

	JURNAL CHEMURGY E-ISSN 2620-7435 Available online at http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK	 SINTA Accreditation No. 152/E/KPT/2023
---	---	--

PERBANDINGAN EFEKTIVITAS KARBON AKTIF DAN BATU APUNG DALAM MENURUNKAN KESADAHAN TOTAL DAN KEKERUHAN AIR SUNGAI MENGGUNAKAN SISTEM ADSORPSI KOLOM KONTINU

A COMPARATIVE STUDY ON THE EFFECTIVENESS OF ACTIVATED CARBON AND PUMICE FOR REDUCING TOTAL HARDNESS AND TURBIDITY OF RIVER WATER IN A CONTINUOUS COLUMN ADSORPTION SYSTEM

Diana Novita Sari*, Amalya Rafeyfa Wijaya, Iffah Ayu Mayla Puri, Ivonne Nadya Pricyllia, M. Wildanul Faizal Khafit, M. Tegar Firmansyah, Nur Azzakhruf A'dn

¹Department of Chemical Engineering, State Polytechnic of Malang
Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang, Indonesia

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

(Received: 2026 04, 07; Reviewed: 2026 06, 05; Accepted: 2026 06, 26)

Abstrak

Penurunan kualitas air sungai ditandai oleh meningkatnya kesadahan total dan kekeruhan yang dapat mengganggu pemanfaatannya sebagai sumber air baku. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas karbon aktif dan batu apung sebagai adsorben dalam menurunkan kesadahan total dan kekeruhan air sungai menggunakan sistem adsorpsi kolom kontinu. Air sungai dengan nilai awal kesadahan total sebesar 373 mg/L CaCO₃ dan kekeruhan 30,4 NTU dialirkan melalui kolom adsorpsi dengan variasi massa adsorben sebesar 200, 250, 300, 350, 400, dan 450 gram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben cenderung meningkatkan efisiensi penurunan kedua parameter kualitas air. Karbon aktif menunjukkan kinerja paling optimal, dengan efisiensi penurunan kekeruhan mencapai 87% dan kesadahan total sebesar 77% pada massa adsorben 450 gram. Sementara itu, batu apung menghasilkan efisiensi penurunan kekeruhan sebesar 83% dan kesadahan total sebesar 67% pada kondisi yang sama. Perbedaan kinerja kedua adsorben dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia material, khususnya luas permukaan dan struktur pori, yang berperan penting dalam mekanisme adsorpsi. Berdasarkan hasil tersebut, karbon aktif dinilai lebih efektif dibandingkan batu apung dalam sistem adsorpsi kolom kontinu, meskipun batu apung tetap memiliki potensi sebagai adsorben alternatif yang lebih ekonomis untuk pengolahan air sungai skala kecil hingga menengah.

Kata Kunci: adsorpsi, karbon aktif, batu apung, kesadahan total, kekeruhan

Abstract

The deterioration of river water quality is commonly indicated by increased total hardness and turbidity, which may hinder its utilization as a raw water source. This study aimed to compare the effectiveness of activated carbon and pumice stone as adsorbents in reducing total hardness and turbidity of river water using a continuous column adsorption system. River water with an initial total hardness of 373 mg/L as CaCO₃ and a turbidity of 30.4 NTU was passed through an adsorption column with adsorbent mass variations of 200, 250,

	<h1>JURNAL CHEMURGY</h1> <p>E-ISSN 2620-7435</p> <p>Available online at http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK</p>	 <p>SINTA Accreditation No. 152/E/KPT/2023</p>
---	---	---

300, 350, 400, and 450 g. The results showed that increasing the adsorbent mass generally enhanced the removal efficiency of both water quality parameters. Activated carbon exhibited the highest performance, achieving turbidity and total hardness removal efficiencies of 87% and 77%, respectively, at an adsorbent mass of 450 g. In comparison, pumice stone achieved turbidity and total hardness reductions of 83% and 67% under the same conditions. The performance differences between the two adsorbents are attributed to their distinct physical and chemical characteristics, particularly surface area and pore structure, which play a crucial role in the adsorption mechanism. Based on these findings, activated carbon was more effective than pumice stone in a continuous column adsorption system, although pumice stone remains a promising low-cost alternative adsorbent for small- to medium-scale river water treatment applications.

Keywords: adsorption, activated carbon, pumice, total hardness, turbidity

1. PENDAHULUAN

Air sungai merupakan sumber daya air permukaan yang ketersediaannya relatif melimpah dan memiliki peran penting dalam menunjang kebutuhan domestik, pertanian, industri, serta keberlanjutan ekosistem perairan. Di banyak wilayah, air sungai masih dimanfaatkan sebagai sumber air baku karena kemudahan akses dan kontinuitas ketersediaannya sepanjang tahun. Namun, melimpahnya kuantitas air sungai tidak selalu diikuti dengan kualitas yang memadai, sehingga diperlukan pengelolaan dan pengolahan kualitas air sebelum dimanfaatkan secara luas (Tong, 2023).

Seiring dengan meningkatnya aktivitas manusia, kualitas air sungai cenderung mengalami penurunan akibat masuknya beban pencemar dari limbah domestik, pertanian, dan industri. Aktivitas tersebut meningkatkan kandungan mineral terlarut dan partikel tersuspensi di badan air, yang umumnya tercermin dari meningkatnya nilai kesadahan total dan kekeruhan. Kedua parameter ini sering digunakan sebagai indikator utama kualitas fisik dan kimia air permukaan karena berkaitan langsung dengan tingkat pencemaran dan kelayakan air sebagai sumber air baku (Chidiac et al., 2023).

Kesadahan total terutama disebabkan oleh keberadaan ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) dalam air. Air dengan tingkat kesadahan tinggi dapat menimbulkan berbagai permasalahan teknis, seperti pembentukan kerak pada pipa, boiler, dan peralatan pengolahan air, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi sistem dan meningkatkan biaya operasional (Febrero & Marzo, 2022). Sementara itu, kekeruhan yang tinggi menunjukkan banyaknya partikel tersuspensi seperti sedimen halus dan bahan organik, yang dapat mengganggu proses filtrasi dan disinfeksi serta menurunkan kualitas estetika air (Sumanasekera & Rajapakse, 2025).

Berbagai metode pengolahan air konvensional, seperti koagulasi–flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi pasir, telah banyak diterapkan untuk menurunkan kekeruhan dan sebagian kontaminan dalam air sungai. Meskipun metode tersebut relatif efektif, pengolahan konvensional sering kali kurang optimal dalam menurunkan kesadahan total secara simultan dan memerlukan konsumsi bahan kimia yang tinggi serta menghasilkan lumpur sisa yang membutuhkan penanganan lanjutan. Selain itu, fluktuasi kualitas air baku sungai dapat menurunkan efektivitas proses konvensional dan meningkatkan biaya operasional (Łukasiewicz, 2025; Shamshad & Ur Rehman, 2024).

Sebagai alternatif, proses adsorpsi banyak dikembangkan karena memiliki keunggulan berupa kemudahan pengoperasian, fleksibilitas, serta kemampuan menurunkan berbagai parameter kualitas air secara bersamaan. Adsorpsi dapat diterapkan baik dalam sistem *batch* maupun kolom kontinu, namun sistem kolom kontinu dinilai lebih sesuai untuk aplikasi pengolahan air skala nyata karena mampu beroperasi secara berkelanjutan dan memiliki efisiensi pemanfaatan adsorben yang lebih baik. Selain itu, sistem kontinu memungkinkan evaluasi kinerja adsorben secara dinamis melalui

pengamatan perubahan kualitas air selama waktu operasi (Hu & Hao, 2025; Patel, 2022; Thirunavukkarasu et al., 2021).

Karbon aktif merupakan adsorben yang paling luas digunakan dalam pengolahan air karena memiliki luas permukaan spesifik yang sangat besar ($273\text{-}827\text{ m}^2/\text{g}$), volume pori ($0,27\text{-}0,69\text{ mL/g}$) serta struktur pori mikro ($8,2\text{-}12,4\text{ nm}$) dan mesopori yang berkembang. Karakteristik ini memungkinkan karbon aktif memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap partikel tersuspensi dan berbagai ion terlarut dalam air (Pet et al., 2024; Sharma et al., 2022). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif efektif dalam menurunkan kekeruhan dan kesadahan air, namun penggunaannya sering dibatasi oleh biaya produksi dan regenerasi yang relatif tinggi (Pujiastuti, 2025).

Di sisi lain, batu apung (*pumice*) mulai banyak diteliti sebagai adsorben alternatif berbiaya rendah yang memiliki struktur berpori alami dan ketersediaan melimpah. Batu apung tersusun atas material silikat dengan porositas tinggi, sehingga berpotensi digunakan untuk menyisihkan partikel tersuspensi dan ion tertentu dari air melalui mekanisme adsorpsi dan penyaringan fisik. Meskipun efisiensinya umumnya lebih rendah dibandingkan karbon aktif, batu apung tetap menarik untuk diaplikasikan pada sistem pengolahan air skala kecil hingga menengah (Indah et al., 2024; Pratiwi et al., 2019; Qureshi et al., 2023).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pemanfaatan adsorben dalam pengolahan air dengan fokus dan pendekatan yang berbeda. Kalsoom et al., 2022 meneliti penggunaan karbon aktif dalam sistem adsorpsi *fixed-bed column* untuk pengolahan air tercemar pestisida, dengan variabel utama berupa jenis adsorben (karbon aktif, *biochar*) dan laju alir ($0,5\text{-}1,5\text{ mL/menit}$). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kolom yang diisi karbon aktif mampu mempertahankan efisiensi penurunan kontaminan secara stabil selama operasi berkelanjutan, serta memungkinkan evaluasi kinerja adsorben secara dinamis melalui kurva terobosan (*breakthrough curve*), yang menegaskan keunggulan sistem kolom kontinu untuk aplikasi skala nyata. Selain itu, Ghanbarizadeh et al., 2022 mengevaluasi kinerja beberapa adsorben, termasuk karbon aktif, dalam menurunkan kesadahan air minum dan air tanah dengan parameter operasi berupa waktu kontak dan kondisi kolom. Studi tersebut melaporkan bahwa karbon aktif mampu menurunkan konsentrasi ion kalsium dan magnesium secara signifikan, meskipun efisiensinya masih dipengaruhi oleh karakteristik fisik adsorben dan kondisi operasi sistem. Di sisi lain, penggunaan batu apung sebagai adsorben alternatif berbiaya rendah telah dilaporkan oleh Indah et al., 2019 dalam kolom adsorpsi kontinu untuk menurunkan kandungan aluminium dalam air tanah, dengan hasil efisiensi penghilangan mencapai sekitar $59,5\%$ pada kondisi optimum, yang menunjukkan potensi batu apung sebagai adsorben alternatif meskipun dengan efektivitas yang lebih rendah dibandingkan material berbasis karbon. Namun demikian, berdasarkan kajian literatur tersebut, penelitian mengenai karbon aktif dan batu apung masih umumnya dilakukan secara terpisah dan lebih banyak difokuskan pada penghilangan kontaminan spesifik, seperti pestisida, logam berat, atau fluorida. Penelitian yang secara langsung membandingkan kinerja karbon aktif dan batu apung dalam menurunkan kesadahan total dan kekeruhan air sungai secara simultan menggunakan sistem adsorpsi kolom kontinu masih sangat terbatas. Selain itu, kajian yang mengevaluasi pengaruh variasi massa adsorben secara sistematis dalam rentang yang luas terhadap efisiensi penurunan kedua parameter tersebut juga jarang dilaporkan, khususnya untuk aplikasi pengolahan air sungai sebagai sumber air baku.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja karbon aktif dan batu apung dalam sistem adsorpsi kolom kontinu berdasarkan efisiensi penurunan kesadahan total dan kekeruhan air sungai pada variasi massa adsorben, sehingga memberikan dasar praktis untuk pemilihan adsorben yang efektif dan ekonomis dalam pengolahan air sungai.

2. METODOLOGI

2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi satu set rangkaian *adsorption kits*, kolom adsorpsi, pompa air, gelas beker, erlenmeyer, buret, labu takar, gelas ukur, pipet ukur, pipet volumetrik, pipet tetes, *ball pipet*, corong, spatula, statif, klem penjepit, timbangan analitik, *Portable Turbidity meter* Model 2100 P.

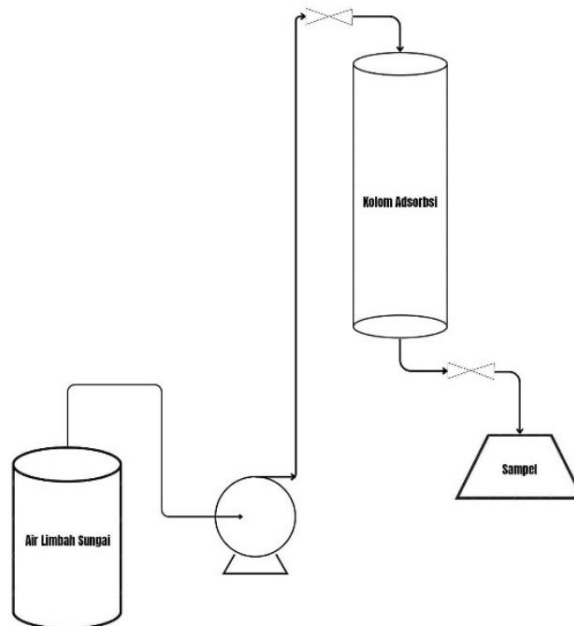
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi air sungai sebagai sampel uji, karbon aktif dan batu apung sebagai adsorben, serta akuades untuk pencucian peralatan. Bahan kimia yang digunakan untuk analisis kesadahan total meliputi larutan standar EDTA, larutan buffer pH 10, larutan standar primer Ca^{2+} , dan indikator *Eriochrome Black T* (EBT).

2.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk membandingkan kinerja karbon aktif dan batu apung sebagai adsorben dalam menurunkan kesadahan total dan kekeruhan air sungai menggunakan sistem adsorpsi kolom kontinu. Rancangan penelitian dilakukan dengan memvariasikan massa adsorben sebagai variabel bebas, yaitu 200, 250, 300, 350, 400, dan 450 gram, sementara jenis adsorben yang digunakan adalah karbon aktif dan batu apung. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai kesadahan total yang dinyatakan dalam satuan mg/L CaCO_3 dan kekeruhan yang dinyatakan dalam satuan NTU. Variabel tetap yang dikontrol selama penelitian meliputi laju alir air sebesar 16 L/jam, waktu operasi selama 60 menit, tinggi kolom adsorpsi, suhu lingkungan sekitar 25°C , serta pH air sungai yang berada pada kondisi netral.

2.3 Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan persiapan rangkaian alat adsorpsi kolom kontinu (Gambar 1) dan pengambilan sampel air sungai. Sampel air sungai awal dianalisis untuk mengetahui nilai awal kesadahan total dan kekeruhan. Pompa kemudian dioperasikan dan laju alir diatur sebesar 16 L/jam, kemudian pompa dimatikan sementara. Adsorben karbon aktif dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan. Setelah kolom terisi, pompa dihidupkan kembali untuk mengalirkan air sungai secara kontinu melalui kolom adsorpsi. Sampel air keluaran kolom diambil setiap 5 menit hingga waktu operasi mencapai 60 menit. Setelah satu siklus percobaan selesai, pompa dimatikan dan kolom dikosongkan. Prosedur yang sama selanjutnya diulangi menggunakan adsorben batu apung dengan variasi massa adsorben lainnya. Seluruh sampel hasil adsorpsi kemudian dianalisis untuk menentukan nilai kesadahan total dan kekeruhan.



Gambar 1. Skema alat percobaan kolom adsorpsi kontinu

2.4 Metode Analisis Data

Analisa data dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas proses adsorpsi dan membandingkan kinerja adsorben karbon aktif dan batu apung dalam menurunkan kesadahan total dan kekeruhan air sungai. Efisiensi penurunan (% removal) dihitung berdasarkan perbandingan konsentrasi awal (C_0) dan konsentrasi akhir (C_t) setelah proses adsorpsi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1). Persamaan ini umum digunakan untuk mengevaluasi kemampuan adsorben dalam menyisihkan kontaminan dari fase cair dan menentukan efektivitas proses adsorpsi (Serban et al., 2023).

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

Penentuan kesadahan total dilakukan menggunakan metode titrasi kompleksometri EDTA. Perhitungan kesadahan total sebagai mg CaCO₃/L didasarkan pada volume EDTA yang bereaksi dengan ion penyebab kesadahan dan dihitung menggunakan Persamaan (2), sebagaimana digunakan pada analisis kesadahan air dengan metode EDTA titrasi (Mubarok & Putri, 2025).

$$\text{Kesadahan Total} = \frac{V_{\text{EDTA}} \times N_{\text{EDTA}} \times \text{BM}_{\text{CaCO}_3} \times 1000}{V_{\text{sampel}}} \quad (2)$$

Pengukuran kekeruhan dilakukan menggunakan turbidimeter dan dinyatakan dalam satuan *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU), di mana nilai diperoleh secara langsung dari pembacaan alat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Awal Air Sungai

Air sungai yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai kekeruhan awal sebesar 30,4 NTU dan kesadahan total awal sebesar 373 mg CaCO₃/L, yang menunjukkan bahwa kualitas air berada pada kondisi kurang layak untuk dimanfaatkan secara langsung sebagai sumber air baku tanpa pengolahan terlebih dahulu. Kesadahan total dan kekeruhan merupakan parameter penting dalam evaluasi kualitas air permukaan karena mencerminkan kandungan mineral terlarut serta keberadaan partikel tersuspensi di dalam air.

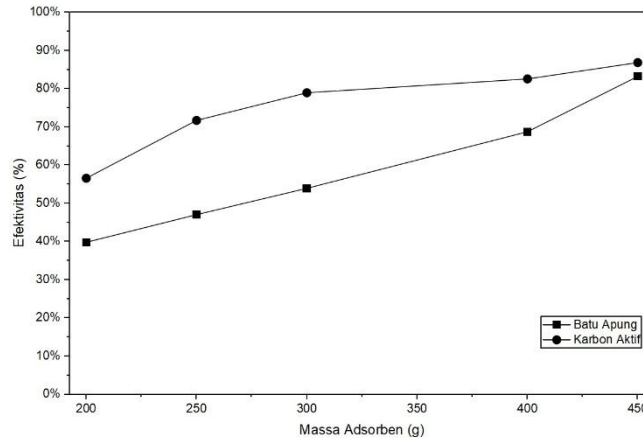
Kekeruhan air sungai merupakan indikator keberadaan partikel tersuspensi yang masuk ke badan air akibat proses erosi, aliran permukaan, dan aktivitas manusia di sekitar daerah aliran sungai. Nilai kekeruhan yang tinggi dapat berdampak negatif terhadap sistem pengolahan air, karena memperbesar kebutuhan bahan kimia pada tahap awal serta mengurangi efektivitas proses pemurnian lanjutan (Sihombing & Haribowo, 2025). Berdasarkan *Guidelines for Drinking-water Quality* yang diterbitkan oleh *World Health Organization* (WHO), kekeruhan air yang direkomendasikan untuk air minum dan air baku pengolahan sebaiknya berada di bawah 5 NTU, bahkan dianjurkan kurang dari 1 NTU untuk menjamin efektivitas disinfeksi (World Health Organization, 2017, 2022). Dengan demikian, nilai kekeruhan awal sebesar 30,4 NTU tergolong jauh melampaui batas kelayakan yang direkomendasikan dan mengindikasikan perlunya proses pengolahan yang signifikan.

Sementara itu, kesadahan total air sungai mencerminkan tingginya kandungan ion Ca²⁺ dan Mg²⁺ yang terlarut akibat proses geokimia alami dan aktivitas manusia. Nilai kesadahan total sebesar 373 mg CaCO₃/L termasuk dalam kategori air sangat keras, berdasarkan klasifikasi umum yang menyatakan bahwa air dengan kesadahan di atas 300 mg CaCO₃/L tergolong memiliki tingkat kesadahan tinggi. Meskipun WHO menyatakan bahwa kesadahan total tidak berpengaruh langsung terhadap kesehatan, kondisi ini dapat menimbulkan permasalahan operasional berupa pembentukan kerak pada sistem distribusi dan peralatan pengolahan air, yang selanjutnya berdampak pada penurunan efisiensi dan peningkatan biaya pengoperasian.

Berdasarkan karakteristik awal dan perbandingan dengan batas kelayakan yang direkomendasikan oleh WHO, dapat disimpulkan bahwa air sungai dalam penelitian ini belum memenuhi kriteria kualitas yang layak, khususnya dari sisi kekeruhan, serta memiliki tingkat kesadahan yang tinggi. Kondisi tersebut menegaskan perlunya penerapan metode pengolahan yang mampu menurunkan kekeruhan dan kesadahan total secara efektif dan simultan, sehingga mendasari pemilihan sistem adsorpsi kolom kontinu sebagai metode pengolahan dalam penelitian ini.

3.2 Pengaruh Variasi Massa Adsorben terhadap Penurunan Kekeruhan

Pengaruh variasi massa adsorben terhadap penurunan kekeruhan air sungai dianalisis dengan membandingkan kinerja karbon aktif dan batu apung sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Variasi massa adsorben sebesar 200, 250, 300, 350, 400, dan 450 gram digunakan untuk mengevaluasi perubahan efisiensi penurunan kekeruhan sekaligus mengidentifikasi perbedaan karakteristik adsorpsi kedua material dalam sistem adsorpsi kolom kontinu.



Gambar 2. Efektivitas karbon aktif dan batu apung terhadap kekeruhan

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa peningkatan massa adsorben pada kedua jenis material cenderung meningkatkan efisiensi penurunan kekeruhan, meskipun dengan tingkat efektivitas yang berbeda. Pada massa adsorben terendah (200 gram), penurunan kekeruhan yang dicapai masih relatif terbatas, yang menunjukkan bahwa luas permukaan kontak dan jumlah pori aktif belum mencukupi untuk menangkap partikel tersuspensi secara optimal. Seiring bertambahnya massa adsorben, jumlah situs aktif dan ketebalan lapisan adsorben dalam kolom meningkat, sehingga memperbesar peluang partikel penyebab kekeruhan untuk terperangkap melalui mekanisme adsorpsi dan penyaringan fisik.

Karbon aktif menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan batu apung pada seluruh variasi massa adsorben. Pada massa tertinggi, yaitu 450 gram, karbon aktif mampu menurunkan kekeruhan hingga sekitar 87%, sedangkan batu apung mencapai efisiensi sekitar 83%. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa karakteristik material adsorben memainkan peran penting dalam proses penurunan kekeruhan. Karbon aktif memiliki luas permukaan spesifik yang sangat besar serta struktur pori mikro dan meso yang berkembang dengan baik, sehingga efektif dalam menangkap partikel tersuspensi berukuran halus yang berkontribusi terhadap kekeruhan air. Selain mekanisme adsorpsi permukaan, karbon aktif juga berperan sebagai media penyaring mikro yang mampu menahan partikel secara fisik di dalam struktur porinya. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Novita Elida, 2021 yang menunjukkan bahwa peningkatan massa karbon aktif secara signifikan meningkatkan penurunan kekeruhan air limbah kopi hingga mendekati 90%, yang dikaitkan dengan bertambahnya luas permukaan adsorpsi dan intensitas interaksi adsorben-adsorbat.

Sebaliknya, batu apung memiliki performa yang relatif lebih rendah dibandingkan karbon aktif. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik fisik batu apung yang umumnya memiliki luas permukaan spesifik lebih kecil dan distribusi pori yang kurang homogen. Batu apung lebih dominan bekerja melalui mekanisme filtrasi mekanik dan adsorpsi terbatas pada permukaan eksternal, sehingga efektivitasnya dalam menangkap partikel koloid halus lebih rendah dibandingkan karbon aktif. Meskipun demikian, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa batu apung tetap memiliki potensi sebagai adsorben alternatif, terutama dari sisi ketersediaan material dan biaya yang lebih ekonomis.

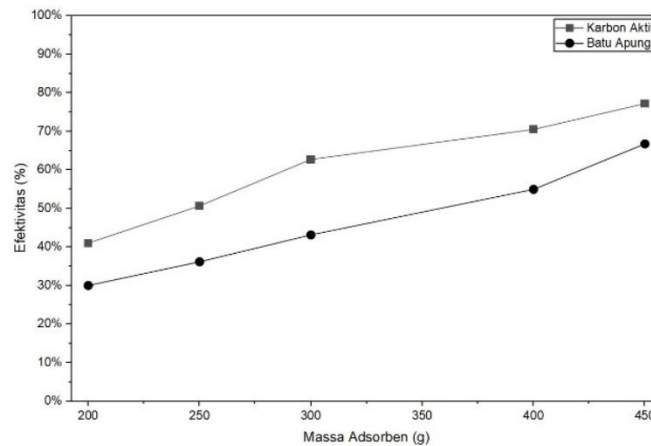
Selain itu, berdasarkan Gambar 2 terlihat bahwa peningkatan efisiensi penurunan kekeruhan tidak lagi berlangsung secara signifikan pada penggunaan massa adsorben yang tinggi, terutama di atas 400 gram. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kolom telah mendekati kondisi kerja yang optimal, sehingga penambahan adsorben dalam jumlah lebih besar tidak memberikan peningkatan kinerja yang berarti. Pola serupa juga ditemukan pada berbagai penelitian sistem adsorpsi kolom kontinu, di mana penambahan tinggi lapisan adsorben hingga batas tertentu hanya memberikan tambahan efisiensi yang kecil karena aliran air tidak lagi berinteraksi secara merata dengan seluruh permukaan adsorben di dalam kolom (Solgi et al., 2023).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa variasi massa adsorben berpengaruh nyata terhadap penurunan kekeruhan air sungai dalam sistem adsorpsi kolom kontinu. Karbon aktif

menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan batu apung pada seluruh variasi massa adsorben, terutama pada massa tinggi, sehingga lebih direkomendasikan untuk aplikasi pengolahan air sungai yang membutuhkan tingkat kejernihan tinggi. Namun demikian, batu apung tetap memiliki prospek untuk diaplikasikan sebagai adsorben alternatif pada skala kecil hingga menengah dengan pertimbangan efisiensi biaya dan ketersediaan material.

3.3 Pengaruh Variasi Massa Adsorben terhadap Penurunan Kesadahan Total

Kesadahan total air sungai terutama berkaitan dengan keberadaan ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) dalam fase terlarut, sehingga mekanisme penurunannya berbeda secara mendasar dengan kekeruhan yang didominasi partikel tersuspensi. Dalam sistem adsorpsi kolom kontinu, penurunan kesadahan tidak hanya dipengaruhi oleh aspek fisik, tetapi sangat bergantung pada interaksi kimia antara ion terlarut dan permukaan adsorben.



Gambar 3. Efektivitas karbon aktif dan batu apung terhadap kesadahan total

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa peningkatan massa adsorben pada kolom adsorpsi menghasilkan penurunan kesadahan total yang semakin besar, baik pada karbon aktif maupun batu apung. Pada massa adsorben rendah, kemampuan penurunan kesadahan masih terbatas karena jumlah situs aktif bermuatan negatif pada permukaan adsorben belum cukup untuk mengikat ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} secara efektif. Dalam kondisi ini, sebagian besar ion kesadahan masih lolos bersama aliran air keluar kolom.

Seiring dengan bertambahnya massa adsorben, jumlah permukaan aktif dan gugus fungsional yang tersedia di dalam kolom meningkat, sehingga peluang terjadinya interaksi antara ion kesadahan dan adsorben menjadi lebih besar. Pada karbon aktif, permukaan material ini umumnya mengandung gugus oksigen fungsional seperti hidroksil ($-\text{OH}$), karboksil ($-\text{COOH}$), dan karbonil ($-\text{C}=\text{O}$), yang dapat berperan sebagai pusat ikatan bagi ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} melalui gaya elektrostatis dan mekanisme pertukaran ion. Interaksi ini menyebabkan ion kesadahan terjerap pada permukaan karbon aktif dan terlepas dari fase air, sehingga konsentrasi kesadahan total menurun secara signifikan.

Batu apung juga menunjukkan kemampuan menurunkan kesadahan total, namun dengan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan karbon aktif. Batu apung tersusun terutama dari silika dan alumina, sehingga mekanisme penurunan kesadahan pada material ini lebih didominasi oleh adsorpsi permukaan dan pertukaran ion terbatas pada situs silanol ($\text{Si}-\text{OH}$). Jumlah gugus aktif pada batu apung relatif lebih sedikit, sehingga kapasitas pengikatan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} lebih cepat mencapai kejenuhan. Kondisi ini menjelaskan mengapa kurva batu apung pada Gambar 3 memiliki kemiringan yang lebih landai dibandingkan karbon aktif.

Pada massa adsorben yang lebih tinggi, khususnya mendekati 450 gram, kurva pada Gambar 3 mulai menunjukkan kecenderungan melandai untuk kedua jenis adsorben. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar situs aktif adsorben telah terisi oleh ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} , sehingga sistem mendekati kondisi jenuh. Dalam kondisi ini, penambahan massa adsorben selanjutnya tidak lagi memberikan penurunan kesadahan total yang signifikan karena proses adsorpsi telah mencapai keseimbangan

antara ion terlarut dan permukaan adsorben. Fenomena ini umum terjadi pada sistem adsorpsi kolom kontinu dan telah dilaporkan dalam berbagai studi kolom tetap, di mana peningkatan tinggi lapisan adsorben pada tahap lanjut hanya menghasilkan peningkatan efisiensi yang terbatas (Solgi et al., 2023).

Secara keseluruhan, Gambar 3 menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki afinitas yang lebih kuat terhadap ion penyebab kesadahan dibandingkan batu apung, terutama pada variasi massa adsorben menengah hingga tinggi. Keunggulan ini berkaitan langsung dengan sifat kimia dan struktur permukaan karbon aktif yang lebih mendukung proses adsorpsi ionik. Meskipun demikian, batu apung tetap berpotensi digunakan sebagai adsorben alternatif pada aplikasi tertentu, khususnya untuk pengolahan air dengan tingkat kesadahan sedang dan keterbatasan biaya, meskipun dengan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan karbon aktif.

3.4 Perbandingan Kinerja Karbon Aktif dan Batu Apung dalam Sistem Kolom Kontinu

Perbandingan kinerja karbon aktif dan batu apung dalam sistem adsorpsi kolom kontinu dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas kedua adsorben secara menyeluruh dalam menurunkan kekeruhan dan kesadahan total air sungai selama proses pengolahan berlangsung. Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 2 dan Gambar 3, karbon aktif secara konsisten menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan batu apung pada seluruh variasi massa adsorben yang diuji. Karbon aktif mampu menghasilkan efisiensi penurunan kekeruhan dan kesadahan total yang lebih tinggi, terutama pada massa adsorben menengah hingga tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih efektif dalam sistem aliran kontinu, baik terhadap partikel tersuspensi penyebab kekeruhan maupun terhadap ion-ion penyebab kesadahan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Lawtae & Tangsatthikulchai, 2021 yang melaporkan bahwa karbon aktif merupakan adsorben yang banyak digunakan dalam pengolahan air karena memiliki luas permukaan spesifik dan volume pori yang tinggi. Karakteristik tersebut menyediakan lebih banyak situs aktif untuk proses adsorpsi serta meningkatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat, sehingga kapasitas adsorpsi menjadi lebih besar dibandingkan adsorben dengan porositas yang lebih rendah. Oleh karena itu, karbon aktif pada penelitian ini menunjukkan kemampuan penyisihan kekeruhan dan kesadahan total yang lebih baik dibandingkan batu apung.

Meskipun memiliki kinerja yang lebih rendah dibandingkan karbon aktif, batu apung tetap menunjukkan kemampuan dalam menurunkan kekeruhan dan kesadahan total. Hal ini disebabkan batu apung memiliki struktur berpori yang memungkinkan terjadinya proses adsorpsi dan penyaringan fisik terhadap partikel maupun ion yang terdapat dalam air. Pratiwi et al., 2019 melaporkan bahwa batu apung dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena memiliki pori-pori alami yang mendukung proses penyisihan kontaminan dalam air. Namun, luas permukaan dan jumlah situs aktif yang dimiliki batu apung umumnya lebih rendah dibandingkan karbon aktif sehingga kapasitas adsorpsinya juga lebih kecil.

Selain itu, perbedaan kinerja kedua adsorben juga terlihat dari respons sistem terhadap peningkatan massa adsorben. Pada karbon aktif, peningkatan massa adsorben memberikan peningkatan efisiensi yang lebih signifikan sebelum mencapai kondisi mendekati jenuh, sedangkan pada batu apung peningkatan efisiensi cenderung lebih cepat melandai. Fenomena ini menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih besar dan mampu mempertahankan kinerja yang stabil dalam rentang operasi yang lebih luas. Dalam konteks aplikasi kolom kontinu, karakteristik ini menjadi keunggulan penting karena memungkinkan pengolahan air secara berkelanjutan dengan frekuensi penggantian adsorben yang lebih rendah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan batu apung dalam sistem adsorpsi kolom kontinu untuk pengolahan air sungai, baik dari aspek efisiensi penurunan kekeruhan maupun kesadahan total. Namun demikian, batu apung tetap memiliki potensi sebagai adsorben alternatif, terutama untuk aplikasi skala kecil hingga menengah, mengingat ketersediaannya yang melimpah dan biaya yang relatif rendah. Oleh karena itu, pemilihan adsorben dalam sistem kolom kontinu perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi pengolahan, ketersediaan material, dan aspek ekonomi, sesuai dengan kebutuhan dan skala penerapan di lapangan.

4. KESIMPULAN

Karbon aktif menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dalam menurunkan kekeruhan (87%) dan kesadahan total (77%) dibandingkan batu apung, yang masing-masing hanya mampu menurunkan kekeruhan sekitar 83% dan kesadahan total 67%, perbedaan ini terutama dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik dan struktur pori karbon aktif yang lebih berkembang. Meskipun demikian, batu apung tetap mampu menurunkan kedua parameter kualitas air secara signifikan serta memiliki keunggulan dari sisi ketersediaan material dan efisiensi biaya. Oleh karena itu, karbon aktif lebih direkomendasikan untuk pengolahan air yang memerlukan kualitas hasil olahan tinggi dan kinerja yang stabil, sedangkan batu apung lebih sesuai untuk aplikasi skala kecil atau sebagai tahap pra-pengolahan dengan pertimbangan ekonomi.

DAFTAR PUSTAKA

- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 22, Number 2, pp. 349–395). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- Febrero, & Marzo. (2022). A Study On Effects Of Hard Water On Human Health A Study On Effects Of Hard Water. *Research Ambition: An International Multidisciplinary e-Journal*, 6(4), 15–19. <https://doi.org/10.53724/ambition/v6n4.06Received10thFeb.2022>
- Ghanbarizadeh, P., Parivazh, M. M., Abbasi, M., Osfouri, S., Dianat, M. J., Rostami, A., Dibaj, M., & Akrami, M. (2022). Performance Enhancement of Specific Adsorbents for Hardness Reduction of Drinking Water and Groundwater. *Water (Switzerland)*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/w14172749>
- Hu, Q., & Hao, L. (2025). Adsorption Technologies in Wastewater Treatment Processes. In *Water (Switzerland)* (Vol. 17, Number 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w17152335>
- Indah, S., Helard, D., & Herdiani, F. (2024). Pemanfaatan batu apung sebagai adsorben dalam aplikasi kolom adsorpsi untuk penyisihan logam kromium dari air tanah. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 20(1), 33–40. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol20.No1.2024.1510>
- Indah, S., Helard, D., & Hudawaty, F. (2019). Column Study of Aluminum Adsorption from Groundwater by Natural Pumice. 9(5).
- Kalsoom, Khan, S., Ullah, R., Adil, M., Waheed, A., Khan, K. A., Ghramh, H. A., Alharby, H. F., Alzahrani, Y. M., Alghamdi, S. A., Alabdallah, N. M., & Rahim, F. (2022). Adsorption of Pesticides Using Wood-Derived Biochar and Granular Activated Carbon in a Fixed-Bed Column System. *Water (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/w14192937>
- Lawtae, P., & Tangsathitkulchai, C. (2021). The use of high surface area mesoporous-activated carbon from longan seed biomass for increasing capacity and kinetics of methylene blue adsorption from aqueous solution. *Molecules*, 26(21). <https://doi.org/10.3390/molecules26216521>
- Lukasiewicz, E. (2025). Coagulation–Sedimentation in Water and Wastewater Treatment: Removal of Pesticides, Pharmaceuticals, PFAS, Microplastics, and Natural Organic Matter. In *Water (Switzerland)* (Vol. 17, Number 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w17213048>
- Mubarok, I., & Putri, N. A. (2025). Analysis of Total Hardness Levels in Water Around the Trunojoyo Campus using the Complexometric Method. 5(2). <https://doi.org/10.35508/jbk.v5i2.24596>
- Novita Elida. (2021). Perlakuan Massa dan Waktu Kontak Karbon Aktif Terhadap Efisiensi Adsorpsi Air Limbah Pengolahan Kopi. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 9(2), 49–56. <https://doi.org/10.19028/JTEP.09.2.49-56>

- Patel, H. (2022). Comparison of batch and fixed bed column adsorption: a critical review. In *International Journal of Environmental Science and Technology* (Vol. 19, Number 10, pp. 10409–10426). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03492-y>
- Pet, I., Sanad, M. N., Farouz, M., Elfaham, M. M., El-Hussein, A., El-sadek, M. S. A., Althobiti, R. A., & Ioanid, A. (2024). Review: Recent Developments in the Implementation of Activated Carbon as Heavy Metal Removal Management. In *Water Conservation Science and Engineering* (Vol. 9, Number 2). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00287-3>
- Pratiwi, N. I., Huwaida, A., Indah, S., & Helard, D. (2019). Adsorption and Regeneration of Sungai Pasak Pumice as An Adsorbent for Ammonium Removal in Water. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 10(1), 38–46. <https://doi.org/10.21771/jrtpi.2019.v10.no.1.p1-10>
- Pujiastuti, H. (2025). JURNAL INTEGRASI PROSES Website: <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip> Rekayasa Struktur Mikro-Mesopori Pada Karbon Aktif Berbasis Biomassa Untuk Adsorpsi Metilen Biru: Sebuah Reviu. In *Jurnal Integrasi Proses* (Vol. 14, Number 2). <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip>
- Qureshi, T. A., Gadhi, T. A., Khokhar, D. A., Ali, I., Memon, N., Channa, N., Bakhat, S., Rafique, T., & Mahar, R. B. (2023). Insight on the Properties of Pumice Mineral for the Combined Adsorption Distillation of Membrane Reject Water. *Minerals*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/min13091131>
- Serban, G. V., Iancu, V. I., Dinu, C., Tenea, A., Vasilache, N., Cristea, I., Niculescu, M., Ionescu, I., & Chiriac, F. L. (2023). Removal Efficiency and Adsorption Kinetics of Methyl Orange from Wastewater by Commercial Activated Carbon. *Sustainability (Switzerland)*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/su151712939>
- Shamshad, J., & Ur Rehman, R. (2024). Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: a comprehensive exploration of conventional and emerging technologies. In *Environmental Science: Advances* (Vol. 4, Number 2, pp. 189–222). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d4va00136b>
- Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Lai, C. W., Naushad, M., Shehnaz, Iqbal, J., & Stadler, F. J. (2022). Activated Carbon as Superadsorbent and Sustainable Material for Diverse Applications. In *Adsorption Science and Technology* (Vol. 2022). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2022/4184809>
- Sihombing, H., & Haribowo, R. (2025). Analisis Status Mutu Air Sungai Kasin Kecamatan Sukun Kota Malang Menggunakan Metode Indeks Pencemaran (IP). *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 5(2), 751–759. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2025.005.02.071>
- Solgi, M., Steiger, B. G. K., & Wilson, L. D. (2023). A Fixed-Bed Column with an Agro-Waste Biomass Composite for Controlled Separation of Sulfate from Aqueous Media. *Separations*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/separations10040262>
- Sumanasekera, S., & Rajapakse, J. (2025). Turbidity as a Barrier to Water Treatment: A Review of Current and Emerging Removal Technologies, Advantages and Limitations. <https://doi.org/10.20944/preprints202509.2551.v1>
- Thirunavukkarasu, A., Nithya, R., & Sivashankar, R. (2021). Continuous fixed-bed biosorption process: A review. In *Chemical Engineering Journal Advances* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100188>
- Tong, L. (2023). The Importance of River Water for Environment and Society. *J Hydrogeol Hydrol Eng*, 12(2). <https://doi.org/10.4172/2325-9647.1000257>
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for Drinking-Water Quality Fourth Edition Incorporating The First Addendum*.

World Health Organization. (2022). *Fourth edition incorporating the first and second addenda Guidelines for drinking-water quality.*