

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN MASSA BIOCHAR PADA ADSORPSI ION FOSFAT (PO_4^{3-}) DALAM AIR LIMBAH SINTETIS

I Made Nada¹⁾, I Gusti Ngurah Made Wiratama²⁾, Fransiskus Vebrian Kenedy²⁾, I Made Wahyu Wijaya^{3*)}

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

²⁾ Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mahasaraswati Denpasar, Bali

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

*Email koresponden: wijaya@unmas.ac.id

ABSTRAK

Fosfat berlebih (PO_4^{3-}) dalam air limbah dapat menyebabkan eutrofikasi yang mengancam kehidupan akuatik. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas biochar yang dibuat dari limbah upacara dan kulit durian dalam menurunkan kadar fosfat dalam air limbah sintetis. Biochar diaktifkan dengan ion Mg^{2+} , dan dilakukan analisis untuk mengukur laju serta kapasitas adsorpsi agar sesuai dengan standar kualitas air pemerintah, yaitu maksimal 0,2 mg/L fosfat. Biochar diproduksi melalui proses pirolisis pada suhu 400–700 °C dan kemudian diaktifkan dengan perendaman dalam larutan MgCl_2 1 M selama 24 jam. Pengujian adsorpsi dilakukan dalam reaktor dengan kondisi eksperimental yang terkontrol menggunakan variasi jumlah biochar. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk menilai apakah peningkatan atau penurunan jumlah biochar akan mempengaruhi penurunan kadar fosfat dalam air limbah sintetis. Hasil menunjukkan bahwa biochar yang diaktifkan dengan MgCl_2 pada pH 9 paling efektif dalam menurunkan konsentrasi fosfat. Penambahan biochar hingga 0,5 g menghasilkan penurunan fosfat sebesar 74,32 mg/L (29,06%).

Kata Kunci: Adsorpsi, Biochar, Fosfat, Air Limbah Sintetis

ABSTRACT

Excess phosphate (PO_4^{3-}) in wastewater can cause eutrophication, threatening aquatic life. This study aims to evaluate the effectiveness of biochar produced from ceremonial waste and durian peels in reducing phosphate levels in synthetic wastewater. The biochar was activated with Mg^{2+} ions, and analyses were conducted to measure the adsorption rate and capacity to comply with the government water quality standard, which is a maximum of 0.2 mg/L phosphate. The biochar was produced through pyrolysis at temperatures of 400-700 °C and then activated by soaking in a 1 M MgCl_2 solution for 24 hours. Adsorption testing was performed in a reactor under controlled experimental conditions with varying amounts of biochar. The main objective of the testing was to assess whether increasing or decreasing the amount of biochar would change the reduction of phosphate levels in the synthetic wastewater. The results showed that the biochar activated with MgCl_2 at pH 9 was most effective in reducing phosphate concentration. Adding up to 0.5 g of biochar resulted in a phosphate removal of 74.32 mg/L (29.06%).

Keywords : Adsorption, Biochar, Phosphate, Synthetic Wastewater

1. PENDAHULUAN

Keberadaan fosfat (PO_4^{3-}) yang berlebih pada air limbah dapat menyebabkan eutrofikasi yang berdampak negatif pada kehidupan akuatik. Aktivitas pertanian dan usaha menghasilkan air limbah yang belum diolah secara optimal dan langsung dibuang ke sungai menyebabkan peningkatan pencemara badan air sungai. Berdasarkan PermenLHK No. 68 Tahun 2016 dan Peraturan Pemerintah No. 22 tahun 2021, kadar maksimum senyawa nutrisi untuk baku mutu air kelas 1 adalah sebesar 0,1 mg/L (NH_4^+), 10 mg/L (NO_3^-), 0,06 mg/L (NO_2^-), 15 mg/L (Total N), dan 0,2 mg/L (PO_4^{3-}). Nutrien menjadi parameter penting dalam pengelolaan sumber daya air. Menurut penelitian Yang, (2008), total P sebesar 0.03-0.1 mg/L akan menyebabkan eutrofikasi.

Fosfat adalah parameter penting untuk memantau polusi dan kualitas air karena bisa terlarut atau terikat pada padatan tersuspensi dalam air limbah. Secara kimia fosfat (PO_4^{3-}) terdiri dari satu atom fosforus yang terikat pada empat atom oksigen. Sumbernya berasal dari aktivitas manusia seperti penggunaan deterjen, industri, dan pertanian (Mara & Pearson, 1998). Eutrofikasi adalah proses alamiah di mana perairan menjadi lebih produktif bagi pertumbuhan biomassa (Sutamihardja, *et al.*, 2018). Namun, aktivitas manusia telah mempercepat proses ini secara signifikan. Hal ini menyebabkan ledakan populasi alga, terutama di perairan yang tenang seperti danau, kolam, dan laut.

Berbagai teknologi telah diterapkan dalam penurunan fosfat dalam air seperti proses deaminasi biologis (Espinosa-Ortiz, *et al.*, 2016; Glazko, *et al.*, 2001) serta proses fisikokimia lainnya. Selain itu terdapat proses yang digunakan untuk memperoleh kembali fosfor dari air limbah yaitu pengendapan (Chen, *et al.*, 2018), metode kristalisasi (Cui, *et al.*, 2016; Zhang, *et al.*, 2018), metode pertukaran ion (Mosa, *et al.*, 2018), dan metode adsorpsi (Cao, *et al.*, 2018; Jafari, *et al.*, 2018). Adsorpsi dianggap sebagai salah satu teknik yang efisien dengan pengoperasian sederhana (He, *et al.*, 2017). Banyak jenis adsorben yang telah dikembangkan, seperti logam ganda berlapis Fe-MoS₄ (Jawad, *et al.*, 2017), zeolit yang dimodifikasi (Zavareh, *et al.*, 2018), magnet baru Fe₃O₄/kitosan/Al(OH)₃ adsorben (Hu, *et al.*, 2018); Y.H. Jiang, *et al.*, 2018), karbon aktif (Dil, *et al.*, 2018; Pandiarajan, *et al.*, 2018). Adsorben merupakan bahan yang memiliki karakteristik khusus yang memungkinkannya untuk menyerap zat dari larutan atau gas. Beberapa karakteristik utama dari adsorben termasuk luas permukaan spesifik yang tinggi, keberadaan pori-pori dengan ukuran yang bervariasi, kestabilan kimia, dan kemampuan untuk mengikat zat target secara efisien.

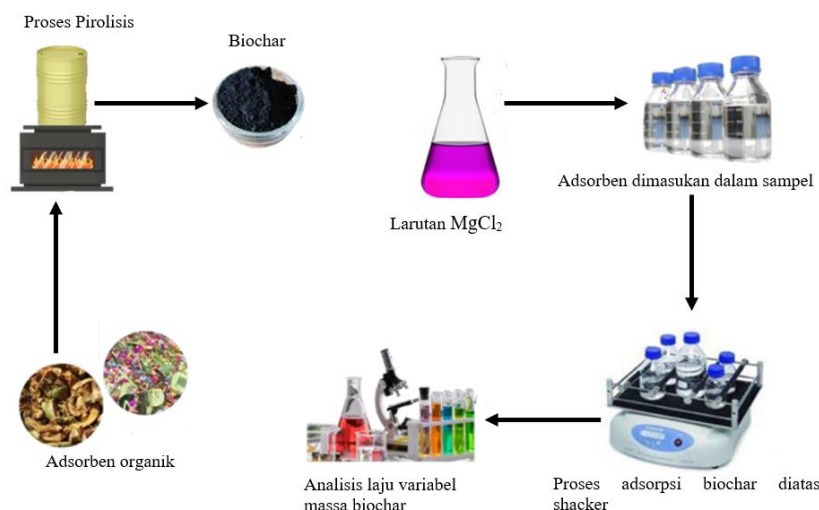
Proses adsorpsi senyawa fosfat (PO_4^{3-}) dalam air limbah melibatkan penyerapan fosfat oleh permukaan material adsorben yang secara efektif mengurangi konsentrasi fosfat dalam air limbah (Langmuir, 1918). Adsorben sendiri merupakan bahan yang memiliki karakteristik khusus yang memungkinkannya untuk menyerap zat dari larutan atau gas (Langmuir, 1918). Adsorpsi terjadi ketika senyawa fosfat diikat oleh permukaan material adsorben melalui interaksi fisika atau kimia antara ion fosfat dan permukaan material tersebut (Langmuir, 1918). Proses adsorpsi fosfat dapat meningkatkan efisiensi penghilangan fosfat dari air limbah dengan mengurangi konsentrasi fosfat dalam larutan (Xie, *et al.*, 2019; Zhang, *et al.*, 2020; Wang, *et al.*, 2021).

Penelitian ini berfokus pada pengujian pengaruh variasi massa biochar terhadap penyerapan fosfat dalam air limbah sintetis. Dalam percobaan ini, berbagai massa biochar yang dihasilkan dari sampah sisa upakara dan kulit durian digunakan untuk mengetahui bagaimana perubahan jumlah biochar yang ditambahkan dapat memengaruhi kemampuan biochar dalam menyerap fosfat. Biochar tersebut diproses melalui pirolisis pada suhu 400 °C hingga 700 °C, kemudian dihaluskan dan diaktivasi dengan ion Mg^{2+} . Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai apakah dengan meningkatkan atau mengurangi massa biochar, ada perubahan signifikan dalam jumlah fosfat yang terserap. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang peran massa biochar dalam proses penyerapan fosfat.

2. METODOLOGI

2.1 Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode eksperimen kuantitatif. Dalam konteks metode eksperimen kuantitatif, kegiatan penelitian dimulai dengan mempersiapkan reaktor pemulihan dan sampel air, yang merupakan langkah awal untuk memastikan lingkungan eksperimen yang terkontrol. Preparasi adsorben dilakukan dengan membuat biochar melalui proses pirolisis, yang menghasilkan adsorben organik untuk digunakan dalam eksperimen. Proses selanjutnya adalah penambahan ion logam Mg^{2+} ke dalam sampel air sebagai aktivasi, diikuti dengan pengukuran massa biochar yang berbeda untuk mempelajari pengaruhnya terhadap efektivitas adsorpsi fosfat. Ilustrasi eksperimen penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi Tahapan Eksperimen

2.2 Pengumpulan Data

1. Uji aktivasi $MgCl_2^{2+}$

Biochar dimodifikasi dengan ion logam Mg^{2+} melalui perendaman dalam larutan $MgCl_2$ selama 24 jam, kemudian dikeringkan dalam oven. Aktivasi dimulai dengan pembuatan

larutan pH 5, 7, dan 9 menggunakan HNO_3 dan NaOH . Larutan MgCl_2 dan biochar ditambahkan ke larutan pH tersebut dalam labu Erlenmeyer, kemudian diaduk menggunakan orbital shaker dengan variasi waktu 0 hingga 110 menit pada kecepatan 80 rpm. Sampel diambil pada interval waktu tersebut untuk diuji kadar magnesium menggunakan titrasi dan diukur serapannya menggunakan spektrofotometri pada panjang gelombang 880 nm.

2. Uji Adsorpsi Fosfat

Pengukuran dosis optimum biochar dilakukan untuk menentukan jumlah biochar yang paling efektif dalam mengadsorpsi fosfat dari larutan. Larutan KH_2PO_4 dengan pH 7 dan konsentrasi 200 mg/L disiapkan dalam gelas beaker 1000 mL berisi akuades dan dibagi ke dalam 10 gelas Erlenmeyer, masing-masing dengan volume 100 mL. Biochar ditambahkan dengan variasi massa 0 gram, 0,1 gram, 0,5 gram, 0,7 gram, 1 gram, 1,5 gram, 1,75 gram, 2 gram, dan 5 gram. Larutan di-shaker pada interval waktu 0 menit dan 60 menit. Sampel diambil pada menit ke-0 sebagai blanko dan pada menit ke-60 setelah pengocokan. Pengenceran dilakukan menggunakan metode titrasi, diikuti dengan pembacaan serapan pada spektrofotometer pada panjang gelombang 880 nm. Sebanyak 22 sampel disiapkan, termasuk satu blanko, dengan masing-masing sampel diduplikat dua kali. Kurva kalibrasi kemudian dibuat dari data yang diperoleh.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji aktivasi MgCl_2^{2+}

Biochar sampah upakara dan sampah kulit buah duren yang dihasilkan melalui proses pirolisis dan penyaringan telah disiapkan sebanyak 1 kg untuk keperluan penelitian. Proses pirolisis dilakukan dengan memanaskan bahan organik sampah sisa upakara dan kulit buah duren dalam kondisi tanpa oksigen pada suhu 400 °C hingga 700 °C. Proses ini menghasilkan biochar yang memiliki porositas dan luas permukaan yang tinggi, yang sangat penting untuk meningkatkan massa biochar (Gambar 2). Biochar yang telah dihasilkan kemudian disaring menggunakan saringan 60 mesh untuk memastikan kualitas dan konsistensi yang diperlukan dalam penelitian. Proses penyaringan ini bertujuan untuk menghilangkan partikel-partikel halus yang tidak diinginkan dan memastikan ukuran partikel biochar seragam.

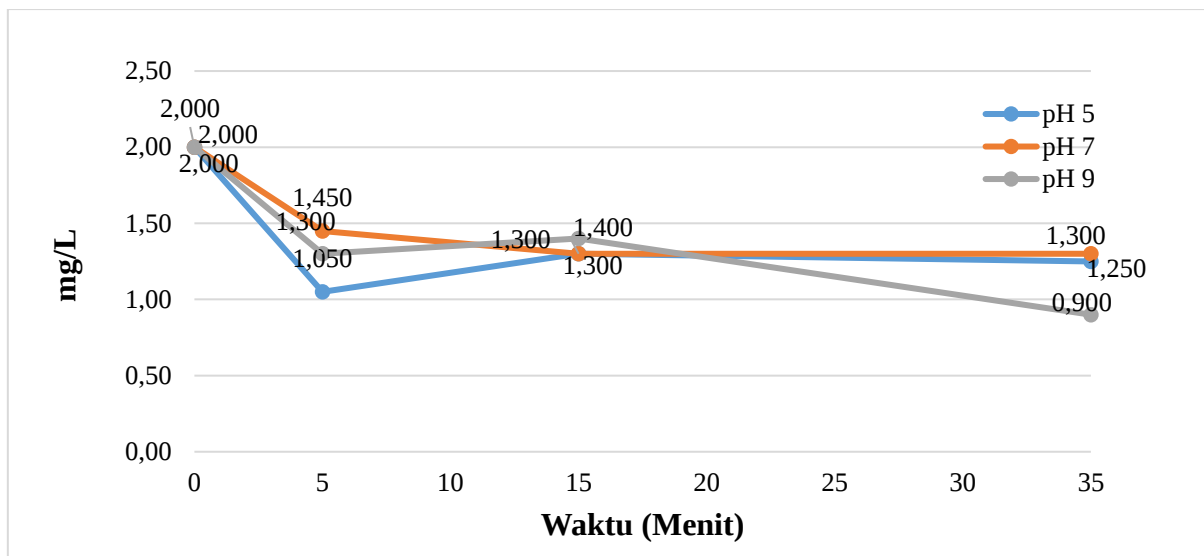


Gambar 2. Biochar Hasil Pirolisis

Aktivasi biochar menggunakan ion logam $MgCl_2^+$ bertujuan untuk meningkatkan laju adsorpsinya dan reaktivitas permukaannya. Aktivasi biochar dilakukan dengan mereaksikan biochar dengan larutan $MgCl$ 1 M pada labu erlenmeyer dan diaduk dengan menggunakan alat pengaduk orbital shaker pada kecepatan 80 rpm. Proses aktivasi dilakukan dengan variasi pH yaitu pH asam (5), netral (7) dan basa (9). Hal ini bertujuan untuk mengetahui pH optimum untuk aktivasi biochar. Aktivasi dilakukan selama 110 menit dengan pengambilan sampel pada menit ke-0, 5, 15, dan 35 untuk mengetahui konsentrasi $MgCl_2^+$ selama aktivasi. Hasil pengukuran aktivasi biochar dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 3.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Aktivasi Bochar

Waktu Kontak	pH 5			pH 7			pH 9		
	1	2		1	2		1	2	
0	0,2	0,2	0,200	0,2	0,2	0,200	0,2	0,2	0,200
5	0,1	0,11	0,105	0,14	0,15	0,145	0,13	0,13	0,130
15	0,14	0,12	0,130	0,12	0,14	0,130	0,14	0,14	0,140
35	0,14	0,11	0,125	0,13	0,13	0,130	0,08	0,10	0,090



Gambar 3. Konsentrasi $MgCl_2^+$ Selama Proses Aktivasi

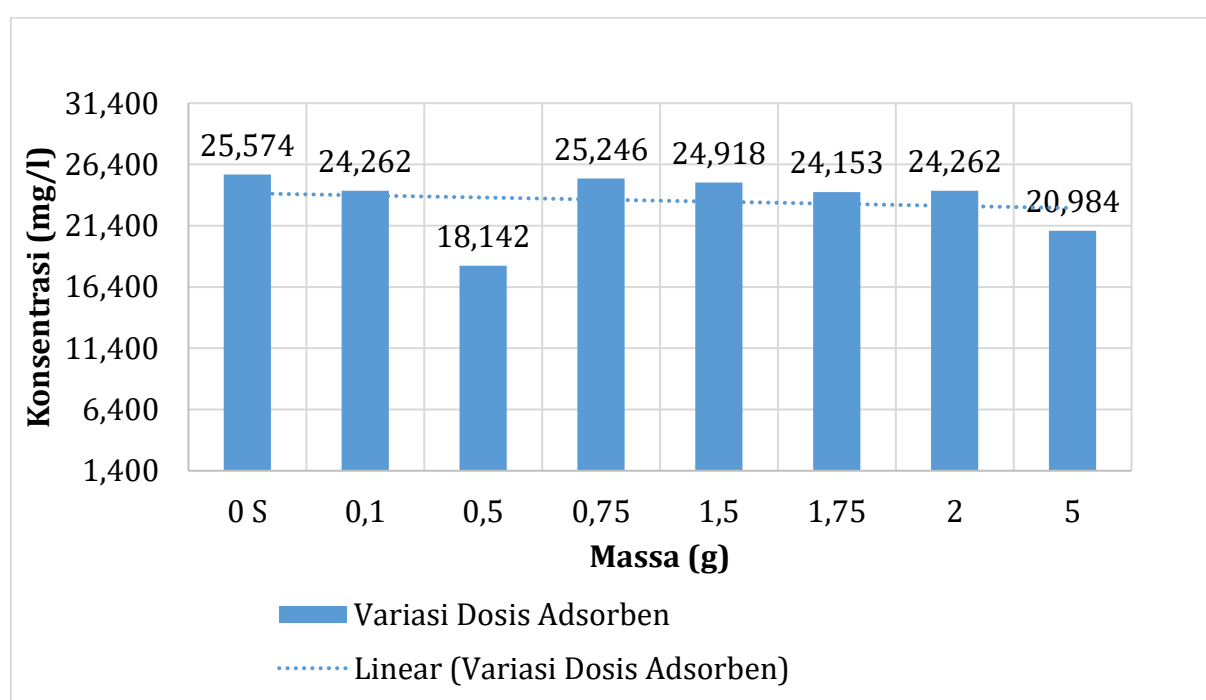
Perubahan konsentrasi Mg^{2+} selama proses aktivasi biochar dengan $MgCl_2$ pada pH 5, pH 7, dan pH 9 mengungkapkan bahwa pH yang lebih tinggi, terutama pH 9, mempercepat interaksi antara ion Mg^{2+} dan biochar. Pada pH 9, konsentrasi Mg^{2+} menurun drastis dalam 5 menit pertama, kemudian sedikit meningkat akibat desorpsi, sebelum kembali menurun secara bertahap hingga akhir pengamatan, menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung dengan efisien. Pada pH 7, penurunan konsentrasi Mg^{2+} juga terjadi tetapi dengan laju yang lebih lambat dan lebih stabil, menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung tetapi kurang intensif dibandingkan pH 9. Sementara itu, pada pH 5, meskipun terjadi penurunan awal yang signifikan, konsentrasi Mg^{2+} menunjukkan peningkatan setelah 15 menit karena desorpsi, sebelum akhirnya kembali menurun dengan laju yang lebih lambat. Kondisi pH yang lebih tinggi (pH 9) terbukti lebih efektif dalam mengoptimalkan adsorpsi Mg^{2+} pada biochar, yang mungkin disebabkan oleh peningkatan laju ionisasi dan reaktivitas ion Mg^{2+} dalam kondisi basa. Sebaliknya, pada pH yang lebih rendah, proses aktivasi berjalan lebih lambat dan stabilitas adsorpsi lebih cepat tercapai, menandakan bahwa kondisi ini kurang mendukung ionisasi optimal dan interaksi efektif antara Mg^{2+} dan biochar.

3.2 Uji Adsorpsi Fosfat (PO_4^{3-})

Uji fosfat untuk percobaan variabel massa biochar dilakukan untuk menilai apakah variasi massa biochar yaitu 0,1 g, 0,5 g, 0,75 g, 1,5 g, 1,75 g, 2 g dan 5 g secara signifikan mempengaruhi konsentrasi fosfat dalam larutan. Uji P digunakan untuk menguji hipotesis bahwa perubahan massa biochar berkontribusi pada penurunan konsentrasi fosfat secara signifikan, dengan membedakan efek nyata dari variasi acak dalam data. Hasil Uji P memungkinkan penentuan perbedaan konsentrasi fosfat yang diamati terkait dengan massa biochar atau disebabkan oleh fluktuasi acak. Uji P untuk percobaan variabel massa biochar dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 4.

Tabel 2. Uji P Untuk Percobaan Variabel Massa Biochar

No	Massa Adsorben (gram)	Konsentrasi Fosfat Awal (mg/L)	Konsentrasi Fosfat Akhir (mg/L)	Penyisihan (mg/L)	Persen Teradsorpsi (%)	Massa Teradsorpsi (mg/g)
1	0	256	25,574	0	0	0
2	0,1	256	24,262	13,11	5,13%	131,148
3	0,5	256	18,142	74,32	29,06%	148,634
4	0,75	256	25,246	3,28	1,28%	4,372
5	1,5	256	24,918	6,56	2,56%	4,372
6	1,75	256	24,153	14,21	5,56%	8,119
7	2	256	24,262	13,11	5,13%	6,557
8	5	256	20,984	45,90	17,95%	9,180



Gambar 4. Hasil Uji P Untuk Percobaan Variabel Massa Biochar

Grafik hasil pengukuran variabel massa biochar menunjukkan hubungan antara massa biochar yang ditambahkan dengan konsentrasi fosfat dalam larutan. Pada kondisi awal tanpa penambahan biochar (0 g), konsentrasi fosfat tercatat sebesar 25,574 mg/L. Penambahan 0,1 g biochar menyebabkan penurunan konsentrasi fosfat menjadi 24,262 mg/L. Penurunan ini menunjukkan bahwa biochar mulai berfungsi sebagai adsorben yang efektif dalam mengurangi kandungan fosfat dalam larutan.

Penambahan biochar sebanyak 0,5 g menghasilkan penurunan konsentrasi fosfat yang lebih signifikan, yaitu mencapai 18,142 mg/L. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan massa biochar meningkatkan kapasitas adsorpsi fosfat. Namun, penambahan biochar sebanyak 0,75 g menyebabkan peningkatan konsentrasi fosfat menjadi 25,246 mg/L. Fenomena ini disebabkan oleh adanya desorpsi atau pelepasan kembali fosfat yang sebelumnya teradsorpsi pada permukaan biochar.

Pada penambahan biochar sebanyak 1,5 g, konsentrasi fosfat menunjukkan kestabilan di 24,918 mg/L. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa sistem telah mencapai titik jenuh adsorpsi, di mana penambahan massa biochar lebih lanjut tidak lagi secara signifikan mengurangi konsentrasi fosfat dalam larutan. Penambahan biochar sebanyak 1,75 g dan 2 g juga menunjukkan konsentrasi fosfat yang relatif stabil di 24,153 samapai dengan 24,262 mg/L, yang memperkuat indikasi bahwa titik jenuh adsorpsi telah tercapai.

Penambahan biochar sebanyak 5 g menurunkan konsentrasi fosfat lebih lanjut hingga 20,984 mg/L. Meskipun terjadi penurunan, laju penurunan konsentrasi fosfat tidak secepat pada penambahan biochar awal. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun kapasitas adsorpsi biochar masih ada, efektivitasnya menurun pada massa biochar yang lebih tinggi, dikarenakan terbatasnya situs aktif yang tersedia untuk adsorpsi fosfat.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa peningkatan massa biochar berpengaruh signifikan terhadap penurunan konsentrasi fosfat dalam larutan. Penurunan konsentrasi fosfat yang paling signifikan terjadi pada penambahan biochar hingga 0,5 g dengan nilai penyisihan fosfat mencapai 74,32 mg/L (29,06%) dan massa teradsorpsi sebesar 148,634 mg/g. Penurunan konsentrasi fosfat yang signifikan terjadi hingga penambahan biochar mencapai 0,5 g. Setelah titik ini, penambahan massa biochar selanjutnya hanya menghasilkan sedikit pengurangan dalam konsentrasi fosfat yang menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kesetimbangan adsorpsi.

4. PENUTUP

Hasil uji pengaruh massa biochar yang telah diaktivasi dengan $MgCl_2$ pada pH 9 menunjukkan efisiensi tertinggi dalam penurunan konsentrasi ion Mg^{2+} , yang turun dari 2,00 mg/L menjadi 0,90 mg/L dalam 35 menit dengan kecepatan pengadukan 80 rpm pada orbital shaker. Penambahan biochar hingga 0,5 g memberikan penurunan konsentrasi fosfat yang paling signifikan, dengan penyisihan fosfat mencapai 74,32 mg/L (29,06%) dan kapasitas adsorpsi sebesar 148,634 mg/g. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan massa biochar hingga 0,5 g berperan penting dalam meningkatkan efektivitas adsorpsi fosfat.

DAFTAR PUSTAKA

- Andreas, A., Putranto, A., & Sabatini, T. C. 2015. Sintesis Karbon Aktif dari Kulit Salak Aktivasi Kimia-Senyawa KOH sebagai Adsorben Proses Adosprsi Zat Warna Metilen Biru. *Jurnal Teknik Kimia*.
- Cao, Y.L., Pan, Z.H., Shi, Q.X., Yu, J.Y., 2018. Modification of chitin with high adsorption capacity for methylene blue removal. *Int. J. Biol. Macromol*.
- Chen, Q., Qin, J., Cheng, Z., Huang, L., Sun, P., Chen, L., Shen, G., 2018. Synthesis of a stable magnesium-impregnated biochar and its reduction of phosphorus leaching from soil. *Chemosphere*.
- Cui, G., Min, L., Ying, C., Wei, Z., Zhao, J., 2016. Synthesis of a ferric hydroxide-coated cellulose nanofiber hybrid for effective removal of phosphate from wastewater. *Carbohydr. Polym*.

- Dil, E.A., Ghaedi, M., Asfaram, A., Bazrafshan, A.A., 2018. Ultrasound wave assisted adsorption of Congo Red using gold-magnetic nanocomposite loaded on activated carbon: optimization of process parameters. *Ultrason. Sonochem.*
- Espinosa-Ortiz, E.J., Rene, E.R., Pakshirajan, K., Hullebusch, E.D.V., Lens, P.N.L., 2016. Fungal pelleted reactors in wastewater treatment: applications and perspectives. *Chem. Eng. J.*
- Glazko, I.L., Levanova, S.V., Pechatnikov, M.G., Sokolov, A.B., Kanaev, A.L., Krizhanovskii, A.S., 2001. Deamination as a method of pretreatment of nitrogencontaining wastewater before biological treatment. *Russ. J. Appl. Chem.*
- He, R., Peng, Z., Lyu, H., Huang, H., Nan, Q., Tang, J., 2017. Synthesis and characterization of an iron-impregnated biochar for aqueous arsenic removal. *Sci. Total Environ.*
- Hu, H., Yang, L., Lin, Z., Xiang, X., Jiang, X., Hou, L., 2018. Preparation and characterization of novel magnetic Fe₃O₄/ chitosan/Al (OH)₃ beads and its adsorption for fluoride. *Int. J. Biol. Macromol.*
- Jafari, K., Heidari, M., Rahmanian, O., 2018. Wastewater treatment for Amoxicillin removal using magnetic adsorbent synthesized by ultrasound process. *Ultrason. Sonochem.*
- Jawad, A., Liao, Z., Zhou, Z., Khan, A., Wang, T., Ifthikar, J., Shahzad, A., Chen, Z., Chen, Z., 2017. Fe-MoS₄: an effective and stable LDH based adsorbent for selective removal of heavy metals. *ACS. Appl. Mater. Interfaces*
- Jiang, Y. H., Li, A. Y., Deng, H., Ye, C. H., Wu, Y. Q., Linmu, Y. D., & Hang, H. L. 2019. Characteristics of nitrogen and phosphorus adsorption by Mg-loaded biochar from different feedstocks. *Bioresource technology.*
- Kehutanan, K. L. H. D. 2016. Peraturan Menteri Lhk No. 68 Th 2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik. Kementerian Lingkung Hidup Dan Kehutan.
- Langmuir, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society.*
- Mara, D., & Pearson, H. W. 1998. Phosphorus removal from wastewater: a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology.*
- Mosa, A., El-Ghamry, A., Tolba, M., 2018. Functionalized biochar derived from heavy metal rich feedstock: phosphate recovery and reusing the exhausted biochar as an enriched soil amendment. *Chemosphere.*
- Pandiarajan, A., Kamaraj, R., Vasudevan, S., Vasudevan, S., 2018. OPAC (Orange Peel Activated Carbon) derived from waste orange peel for the adsorption of Chlorophenoxyacetic Acid herbicides from water: adsorption isotherm, kinetic modelling and thermodynamic studies. *Bioresour. Technol.*
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Wang, J., Qian, J., Lu, J., Liu, X., Liu, S., & Li, H. 2021. Dual templates of MOFs@ MOFs with expanded interlayer spacing for high-efficiency and fast adsorption of phosphate. *Chemical Engineering Journal.*
- Xie, S., Pan, X., Gao, B., Cao, Y., Zhao, Y., & Lou, Z. 2019. Phosphate adsorption by magnetic biochar derived from activated sludge: Performance, mechanisms, and application potentials. *Bioresource technology.*
- Yang XE, Wu X, Hao HL, He ZL. 2008. Mechanisms and assessment of water eutrophication. *J Zhejiang Univ Sci.*
- Zavareh, S., Farrokhzad, Z., Darvishi, F., 2018. Modification of zeolite 4A for use as an adsorbent for glyphosate and as an antibacterial agent for water. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*

- Zhang, L., Liu, J., Guo, X., 2018. Investigation on mechanism of phosphate removal on carbonized sludge adsorbent. *J. Environ. Sci.*
- Zhang, M., Feng, C., Li, Z., Huang, L., & Wang, J. 2020. Simultaneous removal of phosphate and ammonium by cerium-manganese oxide with high efficiency and excellent stability. *Chemical Engineering Journal*.