

ANALISIS KARAKTERISTIK FILTRASI DAN EFISIENSI ADSORPSI AMONIUM PADA SISTEM FILTER BIOCHAR TERAKTIVASI Mg^{2+}

Dewa Agung Dibyacitta¹⁾, I GD. Yudha Partama²⁾, I Made Wahyu Wijaya^{2*)}

¹⁾ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mahasaraswati Denpasar, Bali

²⁾ Program Studi Perencanaan Wilayah dan Perdesaan, Program Pascasarjana, Universitas Mahasaraswati Denpasar, Bali

*Email korespondensi: wijaya@unmas.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan konsentrasi amonium (NH_4^+) pada air limbah domestik berkontribusi terhadap eutrofikasi, penurunan kadar oksigen terlarut, dan gangguan keseimbangan ekosistem perairan. Sistem pengolahan kontinu sering menghadapi kendala stabilitas kinerja akibat fluktuasi debit dan beban pencemar, sehingga diperlukan teknologi filtrasi yang efektif dan stabil secara hidraulik. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik filtrasi dan efisiensi adsorpsi amonium pada sistem filter biochar teraktivasi Mg^{2+} aliran ke atas (*upflow*) dengan empat kompartemen seri. Biochar kayu dimodifikasi menggunakan larutan $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 4,2 g/L selama 70 menit. Sistem dioperasikan secara kontinu selama enam hari dengan debit 100 mL/menit menggunakan air limbah domestik berkonsentrasi amonium 27,74–42,73 mg/L. Hasil menunjukkan *head loss* sebesar 0,0267 m per kompartemen dan total 0,1068 m, yang menandakan kondisi hidraulik stabil tanpa indikasi *clogging* signifikan. Nilai HRT rata-rata 1,79 jam per kompartemen (total 9,78 jam) memberikan waktu kontak optimal. Efisiensi adsorpsi amonium mencapai 94,28–96,53% dan meningkat secara bertahap pada setiap kompartemen. Disimpulkan bahwa sistem filter biochar teraktivasi Mg^{2+} memiliki kinerja hidraulik dan efisiensi adsorpsi yang tinggi.

Kata Kunci: Amonium, Biochar Teraktivasi Mg^{2+} , Filtrasi, *Head Loss*, HRT.

ABSTRACT

The increasing concentration of ammonium (NH_4^+) in domestic wastewater contributes to eutrophication, depletion of dissolved oxygen, and disruption of aquatic ecosystem balance. Continuous treatment systems often face operational stability challenges due to fluctuations in flow rate and pollutant loading, thereby requiring filtration technologies that are both effective and hydraulically stable. This study aimed to analyze the filtration characteristics and ammonium adsorption efficiency of an upflow Mg^{2+} -activated biochar filter system arranged in four serial compartments. Wood-based biochar was chemically modified using a 4.2 g/L $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ solution for 70 minutes. The system was operated continuously for six days at a constant flow rate of 100 mL/min using domestic wastewater with ammonium concentrations ranging from 27.74 to 42.73 mg/L. The results showed a head loss of 0.0267 m per compartment and a total of 0.1068 m, indicating stable hydraulic conditions without significant clogging. The average hydraulic retention time (HRT) was 1.79 hours per compartment (9.78 hours total), providing adequate contact time for adsorption. Ammonium adsorption efficiency reached 94.28–96.53% and increased progressively across the compartments. It can be concluded that

the Mg²⁺-activated biochar filter system demonstrated favorable hydraulic performance and high ammonium adsorption efficiency under continuous operation.

Keywords: Ammonium, Mg²⁺-Activated Biochar, Filtration, Head Loss, HRT

1. PENDAHULUAN

Tantangan pengelolaan nutrisi, terutama amonium (NH₄⁺), pada limbah domestik menjadi isu penting dalam manajemen air limbah domestik saat ini. Kehadiran amonium dalam konsentrasi tinggi di perairan memicu berbagai dampak negatif, mulai dari eutrofikasi dan penurunan kadar oksigen terlarut hingga ancaman bagi kehidupan organisme akuatik (González & Roldán, 2019). Selain degradasi kualitas air, akumulasi NH₄⁺ dapat memicu kondisi hipoksia yang mengganggu stabilitas ekosistem (Lu *et al.*, 2023). Meskipun berbagai teknik penyisihan nitrogen telah diimplementasikan, sistem pengolahan kontinu sering kali menghadapi kendala stabilitas kinerja akibat fluktuasi debit maupun variabilitas beban pencemar (Metcalf & Eddy, 2014). Oleh sebab itu, inovasi teknologi filtrasi yang mampu menjaga efisiensi sekaligus stabilitas operasional sangat diperlukan.

Biochar merupakan salah satu material yang banyak dikembangkan sebagai adsorben dalam pengolahan air limbah karena ketersediaan bahan baku, biaya produksi yang relatif rendah, serta potensi pemanfaatannya secara berkelanjutan (Tan *et al.*, 2015; Lehmann & Joseph, 2015). Untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap kation amonium, biochar dapat dimodifikasi menggunakan magnesium (Mg²⁺). Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi, kapasitas tukar kation (CEC) dan menambah situs aktif pada permukaan biochar (Yin *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2024; Wijaya, 2025). Mekanisme yang terjadi meliputi pertukaran ion antara NH₄⁺ dan Mg²⁺ serta interaksi elektrostatis pada permukaan bermuatan negatif (Zheng *et al.*, 2025). Dengan adanya aktivasi Mg²⁺, adsorben menunjukkan peningkatan afinitas terhadap amonium, termasuk pada kondisi dengan ion kompetitor (Yao *et al.*, 2022).

Selain kapasitas adsorpsi, kinerja sistem filter dalam skala kolom kontinu juga dipengaruhi oleh karakteristik hidraulik media. Ukuran partikel biochar berpengaruh terhadap konduktivitas hidraulik jenuh serta distribusi aliran di dalam reaktor (Blanco-Canqui, 2017; Edeh *et al.*, 2020). Selama operasi, akumulasi partikel dan perubahan struktur media dapat menyebabkan peningkatan kehilangan tekanan (*head loss*), penyumbatan (*clogging*), atau aliran singkat (*short-circuiting*). Kondisi tersebut berpotensi mengurangi efisiensi kontak antara polutan dan adsorben (Chen *et al.*, 2021; Abd Lahin *et al.*, 2021).

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan stabilitas sistem adalah penggunaan konfigurasi aliran ke atas (*upflow*) dengan susunan kompartemen secara seri. Desain *upflow* mampu mendistribusikan aliran secara lebih merata serta meminimalisir penumpukan sedimen di permukaan media, sehingga *head loss* tetap terkendali (Abd Lahin *et al.*, 2021). Selain itu, sistem seri memperpanjang lintasan aliran dan mengoptimalkan pemanfaatan media secara bertahap, yang pada akhirnya

meningkatkan waktu kontak. Sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada sistem *batch* atau pengujian kapasitas adsorpsi secara statis.

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa biochar teraktivasi Mg^{2+} memiliki kapasitas adsorpsi yang signifikan terhadap amonium dan fosfat, dengan kapasitas adsorpsi mencapai 24,39 mg/g untuk NH_4^+ pada kondisi *batch* (Wijaya, 2025). Namun, pendekatan *batch* belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasional sistem kontinu, terutama dalam hal distribusi aliran, waktu kontak, dan dinamika beban pencemar. Oleh karena itu, penelitian mengenai sistem filtrasi kontinu menjadi penting untuk mengevaluasi kinerja adsorpsi dalam kondisi yang lebih mendekati aplikasi lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik filtrasi secara hidraulik serta efektivitas adsorpsi NH_4^+ menggunakan biochar teraktivasi Mg^{2+} dalam sistem *upflow* selama periode operasi.

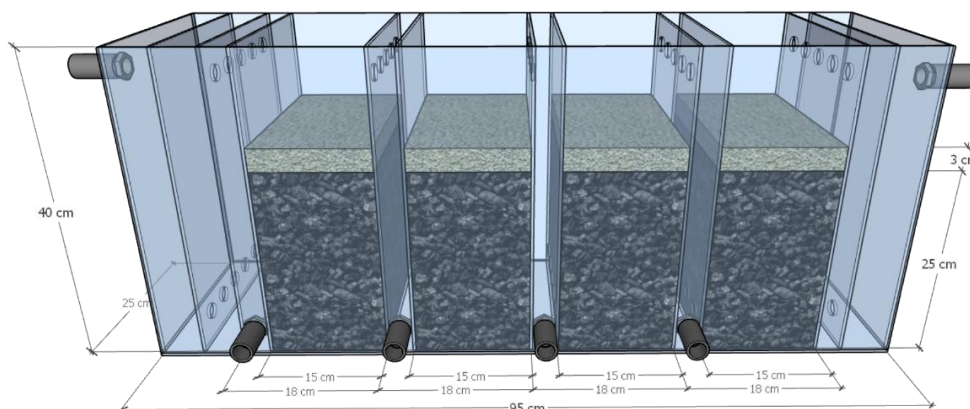
2. METODOLOGI

2.1 Persiapan Biochar Teraktivasi Mg^{2+}

Media utama yang digunakan adalah biochar berbahan baku biomassa kayu dengan rentang ukuran partikel 3–5 cm. Pemilihan ukuran makro ini bertujuan untuk menjaga porositas sistem dan mengoptimalkan konduktivitas hidraulik, karena ukuran partikel yang lebih besar cenderung meningkatkan permeabilitas dan mengurangi potensi penyumbatan dalam sistem filtrasi (Blanco-Canqui, 2017; Abd Lahin *et al.*, 2021). Untuk meningkatkan performa adsorpsi, dilakukan modifikasi kimia melalui perendaman dalam larutan magnesium klorida heksahidrat ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) berkonsentrasi 4,2 g/L selama 70 menit. Setelah perendaman, media disaring dan dikeringkan pada suhu ruang hingga mencapai kondisi berat konstan sebelum digunakan sebagai media filter.

2.2 Desain Sistem dan Operasional

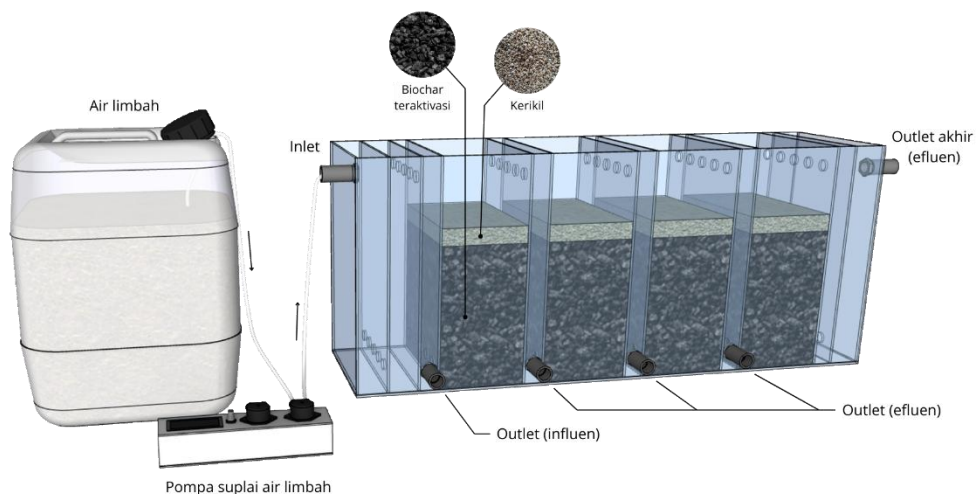
Sistem filtrasi disusun menggunakan konfigurasi aliran ke atas (*upflow*) yang terdiri dari empat kompartemen seri. Desain seri ini diimplementasikan untuk memperpanjang lintasan filtrasi dan memaksimalkan waktu kontak antara adsorbat dengan media filter (adsorben).



Gambar 1. Dimensi Reaktor Filter
(Sumber: Hasil Rancangan, 2025)

Gambar 1 menunjukkan dimensi reaktor filter dengan tinggi 95 cm, lebar 25 cm, tinggi 40 cm, serta kompartemen yang tersusun secara seri dengan panjang masing-masing kompartemen 18 cm. Media dalam setiap kompartemen terdiri dari biochar teraktivasi Mg^{2+} setebal 25 cm dan zeolit (3–5 mm) setebal 3 cm sebagai lapisan penyangga.

Gambar 2 menunjukkan skema sistem filtrasi biochar teraktivasi Mg^{2+} . Operasi sistem dilakukan secara kontinu selama enam hari menggunakan pompa peristaltik dengan debit konstan sebesar 100 mL/menit. Air limbah domestik yang digunakan sebagai influen bersumber dari kolam stabilisasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL).



Gambar 2. Skema Sistem Filtrasi
 (Sumber: Hasil Rancangan, 2025)

2.3 Analisis Karakteristik Filtrasi

a) Kehilangan Tekanan (*Head Loss*)

Nilai *head loss* digunakan sebagai indikator terjadinya penyumbatan pori media atau akumulasi padatan pada media biochar. Perhitungan kehilangan tekanan dilakukan berdasarkan Hukum Darcy melalui Persamaan 1 berikut:

$$\Delta h = \frac{Q \times L}{k \times A} \quad (1)$$

Keterangan:

- Δh = kehilangan tekanan (m)
- Q = debit aliran ($m^3/detik$)
- L = panjang lintasan aliran (m)
- A = luas penampang filter (m^2)
- k = konduktivitas hidraulik (m/detik)

Nilai konduktivitas hidraulik (k) dalam penelitian diestimasi berdasarkan literatur, yaitu $5,47 \times 10^{-4}$ m/detik dan zeolit $2,11 \times 10^{-4}$ m/detik (Fronczyk, 2020). Kisaran tersebut dapat digunakan sebagai acuan awal (*initial estimate*) untuk merepresentasikan

permeabilitas media karbon seperti biochar berukuran kasar, meskipun nilai aktual dapat bervariasi tergantung ukuran partikel, struktur pori, tingkat pemadatan, serta potensi penyumbatan selama operasi filtrasi.

b) Waktu retensi hidraulik (*Hydraulic Retention Time/HRT*)

HRT ditentukan secara eksperimental dengan mengukur waktu tempuh aktual air limbah sejak pertama kali memasuki reaktor hingga mencapai *outlet* sebagai efluen. Pengukuran ini merepresentasikan waktu tinggal hidraulik aktual sistem dan digunakan untuk mengevaluasi performa aliran serta distribusi hidraulik antar kompartemen.

2.4 Analisis Efisiensi Adsorpsi Amonium

Pengambilan sampel dilakukan secara berkala pada titik influen dan efluen di setiap kompartemen. Konsentrasi amonium (NH_4^+) dianalisis menggunakan spektrofotometri pada panjang gelombang 640 nm. Efisiensi adsorpsi dihitung menggunakan Persamaan 2:

$$\% \text{ adsorpsi} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

C_{in} = konsentrasi influen (mg/L)

C_{out} = konsentrasi efluen (mg/L)

Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif untuk melihat korelasi antara dinamika HRT, *head loss*, dan peningkatan efisiensi adsorpsi di setiap tahapan kompartemen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Awal Air Limbah Domestik

Konsentrasi amonium (NH_4^+) dalam penelitian ini digunakan sebagai parameter utama sesuai dengan metode analisis. Dalam sistem perairan, NH_4^+ berada dalam kesetimbangan dengan amonia bebas (NH_3), yang secara bersama-sama dikenal sebagai total nitrogen amonia. Oleh karena itu, perbandingan dengan baku mutu amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$) dalam Peraturan Menteri LHK No. 68 Tahun 2016 digunakan sebagai acuan umum untuk menggambarkan tingkat pencemaran nitrogen.

Berdasarkan hasil pengukuran, konsentrasi NH_4^+ pada air limbah domestik yang digunakan dalam studi ini secara konsisten melampaui baku mutu. Variasi konsentrasi selama masa operasional disajikan dalam Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1, konsentrasi NH_4^+ pada influen menunjukkan tren peningkatan selama periode pengamatan. Nilai rata-rata konsentrasi yang jauh melampaui baku mutu mengindikasikan bahwa air limbah domestik yang digunakan memiliki beban nitrogen yang tinggi dan memerlukan pengolahan lanjutan sebelum dibuang ke badan air penerima. Kondisi ini umum dijumpai pada limbah domestik yang berasal dari aktivitas

rumah tangga, terutama dari sisa metabolisme manusia dan penggunaan produk pembersih yang mengandung nitrogen (Metcalf & Eddy, 2014).

Tabel 1. Karakteristik Awal Air Limbah Domestik

Hari	Amonium (mg/L)	
	Hasil Pengukuran	Baku Mutu
1	27,74	
2	34,07	
3	34,45	
4	36,51	10
5	40,41	
6	42,73	

Sumber: Hasil Pengukuran, 2025

Variasi konsentrasi influen yang bersifat fluktuatif mencerminkan kondisi eksisting limbah domestik pada kolam stabilisasi IPAL yang juga dinamis, yang dipengaruhi oleh variasi aktivitas harian, pola penggunaan air, serta beban pencemar yang masuk ke sistem pengolahan (Metcalf & Eddy, 2014). Secara keseluruhan, tingginya konsentrasi awal amonium serta fluktuatif pada influen memberikan kondisi uji yang representatif untuk menilai performa sistem filtrasi biochar teraktivasi Mg^{2+} dalam menangani beban nitrogen yang signifikan pada skala kontinu.

3.2 Kehilangan Tekanan (*Head Loss*)

Hasil perhitungan menunjukkan nilai *head loss* sebesar 0,0267 m per kompartemen. Kontribusi resistansi terbesar berasal dari lapisan biochar (0,0204 m), sementara lapisan zeolit hanya menyumbang 0,0063 m. Fenomena ini selaras dengan ketebalan media biochar (25 cm) yang memperpanjang lintasan aliran sehingga meningkatkan gesekan hidraulik. Berdasarkan Hukum Darcy, gradien tekanan dalam media berpori dipengaruhi oleh panjang media dan berbanding terbalik dengan konduktivitas hidraulik (Metcalf & Eddy, 2014; Boettcher *et al.*, 2022). Walaupun permeabilitas biochar relatif tinggi, pengaruh panjang lintasan tetap menjadi faktor dominan dalam pembentukan *head loss*.

Total *head loss* sistem sebesar 0,1068 m pada empat kompartemen menunjukkan bahwa hambatan aliran masih berada dalam kategori rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa porositas efektif media masih terjaga dan belum terjadi penyumbatan signifikan. Dalam sistem filtrasi berpori, peningkatan *head loss* secara drastis biasanya menjadi indikator awal terjadinya clogging akibat akumulasi padatan tersuspensi atau pertumbuhan biofilm (Chen *et al.*, 2021).

3.3 Waktu Retensi Hidraulik (HRT)

Rata-rata HRT yang tercatat adalah 1,79 jam per kompartemen, sedangkan waktu tinggal total sistem termasuk kontribusi ruang distribusi aliran di dalam reaktor mencapai 9,78 jam. Nilai ini merepresentasikan waktu tinggal efektif air limbah di dalam media filtrasi selama proses berlangsung. Pada reaktor yang berisi media granular, fluida

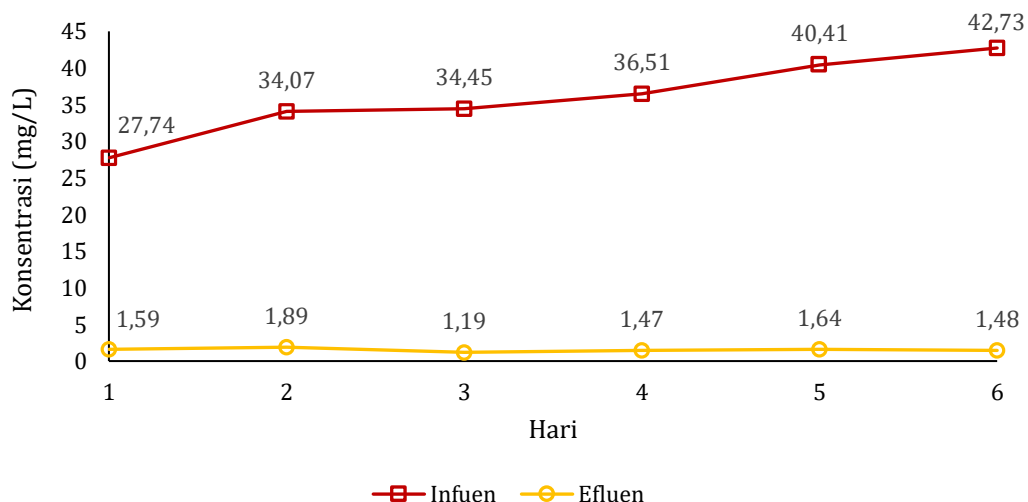
tidak mengisi seluruh volume geometris reaktor, melainkan hanya mengalir melalui ruang antarpartikel dan pori-pori media (Al-Ani & Al-Dahhan, 2021).

Durasi kontak kumulatif hampir 10 jam memberikan waktu yang cukup untuk berlangsungnya proses adsorpsi dua tahap. Tahap pertama merupakan adsorpsi cepat pada permukaan eksternal biochar yang dipengaruhi oleh gaya tarik elektrostatis. Tahap kedua adalah difusi intra-pori, yaitu pergerakan ion amonium ke dalam pori mikro dan mesopori yang memperluas area interaksi adsorben dengan adsorbat (Tan *et al.*, 2015; Patel, 2019). Proses difusi ini umumnya berlangsung lebih lambat dibandingkan adsorpsi permukaan, namun berkontribusi signifikan terhadap kapasitas total dan kestabilan adsorpsi dalam jangka waktu lebih panjang.

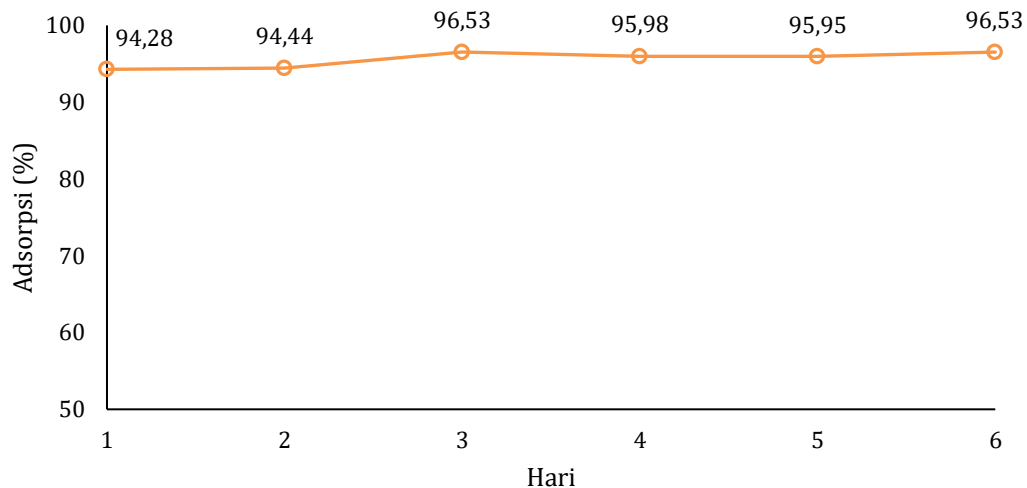
Penelitian Daud *et al.* (2017) menunjukkan bahwa waktu kontak sekitar 2 jam telah mampu menyisihkan hingga 80% nitrogen amonium. Hal ini sejalan dengan HRT per kompartemen pada sistem ini, di mana kondisi hidraulik dapat dikategorikan sangat mendukung terjadinya adsorpsi optimal. Kombinasi antara *head loss* yang rendah dan HRT yang relatif tinggi menunjukkan adanya keseimbangan antara hambatan aliran dan durasi kontak, sehingga proses adsorpsi dapat berlangsung secara efektif tanpa menimbulkan tekanan hidraulik berlebihan pada sistem.

3.4 Efisiensi Adsorpsi Amonium

Efisiensi adsorpsi amonium (NH_4^+) secara keseluruhan pada sistem filtrasi dihitung berdasarkan perbandingan antara konsentrasi influen dan konsentrasi efluen akhir setelah melewati seluruh kompartemen filter yang disajikan pada Gambar 3. Dengan demikian, nilai yang diperoleh merepresentasikan kinerja total sistem dalam kondisi operasi kontinu.



Gambar 3. Konsentrasi Influen dan Konsentrasi Efluen Akhir
(Sumber: Hasil Pengukuran, 2025)



Gambar 4. Efisiensi Adsorpsi Amonium
(Sumber: Hasil Pengukuran, 2025)

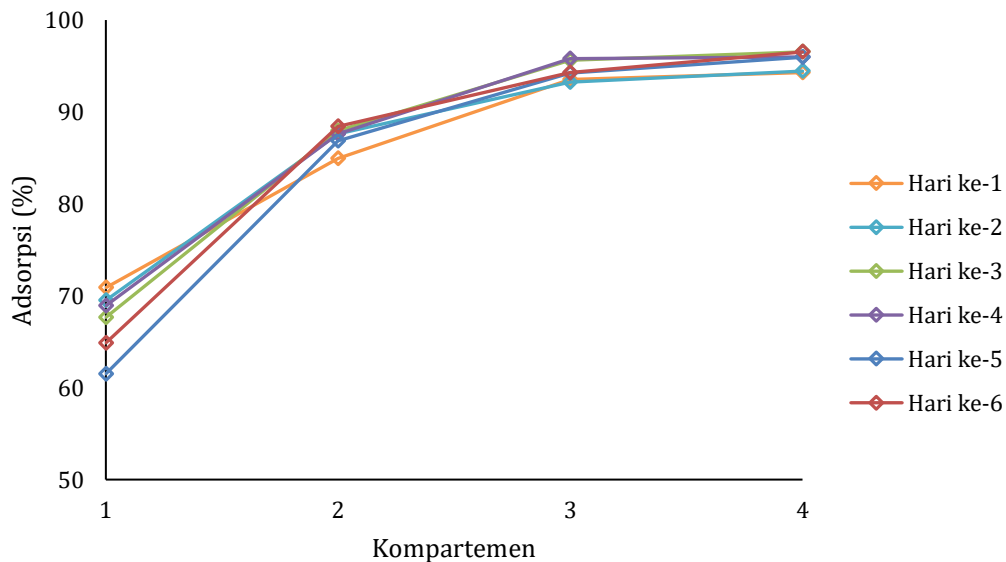
Pada Gambar 4, efisiensi adsorpsi NH_4^+ selama enam hari berada pada rentang 94,28–96,53%. Nilai ini menunjukkan performa adsorpsi yang tinggi dan relatif konstan, yang mengindikasikan bahwa kapasitas adsorpsi biochar teraktivasi Mg^{2+} belum mengalami kejenuhan signifikan dalam periode pengamatan. Stabilitas efisiensi meskipun konsentrasi influen meningkat hingga 42,73 mg/L menunjukkan bahwa sistem memiliki ketahanan terhadap fluktuasi beban pencemar.

Secara umum, pada sistem kolom aliran kontinu, peningkatan konsentrasi influen berpotensi mempercepat tercapainya titik jenuh (*breakthrough*) akibat keterbatasan situs aktif pada media (Patel, 2019). Namun, pada penelitian ini belum teramati penurunan efisiensi yang berarti, sehingga dapat diasumsikan bahwa kurva *breakthrough* masih berada pada fase awal (*initial adsorption zone*). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian *fixed-bed* biochar yang menunjukkan bahwa kombinasi waktu retensi yang memadai dan distribusi aliran yang merata mampu menunda terjadinya kejenuhan media (Li *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2025).

Tingginya efisiensi ini merupakan kombinasi antara desain hidraulik dan mekanisme kimia pada media biochar teraktivasi Mg^{2+} . Secara kimiawi, adsorpsi NH_4^+ melibatkan kombinasi gaya tarik elektrostatis, pertukaran ion, dan difusi intra-pori. Pada tahap awal, NH_4^+ tertarik ke permukaan biochar melalui interaksi elektrostatis antara muatan positif ion amonium dan gugus bermuatan negatif pada permukaan karbon (Yin *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2025).

Selanjutnya, mekanisme pertukaran ion terjadi ketika NH_4^+ menggantikan kation yang terikat lebih lemah pada situs aktif. Pelepasan sebagian Mg^{2+} selama proses adsorpsi mengindikasikan terjadinya pertukaran ion aktif yang memperkuat retensi amonium (Zheng *et al.*, 2025). Difusi intra-pori berperan dalam tahap lanjutan, di mana NH_4^+ berdifusi melalui mesopori sebagai jalur transport menuju mikropori yang menyediakan luas permukaan internal untuk proses adsorpsi (Tan *et al.*, 2015; Patel, 2019). Kombinasi ketiga mekanisme tersebut menjelaskan mengapa efisiensi adsorpsi tetap stabil dalam

periode operasi kontinu. Namun demikian, mekanisme ini dalam penelitian ini tidak dianalisis secara langsung melalui uji pelepasan Mg^{2+} atau karakterisasi lanjutan, sehingga interpretasi yang disampaikan masih bersifat teoritis berdasarkan literatur.



Gambar 5. Efisiensi Adsorpsi Tiap Kompartemen
(Sumber: Hasil pengukuran, 2025)

Pada Gambar 5, efisiensi adsorpsi NH_4^+ menunjukkan perbedaan antar kompartemen, di mana kompartemen 1 memiliki nilai lebih rendah dibandingkan kompartemen berikutnya. Hal ini mengindikasikan bahwa pada bagian awal reaktor terjadi keterbatasan distribusi aliran dan kontak awal antara influen dan media biochar, sehingga proses adsorpsi belum berlangsung optimal. Seiring bertambahnya jumlah kompartemen, efisiensi adsorpsi meningkat secara bertahap, dengan kenaikan signifikan dari kompartemen 1 ke kompartemen 2, kemudian cenderung stabil pada kompartemen 3 dan 4. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi filter dalam susunan seri mampu meningkatkan distribusi aliran dan waktu kontak, sehingga interaksi antara NH_4^+ dan permukaan biochar teraktivasi Mg^{2+} menjadi lebih efektif. Dengan demikian, kinerja adsorpsi tidak hanya ditentukan oleh kapasitas media, tetapi juga oleh kondisi hidraulik dalam sistem.

Fenomena peningkatan efisiensi ini sesuai dengan teori zona perpindahan massa (*mass transfer zone/MTZ*) pada kolom adsorpsi, di mana konsentrasi polutan menurun secara progresif sepanjang arah aliran akibat pemanfaatan bertahap situs aktif pada media (Al-Ani & Al-Dahhan, 2021). Dalam sistem seri, setiap kompartemen berfungsi memperluas panjang efektif kolom dan memperpanjang jalur aliran, sehingga memperbesar peluang kontak antara NH_4^+ dan permukaan adsorben (Li *et al.*, 2022). HRT kumulatif sebesar $\pm 9,78$ jam dalam sistem ini memberikan waktu kontak yang cukup untuk mendukung mekanisme tersebut. Dengan demikian, distribusi beban adsorpsi menjadi lebih merata dan risiko kejenuhan lokal dapat diminimalkan.

Penurunan efisiensi yang lebih tajam pada kompartemen 1 pada hari ke-5 mengindikasikan adanya perubahan kondisi sistem, yang kemungkinan dipengaruhi oleh peningkatan beban NH_4^+ pada influen atau mulai terjadinya kejenuhan lokal pada media di bagian awal reaktor. Meskipun parameter pH tidak diukur, perubahan karakteristik influen juga berpotensi memengaruhi kesetimbangan nitrogen dalam sistem. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi kolom biochar teraktivasi Mg^{2+} dalam sistem kompartemen seri mampu mempertahankan kinerja adsorpsi yang stabil. Temuan ini memperkuat potensi aplikasi sistem filter biochar teraktivasi sebagai alternatif teknologi pengolahan air limbah domestik berbasis adsorpsi pada skala kontinu.

4. PENUTUP

Sistem filter biochar teraktivasi Mg^{2+} dengan konfigurasi aliran ke atas (*upflow*) dan susunan kompartemen seri menunjukkan kinerja hidraulik yang stabil serta efisiensi adsorpsi amonium yang tinggi pada pengolahan air limbah domestik secara kontinu. Karakteristik filtrasi menunjukkan *head loss* total yang relatif rendah dan waktu retensi hidraulik yang memadai, sehingga mampu mendukung proses adsorpsi dan pertukaran ion amonium secara optimal. Efisiensi adsorpsi amonium menunjukkan kinerja yang tinggi dan konsisten hingga mencapai efisiensi di atas 90%.

Penelitian ini memiliki keterbatasan, terutama tidak dilakukannya analisis karakterisasi media sebelum dan sesudah adsorpsi, serta tidak adanya pengukuran parameter pendukung seperti pH dan Mg^{2+} . Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji mekanisme adsorpsi secara lebih mendalam serta mengevaluasi performa jangka panjang hingga kondisi jenuh.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Universitas Mahasaraswati Denpasar atas dukungan akademik dan fasilitas penelitian yang telah diberikan. Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam pendanaan penelitian, pelaksanaan kegiatan, pengumpulan dan pengolahan data, hingga penyusunan artikel ini sehingga penelitian dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Lahin, F., Sarbatly, R., & Chel-Ken, C. (2021). Point-of-use Upflow Sand Filter for Rural Water Treatment Using Natural Local Sand: Understanding and Predicting Pressure Drop. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1192(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1192/1/012008>
- Al-Ani, M., & Al-Dahhan, M. (2021). Effect of Catalyst Shape on Pressure Drop and Liquid Holdup in A Pilot Plant Trickle Bed Reactor. *Fuel*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118860>
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>

- Boettcher, K. E. R., Fischer, M. D., Neumann, T., & Ehrhard, P. (2022). Experimental Investigation of the Pre-Darcy Regime. *Experiments in Fluids*, 63(2). <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03387-9>
- Chen, S., Dougherty, M., Chen, Z., Zuo, X., & He, J. (2021). Managing Biofilm Growth and Clogging to Promote Sustainability in an Intermittent Sand Filter (ISF). *Science of The Total Environment*, 755, 142477. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142477>
- Daud, Z., Suhani, N., Maya Saphira Radin Mohamed, R., & Awang, H. (2017). Feasibility of Banana (*Musa sapientum*) Trunk Biofibres for Treating Kitchen Wastewater. *Nature Environment and Pollution Technology*, 6(4), 1205–1210.
- Edeh, I. G., Mašek, O., & Buss, W. (2020). A Meta-analysis on Biochar's Effects on Soil Water Properties – New Insights and Future Research Challenges. *Science of The Total Environment*, 714, 136857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>
- Fronczyk, J. (2020). Properties of Reactive Materials for Application in Runoff Water Treatment Systems. *Journal of Ecological Engineering*, 21(8), 185–197. <https://doi.org/10.12911/22998993/126988>
- González, E. J., & Roldán, G. (2019). Eutrophication and Phytoplankton: Some Generalities from Lakes and Reservoirs of the Americas. In M. Vítová (Ed.), *Microalgae - From Physiology to Application* (2). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89010>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Li, D.-Y., Cho, Y.-C., Hsu, M. H., & Lin, Y.-P. (2022). Recovery of Phosphate and Ammonia from Wastewater via Struvite Precipitation Using Spent Refractory Brick Gravel from Steel Industry. *Journal of Environmental Management*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114110>
- Lu, Y., Cheung, S., Koh, X. P., Xia, X., Jing, H., Lee, P., Kao, S. J., Gan, J., Dai, M., & Liu, H. (2023). Active Degradation-nitrification Microbial Assemblages in the Hypoxic Zone in a Subtropical Estuary. *Science of the Total Environment*, 904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166694>
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education. <https://books.google.co.id/books?id=6KVKMAEACAAJ>
- Patel, H. (2019). Fixed-bed Column Adsorption Study: A Comprehensive Review. In *Applied Water Science* (Vol. 9, Number 3). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Wijaya, I. M. W. (2025). Adsorption Kinetics and Isotherm Study of Ammonium and Phosphate Removal Using Magnesium-Activated Biochar. *Journal of Ecological Engineering*, 26(6), 62–75. <https://doi.org/10.12911/22998993/201996>
- Xie, Y., Wu, J., Hu, H., Liu, S., Xie, X., Huang, J., & Han, Z. (2024). Boosting Synergistic Recovery of Ammonia Nitrogen and Phosphate from Phosphorus Chemical Wastewater by Co-pyrolyzing the Biomass and Magnesite. *Separation and Purification Technology*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127645>
- Yao, A. K. Z., Jiun, L. W., Yong, L. C., Shi, C. Y., & Seng, O. B. (2022). Ammonium Sorption and Regeneration Using Mg-modified Zeolites: A Study on the Interferences of Competing Ions from Aquaculture Effluent. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102909. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102909>

- Yin, Q., Liu, M., & Ren, H. (2019). Removal of Ammonium and Phosphate from Water by Mg-modified Biochar: Influence of Mg pretreatment and Pyrolysis Temperature. *BioResources*, 14(3), 6203–6218. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.6203-6218>
- Zheng, H., Ma, C., Li, T., Fu, X., Song, F., Wang, J., Huang, Y., & Zhao, Q. (2025). Removal of Ammonia Nitrogen and Phosphate from Livestock Wastewater by Magnesite Tailings Modified Biochar: Performance and Mechanisms. *Applied Water Science*, 15. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02598-9>