauh melampaui baku mutu yang ditetapkan dalam peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 tahun 2014, yaitu batas maksimal Fe sebesar 5 mg/L dan Pb sebesar 0,1 mg/L, sehingga limbah laboratorium yang mengandung kedua logam tersebut wajib diolah sebelum dibuang ke lingkungan (Audiana dkk., 2022).

Keberadaan logam Fe dan Pb dalam perairan tidak hanya melampaui batas regulasi tetapi juga menimbulkan dampak yang serius terhadap ekosistem dan kesehatan makhluk hidup. Setelah logam berat masuk ke badan air, keduanya akan bertahan dan dapat terakumulasi hingga mencapai konsentrasi yang berbahaya bagi makhluk hidup (Tony dkk., 2022). Logam Fe dalam konsentrasi berlebih dapat menurunkan kadar oksigen terlarut di perairan karena proses oksidasi Fe membentuk endapan ferri hidroksida yang menutup permukaan sedimen dan menghambat kehidupan organisme akuatik. Sementara itu dari sisi dampak kesehatan manusia, paparan logam Pb secara kronis dapat menyebabkan gangguan sistem saraf berupa penurunan IQ dan keterlambatan pertumbuhan, gangguan sistem reproduksi, peningkatan tekanan darah, serta gangguan fungsi. Mengingat besarnya risiko yang ditimbulkan oleh kedua logam tersebut, maka pengolahan limbah laboratorium yang mengandung Fe dan Pb menjadi suatu kebutuhan yang mendesak dan tidak dapat diabaikan (Hasanah, 2022).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menurunkan kadar logam berat dalam limbah cair, antara lain presipitasi kimia, pertukaran ion, ekstraksi pelarut, evaporasi, dan reverse osmosis. Metode-metode konvensional tersebut memiliki kelemahan utama berupa

dihasilkannya lumpur dalam jumlah besar serta membutuhkan biaya operasional yang tinggi sehingga prosesnya menjadi tidak efektif untuk skala tertentu (Aghni dkk., 2020). Berbagai alternatif yang ada, metode adsorpsi dinilai lebih unggul karena prosesnya sederhana, dapat diterapkan pada berbagai skala, dan tidak menghasilkan produk samping berbahaya. Proses adsorpsi lebih sering dipilih dalam pengolahan limbah logam berat karena bersifat hemat biaya dan tidak menimbulkan efek samping yang berbahaya bagi lingkungan (Agustin dan Apriani., 2024). Dengan mempertimbangkan efektivitas, kesederhanaan proses, dan efisiensi biaya, metode adsorpsi menggunakan adsorben berbasis biomassa lignoselulosa dipilih sebagai pendekatan pengolahan yang paling sesuai untuk diterapkan dalam penelitian ini (Rifqi dkk., 2024).

Salah satu bahan baku biomassa yang berpotensi dikembangkan sebagai adsorben dalam penelitian ini adalah serbuk batang kelapa (*Cocos nucifera*). Batang kelapa merupakan material lignoselulosa yang kaya akan tiga komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Pada bagian kelapa, kandungan selulosa tercatat sebesar 37,9%, hemiselulosa 15,5%, dan lignin 33,5% (Kondo dan Muhammad, 2018). Ketiga komponen ini mengandung gugus fungsi aktif seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan karbonil (-C=O) yang berperan penting dalam mengikat ion logam berat. Serbuk batang kelapa memiliki kandungan karbon yang tinggi, gugus fungsi yang banyak mengandung oksigen, dan struktur berpori yang membuatnya berpotensi sebagai adsorben untuk menghilangkan kontaminan logam berat dari limbah cair. Pemanfaatan serbuk batang kelapa sebagai bahan baku juga memiliki nilai tambah dari sisi lingkungan karena limbah batang kelapa selama ini belum dimanfaatkan secara optimal dan sering dibiarkan membusuk atau dibakar tanpa nilai guna (Rizki dkk., 2024).

Berdasarkan uraian permasalahan di atas, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi suhu dan rasio massa adsorben terhadap efisiensi penurunan konsentrasi logam berat Fe dan Pb dalam limbah cair laboratorium menggunakan serbuk batang kelapa (*Cocos nucifera* L). Variasi suhu dalam proses adsorpsi menjadi parameter penting karena suhu mempengaruhi energi kinetik molekul dan laju difusi ion logam menuju permukaan adsorben, sehingga perubahan suhu dapat meningkatkan atau menurunkan kemampuan adsorben. Peningkatan suhu operasi dalam proses adsorpsi dapat memperbesar ukuran pori adsorben karena difusi merupakan proses yang bersifat endotermis, sehingga kapasitas adsorpsi cenderung meningkat seiring kenaikan suhu (Octavia dkk., 2024).

Variasi rasio massa adsorben terhadap volume larutan untuk menentukan jumlah sisi aktif optimal yang tersedia dalam mengikat ion logam. Massa adsorben yang lebih besar terbukti menghasilkan efisiensi penurunan konsentrasi logam yang lebih tinggi karena semakin banyak sisi aktif yang tersedia untuk proses penyerapan ion logam dalam larutan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan data kondisi optimum proses adsorpsi menggunakan serbuk batang kelapa sebagai adsorben alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan dalam pengolahan limbah cair laboratorium yang mengandung logam berat Fe dan Pb (Anggriani et al., 2021).

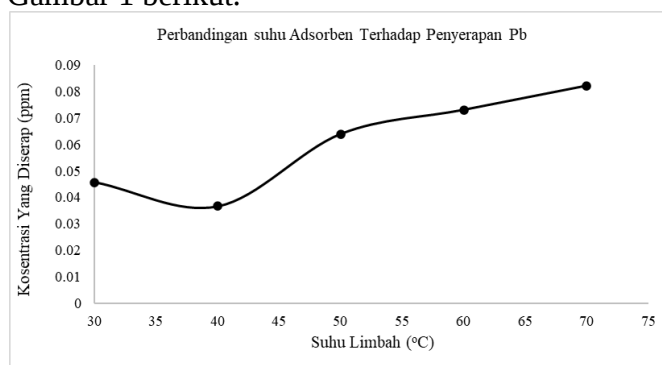
METODE PENELITIAN

Objek penelitian ini adalah air limbah sintetik yang dibuat di laboratorium sebelum proses pengolahan di WWTP. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan April-Juni 2026 di Laboratorium Biomassa FTI UMI untuk pembuatan Adsorben dengan proses pirolisisnya, untuk proses penyerapan logam Besi dan Timbal digunakan Laboratorium Riset Teknik Kimia FTI UMI, serta untuk pengujian kadar logam Besi dan Timbal pada sampelnya digunakan Laboratorium di BBIHP Makassar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh suhu Adsorpsi terhadap penyerapan Logam Timbal (Pb)

Hasil pengukuran konsentrasi Pb pada berbagai rasio suhu limbah disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Grafik Pengaruh suhu Adsorpsi terhadap penyerapan Logam Timbal (Pb)

Berdasarkan data pada Gambar 1, konsentrasi Pb setelah proses adsorpsi menunjukkan pola yang tidak linier terhadap kenaikan suhu. Pada suhu 30°C konsentrasi Pb tercatat sebesar 0,0457 ppm, kemudian turun menjadi 0,0366 ppm pada suhu 40°C. Namun setelah melewati suhu 40°C, konsentrasi Pb justru terus meningkat seiring naiknya suhu, yaitu menjadi 0,0821 ppm pada 50°C, 0,0912 ppm pada 60°C, dan 0,1003 ppm pada 70°C. Pola ini menunjukkan bahwa efisiensi penyerapan Pb oleh serbuk batang kelapa mencapai titik terbaik pada suhu 40°C, sedangkan peningkatan suhu lebih lanjut justru menurunkan kinerja adsorpsi.

Fenomena ini konsisten dengan penelitian (Horsfall dan Spiff., 2005) yang meneliti sorpsi Pb^{2+} menggunakan biomassa *Caladium bicolor*. Dalam penelitian tersebut ditemukan bahwa suhu paling optimum untuk penyerapan Pb^{2+} juga berada pada kisaran 40°C, dan proses sorpsinya bersifat eksotermik serta didominasi oleh mekanisme fisisorpsi. Artinya suhu yang terlalu tinggi tidak menguntungkan proses adsorpsi karena reaksi eksotermik secara alami lebih disukai pada kondisi suhu rendah. Kesamaan pola antara hasil penelitian ini dengan temuan Horsfall dan Spiff memberi indikasi bahwa mekanisme penyerapan Pb oleh serbuk batang kelapa juga kemungkinan besar berlangsung melalui fisisorpsi, dimana ikatan antara ion Pb^{2+} dan permukaan adsorben terjadi melalui gaya van der Waals dan interaksi elektrostatik yang relatif lemah dibandingkan ikatan kimia.

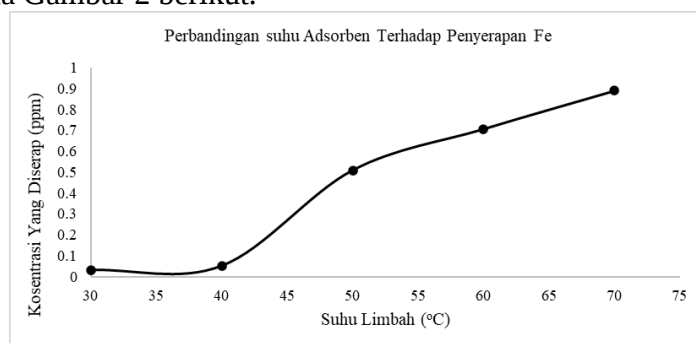
Secara molekuler, penurunan efisiensi adsorpsi pada suhu di atas 40°C dapat dijelaskan melalui peningkatan energi kinetik ion Pb^{2+} dan molekul air seiring naiknya suhu. Energi kinetik yang lebih tinggi membuat ion logam yang sebelumnya sudah terikat pada permukaan adsorben menjadi lebih mudah terlepas kembali ke dalam larutan, sesuai dengan prinsip Le Chatelier pada reaksi eksotermik yang bersifat reversibel. Selain itu, suhu tinggi juga dapat mempercepat gerakan molekul sehingga interaksi lemah antara gugus aktif adsorben seperti hidroksil dan ion Pb^{2+} menjadi tidak stabil dan mudah terputus.

Meskipun demikian, ada beberapa hal yang perlu dikritisi dari hasil ini. Pertama, selisih konsentrasi antara 30°C dan 40°C tergolong kecil, sehingga tanpa pengulangan (replikasi) pengukuran belum bisa dipastikan apakah perbedaan itu signifikan secara statistik atau hanya variasi acak selama eksperimen. Kedua, penelitian ini belum disertai dengan analisis parameter termodinamika seperti ΔG , ΔH , dan ΔS sebagaimana dilakukan pada penelitian rujukan, sehingga sifat eksotermik dari proses adsorpsi Pb pada serbuk batang kelapa ini masih bersifat dugaan berdasarkan kemiripan pola data, bukan pembuktian langsung. Ketiga, variabel lain seperti pH larutan dan waktu kontak tidak dikendalikan atau

dilaporkan selama pengujian suhu berlangsung, padahal kedua faktor tersebut diketahui saling memengaruhi proses adsorpsi logam berat, sehingga interaksi antar variabel belum dapat dipisahkan secara jelas. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan uji termodinamika serta karakterisasi gugus fungsi menggunakan FTIR sebelum dan sesudah adsorpsi untuk memperkuat pembuktian mekanisme fisorpsi yang diduga terjadi. Berdasarkan keseluruhan data, suhu 40°C ditetapkan sebagai kondisi optimum untuk adsorpsi Pb oleh serbuk batang kelapa karena menghasilkan konsentrasi akhir Pb terendah dibandingkan variasi suhu lainnya.

Pengaruh Suhu Adsorbs Terhadap Penyerapan Logam(Fe)

Hasil pengukuran konsentrasi Fe pada berbagai variasi suhu limbah disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2 Grafik Pengaruh suhu Adsorpsi terhadap penyerapan Logam Timbal (Pb)

Data pada dan Gambar 2 memperlihatkan kecenderungan yang berbeda dan lebih ekstrem dibandingkan hasil pada logam Pb. Konsentrasi Fe hasil adsorpsi pada suhu 30°C berada di angka 0,0314 ppm, kemudian sedikit naik menjadi 0,051 ppm pada suhu 40°C. Setelah itu terjadi lonjakan konsentrasi yang cukup tajam, yaitu menjadi 0,509 ppm pada 50°C, 0,706 ppm pada 60°C, dan mencapai 0,889 ppm pada 70°C. Kalau dilihat dari besarnya, kenaikan dari 40°C ke 50°C saja sudah hampir sepuluh kali lipat, jauh berbeda dengan pola kenaikan bertahap yang biasanya dilaporkan pada studi adsorpsi logam berat lain.

Secara umum, arah tren ini masih sejalan dengan karakteristik proses adsorpsi Fe yang bersifat fisik dan eksotermik (Jiang dkk., 2016) yang membandingkan kemampuan sekam padi, abu sekam padi, dan biomassa *Saccharomyces cerevisiae* dalam menyerap Fe(II) dan Mn(II) menemukan bahwa proses adsorpsi kedua logam tersebut berlangsung secara fisik, spontan, dan eksotermik. Sifat eksotermik ini menjelaskan mengapa kenaikan suhu justru merugikan proses penyerapan Fe, karena ikatan fisik antara ion logam dan permukaan adsorben yang terbentuk melalui gaya elektrostatis dan ikatan hidrogen tergolong lemah dan mudah terganggu begitu energi termal sistem meningkat.

Namun besarnya lonjakan konsentrasi Fe pada rentang 40 sampai 70°C ini perlu dicermati lebih dalam, tidak cukup hanya dijelaskan lewat argumen eksotermik saja. Ada beberapa kemungkinan yang lebih spesifik untuk kasus serbuk batang kelapa. Pertama, serbuk batang kelapa merupakan bahan berbasis lignoselulosa yang tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Struktur ini rentan mengalami perubahan fisik seperti pelunakan atau kerusakan sebagian pada gugus fungsi permukaan apabila terpapar suhu yang cukup tinggi dalam larutan, sehingga situs aktif yang tadinya bisa mengikat ion Fe menjadi berkurang jumlahnya secara drastis begitu suhu melewati 40°C. Kedua, ada kemungkinan sebagian ion Fe^{2+} yang sudah teradsorpsi mengalami desorpsi cepat karena kenaikan energi kinetik molekul, sesuai pola yang juga dilaporkan pada berbagai studi biosorpsi Fe berbasis limbah pertanian. Ketiga, perlu dipertimbangkan juga kemungkinan faktor pengukuran,

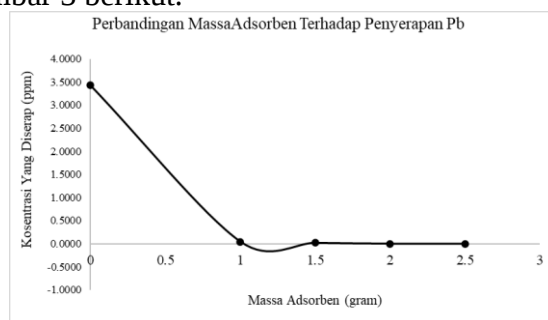
karena lonjakan sebesar sepuluh kali lipat dalam rentang suhu yang relatif sempit tergolong tidak biasa dan idealnya dikonfirmasi lewat pengulangan sampel pada suhu 50°C untuk memastikan bukan disebabkan oleh galat analisis AAS atau kontaminasi silang saat preparasi sampel.

Dari sisi kritik metodologis, penelitian ini juga belum melakukan karakterisasi termal terhadap serbuk batang kelapa, misalnya lewat analisis TGA atau FTIR sebelum dan sesudah pemanasan, sehingga klaim bahwa penurunan kinerja adsorpsi disebabkan oleh kerusakan struktur adsorben masih bersifat dugaan dan belum dibuktikan secara langsung. Selain itu, sama seperti pada pembahasan Pb, variabel pH dan waktu kontak tidak dilaporkan dikendalikan selama variasi suhu dilakukan, padahal kedua faktor ini punya pengaruh besar terhadap kelarutan dan kestabilan ion Fe dalam larutan.

Berdasarkan data yang ada, suhu 30°C ditetapkan sebagai kondisi paling menguntungkan untuk penyerapan Fe oleh serbuk batang kelapa, karena menghasilkan konsentrasi akhir Fe paling rendah dibandingkan seluruh variasi suhu yang diuji. Temuan ini sekaligus mengonfirmasi bahwa untuk kedua logam yang diteliti, baik Pb maupun Fe, suhu adsorpsi yang rendah lebih menguntungkan dibandingkan suhu tinggi, meski titik optimum keduanya sedikit berbeda.

Pengaruh Massa Adsorben terhadap penyerapan Logam Timbal (Pb)

Hasil pengukuran konsentrasi Pb pada berbagai rasio massa adsorben disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Pengaruh Massa Adsorben terhadap penyerapan Logam Timbal (Pb)

Berdasarkan data pada Tabel 1 dan Gambar 1, konsentrasi awal Pb sebelum proses adsorpsi tercatat sebesar 3,426 ppm. Nilai ini telah melampaui baku mutu maksimum Pb yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 sebesar 0,1 mg/L, dimana selisih antara konsentrasi awal dengan baku mutu yang ditetapkan mencapai lebih dari 34 kali lipat nilai ambang batas yang diperbolehkan. Tingginya konsentrasi Pb dalam sampel limbah laboratorium ini sejalan dengan penelitian (Audina dkk, 2017) yang melaporkan bahwa konsentrasi ion logam Pb pada limbah laboratorium perguruan tinggi dapat mencapai 22,9 mg/L dan jauh melampaui baku mutu lingkungan yang berlaku. Kondisi ini membuktikan bahwa limbah cair laboratorium yang mengandung logam Pb tidak dapat langsung dibuang ke badan air penerima tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu, karena berpotensi menimbulkan dampak toksik yang serius terhadap ekosistem perairan dan kesehatan manusia apabila terakumulasi dalam jangka panjang melalui rantai makanan (Putra dkk, 2023).

Setelah proses adsorpsi menggunakan adsorben serbuk batang kelapa, konsentrasi Pb dalam larutan mengalami penurunan yang sangat signifikan pada seluruh variasi massa yang diuji. Pada massa 1,0 gram konsentrasi Pb turun dari 3,426 ppm menjadi 0,0457 ppm, kemudian turun lebih lanjut menjadi 0,0183 ppm pada massa 1,5 gram, dan mencapai nilai terendah sebesar 0,0001 ppm pada massa 2,0 gram dan 2,5 gram. Penurunan konsentrasi Pb yang semakin besar seiring bertambahnya massa adsorben ini terjadi karena penambahan

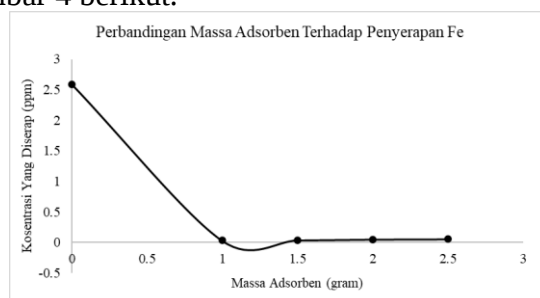
massa secara langsung meningkatkan jumlah sisi aktif yang tersedia pada permukaan adsorben untuk mengikat ion Pb^{2+} , sehingga semakin banyak ion logam yang mampu terjerap dari larutan (Iftekhar dkk., 2025).

Massa 2,0 gram dan 2,5 gram konsentrasi Pb akhir yang terukur menunjukkan nilai yang sama persis yaitu 0,0001 ppm. Ini mengindikasikan bahwa pada massa 2,0 gram permukaan biochar sudah mampu menyerap hampir seluruh ion Pb^{2+} yang tersedia dalam larutan, sehingga penambahan massa lebih lanjut menjadi 2,5 gram tidak memberikan penurunan konsentrasi yang berarti. Fenomena ini sejalan dengan konsep titik jenuh adsorben dimana setelah seluruh ion logam dalam larutan terserap, penambahan massa adsorben tidak lagi efektif karena tidak ada lagi adsorbat yang tersisa untuk diserap (Nurafriyanti,, 2017).

Meskipun konsentrasi terendah diperoleh pada massa 2,0 gram, konsentrasi Pb akhir pada massa terkecil yaitu 1,0 gram sebesar 0,0457 ppm sudah berada jauh di bawah baku mutu maksimum 0,1 mg/L berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014. Ini berarti limbah yang diolah menggunakan massa 1,0 gram sudah aman dan layak untuk dibuang ke badan air penerima tanpa perlu menambah massa adsorben lebih lanjut. Berdasarkan pertimbangan efisiensi penggunaan bahan baku adsorben dan nilai ekonomis operasional, massa adsorben sebesar 1,0 gram per 50 mL larutan ditetapkan sebagai kondisi tetap yang digunakan pada tahap pengujian variasi suhu selanjutnya karena sudah memenuhi standar baku mutu yang berlaku dengan konsumsi adsorben yang paling minimal.

Pengaruh Massa Adsorben Terhadap Penyerapan Logam Besi (Fe)

Hasil pengukuran konsentrasi Pb pada berbagai rasio massa adsorben disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Pengaruh Massa Adsorben terhadap penyerapan Logam Timbl (Pb)

Berdasarkan data pada grafik 4, konsentrasi Fe turun sangat tajam dari 2,5894 ppm sebelum adsorpsi menjadi 0,0314 ppm pada massa arang 1,0 gram. Setelah itu, konsentrasi Fe naik sedikit demi sedikit menjadi 0,036 ppm pada 1,5 gram, 0,0487 ppm pada 2,0 gram, dan 0,0538 ppm pada 2,5 gram. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan massa arang yang pertama memberikan efek penyerapan besar, sedangkan penambahan massa selanjutnya justru sedikit menurunkan efisiensi penyerapan.

Penurunan tajam pada tahap awal terjadi karena pada massa arang yang kecil, jumlah situs aktif yang tersedia jauh lebih besar dibandingkan jumlah ion Fe dalam larutan, sehingga hampir seluruh ion logam bisa langsung terikat. Tee dkk. (2022) dalam kajiannya terhadap biosorben dan biosorben magnetik menjelaskan bahwa luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tinggi pada tahap awal memang menjadi faktor utama yang mendorong tingginya kapasitas penyerapan logam berat.

Namun, kenaikan konsentrasi Fe setelah massa 1,0 gram ini sejalan dengan temuan Padmavathy dkk. (2016) pada penelitian penyerapan Cr(VI) menggunakan nanopartikel magnetit. Mereka menemukan bahwa penambahan dosis adsorben di atas titik optimum

justru menyebabkan partikel adsorben saling menggumpal atau beraglomerasi satu sama lain. Penggumpalan ini mengurangi luas permukaan efektif per satuan berat adsorben, sehingga sebagian situs aktif menjadi tidak termanfaatkan secara maksimal dan efisiensi penyerapan per satuan massa arang justru menurun, meski jumlah arang yang digunakan lebih banyak.

Meskipun terjadi kenaikan kecil setelah massa 1,0 gram, seluruh nilai konsentrasi Fe pada semua variasi massa tetap jauh di bawah baku mutu 5 mg/L yang berlaku, sehingga tidak menimbulkan masalah dari sisi kepatuhan lingkungan. Berdasarkan pertimbangan efisiensi penggunaan bahan dan hasil penyerapan yang paling rendah, massa arang 1,0 gram ditetapkan sebagai kondisi optimum untuk penyerapan Fe. Perlu dicatat, penelitian ini belum mengukur secara langsung tingkat agregasi partikel arang pada dosis tinggi, misalnya lewat pengamatan visual atau analisis distribusi ukuran partikel setelah pencampuran. Oleh karena itu, penjelasan mengenai aglomerasi partikel di atas masih bersifat pendekatan berdasarkan kemiripan pola dengan penelitian terdahulu, bukan bukti langsung dari data penelitian ini sendiri.

KESIMPULAN

1. Variasi suhu berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi kedua logam. Kondisi terbaik untuk Pb dicapai pada suhu 40°C dengan sisa konsentrasi 0,0366 ppm, sedangkan Fe justru optimal pada suhu yang lebih rendah yaitu 30°C dengan sisa konsentrasi 0,0314 ppm. Di atas suhu tersebut, efisiensi penyerapan kedua logam menurun karena sifat adsorpsi yang eksotermik.
2. Variasi rasio massa adsorben juga berpengaruh terhadap efisiensi adsorpsi kedua logam. Konsentrasi Pb terus menurun hingga 0,0001 ppm pada massa 2,0 dan 2,5 gram, sedangkan Fe justru paling rendah pada massa 1,0 gram sebesar 0,0314 ppm dan kembali naik saat massa ditambah, akibat desorpsi dan jenuhnya sisi aktif adsorben. Massa 1,0 gram per 50 mL limbah dipilih sebagai kondisi optimum karena hasilnya sudah memenuhi baku mutu dengan penggunaan bahan yang paling hemat.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengendalikan pH larutan selama proses adsorpsi, karena pH sangat memengaruhi kelarutan dan pengikatan ion logam terutama Fe. Analisis termodinamika serta karakterisasi FTIR dan SEM juga perlu dilakukan agar mekanisme adsorpsi terbukti secara ilmiah, bukan sekadar dugaan dari kemiripan pola data. Pengulangan pengukuran juga disarankan, khususnya pada variasi suhu Fe yang menunjukkan lonjakan konsentrasi cukup tajam, agar hasil lebih valid. Selain itu, kombinasi suhu dan rasio massa dapat diuji melalui pendekatan Response Surface Methodology (RSM), sekaligus menguji reusabilitas adsorben untuk penerapan pada skala yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, Suhendrayatna, dan Syahiddin DS. (2016). "Pengaruh Aktivasi Adsorben Biomassa Terhadap Gugus Hidroksil Pada Proses Adsorpsi Ion Logam Timbal (Pb)". *Jurnal Teknik Kimia USU*, 5(3), 7–11.
- Adewirli Putra, Wiya Elsa Fitri, F. A. F. (2023). "Toksistas Logam Timbal Terhadap Kesehatan dan Lingkungan". *Jurnal Kesehatan Medika Saintika*, 14, 158–174.
- Aghni, G., Sukono, B., Hikmawan, F. R., dan Satriawan, D. (2020). "Mekanisme Fitoremediasi". *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 2(02).
- Agustin, D. T., dan Apriani, I. (2024). "Kinetika Adsorpsi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Ampas Tebu dan Gambas Kering Pada Air Sumur Gali Sekitar TPA Batu Layang". *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(2), 427–432.

- Alamsyah, M., Kalla, R., dan La Ifa, L. I. (2017). "Pemurnian Minyak Jelantah Dengan Proses Adsorpsi". *Journal Of Chemical Process Engineering*, 2(2), 22.
- Anggraini, A. D., dan Mulyanti, H. (2025). "Efektivitas Reverse Osmosis dalam Menurunkan Tds". *Jurnal Sains Riset*, 15, 387-398.
- Anggriani, U. M., Hasan, A., dan Purnamasari, I. (2021). "Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif dalam Penurunan Konsentrasi Logam Tembaga (Cu) dan Timbal (Pb)". *Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya*, 12(02), 29-37.
- Angraini, N., Agustina, T.E dan Hadiah, F. (2022). "Pengaruh Ph dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb, Cu, Dan Cd". *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 345-355.
- Audina, M., Apriani, I. dan Kadaria, U. (2017). Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Teknik Lingkungan dengan Koagulasi dan Adsorpsi untuk Menurunkan COD, Fe, dan Pb. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 5(1), 1-10.
- Deri, N.O., Muslim, O., danHusin, Z. H, (2024). "Adsorpsi Ion Logam Cd (II) Dengan Menggunakan Adsorben Dari Kulit Pinang (Areca Catechu. L)". *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 2, 149–169.
- Dwi, E., dan Kurniawan, A. (2025). "Pengembangan Penuntun Praktikum Kimia Ramah Lingkungan Berbasis Inkuiri Terbimbing; Tahap Development Model ADDIE". *Journal Of Chemistry, Education, and Science*, 9(1), 14-22.
- Firda Rizki Rhomadoni, Siti Jamilatun, M. dan Idris, M. S. (2024). "Mekanisme dan Aplikasi Pirolisis Biomassa dalam Produksi Biochar, Bio-Oil dan Gas". *Seminar Nasional Inovasi Dan Teknologi, Universitas Ahmad Dahlan*, 28, 54-68.
- Harsono, D. (2015). "Sifat Fisis dan Mekanis Batang Kelapa (Cocos Nucifera L.) dengan Proses Pemadatan". *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 7, 39-48.
- Haryanti, D., Budianta, D., dan Salni, S. (2013). "Potensi Beberapa Jenis Tanaman Hias Sebagai Fitoremediasi Logam Timbal (Pb) dalam Tanah". *Jurnal Penelitian Sains*, 16(2), 53-58.
- Hasanah, N. (2022). "Cemaran Logam Berat Timbal (Pb) pada Pangan Lokal Kekerangan (Bilvavia)". *MGK Hasanah Universitas Airlanga*, 15, 17-19.
- Herlambang, Y. D. (2007). "Aplikasi Pengolahan Citra untuk Analisis Strukturmikro Logam Ferro Berdasarkan Pola-Pola Khas Statistiknya". *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi*, 2007
- Ifa, L., Pakala, F. R., Burhan, R. W., Jaya, F., dan Majid, R. A. (2020). "Pemanfaatan Sabut Kelapa Sebagai Bioadsorben Logam Berat Pb(II) Pada Air Limbah Industri". *Journal Of Chemical Process Engineering*, 5(1), 54-60.
- Jefriadi, Rinny Jelita, danNurhaliza, N. N. (2025). "Karbon Aktif dari Limbah Sawi Putih untuk Adsorpsi Ion Mangan (Mn)". *Jurnal Teknologi Agro-Industri*, 12(1), 70-80.
- Kaavessina, M. (2005). "Keseimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) dengan Adsorben Chitin Secara Batch". *Jurnal Teknik Kimia, FT UNS*, 4(1), 36-44.
- Kardiman, La Ifa, dan Rasyid, R. (2019). "Pembuatan Adsorben Dari Sabut Kelapa Sebagai Penyerap Logam Berat Pb (II)". *Jurnal ILTEK*, 14(2), 2083-2087.
- Karim, M. A., Juniar, H., dan Ambarsari, M. F. P. (2017). "adsorpsi Ion Logam Fe Dalam Limbah Tekstil Sintesis Dengan Menggunakan Metode Batch". *Jurnal Distilasi*, 2(2), 68.
- Kondo, Yan dan Muhammad, A. (2018). "Analisis Kandungan Lignin , Sellulosa , Dan Hemisellulosa". *INTEK Jurnal Penelitian*, 5(2), 94-97.
- Maharani, D. F dan Sa'diyah, K (2021). Adsorpsi Logam Nikel Menggunakan Adsorben Serbuk Gergaji Kayu". *Jurnal Teknologi Separasi*, 7(9), 170-178.
- Nurafriyanti, N., Prihatini, N.S. dan Syauqiah, I. (2017). Pengaruh Variasi pH dan Berat Adsorben dalam Pengurangan Konsentrasi Cr Total pada Limbah Artifisial Menggunakan Adsorben Ampas Daun Teh. *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(1), 56-65.
- Nurgitarini Muhluddin, Abd. Gafur, Y. (2022). "Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) Dan Kadmium (Cd)". *Journal Of Public Health*, 3(1), 119-129.
- Nurhayati, I., Vigiani, S., DAN Majid, D. (2020). "Penurunan Kadar Besi (Fe), Kromium (Cr), COD Dan BOD Limbah Cair Laboratorium Dengan Pengenceran Koagulasi Dan Adsorpsi". *Jurnal Teknik Sipil Universitas PGRI Adi Buana Surabaya*, 14(1), 74–87.

- Nurohmah dan Fathoni, R. (2019). Kemampuan Adsorpsi Logam Berat Cu dan Pb Menggunakan Adsorben Kulit Jagung. "Prosiding Seminar Nasional Teknologi, Universitas Mulawarman.
- Pratiwi, P., Aliah, H., Andrew, D., Sakke, P., dan Hamid, S. (2025). "Adsorption Of Cadmium Metal In Liquid Waste Using Adsorbent Product Of Pyrolysis Of Teak Wood Biomass Waste". *Journal Of Green Chemical And Environmental Engineering*, 1 (1), 1-10.
- Putra, A., Fitri, W.E. dan Febria, F.A. (2023). Toksisitas Logam Timbal terhadap Kesehatan dan Lingkungan: Literatur Review. *Jurnal Kesehatan Medika Saintika*, 14, 158-174.
- Rachmawati, S., Bernadetta, P., Mardiyanto, M. B., Fil'ardiani, N. U., Khoirunnisa, S., dan Arta, Y. P. A. (2024). "Kandungan Logam Berat Besi (Fe) Dan Timbal (Pb) Pada Air Lindi TPA Putri Cempo, Surakarta". *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal Of Environmental Sustainability Management)*, 8(2), 219–232.
- Rifqi Sufra, Jabosar R.H Panjaitan, Misbahudin Alhanif, Mustafa, Fauzi Yusupandi, Endi Adriansyah, Gustia Rahmadini, M. Rayhan Raqin, Peppy Herawati, A. S. (2024). "Intensifikasi Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Melalui Proses Koagulasi dan Adsorpsi Studi Pengolahan Limbah Cair Laboratorium dengan Metode Kombinasi Fisika-Kimia". *Jurnal Talenta Sipil*, 7(1), 266-275.
- Santi. (2013). Kajian Kinetika Dan Termodinamika Adsorpsi Ion Logam Pb (II) Dan Cu(Ii) Pada Karbon Aktif Sekam Padi Yang Diiradiasi Dengan Gelombang Ultrasonik.
- Shinta, Helard, D. dan Lathifah, W.D. (2022). Pemanfaatan Kulit Jagung sebagai Adsorben dalam Penyisihan Detergen dari Air Limbah Laundry. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(1).
- Sri Martini, dan Erna Yuliwati, D. K. (2020). "Pembuatan Teknologi Pengolahan Limbah Cair Industri". *Jurnal Destilasi Teknik Kimia, Universitas Muhammadiyah Palembang*, 5(2), 26-33.
- Syarif, T., Aladin, A., Modding, B., Rahmatullah, R.A dan Mustafa, N.M., (2023). " Penentuan Waktu Optimum Pirolisis Limbah Biomassa Serbuk Gergaji Batang Kelapa Menggunakan Gas Inert Argon". *Journal Of Chemical Process Engineering*, 8 (1), 40-48.
- Syauqiah I., Amalia M., dan Kertini H. A. (2011). "Analisis Variasi Waktu dan Kecepatan Pengaduk pada Proses Adsorpsi Limbah Logam Berat dengan Arang Aktif". *Jurnal Info Teknik*, 12(1), 11-20.
- Tony, C. P., Ernawati, R., dan Nursanto, E. (2022). "Analisis Pencemaran Logam Berat Terhadap Kualitas Air Pada Sungai Kalemendo". *Kurvatek Magister Teknik Pertambangan, UPN "Veteran" Yogyakarta*, 7(1), 13-18.
- Walad Wirawan, dan Rap Leanon, Z. M. (2015). "Pengaruh Suhu Adsorpsi dan Jumlah Penambahan Karbon Aktif Terhadap Kecerahan Surfaktan Decyl Poliglikosida dari D-Glukosa dan Dekanol Walad". *Jurnal Teknik Kimia USU*, 4(3), 12-16.
- Wardhani, I. Y., Surjokusumo, S., Sudo, Y., dan Nugroho, N. (2024). "Distribusi Kandungan Kimia Kayu Kelapa (Cocos Nucifera L)". *Jurnal Destilasi Teknik Kimia, Universitas Muhammadiyah Palembang*, 4, 1-7.
- Widayatno, T., Yuliawati, T., dan Susilo, A. A. (2017). "Adsorpsi Logam Berat (Pb) Dari Limbah Cair Dengan Adsorben Arang Bambu Aktif". *Jurnal Teknologi Bahan Alam*, 1(1), 17-23.
- Yulaipi, Sumah, A. (2013). "Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) dan Hubungannya dengan Laju Pertumbuhan Ikan Mujair (Oreochromis Mossambicus)". *Jurnal Saina Dan SENI Pomits*, 2(2), 1-5.