

EFEKTIVITAS FILTER BIOCHAR PADA PENURUNAN KONSENTRASI AMMONIUM (NH_4^+) DAN FOSFAT (PO_4^{3-}) DALAM AIR LIMBAH DOMESTIK

Shinta Enggar Maharani¹, Filemon Bram Gunas Junior², I Made Wahyu Wijaya^{3*}

^{1,2}Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mahasaraswati Denpasar

³Program Studi Perencanaan Wilayah dan Perdesaan, Pascasarjana Universitas Mahasaraswati Denpasar

*Email: wijaya@unmas.ac.id

ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren konsentrasi ammonium (NH_4^+) dan fosfat (PO_4^{3-}) selama 20 hari operasional filter biochar dua kompartemen dengan sistem aliran kontinu, serta membandingkan kinerja biochar teraktivasi magnesium dan biochar tanpa aktivasi. Pengambilan sampel dilakukan setiap hari pada titik influen (IN), efluen kompartemen 1 (EF1), dan efluen kompartemen 2 (EF2). Analisis konsentrasi dilakukan menggunakan metode spektrofotometri, sedangkan efisiensi penyisihan dihitung berdasarkan perbandingan konsentrasi influen dan efluen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar teraktivasi magnesium memiliki kinerja yang lebih efektif dan stabil dibandingkan biochar tanpa aktivasi. Pada parameter ammonium, biochar teraktivasi mampu mencapai efisiensi penyisihan sebesar 65–75%, sedangkan biochar tanpa aktivasi hanya 30–60% dan mengalami penurunan kinerja lebih cepat akibat kejenuhan media. Pada parameter fosfat, biochar teraktivasi menunjukkan efisiensi sebesar 25–40% melalui mekanisme kompleksasi dan presipitasi Mg-PO_4 , sementara biochar tanpa aktivasi tidak efektif dan bahkan menunjukkan efisiensi negatif (-100% hingga -250%) akibat fenomena pelepasan (*leaching*). Secara keseluruhan, aktivasi magnesium terbukti meningkatkan kapasitas adsorpsi, memperpanjang masa efektif operasional, serta memperlambat laju kejenuhan media dalam sistem filtrasi kontinu. Oleh karena itu, modifikasi kimia biochar direkomendasikan untuk meningkatkan efektivitas penyisihan nutrisi dalam pengolahan air limbah domestik.

Kata kunci: Biochar, Aktivasi Magnesium, Ammonium, Fosfat, Adsorpsi, Filtrasi Kontinu.

ABSTRACT: This study aimed to analyze the concentration trends of ammonium (NH_4^+) and phosphate (PO_4^{3-}) during 20 days of operation in a two-compartment biochar filtration system under continuous flow conditions, and to compare the performance of magnesium-activated biochar and non-activated biochar. Samples were collected daily from the influent (IN), effluent compartment 1 (EF1), and effluent compartment 2 (EF2). Concentrations were analyzed using spectrophotometric methods, and removal efficiency was calculated based on the difference between influent and effluent concentrations. The results showed that magnesium-activated biochar exhibited more effective and stable performance compared to non-activated biochar. For ammonium removal, activated biochar achieved efficiencies of 65–75%, while non-activated biochar only reached 30–60% and experienced a faster decline in performance due to media saturation. In terms of phosphate removal, activated biochar achieved efficiencies of 25–40% through Mg-PO_4 complex formation and micro-precipitation mechanisms. In contrast, non-activated biochar was ineffective and even showed negative removal efficiencies (-100% to -250%) due to phosphate leaching. Overall, magnesium activation significantly enhanced adsorption capacity, extended the effective operational period, and delayed media saturation in the continuous filtration system. Therefore, chemical modification of biochar is strongly recommended to improve nutrient removal performance in domestic wastewater treatment systems.

Keywords: Biochar, Magnesium Activation, Ammonium, Phosphate, Adsorption, Continuous Filtration

PENDAHULUAN

Pencemaran air akibat limbah domestik masih menjadi permasalahan lingkungan yang signifikan di wilayah perkotaan maupun kawasan padat penduduk. Pencemaran nutrisi dari limbah domestik di kawasan perkotaan telah menimbulkan beban lingkungan yang berat, sebagaimana terlihat pada tren polusi di lokasi Sungai Tukad Badung yang menunjukkan perlunya upaya pemulihan kualitas air secara sistematis.

Salah satu teknologi yang menjanjikan adalah penggunaan biochar, namun efektivitasnya sangat bergantung pada modifikasi permukaan untuk

mengatasi hambatan elektrostatis terhadap ion tertentu (Wijaya *et al.* 2024). Penggunaan biochar sebagai adsorben telah banyak diteliti karena sifatnya yang ekonomis dan ramah lingkungan (Mohan *et al.*, 2014; Said *et al.*, 2021). Namun, biochar standar seringkali memiliki kapasitas adsorpsi yang rendah terhadap anion seperti fosfat karena adanya hambatan elektrostatis pada permukaannya (Yao *et al.*, 2013; Takashi *et al.*, 2022).

Oleh karena itu, modifikasi biochar dengan logam alkali tanah seperti magnesium (Mg) menjadi solusi krusial untuk meningkatkan densitas muatan positif dan menciptakan situs aktif baru (Li *et al.*, 2020; Novais *et al.*, 2018).

Limbah domestik umumnya mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, serta nutrisi berupa nitrogen dan fosfor dalam konsentrasi yang cukup tinggi. Nitrogen dalam air limbah domestik dominan ditemukan dalam bentuk ammonium (NH_4^+), sedangkan fosfor banyak dijumpai dalam bentuk ortofosfat (PO_4^{3-}) (Metcalf & Eddy, 2014). Keberadaan kedua senyawa ini dalam konsentrasi tinggi dapat memicu eutrofikasi pada badan air penerima, yang ditandai dengan pertumbuhan alga berlebihan, penurunan kadar oksigen terlarut, serta terganggunya keseimbangan ekosistem perairan (Smith & Schindler, 2009).

Proses eutrofikasi tidak hanya berdampak pada aspek ekologis, tetapi juga pada aspek sosial dan ekonomi, seperti menurunnya kualitas air baku untuk kebutuhan domestik serta terganggunya sektor perikanan dan pariwisata (Dodds *et al.*, 2009). Oleh karena itu, pengendalian nutrisi menjadi salah satu fokus utama dalam pengolahan air limbah domestik.

Berbagai metode telah diterapkan untuk menyisahkan nitrogen dan fosfor, seperti proses biologis, koagulasi-flokulasi, serta adsorpsi menggunakan material tertentu (Tchobanoglous *et al.*, 2014). Di antara berbagai metode tersebut, adsorpsi menggunakan material karbon seperti biochar menjadi alternatif yang menjanjikan karena relatif sederhana, ekonomis, dan ramah lingkungan (Lehmann & Joseph, 2015).

Biochar merupakan material karbon hasil proses pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen. Modifikasi biochar dengan magnesium (Mg) tidak hanya meningkatkan luas permukaan, tetapi juga mengubah sifat kimia permukaan menjadi lebih positif sehingga efektif menarik anion fosfat. Mekanisme ini melibatkan pembentukan kompleks permukaan dan presipitasi mikro yang jauh lebih stabil dibandingkan dengan adsorpsi fisik pada biochar tanpa aktivasi (Takashi *et al.* 2022).

Struktur biochar yang berpori, memiliki luas permukaan spesifik tinggi, serta mengandung gugus fungsi aktif pada permukaannya menjadikan material ini potensial sebagai media adsorben (Ahmad *et al.*, 2014). Namun, kapasitas adsorpsi biochar sangat dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku dan proses modifikasi yang dilakukan. Salah satu upaya peningkatan kinerja biochar adalah melalui aktivasi kimia menggunakan logam seperti magnesium (Mg), yang diketahui mampu meningkatkan kapasitas pertukaran

kation dan membentuk kompleks stabil dengan ion fosfat (Yao *et al.*, 2011; Cui *et al.*, 2016). Takashi *et al.* (2022) menjelaskan bahwa modifikasi biochar dengan magnesium secara signifikan meningkatkan densitas muatan positif pada permukaan media, yang secara langsung mengatasi hambatan elektrostatis antara biochar dan anion seperti fosfat.

Dalam sistem filtrasi kontinu, kinerja media tidak hanya ditentukan oleh kapasitas adsorpsi awal, tetapi juga oleh pola perubahan konsentrasi selama waktu operasional. Analisis tren konsentrasi ammonium dan fosfat dari influen hingga efluen pada setiap kompartemen menjadi penting untuk memahami dinamika kejenuhan media serta menentukan masa operasi efektif (Mukherjee & Zimmerman, 2013).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren konsentrasi NH_4^+ dan PO_4^{3-} selama 20 hari operasional filter biochar dua kompartemen, serta mengevaluasi perbedaan kinerja antara biochar teraktivasi magnesium dan biochar tanpa aktivasi dalam sistem aliran kontinu.

Biochar sebagai Media Adsorben dalam Pengolahan Air Limbah

Biochar merupakan material karbon yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen. Proses ini menghasilkan struktur karbon aromatik dengan tingkat stabilitas tinggi serta sistem pori yang berkembang, terdiri dari mikropori (<2 nm), mesopori (2–50 nm), dan makropori (>50 nm). Struktur pori tersebut berperan penting dalam meningkatkan luas permukaan spesifik biochar, sehingga memperbesar peluang interaksi antara permukaan media dan ion terlarut dalam air limbah.

Sifat fisik dan kimia biochar dipengaruhi oleh jenis bahan baku, suhu pirolisis, dan metode aktivasi. Pada suhu pirolisis yang lebih tinggi, biochar cenderung memiliki luas permukaan lebih besar dan struktur karbon yang lebih aromatik. Selain itu, permukaan biochar mengandung gugus fungsi seperti karboksil ($-COOH$), hidroksil ($-OH$), dan karbonil ($-C=O$) yang berperan dalam proses adsorpsi kimia melalui interaksi elektrostatis dan pembentukan kompleks.

Dalam sistem filtrasi kontinu, biochar tidak hanya berfungsi sebagai media fisik penyaring, tetapi juga sebagai adsorben yang

mampu mengikat ion melalui mekanisme pertukaran ion dan interaksi kimia permukaan.

Mekanisme Penyisihan Ammonium (NH_4^+)

Ammonium merupakan bentuk nitrogen terlarut yang dominan dalam air limbah domestik. Dalam kondisi pH netral hingga sedikit asam, nitrogen lebih banyak berada dalam bentuk ion NH_4^+ dibandingkan amonia bebas (NH_3). Mekanisme utama penyisihan ammonium pada biochar adalah melalui pertukaran kation (*cation exchange capacity/CEC*).

Permukaan biochar yang bermuatan negatif mampu menarik dan mengikat ion NH_4^+ melalui gaya elektrostatik. Kapasitas pertukaran kation dipengaruhi oleh jumlah gugus fungsi bermuatan negatif pada permukaan media. Semakin tinggi nilai CEC, semakin besar kemampuan biochar dalam menyisihkan ammonium.

Selain itu, proses difusi intrapartikel juga berperan dalam membawa ion NH_4^+ masuk ke dalam pori-pori internal biochar. Pada tahap awal operasional, banyak situs aktif tersedia sehingga efisiensi penyisihan tinggi. Seiring waktu, situs aktif terisi dan efisiensi menurun, membentuk pola kurva breakthrough.

Mekanisme Penyisihan Fosfat (PO_4^{3-})

Fosfat merupakan ion bermuatan negatif sehingga mekanisme penyisihannya berbeda dengan ammonium. Pada biochar tanpa modifikasi, penyisihan fosfat umumnya terbatas pada adsorpsi fisik dan interaksi lemah dengan gugus fungsi permukaan.

Aktivasi menggunakan magnesium (Mg) meningkatkan kinerja penyisihan fosfat melalui mekanisme presipitasi dan pembentukan kompleks kimia. Ion Mg^{2+} yang terikat pada permukaan biochar dapat bereaksi dengan PO_4^{3-} membentuk senyawa magnesium fosfat yang relatif tidak larut. Mekanisme ini lebih stabil dibandingkan adsorpsi fisik biasa.

Efektivitas pembentukan kompleks Mg-PO_4 dipengaruhi oleh pH, konsentrasi awal fosfat, dan distribusi ion magnesium pada permukaan media. Pada kondisi operasional kontinyu, mekanisme ini mampu memperpanjang fase efektif penyisihan sebelum media mencapai kejenuhan.

Aktivasi Magnesium Pada Biochar

Aktivasi kimia biochar bertujuan meningkatkan jumlah situs aktif dan memperbaiki karakteristik permukaan.

Magnesium dipilih karena memiliki afinitas tinggi terhadap ion fosfat serta mampu meningkatkan kapasitas pertukaran kation.

Proses aktivasi menyebabkan terjadinya modifikasi struktur permukaan, peningkatan porositas, serta penambahan kation multivalen yang berperan dalam proses presipitasi. Dengan adanya Mg^{2+} , biochar tidak hanya mengandalkan adsorpsi fisik, tetapi juga reaksi kimia yang lebih kuat dan stabil.

Dalam konteks filtrasi nutrisi, biochar teraktivasi magnesium menunjukkan peningkatan efisiensi penyisihan baik untuk ammonium maupun fosfat dibandingkan biochar tanpa aktivasi.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Wijaya *et al.* (2023) menunjukkan bahwa konsentrasi nitrogen dan fosfor di Sungai Tukad Badung memiliki tren yang fluktuatif namun memiliki potensi besar untuk dipulihkan kembali (*nutrient recovery*). Oleh karena itu, penggunaan filter biochar dengan aktivasi magnesium diuji dalam studi ini sebagai salah satu metode untuk merealisasikan pemulihan nutrisi tersebut dari air limbah.

Sistem Filtrasi Dua Kompartemen

Penggunaan sistem dua kompartemen bertujuan untuk mendistribusikan beban polutan secara bertahap. Kompartemen pertama berfungsi sebagai unit penyisihan utama dengan beban konsentrasi tertinggi. Kompartemen kedua bertindak sebagai unit pemoles (*polishing unit*) untuk menurunkan konsentrasi sisa nutrisi sebelum efluen dilepas.

Konfigurasi ini dapat meningkatkan stabilitas kualitas efluen dan memperpanjang masa operasi efektif sistem secara keseluruhan. Dalam analisis tren konsentrasi, perbedaan antara efluen kompartemen pertama dan kedua menjadi indikator kinerja distribusi beban filtrasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen skala laboratorium yang bertujuan untuk menganalisis tren konsentrasi ammonium (NH_4^+) dan fosfat (PO_4^{3-}) pada sistem filtrasi biochar dua kompartemen. Objek penelitian adalah unit filter biochar yang dioperasikan secara aliran kontinyu menggunakan air limbah domestik sebagai influen. Media filtrasi yang digunakan terdiri atas dua jenis, yaitu biochar teraktivasi magnesium dan biochar tanpa aktivasi, yang diuji secara terpisah untuk membandingkan kinerjanya dalam menurunkan

konsentrasi nutrisi. Penggunaan sistem filtrasi kontinu dalam pengolahan air limbah banyak diterapkan untuk mensimulasikan kondisi operasional nyata pada skala lapangan (Tchobanoglous *et al.*, 2014).

Sistem filtrasi dirancang dalam dua kompartemen yang disusun secara seri. Kompartemen pertama berfungsi sebagai unit penyisihan utama, sedangkan kompartemen kedua sebagai unit pemoles (polishing unit). Konfigurasi reaktor seri diketahui dapat meningkatkan efisiensi penyisihan melalui peningkatan waktu kontak dan distribusi beban pencemar yang lebih merata (Metcalf & Eddy, 2014). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis media biochar, sedangkan variabel terikat adalah konsentrasi NH_4^+ dan PO_4^{3-} pada influen dan efluen. Variabel kontrol meliputi debit aliran, waktu tinggal hidrolis (*Hydraulic Retention Time / HRT*), volume media, serta karakteristik awal air limbah agar kondisi operasional tetap konstan selama penelitian.

Pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode grab sampling setiap hari selama 20 hari masa operasional. Sampel diambil pada tiga titik pengamatan, yaitu influen (sebelum masuk kompartemen pertama), efluen kompartemen pertama (EF1), dan efluen kompartemen kedua (EF2). Metode grab sampling umum digunakan dalam penelitian kualitas air untuk menggambarkan kondisi konsentrasi pada waktu tertentu (APHA, 2017). Dengan dua jenis media dan tiga titik pengambilan selama 20 hari, total sampel yang dianalisis berjumlah 120 sampel. Sampel dimasukkan ke dalam botol sampel yang telah dibersihkan dan diawetkan sesuai prosedur standar pengujian kualitas air.

Analisis konsentrasi ammonium dilakukan menggunakan metode spektrofotometri dengan reagen fenat (indofenol biru), sedangkan fosfat dianalisis menggunakan metode asam askorbat dengan pembacaan absorbansi pada panjang gelombang tertentu menggunakan spektrofotometer. Metode ini mengacu pada *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017), yang secara luas digunakan dalam analisis parameter nutrisi air limbah.

Data hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk mengetahui pola tren perubahan konsentrasi selama waktu operasional. Efisiensi penyisihan dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Efisiensi Penurunan (\%)} = ((C_i - C_e) / C_i) \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

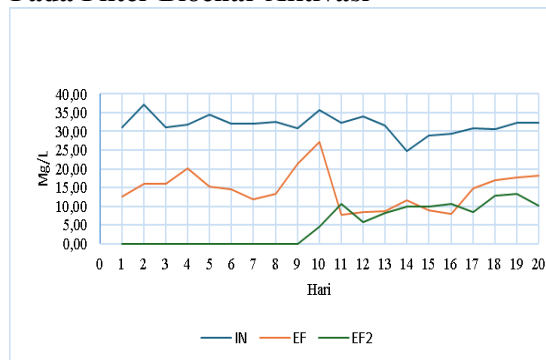
Dengan:

C_i = konsentrasi awal (influen) sebelum filtrasi (mg/L)

C_e = konsentrasi akhir (efluen) setelah filtrasi (mg/L)

Perhitungan efisiensi ini umum digunakan dalam evaluasi kinerja unit pengolahan air limbah untuk menilai kemampuan penyisihan suatu parameter pencemar (Metcalf & Eddy, 2014). Analisis tren konsentrasi dan penyusunan grafik dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Penggunaan model kinetika adsorpsi dan isoterm dalam sistem filtrasi ini mengacu pada pendekatan yang dikembangkan oleh Takashi *et al.* (2022) untuk memahami mekanisme pengikatan nutrisi pada situs aktif yang dimodifikasi logam. Interpretasi data dilakukan dengan membandingkan pola penurunan konsentrasi antara kompartemen pertama dan kedua, serta antara biochar teraktivasi dan tanpa aktivasi. Selain itu, pola perubahan konsentrasi terhadap waktu dianalisis untuk mengidentifikasi fase awal adsorpsi, fase stabil, dan fase kejenuhan media, sebagaimana dijelaskan dalam studi kinetika adsorpsi pada sistem biochar (Ahmad *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2011)

HASIL DAN PEMBAHASAN
Tren Konsentrasi Ammonium dan Fosfat Pada Filter Biochar Aktivasi



Gambar 1. Grafik Tren Konsentrasi Ammonium Filter Biochar Dengan Aktivasi

Berdasarkan Gambar 1, pada fase awal operasional hingga hari ke-8, konsentrasi NH_4^+ pada efluen kompartemen 2 (EF2) berada pada kisaran 1,5–2,5 mg/L dan secara konsisten sedikit lebih rendah dibandingkan efluen kompartemen 1 (EF1). Pada fase awal operasional (hari ke-1 hingga hari ke-8), terjadi penurunan konsentrasi ammonium dan fosfat

yang relatif signifikan dibandingkan fase berikutnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar situs aktif pada permukaan biochar masih tersedia dan memiliki afinitas tinggi terhadap ion nutrisi. Pola penurunan cepat pada tahap awal ini sejalan dengan karakteristik kinetika adsorpsi pseudo-orde dua, di mana laju adsorpsi dikendalikan oleh mekanisme *chemisorption* melalui interaksi kimia antara ion dan gugus fungsi aktif biochar. Studi oleh Wijaya (2025) menunjukkan bahwa adsorpsi amonium dan fosfat pada biochar teraktivasi magnesium mengikuti model orde dua dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat tinggi, yang mengindikasikan dominasi ikatan kimia pada tahap awal kontak. Oleh karena itu, efisiensi penyisihan yang tinggi pada hari-hari awal mencerminkan kondisi media yang belum jenuh dan masih memiliki kapasitas adsorpsi optimal.

Kondisi ini juga menunjukkan bahwa sistem dua kompartemen masih mampu mendistribusikan beban amonium secara bertahap, sehingga kompartemen kedua berperan sebagai unit *polishing*. Konfigurasi reaktor seri seperti ini diketahui dapat meningkatkan efisiensi penyisihan karena adanya peningkatan waktu kontak dan distribusi beban pencemar yang lebih merata (Tchobanoglous *et al.*, 2014).

Pada periode ini, efisiensi penyisihan berada pada kisaran 40–60%, yang mengindikasikan bahwa sebagian situs aktif biochar tanpa aktivasi masih tersedia untuk proses pertukaran kation. Mekanisme utama penyisihan amonium oleh biochar umumnya terjadi melalui proses adsorpsi fisik, pertukaran kation, serta interaksi elektrostatik antara ion NH_4^+ dan permukaan biochar yang bermuatan negatif (Lehmann & Joseph, 2015). Selain itu, kapasitas tukar kation (*cation exchange capacity* / CEC) pada biochar tanpa aktivasi masih memungkinkan terjadinya retensi amonium pada fase awal operasi sebelum media mengalami kejenuhan (Ahmad *et al.*, 2014). Efisiensi penyisihan amonium yang mencapai 65–75% pada filter teraktivasi magnesium selaras dengan temuan Wijaya (2025), di mana proses impregnasi magnesium memperluas volume pori dan menyediakan lebih banyak situs pertukaran kation. Model kinetika adsorpsi menunjukkan bahwa proses ini didominasi oleh mekanisme kemisorpsi yang stabil (Kizito *et al.*, 2015; Nandiwada *et al.*, 2023).

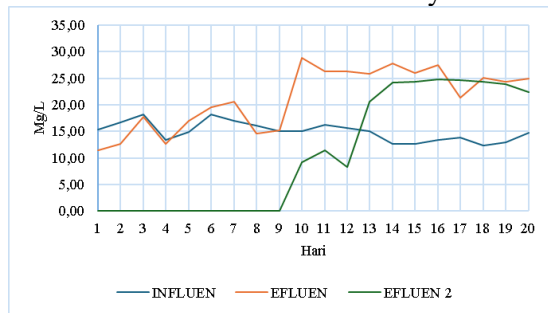
Kondisi ini juga sejalan dengan pola kinetika adsorpsi pada sistem filtrasi kontinyu, di mana fase awal umumnya menunjukkan efisiensi relatif stabil sebelum memasuki fase transisi menuju kejenuhan media (Yao *et al.*, 2011). Dengan demikian, perbedaan konsentrasi antara EF1 dan EF2 pada periode awal menunjukkan bahwa kompartemen kedua masih berfungsi optimal sebagai unit pemoles dalam meningkatkan kualitas efluen akhir.

Memasuki hari ke-13 hingga ke-16, terjadi peningkatan konsentrasi NH_4^+ pada EF2 menjadi 1,5–2,7 mg/L dengan penurunan efisiensi menjadi 35–50%. Peningkatan ini menunjukkan mulai terjadinya penurunan kapasitas adsorpsi akibat berkurangnya jumlah situs aktif yang mampu mengikat ion NH_4^+ . Pada tahap ini, media memasuki fase transisi menuju kejenuhan, di mana laju adsorpsi tidak lagi mampu mengimbangi beban masuk secara optimal. Fenomena ini sejalan dengan teori kinetika adsorpsi pada sistem kontinyu, di mana penurunan efisiensi terjadi ketika sebagian besar situs aktif mulai terisi dan gradien konsentrasi antara fase cair dan permukaan adsorben menurun (Yao *et al.*, 2011). Dalam sistem filtrasi berlapis, kondisi ini umumnya ditandai dengan mulai meningkatnya konsentrasi efluen secara bertahap sebelum mencapai kondisi stabil (Metcalf & Eddy, 2014).

Selanjutnya pada hari ke-17 hingga ke-20, konsentrasi NH_4^+ relatif stabil namun tidak menunjukkan penurunan lebih lanjut, dengan efisiensi hanya berkisar 30–45%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa media telah mendekati fase kejenuhan (*saturation phase*), di mana sebagian besar gugus fungsi aktif pada permukaan biochar telah terisi. Stabilitasnya konsentrasi pada nilai tersebut menunjukkan bahwa kemampuan media dalam menyisihkan amonium telah mencapai batas kapasitas adsorpsinya. Menurut Lehmann dan Joseph (2015), kejenuhan adsorben terjadi ketika kapasitas tukar kation (CEC) dan pori-pori aktif tidak lagi mampu menyediakan ruang pertukaran ion tambahan, sehingga efisiensi sistem cenderung stagnan.

Dibandingkan dengan biochar teraktivasi magnesium, biochar tanpa aktivasi menunjukkan masa efektif operasional yang lebih pendek serta penurunan kinerja yang lebih cepat. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan kapasitas pertukaran kation (CEC) dan jumlah gugus fungsi bermuatan negatif pada

permukaan media, sehingga kemampuan mengikat ion NH_4^+ lebih rendah dan lebih cepat mengalami kejenuhan. Ahmad *et al.* (2014) menjelaskan bahwa karakteristik kimia permukaan biochar sangat menentukan afinitas terhadap ion dalam larutan, sedangkan modifikasi kimia dapat meningkatkan jumlah situs aktif dan stabilitas adsorpsi. Dengan demikian, tanpa proses aktivasi, biochar memiliki ketahanan operasional yang lebih terbatas dalam sistem filtrasi kontinyu.



Gambar 2. Grafik Tren Konsentrasi Fosfat Filter Biochar dengan Aktivasi

Berdasarkan Gambar 2, konsentrasi fosfat pada influen berada pada kisaran 12–18 mg/L dan relatif stabil selama periode operasional. Pada fase awal, yaitu hari ke-1 hingga hari ke-4, terjadi penurunan konsentrasi yang cukup signifikan pada efluen. Kondisi ini menunjukkan bahwa biochar teraktivasi magnesium memiliki kapasitas adsorpsi awal yang tinggi, di mana sebagian besar situs aktif pada permukaan media masih tersedia dan mampu berinteraksi secara optimal dengan ion PO_4^{3-} . Tingginya efisiensi penyisihan pada hari-hari awal juga mencerminkan bahwa sebagian besar situs aktif pada permukaan biochar masih dalam kondisi bebas dan belum mengalami okupansi oleh ion nutrisi. Pada tahap ini, kompetisi antar molekul relatif rendah sehingga proses pertukaran kation dan pembentukan kompleks berlangsung lebih efektif (Wijaya, 2025). Pada biochar teraktivasi magnesium, fase awal juga ditandai oleh terbentuknya mikro-presipitasi $Mg-PO_4$ pada permukaan adsorben. Reaksi presipitasi ini terjadi relatif cepat ketika ion fosfat pertama kali kontak dengan situs Mg aktif, sehingga menyebabkan penurunan konsentrasi yang signifikan pada awal operasional (Wijaya, 2025). Peningkatan kinerja awal ini jugasejalan dengan penelitian Yao *et al.* (2011) yang menyatakan bahwa modifikasi logam pada biochar dapat meningkatkan afinitas terhadap fosfat melalui

pembentukan ikatan kimia yang lebih kuat dibandingkan adsorpsi fisik semata.

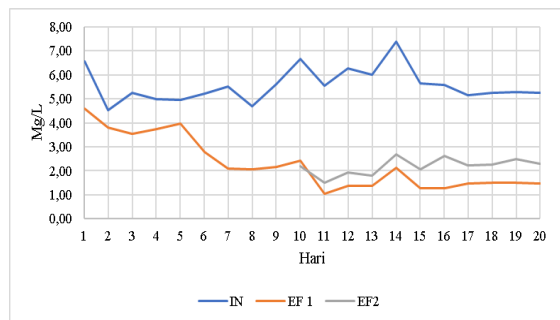
Memasuki hari ke-9 hingga ke-12, efisiensi penyisihan mencapai nilai tertinggi, yaitu pada kisaran 25–40%. Efisiensi penyisihan fosfat sebesar 25–40% pada biochar teraktivasi magnesium menunjukkan langkah maju dalam upaya pemulihan sumber daya. Hal ini sejalan dengan pandangan Wijaya *et al.* (2023) yang menyatakan bahwa strategi pengelolaan air limbah di masa depan harus bergeser dari sekadar pengolahan menjadi pemulihan nutrisi guna mendukung ekonomi sirkular. Peningkatan efisiensi pada fase ini menunjukkan bahwa interaksi kimia antara ion magnesium (Mg^{2+}) yang terikat pada permukaan biochar dengan ion fosfat berlangsung secara efektif. Mekanisme dominan yang terjadi adalah pembentukan kompleks $Mg-PO_4$ serta presipitasi mikro di dalam pori-pori biochar. Proses ini tidak hanya mengandalkan adsorpsi fisik, tetapi juga melibatkan reaksi kimia yang menghasilkan senyawa relatif tidak larut, sehingga konsentrasi fosfat dalam efluen menurun. Temuan ini didukung oleh Cui *et al.* (2016) yang melaporkan bahwa impregnasi magnesium pada biochar meningkatkan kapasitas retensi fosfat melalui mekanisme kompleksasi dan presipitasi magnesium fosfat yang stabil.

Namun setelah hari ke-14, terjadi peningkatan konsentrasi efluen yang diikuti penurunan efisiensi penyisihan. Penurunan kinerja ini mengindikasikan bahwa media mulai mengalami kejenuhan struktural. Akumulasi endapan hasil presipitasi di dalam pori menyebabkan terjadinya *pore blocking*, sehingga luas permukaan efektif dan jumlah situs aktif yang tersedia semakin berkurang. Selain itu, kemungkinan terjadinya desorpsi parsial akibat perubahan kesetimbangan konsentrasi juga dapat berkontribusi terhadap peningkatan kembali konsentrasi fosfat (Ahmad *et al.*, 2014).

Fenomena ini sejalan dengan konsep isoterm Langmuir yang menyatakan bahwa proses adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dengan pembentukan lapisan tunggal (*monolayer*). Ketika seluruh situs aktif telah terisi, kapasitas adsorpsi maksimum tercapai dan efisiensi penyisihan akan menurun secara bertahap (Langmuir, 1918). Dalam sistem filtrasi kontinyu, kondisi ini dikenal sebagai fase *breakthrough* menuju kejenuhan (*saturation phase*), di mana konsentrasi efluen

mulai meningkat mendekati konsentrasi influen (Metcalf & Eddy, 2014). Dengan demikian, fase setelah hari ke-14 dapat dikategorikan sebagai fase kejenuhan dalam kurva *breakthrough* sistem filtrasi kontinyu.

Tren Konsentrasi Ammonium dan Fosfat Pada Filter Biochar Tanpa Aktivasi



Gambar 3. Grafik Tren Konsentrasi Amonia Filter Biochar Tanpa Aktivasi

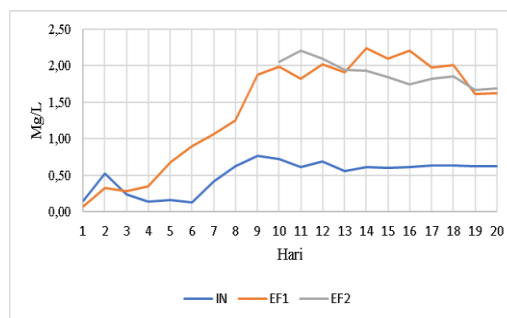
Berdasarkan hasil pengamatan, konsentrasi ammonium (NH_4^+) biochar tanpa aktivasi pada influen relatif stabil selama periode operasional. Pada fase awal (hari ke-1 hingga ke-8), terjadi penurunan konsentrasi yang cukup signifikan pada efluen, khususnya pada kompartemen 2 (EF2) yang berada pada kisaran 1,5–2,5 mg/L. Nilai ini sedikit lebih rendah dibandingkan kompartemen 1 (EF1), menunjukkan bahwa sistem dua kompartemen masih bekerja efektif dalam mendistribusikan beban pencemar secara bertahap. Konfigurasi reaktor seri seperti ini diketahui mampu meningkatkan efisiensi penyisihan melalui peningkatan waktu kontak dan distribusi beban yang lebih merata (Tchobanoglous *et al.*, 2014). Efisiensi penyisihan pada fase ini berkisar antara 40–60%, yang mencerminkan bahwa sebagian besar gugus fungsi aktif pada permukaan biochar masih tersedia untuk mengikat ion NH_4^+ melalui mekanisme pertukaran kation dan interaksi elektrostatis (Lehmann & Joseph, 2015).

Memasuki fase pertengahan operasional (hari ke-9 hingga ke-16), konsentrasi NH_4^+ pada efluen mulai mengalami peningkatan bertahap hingga mencapai kisaran 1,5–2,7 mg/L. Pada periode ini, efisiensi penyisihan menurun menjadi 35–50%. Penurunan efisiensi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi media mulai berkurang akibat semakin terbatasnya situs aktif yang dapat berperan dalam mekanisme pertukaran kation. Fenomena ini sejalan dengan konsep kinetika adsorpsi pada sistem kontinyu, di mana penurunan kinerja

terjadi ketika sebagian besar situs aktif mulai terisi dan gradien konsentrasi antara larutan dan permukaan adsorben menurun (Yao *et al.*, 2011). Selain itu, kapasitas tukar kation (*cation exchange capacity* / CEC) biochar tanpa aktivasi umumnya lebih rendah dibandingkan biochar termodifikasi, sehingga kejenuhan terjadi lebih cepat (Ahmad *et al.*, 2014).

Pada fase akhir (hari ke-17 hingga ke-20), konsentrasi efluen relatif stabil dan tidak menunjukkan penurunan lebih lanjut, dengan efisiensi hanya berkisar 30–45%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa media telah memasuki fase kejenuhan (*saturation phase*), di mana sebagian besar gugus fungsi bermuatan negatif pada permukaan biochar telah terisi oleh ion ammonium. Stabilitasnya konsentrasi pada fase ini mencerminkan bahwa sistem telah mencapai kondisi mendekati *breakthrough*, yaitu saat kemampuan media dalam menyisihkan NH_4^+ tidak lagi optimal dan konsentrasi efluen cenderung mendekati konsentrasi influen (Metcalf & Eddy, 2014). Dalam kurva *breakthrough* adsorpsi, kondisi ini menandakan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum hampir tercapai dan media memerlukan regenerasi atau penggantian (Langmuir, 1918).

Secara keseluruhan, biochar tanpa aktivasi menunjukkan masa efektif operasional yang lebih pendek dibandingkan biochar teraktivasi magnesium. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan kapasitas pertukaran kation (CEC), jumlah gugus fungsi aktif yang lebih sedikit, serta tidak adanya modifikasi kimia yang dapat meningkatkan afinitas terhadap ion ammonium. Menurut Lehmann dan Joseph (2015), proses aktivasi kimia dapat meningkatkan luas permukaan spesifik dan densitas muatan permukaan biochar, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap kejenuhan dalam sistem filtrasi kontinyu. Akibatnya, tanpa proses aktivasi, media lebih cepat mencapai kejenuhan dan efisiensi penyisihan menurun lebih cepat selama periode operasional.



Gambar 1. Grafik Tren Konsentrasi Fosfat

Filter Biochar Tanpa Aktivasi

Berdasarkan hasil pengamatan selama 20 hari operasional, persentase penyisihan fosfat (PO_4^{3-}) pada filter biochar tanpa aktivasi menunjukkan kinerja yang sangat rendah. Pada fase awal, konsentrasi fosfat pada efluen masih mendekati konsentrasi influen yang berada pada kisaran 0,1–0,8 mg/L. Kondisi ini menghasilkan efisiensi penyisihan yang hanya berkisar antara 0–20%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses yang terjadi terbatas pada adsorpsi fisik dengan gaya interaksi lemah, tanpa adanya mekanisme kimia yang mampu mengikat fosfat secara stabil. Ahmad et al. (2014) menjelaskan bahwa biochar tanpa modifikasi umumnya memiliki afinitas rendah terhadap anion seperti fosfat karena dominasi muatan permukaan negatif yang menyebabkan terjadinya gaya tolak elektrostatik.

Memasuki fase pertengahan (hari ke-5 hingga ke-17), konsentrasi fosfat pada efluen meningkat signifikan hingga mencapai 1,8–2,2 mg/L, sementara konsentrasi influen tetap relatif rendah dan stabil. Akibatnya, perhitungan efisiensi menghasilkan nilai negatif, yang berkisar antara -100% hingga -250%. Pada biochar tanpa aktivasi, terjadi efisiensi negatif atau *leaching* fosfat. Hal ini mengonfirmasi bahwa tanpa agen pengikat seperti magnesium, kandungan fosfor internal dari bahan baku biochar justru terlepas ke aliran air (Wijaya et al., 2024; Fang et al., 2020). Sebaliknya, pada biochar teraktivasi, keberadaan magnesium memfasilitasi pembentukan kompleks permukaan dan presipitasi mikro menjadi senyawa magnesium fosfat yang stabil (Wijaya, 2025; Amanullah et al., 2022). Mekanisme ini bertindak sebagai jembatan kimia yang menarik ion fosfat meskipun pada konsentrasi rendah di air limbah (Zhu et al., 2019; Novais et al., 2018). Efisiensi negatif ini mengindikasikan terjadinya fenomena pelepasan (*leaching*), yaitu fosfat yang terlarut dalam air bukan hanya berasal dari influen, tetapi juga dilepaskan dari media biochar. Pelepasan ini diduga berasal dari kandungan fosfor residu atau abu mineral hasil proses pirolisis bahan baku biochar. Mukherjee dan Zimmerman (2013) melaporkan bahwa biochar tertentu dapat melepaskan kembali unsur hara terlarut ke dalam air akibat perubahan kondisi kimia dan kesetimbangan selama kontak dengan larutan.

Pada fase akhir operasional (hari ke-18 hingga ke-20), konsentrasi fosfat pada efluen relatif stabil pada kisaran 1,6–1,8 mg/L dan tetap lebih tinggi dibandingkan influen, sehingga efisiensi penyisihan masih berada pada nilai negatif. Secara keseluruhan, rata-rata efisiensi penyisihan fosfat biochar tanpa aktivasi mendekati 0% dan didominasi oleh nilai negatif. Hal ini menegaskan bahwa tanpa aktivasi kimia, biochar tidak memiliki muatan permukaan positif maupun kation multivalen yang diperlukan untuk membentuk kompleks atau presipitasi dengan ion fosfat, sehingga tidak efektif untuk penyisihan PO_4^{3-} dalam sistem filtrasi aliran kontinyu. Yao et al. (2011) menyatakan bahwa keberadaan logam seperti Mg pada permukaan biochar sangat berperan dalam meningkatkan retensi fosfat melalui mekanisme kompleksasi dan presipitasi yang stabil.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa aktivasi biochar dengan magnesium merupakan faktor kunci dalam meningkatkan efektivitas, stabilitas, dan keberlanjutan kinerja filter dalam menyisihkan amonium dan fosfat pada sistem aliran kontinyu. Modifikasi kimia terbukti meningkatkan kapasitas adsorpsi serta ketahanan terhadap kejenuhan media (Lehmann & Joseph, 2015). Biochar tanpa aktivasi masih dapat digunakan untuk penyisihan amonium pada beban rendah dan waktu operasi terbatas, namun tidak direkomendasikan untuk pengolahan fosfat. Oleh karena itu, untuk aplikasi pengolahan air limbah yang menargetkan pengendalian nutrisi secara simultan, penggunaan biochar teraktivasi magnesium jauh lebih unggul dibandingkan biochar tanpa aktivasi.

SIMPULAN

Biochar teraktivasi magnesium terbukti lebih efektif dan stabil dalam menyisihkan amonium (65–75%) dan fosfat (25–40%) dibandingkan biochar tanpa aktivasi. Biochar tanpa aktivasi menunjukkan kinerja lebih rendah pada amonium (30–60%) dan tidak efektif untuk fosfat karena terjadi pelepasan (*leaching*) dengan efisiensi negatif. Oleh karena itu, aktivasi magnesium merupakan faktor kunci untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dan ketahanan media dalam sistem filtrasi aliran kontinyu khususnya air limbah domestik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Amanullah, M., et al. (2022). *Magnesium-modified biochar for nutrient removal: A review of mechanisms and future perspectives*. *Journal of Environmental Management*, 312, 114856.
- APHA. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Cui, X., Dai, X., Khan, K. Y., Li, T., Yang, X., & He, Z. (2016). Removal of phosphate from aqueous solution using magnesium-modified biochar. *Bioresource Technology*, 218, 1129–1136.
- Dodds, W. K., Bouska, W. W., Eitzmann, J. L., Pilger, T. J., Pitts, K. L., Riley, A. J., Schloesser, J. T., & Thornbrugh, D. J. (2009). Eutrophication of U.S. freshwaters: Analysis of potential economic damages. *Environmental Science & Technology*, 43(1), 12–19.
- Fang, C., et al. (2020). *Phosphorus recovery from wastewater using biochar: Effectiveness of different metal modifications*. *Bioresource Technology*, 305, 123078.
- Hale, S. E., et al. (2021). *The ability of biochar to capture and release nutrients from wastewater*. *Science of The Total Environment*, 761, 143245.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management: Science and technology*. Earthscan.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Li, R., et al. (2020). *Recovery of ammonium and phosphate from wastewater by magnesium-loaded biochar: Influence of pyrolysis temperature*. *Chemosphere*, 242, 125215.
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mukherjee, A., & Zimmerman, A. R. (2013). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma*, 193–194, 122–130.
- Novais, S. V., et al. (2018). *Phosphate adsorption using magnesium-modified biochars: Effects of magnesium source and biochar type*. *Powder Technology*, 340, 124–131.
- Said, N. S. M., et al. (2021). *A review of household wastewater treatment using biochar-based systems*. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101850.
- Sarkhot, D. V., Ghezzehei, T. A., & Berhe, A. A. (2013). Effectiveness of biochar for sorption of ammonium and phosphate from aqueous solution. *Journal of Environmental Management*, 132, 61–69.
- Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: Where do we go from here? *Trends in Ecology & Evolution*, 24(4), 201–207.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70–85.
- Wijaya, I. M. W. (2025). *Adsorption kinetics and isotherms of ammonium and phosphate onto magnesium-modified biochar*. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102832.
- Wijaya, I. M. W., Partama, I. G. Y., Sumantra, I. K., & Kenedy, F. V. (2024). *Assessment of Nutrient Pollution Trends and Recovery Feasibility in the Tukad Badung River Ecosystem*. *Southeast Asian Journal of Science and Technology*, 9(1), 31–44.

- Wijaya, I. M. W., Partama, I. G. Y., & Sumantra, I. K. (2023). *Study on Nutrients Concentration Trends in Tukad Badung River Toward Nutrient Recovery Potential*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1268(1), 012002.
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., & Zimmerman, A. R. (2011). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 83(11), 1467–1471.
- Yao, Y., et al. (2013). *Magnesium-coated biochar in removing phosphate from aqueous solutions*. *Chemosphere*, 92(10), 1274-1280.
- Zhu, N., et al. (2019). *Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from municipal wastewater by metal-modified biochar*. *Environmental Technology*, 40(18), 2351-2361.