

ANALISIS KARAKTERISTIK FILTRASI DENGAN MEDIA BIOCHAR UNTUK PENURUNAN KONSENTRASI AMMONIUM DAN FOSFAT

Filemon Bram Gunas Junior¹⁾, Shinta Enggar Maharani¹⁾, 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

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya kandungan nutrisi, khususnya ammonium (NH_4^+) dan fosfat (PO_4^{3-}), dalam air limbah domestik yang berpotensi menyebabkan eutrofikasi apabila tidak diolah secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik hidraulik dan kinerja filtrasi media biochar dalam sistem filtrasi dua kompartemen pada pengolahan air limbah domestik. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan unit filtrasi skala laboratorium berdimensi efektif 200 mm × 200 mm dengan tinggi media 700 mm. Sistem dioperasikan secara aliran kontinu dengan debit 50 L/jam selama 3 jam per hari. Parameter yang dianalisis meliputi masa efektivitas filtrasi, *bed volume* (BV), kehilangan tekanan (*head loss*), koefisien permeabilitas (K), dan waktu retensi hidraulik (HRT), serta efisiensi penyisihan ammonium dan fosfat yang diukur menggunakan metode spektrofotometri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa masa efektivitas filtrasi mencapai 28,17 jam dengan total volume air terolah sebesar 1,4083 m³ atau setara 66,45 BV. Nilai *head loss* sebesar 0,50 m relatif stabil selama periode operasi, menunjukkan tidak terjadi penyumbatan signifikan pada media. Koefisien permeabilitas sebesar $3,12 \times 10^{-4}$ m/s mengindikasikan permeabilitas sedang hingga tinggi, dengan HRT berkisar 21–25 menit. Media biochar mampu menyisihkan ammonium sebesar 65–75% serta menurunkan konsentrasi fosfat secara signifikan, dengan efisiensi tertinggi pada fase awal operasi sebelum menurun akibat kejenuhan media.

Kata Kunci: Biochar, Filtrasi Dua Kompartemen, Karakteristik Hidraulik, Ammonium, Fosfat

ABSTRACT

This study is motivated by the high concentration of nutrients, particularly ammonium (NH_4^+) and phosphate (PO_4^{3-}), in domestic wastewater, which can lead to eutrophication if not properly treated. The objective of this research is to analyze the hydraulic characteristics and filtration performance of biochar media in a two-compartment filtration system for domestic wastewater treatment. The study was conducted experimentally using a laboratory-scale filtration unit with effective dimensions of 200 mm × 200 mm and a media height of 700 mm. The system was operated under continuous flow conditions at a discharge rate of 50 L/h for 3 hours per day. The analyzed parameters included filtration effectiveness duration, bed volume (BV), head loss, permeability coefficient (K), and hydraulic retention time (HRT), as well as the removal efficiency of ammonium and phosphate, measured using spectrophotometric methods. The results showed that the filtration effectiveness duration reached 28.17 hours, with a total treated water volume of 1.4083 m³, equivalent to 66.45

BV. The head loss value of 0.50 m remained relatively stable throughout the operation, indicating no significant clogging of the media. The permeability coefficient of 3.12×10^{-4} m/s indicates moderate to high permeability, with an HRT ranging from 21 to 25 minutes. The biochar media achieved ammonium removal efficiencies of 65–75% and significantly reduced phosphate concentrations, with the highest efficiency observed at the initial stage before declining due to media saturation.

Keywords: Biochar, Two-Compartment Filtration, Hydraulic Characteristics, Ammonium, Phosphate

1. PENDAHULUAN

Air limbah domestik merupakan salah satu sumber pencemar utama badan air permukaan karena mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, serta nutrisi nitrogen dan fosfor dalam konsentrasi signifikan. Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap pencemaran nutrisi semakin meningkat seiring dengan bertambahnya beban limbah dari kawasan perkotaan dan permukiman padat (Vymazal, 2020; Kumar *et al.*, 2022). Nitrogen dalam air limbah domestik umumnya ditemukan dalam bentuk amonium (NH_4^+), sedangkan fosfor dominan dalam bentuk fosfat (PO_4^{3-}). Kedua senyawa ini berkontribusi langsung terhadap proses eutrofikasi apabila terakumulasi tanpa pengolahan yang memadai. Eutrofikasi menyebabkan pertumbuhan alga secara berlebihan, penurunan kadar oksigen terlarut, serta gangguan terhadap keseimbangan ekosistem perairan (Paerl *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pengendalian amonium dan fosfat menjadi aspek krusial dalam pengelolaan air limbah domestik yang berkelanjutan.

Pengolahan nutrisi dalam air limbah domestik secara konvensional umumnya dilakukan melalui proses biologis seperti nitrifikasi–denitrifikasi untuk nitrogen dan *enhanced biological phosphorus removal* (EBPR) untuk fosfor. Meskipun efektif, sistem biologis memerlukan kontrol operasional yang kompleks, kestabilan kondisi lingkungan, serta biaya investasi dan operasional yang relatif tinggi (Guo *et al.*, 2020). Dalam konteks skala kecil hingga menengah, pendekatan alternatif berbasis proses fisik–kimia seperti filtrasi dan adsorpsi menjadi lebih menarik karena kesederhanaan operasional, fleksibilitas desain, serta potensi efisiensi biaya (Li *et al.*, 2019).

Filtrasi merupakan proses penting dalam pengolahan air limbah yang tidak hanya berfungsi sebagai penyisihan partikel tersuspensi, tetapi juga berperan dalam pengurangan zat terlarut melalui mekanisme adsorpsi pada media. Dalam sistem filtrasi aliran kontinu, kinerja unit sangat dipengaruhi oleh karakteristik hidraulik seperti waktu retensi hidrolis (*Hydraulic Retention Time/HRT*), kehilangan tekanan (*head loss*), dan koefisien permeabilitas. Parameter-parameter ini menentukan distribusi aliran, waktu kontak antara air limbah dan media, serta stabilitas operasi dalam jangka waktu tertentu (Crittenden *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2018). Peningkatan *head loss* menunjukkan terjadinya penyumbatan pori media (*clogging*), sedangkan perubahan permeabilitas mencerminkan dinamika struktur internal media selama proses filtrasi berlangsung.

Dalam perkembangannya, biochar telah banyak diteliti sebagai media alternatif dalam sistem filtrasi karena memiliki struktur berpori, luas permukaan tinggi, serta gugus

fungsi aktif yang mendukung proses adsorpsi. Biochar dihasilkan melalui pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen dan diketahui efektif dalam menyerap berbagai polutan, termasuk ammonium dan fosfat (Tan *et al.*, 2015; Ahmad *et al.*, 2021). Mekanisme penyisihan ammonium umumnya terjadi melalui pertukaran kation, sedangkan fosfat disisihkan melalui mekanisme kompleksasi, adsorpsi elektrostatis, maupun presipitasi dengan kation logam yang tersedia pada permukaan media.

Untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi, biochar dapat dimodifikasi melalui aktivasi kimia, salah satunya menggunakan magnesium (Mg). Aktivasi magnesium terbukti mampu meningkatkan kapasitas pertukaran kation (*cation exchange capacity/CEC*) serta menyediakan situs aktif tambahan yang berperan dalam interaksi dengan ion ammonium dan fosfat. Kehadiran Mg^{2+} pada permukaan biochar juga memungkinkan terbentuknya presipitasi Mg-P yang meningkatkan retensi fosfat secara signifikan (Zhang *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022).

2. METODOLOGI

2.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan pendekatan laboratorium untuk menganalisis karakteristik hidraulik dan kinerja filtrasi biochar dalam sistem filtrasi dua kompartemen pada pengolahan air limbah domestik. Penelitian ini dirancang dengan pendekatan rasional, empiris, dan sistematis. Pendekatan rasional didasarkan pada teori filtrasi media granular serta prinsip Hukum Darcy sebagai landasan ilmiah. Pendekatan empiris dilakukan melalui pengukuran langsung terhadap parameter hidraulik dan kualitas air. Sementara itu, pendekatan sistematis diterapkan melalui pelaksanaan penelitian yang mengikuti tahapan operasional secara terstruktur dan berurutan.

2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Biologi Universitas Mahasaraswati Denpasar pada periode bulan November hingga Desember 2025.

Alat:

- Kolom filtrasi dua kompartemen
- Manometer
- *Flow meter*
- Spektrofotometer
- Gelas ukur dan peralatan laboratorium pendukung

Bahan:

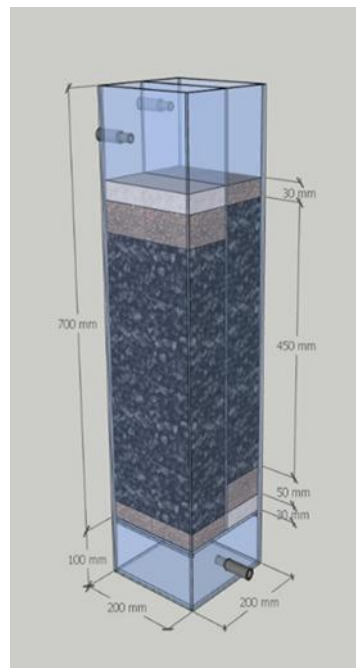
- Media biochar
- Pasir halus
- Kerikil penyangga
- Air limbah domestik (sebagai sampel penelitian)

2.3 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah air limbah domestik. Sampel penelitian berupa air limbah yang dialirkan ke unit filtrasi sebagai *influen*, serta air hasil filtrasi sebagai *efluen*. Pengambilan sampel dilakukan secara periodik selama masa operasi filtrasi.

2.4 Prosedur Penelitian

1. Persiapan media dan penyusunan kolom filtrasi.
2. Pengoperasian sistem dengan debit 50 L/jam selama 3 jam per hari.
3. Pengambilan sampel influen dan efluen.
4. Analisis konsentrasi ammonium dan fosfat menggunakan spektrofotometri.



Gambar 1. Unit Filter Biochar
(Sumber : Hasil rancangan, 2025)

Unit filtrasi dalam penelitian ini memiliki dimensi efektif 200 mm × 200 mm dengan luas penampang sebesar 40.000 mm² dan tinggi total media 700 mm. Susunan media terdiri atas media utama setebal 450 mm, lapisan pasir halus 30 mm, dan lapisan kerikil penyangga 50 mm. Sistem dioperasikan dengan debit filtrasi sebesar 50 L/jam (setara dengan 0,05 m³/jam) selama 3 jam per hari. Tekanan awal yang terbaca pada manometer sebesar 500 mm kolom air dan digunakan sebagai acuan kehilangan tekanan awal sistem. Parameter kinerja filtrasi dianalisis berdasarkan masa efektivitas filtrasi, kehilangan tekanan (*head loss*), koefisien permeabilitas media (K), dan waktu retensi hidrolis (*Hydraulic Retention Time / HRT*).

2.5 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

1. Parameter Hidraulik dan Rumus Perhitungan Masa Efektif Filtrasi

$$T \text{ efektif} = t \text{ jam} + \frac{t \text{ menit}}{60} \quad (1)$$

Keterangan:

T efektif = total waktu operasi efektif (jam)

t jam = waktu operasi dalam satuan jam

t menit = waktu operasi dalam satuan menit

Volume Total Air Terolah (Vtotal)

$$V_{total} = Q \times T \quad (2)$$

Keterangan:

Q = debit (m³/jam)

T = waktu operasi (jam)

Bed Volume (BV)

$$BV = \frac{V_{total}}{V_{media}} \quad (3)$$

Keterangan:

BV = Bed Volume (jumlah volume air yang telah melewati media)

Vtotal = volume total air yang difiltrasi selama waktu operasi (m³)

Vmedia = volume efektif media filtrasi (m³)

Bed Volume (BV) digunakan untuk menunjukkan berapa kali volume media filter telah dialiri air selama periode operasi. Nilai ini menjadi indikator ketahanan media terhadap beban hidraulik dan beban pencemar.

Kehilangan Tekanan (Head Loss)

$$\Delta h = h \text{ awal} - h \text{ akhir} \quad (4)$$

Keterangan:

Δh = kehilangan tekanan atau *head loss* (m)

h awal = tinggi kolom air awal yang terbaca pada manometer (m)

h akhir = tinggi kolom air akhir setelah terjadi aliran melalui media (m)

Head loss menunjukkan besarnya hambatan aliran yang terjadi akibat gesekan dan akumulasi partikel dalam pori-pori media filtrasi. Semakin besar nilai Δh \Delta h, semakin besar pula hambatan aliran yang terjadi di dalam media filter.

Koefisien Permeabilitas (Hukum Darcy)

$$K = \frac{vL}{\Delta h} \quad (5)$$

Keterangan:

K = koefisien permeabilitas media (m/s)

v = kecepatan alir superficial (m/s)

L = ketebalan media filtrasi (m)

Δh = kehilangan tekanan (m)

Waktu Retensi Hidrolik (HRT)

$$\text{HRT} = \frac{V_{\text{media}}}{Q} \quad (6)$$

Keterangan :

HRT = waktu retensi hidrolik (jam atau menit)

V_{media} = volume efektif media filtrasi (m^3)

Q = debit aliran (m^3/jam)

Berdasarkan kedalaman media

$$\text{HRT} = \frac{L}{v} \quad (7)$$

Keterangan :

L = ketebalan atau kedalaman media filtrasi (m)

v = kecepatan alir superfisial (m/jam atau m/s)

Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan hasil perhitungan terhadap kriteria operasional filtrasi cepat (*rapid sand filter*).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Masa Efektivitas Filtrasi

Masa efektivitas filtrasi merupakan periode operasional di mana unit filtrasi masih mampu bekerja secara optimal dalam menyisihkan polutan sesuai dengan kriteria yang ditetapkan. Parameter ini menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kinerja sistem filtrasi, karena mencerminkan kemampuan media dalam mempertahankan efisiensi penyisihan sebelum terjadi penurunan kinerja akibat kejenuhan adsorpsi maupun penyumbatan pori (*clogging*). Seiring waktu operasi, akumulasi partikel tersuspensi dan zat terlarut pada permukaan serta di dalam pori media akan menyebabkan peningkatan kehilangan tekanan (*head loss*) dan penurunan permeabilitas, yang pada akhirnya mempengaruhi distribusi aliran dan waktu kontak. Kondisi ini berdampak langsung pada menurunnya efisiensi penyisihan, khususnya terhadap ammonium (NH_4^+) dan fosfat (PO_4^{3-}). Oleh karena itu, penentuan masa efektivitas filtrasi menjadi penting untuk mengetahui batas waktu operasional optimum, serta sebagai dasar dalam penjadwalan pencucian balik (*backwashing*) atau penggantian media guna menjaga stabilitas kinerja sistem filtrasi.

Masa efektivitas filtrasi merupakan parameter penting untuk menentukan sampai kapan media filter mampu berfungsi optimal sebelum mengalami penurunan performa akibat akumulasi padatan. Berdasarkan hasil pengamatan, total waktu operasi efektif adalah 28 jam 10 menit, yang dinyatakan sebagai:

$$T_{\text{efektif}} = 28 + \frac{10}{60} = 28,17 \text{ jam}$$

Keterangan:

T_{efektif} = total waktu operasi efektif (jam)

28,17 = waktu operasi dalam satuan jam

10 = tambahan waktu dalam satuan menit 60 = faktor konversi menit ke jam

Volume total air yang berhasil difiltrasi selama periode efektivitas adalah:

$$V_{total} = Q \times T = 0,05 \text{ m}^3/\text{jam} \times 28,17 = 1,4083$$

Keterangan :

V_{total} = volume total air yang difiltrasi (m^3)

Q = debit aliran (m^3/jam)

T = waktu operasi efektif (jam)

Untuk mengetahui ketahanan media berdasarkan jumlah volume air yang dapat diproses, digunakan satuan Bed Volume (BV). Berdasarkan perhitungan, masa efektivitas mencapai 66,45 BV. Bed Volume (BV) sering digunakan untuk mengevaluasi daya tahan media filter terhadap beban hidraulik dan beban polutan. Literatur pengolahan air menyebutkan bahwa *rapid sand filter* umumnya mampu beroperasi pada kisaran 50–100 BV sebelum memerlukan pencucian balik (*backwashing*) (Crittenden *et al.*, 2012). Dengan capaian 66,45 BV, unit filtrasi dalam penelitian ini masih berada dalam rentang operasional normal, yang menunjukkan bahwa media belum mengalami kejenuhan atau penyumbatan signifikan.

Penelitian Wijaya *et al.* (2024) mengenai ekosistem Sungai Tukad Badung menekankan bahwa teknologi filtrasi *in-situ* harus mampu menangani debit fluktuatif dengan pemeliharaan yang minimal. Dengan stabilitas hidraulik yang ditunjukkan dalam penelitian ini, filter biochar teraktivasi memenuhi kriteria sebagai unit pengolahan yang efisien untuk mengurangi beban pencemar langsung di saluran drainase perkotaan.

3.2 Kehilangan Tekanan (*Head Loss*)

Kehilangan tekanan merupakan indikator terjadinya hambatan aliran air dalam media filter. Nilai *head loss* yang terukur dinyatakan sebagai berikut $\Delta h = 50 \text{ cm} = 0,50 \text{ m}$ dimana Δh adalah kehilangan tekanan atau *head loss* (m) dan 0,50 m merupakan tinggi kolom air yang terbaca pada manometer

Kehilangan tekanan dalam media berpori dijelaskan melalui prinsip aliran dalam media granular. Head loss pada filtrasi cepat meningkat secara bertahap seiring dengan akumulasi padatan dalam media filtrasi yang menyebabkan penyumbatan pori (*clogging*) dan peningkatan hambatan aliran. Batas operasional *head loss* pada *rapid sand filter* umumnya berada pada kisaran 1,0–1,5 m kolom air, yang digunakan sebagai indikator bahwa media telah mencapai kondisi jenuh dan memerlukan pencucian balik (*backwashing*) untuk mengembalikan kinerja filtrasi (Crittenden *et al.*, 2012; AWWA, 2017). Masih bekerja dalam kondisi hidraulik stabil. Tidak adanya peningkatan head loss selama periode pengamatan mengindikasikan bahwa distribusi pori media masih terbuka dan aliran tetap berada dalam rezim laminar, sesuai asumsi dasar Hukum Darcy. Nilai *head loss* sebesar 0,50 m yang terukur menunjukkan bahwa sistem masih bekerja dalam kondisi hidraulik yang stabil. Tidak adanya peningkatan *head loss* selama periode pengamatan mengindikasikan bahwa distribusi pori media masih terbuka, sehingga tidak

terjadi penyumbatan (*clogging*) yang signifikan dan aliran tetap berada dalam rezim laminer sesuai asumsi dasar Hukum Darcy.

Kondisi ini memiliki implikasi penting terhadap kinerja sistem filtrasi, yaitu menunjukkan bahwa media biochar masih mampu mempertahankan permeabilitas dan distribusi aliran yang merata, sehingga waktu kontak antara air limbah dan media tetap optimal. Stabilitas *head loss* juga mengindikasikan bahwa unit filtrasi belum mencapai batas operasionalnya, sehingga belum memerlukan tindakan pemeliharaan seperti *backwashing* atau penggantian media. Selain itu, kondisi hidraulik yang stabil mendukung konsistensi efisiensi penyisihan ammonium dan fosfat, karena tidak terjadi *short-circuiting* atau aliran tidak merata yang dapat menurunkan kinerja proses. Dengan demikian, nilai *head loss* yang stabil tidak hanya mencerminkan kondisi fisik media yang masih baik, tetapi juga berkontribusi langsung terhadap keberlanjutan dan efektivitas proses filtrasi secara keseluruhan.

3.3 Koefisien Permeabilitas Media (K)

Koefisien permeabilitas merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan media dalam meloloskan air melalui pori-porinya. Nilai ini umumnya dihitung menggunakan Hukum Darcy, yang pertama kali diperkenalkan oleh Henry Darcy pada tahun 1856 melalui eksperimen aliran air dalam media berpori. Hukum ini menyatakan bahwa laju aliran fluida melalui media berpori berbanding lurus dengan gradien hidraulik dan luas penampang, serta berbanding terbalik dengan panjang media.

Kecepatan alir superfisial diperoleh dari:

$$K = \frac{Q}{A} = \frac{0,05}{0,04} = 1,25 \text{ m/jam} \approx 1,30 \text{ m/Jam}$$

Dikonversi ke meter per detik:

$$v = 0,0034722 \text{ m/s}$$

Dengan ketebalan media ($L = 0.45 \text{ m}$) dan kehilangan tekanan ($\Delta h = 0,50 \text{ m}$), diperoleh:

$$K = \frac{0,0034722 \times 0,45}{0,50} = 3,12 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Menurut *Principles of Water Treatment*, nilai K untuk media pasir biasanya berada pada rentang 10^{-5} hingga 10^{-3} m/s , tergantung ukuran butiran dan porositasnya. Nilai permeabilitas sebesar $3,12 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ yang diperoleh dalam penelitian ini termasuk kategori permeabilitas sedang hingga tinggi, yang menunjukkan struktur pori media masih longgar dan belum mengalami kompaksi atau fouling berat.

3.4 Waktu Retensi Hidrolik (*Hydraulic Retention Time* – HRT)

Waktu Retensi Hidrolik (HRT) merupakan parameter penting dalam sistem pengolahan air karena menentukan durasi kontak antara air dan media filtrasi. Menurut *World Health Organization* (2022) dalam *Guidelines for Drinking-water Quality*, filtrasi cepat umumnya memiliki waktu retensi yang relatif singkat, yaitu sekitar 10–30 menit, dengan kecepatan filtrasi berkisar antara 4–10 m/jam.

Berdasarkan volume media

$$\text{HRT} = \frac{V_{\text{media}}}{Q} = \frac{0,0212}{0,05} = 0,424 \text{ jam} = 25,44 \text{ menit}$$

Keterangan :

HRT = waktu retensi hidrolis (jam atau menit)

V_{media} = volume efektif media filtrasi (m^3)

Q = debit aliran (m^3/jam)

Berdasarkan kedalaman media

$$\text{HRT} = \frac{L}{v} = \frac{0,45}{1,25} = 0,36 \text{ jam} = 21,6 \text{ menit}$$

Nilai HRT sebesar 21–25 menit pada penelitian ini masih berada dalam rentang karakteristik filtrasi cepat (*rapid sand filtration*). Rentang waktu tersebut cukup untuk memungkinkan terjadinya mekanisme penyisihan berupa:

- Penyaringan mekanis (*straining*)
- Sedimentasi antar butir (*interception*)
- Adsorpsi pada permukaan media
- Proses biologis terbatas (biofilm tipis)

Keberadaan biochar sebagai media utama juga meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap amonium dan fosfat karena luas permukaan spesifik yang tinggi serta adanya gugus fungsi aktif pada permukaan karbon. Sebagaimana dijelaskan oleh Wijaya (2025), efektivitas adsorpsi pada biochar yang diaktivasi magnesium sangat bergantung pada waktu kontak yang optimal untuk memfasilitasi mekanisme kemisorpsi dan pertukaran ion antara kation magnesium dengan molekul ammonium dan fosfat.

Berdasarkan hasil perhitungan dan parameter hidraulik, unit filtrasi menunjukkan performa yang baik. Masa efektivitas mencapai 66,5 BV, *head loss* tetap stabil pada 0,50 m, nilai permeabilitas berada dalam kategori baik, dan waktu retensi hidrolis sesuai dengan karakteristik filtrasi cepat. Secara keseluruhan, media filtrasi tidak mengalami penyumbatan dan mampu mendukung proses penurunan amonium dan fosfat secara optimal selama periode penelitian.

4. PENUTUP

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem filtrasi dua kompartemen berbasis biochar teraktivasi magnesium menunjukkan kinerja hidraulik yang stabil dan kemampuan penyisihan nutrisi yang efektif dalam pengolahan air limbah domestik. Parameter karakteristik filtrasi seperti masa efektivitas sebesar 66,45 bed volume (BV), *head loss* stabil pada 0,50 m, koefisien permeabilitas dalam kategori baik, serta *Hydraulic Retention Time* (HRT) pada rentang filtrasi cepat (21–25 menit) menunjukkan bahwa media belum mengalami penyumbatan signifikan selama periode operasional. Secara mekanistik, penyisihan ammonium terjadi melalui pertukaran kation, sedangkan fosfat terikat melalui mekanisme adsorpsi dan presipitasi magnesium–fosfat. Integrasi stabilitas hidraulik dan mekanisme kimia ini menunjukkan bahwa biochar.

Namun demikian, untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan dilakukan penelitian lanjutan yang mencakup uji jangka panjang untuk mengevaluasi umur pakai media dan dinamika kejenuhan adsorpsi, variasi beban hidraulik untuk mengetahui batas operasional sistem, serta optimasi modifikasi biochar guna meningkatkan kapasitas penyisihan fosfat secara lebih stabil. Selain itu, studi skala lapangan (*pilot scale*) dan analisis terhadap parameter kualitas air lainnya juga perlu dilakukan untuk menilai kinerja sistem secara lebih komprehensif dan aplikatif.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Universitas Mahasaraswati (Unmas) Denpasar atas pemberian izin penggunaan Laboratorium Biologi sebagai lokasi pelaksanaan penelitian ini. Izin dan dukungan yang diberikan sangat berkontribusi terhadap kelancaran proses pengujian serta penyelesaian penelitian secara optimal. Ucapan terima kasih ditujukan kepada pihak lembaga/instansi terkait yang telah membantu proses terlaksananya penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2021). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2021). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
- American Water Works Association (AWWA). (2017). *Water quality and treatment: A handbook on drinking water* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: Principles and design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Guo, F., Zhang, T., & Wang, Z. (2020). Advances in biological nutrient removal from wastewater. *Bioresource Technology*, 300, 122–130.
- Kumar, V., Sharma, A., & Singh, J. (2022). Nutrient removal from domestic wastewater: A review of treatment technologies. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102–115.
- Li, R., Wang, J. J., Zhou, B., Zhang, Z., Liu, S., Lei, S., & Xiao, R. (2019). Simultaneous capture of ammonium and phosphate by biochar. *Bioresource Technology*, 273, 556–562.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., & Paz-Ferreiro, J. (2022). Biochar's effect on nutrient retention and soil fertility: A review. *Science of the Total Environment*, 512, 388–399.
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2016). Duelling 'CyanoHABs': Unravelling the environmental drivers controlling harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Science & Technology*, 50(2), 301–309.
- 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.
- Vymazal, J. (2020). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 12(3), 789.
- Wang, Y., Zhang, Z., & Chen, Y. (2021). Nutrient pollution and eutrophication in aquatic ecosystems. *Environmental Research*, 194, 110–120.

- 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. (2025). Adsorption kinetics and isotherm study of ammonium and phosphate removal using magnesium-activated biochar. *Journal of Ecological Engineering*, 26(6), 62–75.
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 2nd addendum). WHO Press.
- Zhang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., & Inyang, M. (2020). Synthesis and environmental applications of engineered biochar. *Bioresource Technology*, 246, 395–405.
- Zhang, Q., Wang, X., & Li, Y. (2018). Filtration performance and hydraulic characteristics of porous media filters: A review. *Journal of Environmental Management*, 223, 106–117.