

EFEKTIVITAS FILTER BIOCHAR TERAKTIVASI Mg^{2+} DALAM PENYISIHAN AMONIUM DARI AIR LIMBAH DOMESTIK

Dewa Agung Dibyacitta¹, I Made Wahyu Wijaya^{2*}, I Gusti Ngurah Made Wiratama³

^{1,3}Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Mahasaraswati Denpasar

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

*Email: wijaya@unmas.ac.id

ABSTRAK: Air limbah domestik mengandung nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4^+) yang berpotensi menurunkan kualitas perairan apabila tidak diolah secara memadai. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas sistem filtrasi biochar teraktivasi magnesium (Mg^{2+}) dalam menyisihkan amonium dari air limbah domestik menggunakan reaktor aliran ke atas (*upflow*) yang terdiri atas empat kompartemen yang tersusun secara seri. Biochar biomassa kayu diaktivasi dengan larutan $MgCl_2$ untuk meningkatkan adsorpsi dan sistem dioperasikan selama enam hari pada debit 100 mL/menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi NH_4^+ influen berfluktuasi pada kisaran 27,74–42,73 mg/L, sedangkan konsentrasi efluen relatif rendah dan stabil pada rentang 1,19–1,89 mg/L. Efisiensi penyisihan pada kompartemen akhir mencapai 94,28–96,53%, yang menunjukkan kemampuan sistem filtrasi efektif dalam menyisihkan NH_4^+ selama periode operasi. Efektivitas dipengaruhi oleh perpanjangan waktu kontak dalam sistem seri serta mekanisme pertukaran ion, interaksi elektrostatik, dan jembatan ionik oleh Mg^{2+} pada permukaan biochar. Secara keseluruhan, sistem menunjukkan efisiensi tinggi (>90%) dan stabil selama operasi, dengan tiga kompartemen telah memadai untuk mencapai kinerja optimal.

Kata kunci: Biochar Mg^{2+} , Amonium (NH_4^+), Filtrasi.

ABSTRACT: Domestic wastewater contains nitrogen in the form of ammonium (NH_4^+), which can deteriorate water quality if not adequately treated. This study aimed to evaluate the effectiveness of a magnesium-activated biochar (Mg^{2+}) filtration system for ammonium removal from domestic wastewater using an upflow reactor composed of four compartments arranged in series. Wood-based biochar was activated with an $MgCl_2$ solution to enhance its adsorption capacity, and the system was operated for six days at a flow rate of 100 mL/min. The results showed that influent NH_4^+ concentrations fluctuated between 27.74 and 42.73 mg/L, while effluent concentrations remained relatively low and stable, ranging from 1.19 to 1.89 mg/L. The removal efficiency in the final compartment reached 94.28–96.53%, demonstrating the system's effectiveness in removing NH_4^+ throughout the operational period. The high performance was attributed to extended contact time in the series configuration, as well as ion exchange, electrostatic interactions, and ion bridging mechanisms facilitated by Mg^{2+} on the biochar surface. Overall, the system exhibited high (>90%) and stable removal efficiency, with three compartments considered sufficient to achieve optimal performance.

Keywords: Mg^{2+} activated biochar, ammonium (NH_4^+), filtration

PENDAHULUAN

Penurunan kualitas air sebagian besar dipicu oleh limbah domestik dari kegiatan rumah tangga, khususnya akibat tingginya polutan nutrisi seperti nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4^+) (Metcalf & Eddy, 2014). Apabila air limbah tersebut dibuang langsung tanpa proses pengolahan yang memadai, nutrisi ini akan terakumulasi pada badan air dan berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan. Pemulihan nutrisi dari air limbah menjadi isu penting untuk perlindungan lingkungan.

Pembuangan air limbah tanpa pengolahan yang memadai dapat menyebabkan akumulasi amonium di badan air, sehingga memicu terjadinya eutrofikasi dan pertumbuhan alga berlebih (González & Roldán, 2019). Proses dekomposisi biomassa alga selanjutnya

menurunkan oksigen terlarut hingga kondisi hipoksia atau anoksia, sehingga mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik (Friedrich dkk., 2014). Selain itu, NH_4^+ dalam konsentrasi tinggi juga bersifat toksik bagi organisme perairan dan dapat mengganggu proses biologis pada sistem pengolahan lanjutan, sehingga diperlukan teknologi yang efektif dan stabil untuk menurunkan konsentrasinya sebelum dibuang ke lingkungan.

Pengendalian dan pemulihan nutrisi dari air limbah menjadi langkah penting untuk menjaga kualitas lingkungan perairan. Adsorpsi menggunakan biochar menjadi salah satu alternatif yang berpotensi untuk menurunkan konsentrasi amonium. Biochar sebagai material karbon berpori menunjukkan potensi besar sebagai adsorben nutrisi karena luas permukaan dan keberadaan gugus fungsional

aktifnya (Chew dkk., 2022). Untuk meningkatkan efektivitas adsorpsi amonium, biochar dapat dimodifikasi menggunakan ion logam seperti magnesium (Mg^{2+}). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biochar teraktivasi ion Mg^{2+} memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan biochar tanpa aktivasi (Yin dkk., 2019; Zheng dkk., 2025).

Penelitian sebelumnya oleh Wijaya (2025) menunjukkan bahwa aktivasi Mg^{2+} secara signifikan meningkatkan kapasitas adsorpsi biochar, dengan kapasitas maksimum amonium mencapai 24,39 mg/g. Temuan ini memperkuat dasar teoritis penggunaan biochar teraktivasi Mg^{2+} dalam sistem filtrasi kontinu. Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan dalam skala batch dan menggunakan air limbah sintesis, sehingga diperlukan kajian lanjutan pada sistem filtrasi kontinu dengan air limbah domestik aktual untuk mengevaluasi efektivitas filtrasi.

Pada penelitian ini digunakan sistem filtrasi biochar teraktivasi Mg^{2+} dengan aliran *upflow* untuk meminimalkan penyumbatan media. Sistem filtrasi disusun secara seri untuk meningkatkan efisiensi penyisihan melalui perpanjangan waktu retensi aliran dan optimalisasi kontak media, serta memungkinkan pemanfaatan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan sistem kolom tunggal (Edwin dkk., 2025).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas filter biochar teraktivasi Mg^{2+} sebagai adsorben amonium (NH_4^+) pada air limbah domestik. Analisis dilakukan melalui pengamatan tren perubahan konsentrasi NH_4^+ dan efisiensi penyisihan selama operasi.

Karakteristik Biochar dan Aktivasi Mg^{2+}

Biochar merupakan material karbon berpori yang dihasilkan melalui dekomposisi termokimia biomassa dalam kondisi terbatas oksigen (pirolisis) (Tadesse dkk., 2025). Struktur biochar tersusun atas matriks aromatik dengan pori mikro yang berperan dalam proses adsorpsi. Menurut Lehmann & Joseph (2015), kemampuan adsorpsi biochar dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik, distribusi ukuran pori, gugus fungsional permukaan ($-COOH$, $-OH$, $-C=O$), dan kapasitas tukar kation atau *cation exchange capacity* (CEC).

CEC biochar dapat meningkat melalui proses oksidasi alami selama penyimpanan di lingkungan terbuka, proses penuaan (*aging*),

maupun melalui aktivasi kimia yang disengaja. Proses oksidasi dan *aging* menyebabkan terbentuknya gugus fungsional oksigen tambahan seperti karboksilat ($-COO^-$) dan hidroksil ($-OH$) pada permukaan biochar, sehingga meningkatkan densitas muatan negatif dan kemampuan pertukaran kation (Lehmann & Joseph, 2015). Selain itu, modifikasi kimia menggunakan asam, basa, atau garam logam juga dilaporkan mampu meningkatkan nilai CEC secara signifikan melalui penambahan atau aktivasi gugus fungsional permukaan (Kołodźńska dkk., 2017; Liu dkk., 2022).

Peningkatan CEC secara langsung memperbesar kemampuan biochar dalam mengikat kation bermuatan positif seperti NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , serta berbagai logam berat melalui mekanisme pertukaran ion dan interaksi elektrostatis. Semakin tinggi nilai CEC, semakin besar jumlah situs aktif yang tersedia untuk mengadsorpsi kation dari larutan (Kołodźńska dkk., 2017). Oleh karena itu, modifikasi permukaan biochar merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi terhadap ion amonium dalam air limbah, khususnya pada sistem yang mengandalkan mekanisme pertukaran ion sebagai proses dominan (Zheng dkk., 2025; Liu dkk., 2022).

Modifikasi menggunakan ion logam seperti Mg^{2+} dapat meningkatkan densitas muatan permukaan dan menciptakan situs pertukaran ion tambahan (Liu dkk., 2022; Pathy dkk., 2023). Kehadiran ion logam divalen pada permukaan biochar berkontribusi terhadap pembentukan mekanisme jembatan ionik (*ion bridging*) dan memperkuat interaksi elektrostatis dengan kation dalam larutan (Zheng dkk., 2025; Xie dkk., 2024).

Pada sistem biochar teraktivasi Mg^{2+} , ion Mg^{2+} dapat terdistribusi pada permukaan dan pori-pori biochar, sehingga memungkinkan terjadinya pertukaran ion dengan amonium (NH_4^+). Berdasarkan penelitian Zheng dkk. (2025), efisiensi penyisihan NH_4^+ mencapai 97,5% dengan menggunakan biochar yang dimodifikasi dari *tailing magnesit* sebagai sumber magnesium. Penelitian Li dkk. (2022) dengan memanfaatkan limbah batu bata industri baja sebagai sumber magnesium memperoleh efisiensi penyisihan NH_4^+ mencapai 98,2%.

Mekanisme Adsorpsi NH_4^+ pada Biochar Teraktivasi Mg^{2+}

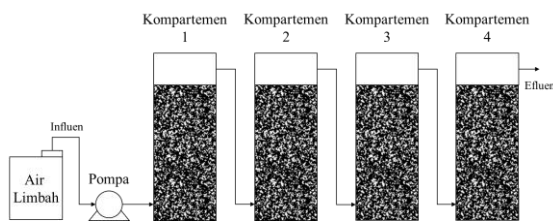
Mekanisme utama penyisihan NH_4^+ pada biochar teraktivasi Mg^{2+} berlangsung melalui pertukaran ion (*cation exchange*). Dalam proses ini, ion NH_4^+ yang bermuatan positif menggantikan ion Mg^{2+} yang terikat secara elektrostatis pada gugus bermuatan negatif di permukaan biochar (Zheng dkk., 2025). Pelepasan sebagian Mg^{2+} ke dalam larutan selama proses adsorpsi sering digunakan sebagai indikator terjadinya mekanisme pertukaran ion aktif (Zheng dkk., 2025).

Selain pertukaran ion, mekanisme adsorpsi NH_4^+ juga didukung oleh interaksi elektrostatis. Aktivasi Mg^{2+} dapat meningkatkan polarisasi permukaan dan memperkuat gaya tarik elektrostatis, terutama pada daerah mikropori yang memiliki densitas muatan tinggi (Leng dkk., 2021).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan sistem filtrasi kontinu aliran ke atas (*upflow*). Unit filter dirancang terdiri atas 4 kompartemen yang tersusun secara seri dengan masing-masing tinggi 40 cm, panjang 45 cm, dan lebar 15 cm.

Susunan media filtrasi pada setiap kompartemen terdiri atas lapisan biochar teraktivasi ion magnesium (Mg^{2+}) dengan ketebalan 25 cm. Skema unit filter dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Unit Filter

Media filter berupa biochar biomassa kayu yang diaktivasi menggunakan larutan MgCl_2 dengan konsentrasi 4,2 g/L melalui metode perendaman selama 70 menit.

Air limbah domestik diperoleh dari kolam stabilisasi IPAL dan dialirkan secara kontinu menggunakan pompa peristaltik dengan debit konstan 100 mL/menit. Sistem dioperasikan selama enam hari. Sampel influen dan efluen diambil setiap hari. Konsentrasi amonium dianalisis menggunakan metode

spektrofotometri pada panjang gelombang 640 nm.

Efisiensi penyisihan dihitung dengan persamaan 1.

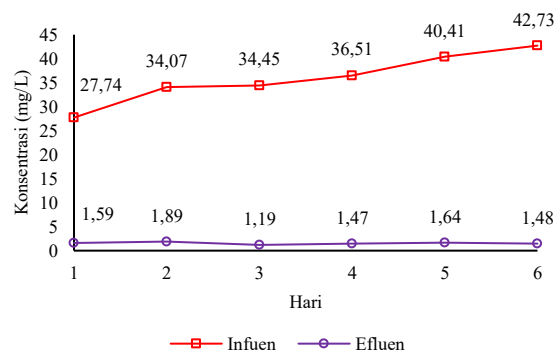
$$\% \text{ penyisihan} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

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

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

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran pada Gambar 2 menunjukkan bahwa konsentrasi amonium (NH_4^+) pada influen berfluktuasi dalam rentang 27,74–42,73 mg/L selama enam hari pengamatan. Fluktuasi ini mencerminkan karakteristik air limbah domestik yang sangat dipengaruhi oleh aktivitas harian dan variasi beban organik (Metcalf & Eddy, 2014; Tanaka dkk., 2021). Variabilitas ini penting karena sistem adsorpsi yang baik harus mampu merespons perubahan beban secara dinamis tanpa mengalami penurunan kinerja yang signifikan.



Gambar 2. Tren Konsentrasi NH_4^+ pada Influen dan Efluen

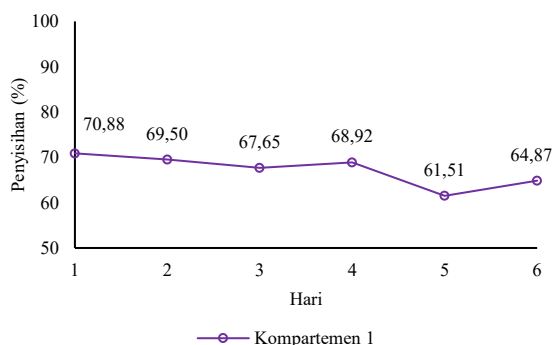
Konsentrasi NH_4^+ pada efluen menunjukkan nilai yang relatif rendah dan stabil, yaitu berada dalam rentang 1,19–1,89 mg/L. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa media biochar teraktivasi Mg^{2+} masih berada dalam kondisi kerja optimal dan belum mengalami kejenuhan signifikan selama waktu operasi pengamatan. Menurut Nguyen dkk. (2017), kestabilan konsentrasi efluen pada sistem kolom adsorpsi menunjukkan bahwa zona perpindahan massa (*mass transfer zone*) masih berada dalam media dan belum mencapai titik jenuh (*breakthrough*).

Berdasarkan efisiensi penyisihan NH_4^+ , sistem filtrasi bekerja secara efektif dalam susunan seri. Penyisihan NH_4^+ meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jumlah kompartemen yang dapat dilihat pada Gambar

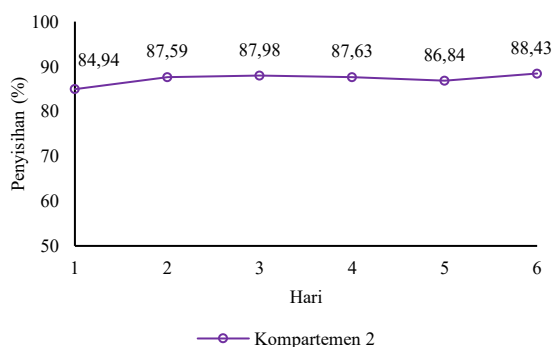
3, 4, dan 5. Peningkatan terjadi dari kompartemen 1 ke kompartemen 2, kemudian efisiensi mencapai tingkat sangat tinggi dan relatif stabil pada kompartemen 3 dan 4. Pola ini memperlihatkan bahwa beban NH_4^+ berkurang secara progresif pada setiap tahapan, sehingga kompartemen berikutnya menerima konsentrasi influen yang lebih rendah dan lebih mudah disisihkan.

Gambar 3 menunjukkan efisiensi pada kompartemen pertama relatif lebih rendah dan cenderung berfluktuasi dengan kisaran 61,51–70,88%. Hal ini disebabkan karena unit ini menerima konsentrasi NH_4^+ tertinggi sehingga mengalami beban adsorpsi terbesar. Selain itu, keberadaan kation kompetitor seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , dan K^+ dalam air limbah domestik dapat mengurangi efektivitas pengikatan NH_4^+ dan cenderung fluktuatif akibat kompetisi pada situs aktif (Xu dkk., 2024).

Penyisihan pada kompartemen ini belum maksimal jika dibandingkan kompartemen berikutnya, karena proses adsorpsi berlangsung paling intensif pada tahap awal dan berpotensi mengalami penurunan saat kapasitas media mulai mendekati jenuh (Nguyen dkk., 2017).



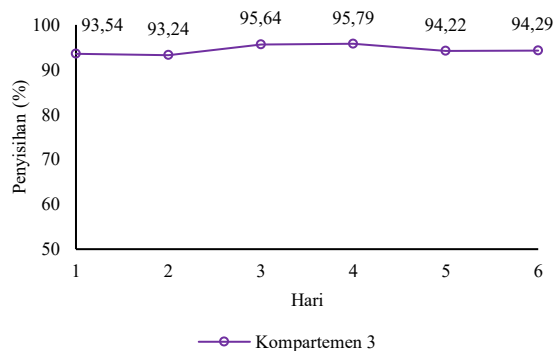
Gambar 3. Efisiensi Penyisihan NH_4^+ pada Kompartemen 1



Gambar 4. Efisiensi Penyisihan Amonium pada Kompartemen 2

Berdasarkan Gambar 4, kompartemen kedua menunjukkan kinerja penyisihan NH_4^+ yang lebih baik dibandingkan kompartemen sebelumnya, dengan efisiensi yang terus meningkat hingga hari ke-6 dalam rentang 84,94–88,43%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa konsentrasi amonium yang masuk ke unit tersebut telah menurun akibat proses penyisihan pada kompartemen pertama, sehingga media adsorben bekerja pada kondisi beban yang lebih rendah dan lebih stabil.

Sejalan dengan penelitian Edwin dkk. (2025), keberadaan kompartemen kedua dalam rangkaian filter memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kinerja sistem. Setelah melewati tahap awal, konsentrasi NH_4^+ yang masuk ke unit ini sudah mengalami penurunan sehingga tekanan beban terhadap media menjadi lebih rendah. Situasi tersebut menciptakan kondisi operasi yang lebih stabil dan memungkinkan proses adsorpsi serta pertukaran ion berlangsung lebih efektif, sehingga potensi kapasitas serap media dapat dimanfaatkan secara lebih optimal.



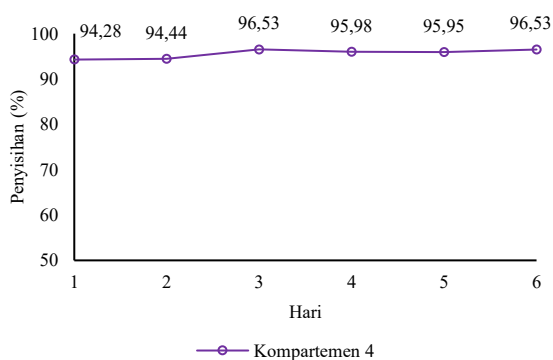
Gambar 5. Efisiensi Penyisihan NH_4^+ pada Kompartemen 3

Berdasarkan Gambar 5, efisiensi penyisihan NH_4^+ kompartemen ketiga berada pada kisaran 93,24–95,79% dan menunjukkan kestabilan yang konsisten selama periode operasi. Capaian ini mengindikasikan bahwa sebagian besar proses adsorpsi telah berlangsung secara efektif sebelum aliran mencapai tahap akhir sistem. Menurut Nguyen dkk. (2017), zona tengah hingga mendekati akhir kolom adsorpsi sering menjadi area di mana perpindahan massa dan pertukaran ion berada pada kondisi yang lebih stabil dibandingkan zona awal yang menerima beban tertinggi.

Tingginya efisiensi pada kompartemen ketiga juga dapat dijelaskan oleh peningkatan kapasitas tukar kation akibat aktivasi Mg^{2+} .

Modifikasi logam diketahui meningkatkan densitas muatan permukaan serta jumlah situs aktif bermuatan negatif yang mampu mengikat NH_4^+ melalui mekanisme pertukaran ion (Lehmann & Joseph, 2015; Kolodyńska dkk., 2017; Liu dkk., 2022). Selain itu, penelitian Zheng dkk. (2025) menunjukkan bahwa biochar termodifikasi magnesium menunjukkan distribusi situs aktif yang lebih homogen dan reaktivitas yang lebih tinggi terhadap kation amonium, sehingga mempertahankan efisiensi pada tahap lanjutan kolom.

Secara teknis, efisiensi pada kompartemen ketiga menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi hampir optimum. Hal ini selaras dengan temuan Leng dkk. (2021) yang menyatakan bahwa pada konsentrasi akhir yang rendah, proses adsorpsi cenderung dikendalikan oleh kesetimbangan permukaan (*surface equilibrium*) dibandingkan oleh difusi eksternal.



Gambar 6. Efisiensi Penyisihan NH_4^+ pada Kompartemen 4

Pada Gambar 6, efisiensi kompartemen keempat meningkat menjadi 94,28–96,53%, namun kenaikan dibandingkan kompartemen ketiga relatif kecil (<2%). Peningkatan yang marginal ini menunjukkan bahwa sebagian besar penyisihan NH_4^+ telah terjadi pada tahap sebelumnya, sehingga kompartemen terakhir hanya berfungsi sebagai tahap polishing. Dalam sistem adsorpsi kontinu, kondisi ini dikenal sebagai fenomena *plateau*, yaitu ketika tambahan panjang kolom tidak lagi memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan karena sebagian besar situs aktif telah dimanfaatkan (Nguyen dkk., 2017; Leng dkk., 2021).

Kontribusi tambahan pada kompartemen keempat juga dapat dikaitkan dengan mekanisme *ion bridging* oleh Mg^{2+} , di mana ion Mg^{2+} berperan sebagai penghubung antara permukaan biochar dan NH_4^+ sehingga

memperkuat stabilitas ikatan adsorpsi (Xie dkk., 2024; Yu dkk., 2025). Namun demikian, karena sebagian besar NH_4^+ telah tersisih sebelumnya, kapasitas sisa media pada kompartemen ini tidak dimanfaatkan secara maksimal.

Dengan demikian, secara operasional dapat disimpulkan bahwa tiga kompartemen telah cukup untuk mencapai efisiensi penyisihan di atas 90%, sedangkan kompartemen keempat berfungsi sebagai unit pengaman (*safety factor*) untuk menjaga kestabilan kualitas efluen. Temuan ini mendukung prinsip desain sistem adsorpsi seri yang menyatakan bahwa optimasi jumlah unit harus mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan efisiensi dan efisiensi biaya operasional (Liu dkk., 2022; Zheng dkk., 2025).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa sistem filtrasi biochar teraktivasi magnesium (Mg^{2+}) mampu menyisihkan amonium dari air limbah domestik secara efektif dan menunjukkan kinerja yang stabil selama periode operasi. Tren konsentrasi amonium pada efluen menunjukkan kondisi yang relatif stabil dan jauh lebih rendah dibandingkan influen, yang menandakan bahwa sistem filtrasi biochar teraktivasi Mg^{2+} mampu mempertahankan kinerja adsorpsi amonium secara konsisten. Penyisihan amonium meningkat secara bertahap dari kompartemen awal hingga akhir, dengan efisiensi tertinggi di atas 90% pada kompartemen ketiga dan keempat. Secara teknis, sistem filtrasi telah mencapai kinerja optimal dan efektif dengan tiga kompartemen, karena kompartemen keempat hanya memberikan peningkatan yang tidak signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chew, J. K., Joseph, S., Chen, G., Zhang, Y., Zhu, L., Liu, M., Taherymoosavi, S., Munroe, P., Mitchell, D. R. G., Pan, G., Li, L., Bian, R., & Fan, X. (2022). Biochar-based Fertiliser Enhances Nutrient Uptake and Transport in Rice Seedlings. *Science of the Total Environment*, 826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154174>
- Edwin, T., Komala, P. S., Primasari, B., Zulkarnaini, Z., Nasution, F. H., & Arionanda, F. (2025). Kemampuan Filter

- Biochar Susunan Seri dalam Menyisihkan Detergen dan Fosfat dari Air Limbah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(5), 1237–1242.
<https://doi.org/10.14710/jil.23.5.1237-1242>
- Friedrich, J., Janssen, F., Aleynik, D., Bange, H. W., Boltacheva, N., Çagatay, M. N., Dale, A. W., Etiopie, G., Erdem, Z., Geraga, M., Gilli, A., Gomoiu, M. T., Hall, P. O. J., Hansson, D., He, Y., Holtappels, M., Kirf, M. K., Kononets, M., Kononov, S., ... Wenzhöfer, F. (2014). Investigating Hypoxia in Aquatic Environments: Diverse Approaches to Addressing a Complex Phenomenon. *Biogeosciences*, 11(4), 1215–1259.
<https://doi.org/10.5194/bg-11-1215-2014>
- González, E. J., & Roldán, G. (2019). Eutrophication and Phytoplankton: Some Generalities from Lakes and Reservoirs of the Americas. Dalam M. Vitová (Ed.), *Microalgae - From Physiology to Application* (2). IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.89010>
- Kołodnyńska, D., Krukowska, J., & Thomas, P. (2017). Comparison of Sorption and Desorption Studies of Heavy Metal Ions from Biochar and Commercial Active Carbon. *Chemical Engineering Journal*, 307, 353–363.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.088>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An Overview on Engineering the Surface Area and Porosity of Biochar. *Science of The Total Environment*, 763, 144204.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
- 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.2021.14110>
- Liu, Z., Xu, Z., Xu, L., Buyong, F., Chay, T. C., Li, Z., Cai, Y., Hu, B., Zhu, Y., & Wang, X. (2022). Modified Biochar: Synthesis and Mechanism for Removal of Environmental Heavy Metals. Dalam *Carbon Research* (Vol. 1, Nomor 1). Springer
<https://doi.org/10.1007/s44246-022-00007-3>
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.
<https://books.google.co.id/books?id=6KVKMAEACAAJ>
- Nguyen, L. H., Vu, T. M., Le, T. T., Trinh, V. T., Tran, T. P., & Van, H. T. (2017). Ammonium Removal from Aqueous Solutions by Fixed-Bed Column Using Corncob-Based Modified Biochar. *Environmental Technology*, 40(6), 683–692.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1404134>
- Pathy, A., Pokharel, P., Chen, X., Balasubramanian, P., & Chang, S. X. (2023). Activation Methods Increase Biochar's Potential for Heavy-metal Adsorption and Environmental Remediation: A Global Meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 865, 161252.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161252>
- Tadesse, A. W., Huang, M., & Zhou, T. (2025). Biochar for Wastewater Treatment: Preparation, Modification, Characterization, and Its Applications. Dalam *Molecules* (Vol. 30, Nomor 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
<https://doi.org/10.3390/molecules30214288>
- Tanaka, H., Fujimoto, M., Minami, K., Takahashi, A., Parajuli, D., Hiwatari, T., Kawakami, M., & Kawamoto, T. (2021). Ammonium Removal and Recovery from Sewage Water Using Column-System Packed Highly Selective Ammonium Adsorbent. *Environmental Pollution*, 284, 117495.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117495>
- 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>
- Xu, X., Chen, G., Wei, J., Qin, Y., Tang, R., Wang, L., Wei, H., Zhou, C., Wu, J., Zhao, X., & Zhou, Z. (2024). Effects of Competitive Cations and Dissolved Organic Matter on Ammonium Exchange and Up-concentration Properties of Ion Exchangers from Domestic Wastewater under Multicycle Exchange-regeneration Operation. *Separation and Purification Technology*, 345, 127274. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127274>
- 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>
- Yu, Y., Bhuyan, M., Perumal, P., & Luukkonen, T. (2025). Ammonium Recovery from Wastewater by Ion Exchange Using Porous Metakaolin Geopolymer Granules Over Extended Adsorption/Regeneration Cycles. *Applied Surface Science Advances*, 30, 100910. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100910>
- 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. Dalam *Applied Water Science* (Vol. 15, Nomor 10). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02598-9>