

Variasi Suhu Pirolisis Pembuatan Biochar Jerami Padi dalam Penyisihan Fosfat dan Amonium pada Air Limpasan Pertanian

Tivany Edwin¹, Alqadri Asri Putra^{1*}, dan Danti Olivia¹

¹Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas; *e-mail: alqadriasriputra@eng.unand.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan pupuk yang berlebihan dapat menyebabkan eutrofikasi sehingga diperlukan sebuah metode pengolahan air limbah pertanian sebelum dibuang ke badan air. Salah satu metode tersebut adalah adsorpsi dengan media yang berasal dari limbah pertanian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pirolisis biochar jerami padi dalam bentuk *coarse* terhadap penyisihan fosfat dari air limpasan pertanian. Biochar jerami padi dipirolisis pada suhu 300°C, 450°C, dan 600°C selama dua jam. Percobaan adsorpsi dilakukan secara batch menggunakan larutan artifisial fosfat dan amonium untuk mendapatkan kondisi optimum suhu pirolisis biochar dan waktu kontak adsorpsi. Konsentrasi fosfat dan amonium dianalisis dengan metode spektrofotometri. Kondisi optimum yang diperoleh dari penyisihan fosfat pada larutan artifisial menggunakan biochar dengan suhu pirolisis 600°C dengan efisiensi penyisihan sebesar 87,018% dan kapasitas adsorpsi 3,481 mg/g. Sedangkan penyisihan amonium optimum menggunakan biochar yang dipirolisis pada suhu 300°C dengan kapasitas adsorpsi 2,916 mg/g dan efisiensi penyisihan sebesar 72,89%. Model kinetika adsorpsi yang paling mendekati untuk penyisihan fosfat menggunakan biochar yang dipirolisis pada suhu 300°C dan 600°C adalah model difusi intra partikel. Sedangkan untuk penyisihan amonium menggunakan semua variasi suhu pirolisis biochar, model yang paling sesuai menggambarkan kinetika adsorpsi adalah model Pseudo 1st order. Walaupun kondisi optimum pada percobaan optimasi diaplikasikan pada sampel limpasan pertanian menunjukkan kapasitas adsorpsi biochar yang lebih rendah dibandingkan dengan percobaan menggunakan larutan artifisial, namun biochar jerami padi berpotensi dalam menyisihkan amonium dan fosfat dari air limpasan pertanian.

Kata kunci: Adsorpsi, biochar jerami padi, variasi suhu pirolisis

ABSTRACT

Excessive use of fertilizers can cause eutrophication, so a wastewater treatment method is required before being discharged into water bodies. One of the methods is the adsorption with media derived from agricultural waste. This study aimed to analyze the effect of variations in temperature of rice straw biochar pyrolysis on the removal of phosphate from agricultural runoff. Rice straw biochar was pyrolyzed at 300 °C, 450 °C, and 600 °C for two hours. The research was carried out by batch experiment using an artificial solution of phosphate and ammonium to obtain the optimum conditions for the pyrolysis temperature of biochar. The concentration of phosphate and ammonium was analyzed by spectrophotometric method. The optimum conditions for the phosphate removal in an artificial solution using biochar were found in a pyrolysis temperature of 600 °C with a removal efficiency of 87.02% and an adsorption capacity of 3.48 mg/g. Meanwhile, the optimum ammonium removal was obtained in the biochar, which was pyrolyzed at a temperature of 300°C, where adsorption capacity and removal efficiency were 2.916 mg/g and 72.89%, respectively. The most-fit adsorption kinetic model for phosphate removal in this study was the intra-particle diffusion model, using biochar which was pyrolyzed at 300°C and 600°C. While for ammonium removal, the best-fit model was Pseudo 1st-order kinetic using all temperature variations of biochar. Rice straw biochar had the potential to remove ammonium and phosphate from agricultural runoff, even though the optimum conditions in the optimization experiment applied to agricultural runoff samples showed a lower adsorption capacity of biochar compared to experiments using artificial solutions.

Keywords: Adsorption, pyrolysis temperature, rice straw biochar

Citation: Edwin, T., Putra, A. A., dan Olivia, D. (2023). Variasi suhu pirolisis pembuatan biochar jerami padi dalam penyisihan fosfat dan amonium pada air limpasan pertanian. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(2), 444-448, doi:10.14710/jil.21.2.444-448

1. PENDAHULUAN

Penggunaan pupuk diperlukan untuk mengurangi kendala hara dan mengelola kesuburan tanah agar dapat meningkatkan produksi tanaman. Namun, penggunaan pupuk yang berlebihan dapat

menyebabkan masalah lingkungan serius yaitu pelepasan senyawa fosfat dan amonium melalui limpasan menuju badan air yang dapat menyebabkan eutrofikasi. Dalam kondisi eutrofik, pertumbuhan organisme yang cepat dapat mengakibatkan

penipisan oksigen terlarut, menurunkan kualitas lingkungan perairan dan membahayakan bagi biota (Mateo-Sagasta & Jacob, 2011).

Salah satu teknologi pengolahan yang dapat digunakan untuk menyisihkan kandungan fosfat dan amonium adalah adsorpsi. Adsorpsi merupakan suatu proses yang terjadi ketika molekul dari zat cair atau gas terakumulasi pada permukaan suatu padatan. Hal ini menyebabkan terbentuknya suatu lapisan tipis dari molekul atau atom.

Salah satu media yang dapat digunakan proses adsorpsi adalah biochar. Menurut Xiang dkk (2020), biochar adalah bahan berkarbon berpori yang dihasilkan selama dekomposisi termokimia dari bahan baku biomassa dengan adanya sedikit atau tanpa oksigen. Biomassa yang dikonversi dengan cara pirolisis dapat menjadi produk yang bernilai lebih. Bahan baku biomassa dapat berupa bahan limbah pertanian seperti jerami padi. Jerami padi ada dalam jumlah besar, karena kuantitasnya sebanding dengan jumlah produksi tanaman padi. Limbah jerami padi yang dihasilkan belum dimanfaatkan secara maksimal.

Penelitian Zhou dkk (2019) menunjukkan bahwa biochar dari bubuk limbah jerami padi yang dipirolisis dengan suhu berbeda menghasilkan kapasitas adsorpsi fosfor dan nitrat yang berbeda pula. Namun belum ditemukan penelitian yang menggunakan biochar jerami padi dalam bentuk *coarse* untuk menyisihkan fosfat dan amonium, dikarenakan aplikasi di lapangan terkadang tidak memungkinkan untuk pemakaian media dalam bubuk. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan amonium dan fosfat menggunakan biochar jerami padi yang dibakar pada suhu pirolisis yang berbeda-beda dalam menyisihkan fosfat dan juga amonium. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk memprediksi model kinetika adsorpsi yang sesuai dalam penyisihan kontaminan tersebut.

2. BAHAN DAN METODE

Persiapan Biochar Jerami Padi

Jerami padi yang digunakan sebagai adsorben diambil dari sisa panen di salah satu sawah di Kelurahan KTK, Kota Solok, Provinsi Sumatera Barat. Proses persiapan adsorben diawali dengan pemotongan jerami padi dengan lebar 0,5-5 cm. Setelah itu, jerami padi dipirolisis dengan suhu 300°C, 450°C dan 600°C pada kecepatan 5°C/menit serta ditahan selama dua jam setelah mencapai suhu yang diinginkan. Setelah dilakukan pirolisis, biochar didinginkan hingga mencapai suhu kamar.

Larutan artifisial dan Sampel asli

Larutan artifisial pada studi ini menggunakan NH₄Cl untuk amonium dan KH₂PO₄ untuk fosfat. Percobaan optimasi dilakukan untuk mendapatkan variasi suhu pirolisis biochar yang paling untuk menyisihkan amonium dan nitrat menggunakan sampel artifisial dalam percobaan adsorpsi. Biochar

dengan suhu pirolisis yang terbaik tersebut kemudian diujicobakan dengan sampel limpasan pertanian. Sampel limpasan pertanian diambil dari saluran pembuangan irigasi sawah yang berada di Jalan Kubang, Kecamatan Pauh, Kota Padang.

Percobaan adsorpsi

Kemampuan adsorpsi biochar diamati pada berbagai waktu kontak, yakni 1, 2, 3, 4, 5, dan 6 jam (An & Nguyen, 2015). Kadar biochar jerami padi yang digunakan untuk percobaan ini adalah 0,5 g/100 mL dengan konsentrasi kontaminan 20 mg/L (Zhou et al., 2019). Pengadukan dilakukan dengan *orbital shaker* dengan kecepatan 180 rpm. Larutan disaring dengan kertas saring sebelum dianalisis. Semua percobaan dilakukan secara triplikat.

Pengukuran pH dilakukan pada setiap pengambilan sampel menggunakan pH meter dengan merk EZ 990. Pengukuran konsentrasi amonium dilakukan berdasarkan SNI 06-2479-1991 tentang kadar amonium dalam air dengan alat spektrofotometer secara Nessler, sedangkan fosfat dengan SNI 6989.31-2005 tentang cara uji kadar fosfat dengan spektrofotometer secara asam askorbat. Kedua parameter diukur menggunakan Spektrofotometer UV-VIS (Shimadzu UV-2600). Efisiensi penyisihan (%R) dihitung menggunakan persamaan (1), dan kapasitas adsorpsi q (mg/g) dihitung menggunakan persamaan (2) (Tchobanoglous, 2002).

$$\%R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$q = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (2)$$

Pendekatan model kinetika adsorpsi yang dipakai pada penelitian ini adalah model *Pseudo first-order* (Persamaan 3), model *Pseudo second-order* (Persamaan 4), dan juga model difusi intra partikel (Persamaan 5). Pendekatan kinetika adsorpsi dilakukan untuk mengetahui laju adsorpsi kontaminan oleh media adsorpsi dalam jangka waktu tertentu (Wang & Guo, 2020).

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_{1p}t)] \quad (3)$$

$$q_t = \frac{K_{2p}q_e^2t}{1 + K_{2p}q_e^2t} \quad (4)$$

$$q_t = K_p t^{0.5} + C \quad (5)$$

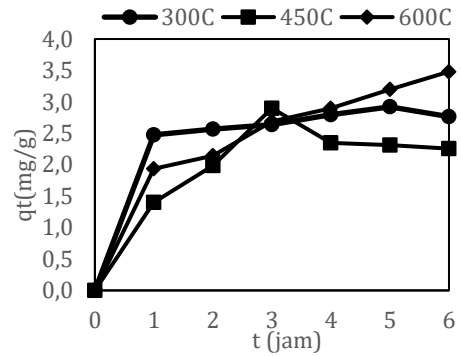
q_t adalah kapasitas adsorpsi pada waktu kontak t (mg/g), sedangkan q_e adalah kapasitas adsorpsi saat equilibrium (mg/g). Sementara itu, k_{1p} merupakan konstanta Pseudo first order (/h) dan t adalah waktu kontak (h). Selanjutnya, K_{2p} merupakan konstanta Pseudo second order (g/mg/h), sedangkan K_p adalah konstanta difusi intra partikel (mg/g/h_{0.5}). Terakhir, C menunjukkan nilai ketebalan lapisan pembatas (mg/g).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

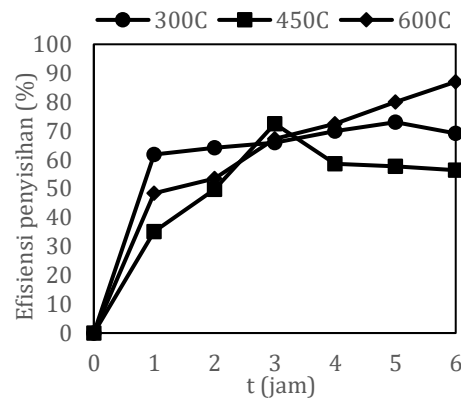
Dari studi ini didapatkan kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan fosfat yang ditampilkan pada Gambar 1 dan 2, sedangkan untuk penyisihan amonium dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.

Biochar jerami padi dengan suhu pembakaran 600°C menunjukkan kapasitas adsorpsi fosfat paling tinggi pada jam ke-enam. Di antara tiga variasi suhu pirolisis biochar, suhu 450°C menunjukkan kapasitas adsorpsi fosfat paling rendah. Namun secara keseluruhan, kapasitas adsorpsi paling tinggi untuk penyisihan fosfat menggunakan biochar dengan suhu pirolisis 600°C pada waktu kontak 6 jam dengan efisiensi penyisihan sebesar 87,018% dan kapasitas adsorpsi 3,481 mg/g. Sementara itu, kapasitas adsorpsi maksimum dan efisiensi penyisihan fosfat menggunakan biochar yang dipirolisis pada suhu 300°C dan 450°C berturut-turut adalah 2,921 mg/g (efisiensi penyisihan 73,018) dan 2,899 mg/g (efisiensi penyisihan 72,483). Hasil ini sejalan dengan studi dari Zhou dkk (2019) yang menunjukkan penyisihan fosfat akan lebih besar menggunakan biochar yang dipirolis pada suhu yang tinggi (700°C) dibandingkan dengan penyisihan menggunakan biochar yang dipirolisis pada suhu yang lebih rendah. Hal ini dapat disebabkan suhu pirolisis yang tinggi menyebabkan semakin terbukanya pori-pori pada permukaan biochar sehingga permukaan area penyerapan sebagai tempat menjerapnya pencemar juga semakin luas (Zhou dkk, 2019).

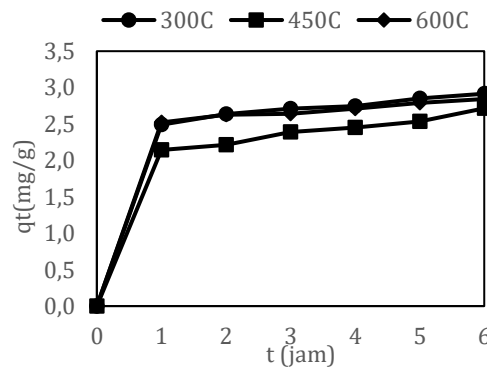
Untuk kapasitas adsorpsi amonium, biochar dengan suhu pirolisis 300°C dan 600°C menunjukkan hasil yang hampir sama. Namun kapasitas adsorpsi amonium yang paling tinggi menggunakan biochar yang dipirolisis pada suhu 300°C dengan waktu kontak 1 jam dengan kapasitas adsorpsi 2,916 mg/g dan efisiensi penyisihan sebesar 72,89%. Biochar yang dipirolisis pada suhu 600°C menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 2,843mg/g dengan efisiensi penyisihan sebesar 71,083%. Biochar yang dipirolisis pada suhu 450°C menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum yang lebih rendah dibandingkan yang lainnya yakni sebesar 2,715 mg/g dengan efisiensi penyisihan 67,887%. Studi yang dilakukan oleh Gao dkk (2015) tentang penyisihan amonium dengan berbagai bahan baku biochar dengan variasi temperatur pirolisis juga menunjukkan penyisihan amonium lebih tinggi menggunakan biochar yang dipirolisis dengan temperatur yang lebih rendah (300°C). Studi lainnya juga menemukan bahwa biochar yang dipirolisis pada temperatur yang lebih rendah memiliki permukaan dengan gugus fungsi yang mengandung oksigen sehingga memungkinkan interaksinya dengan kation seperti amonium pada larutan (Uchimiya dkk, 2011; Chen dkk, 2009).



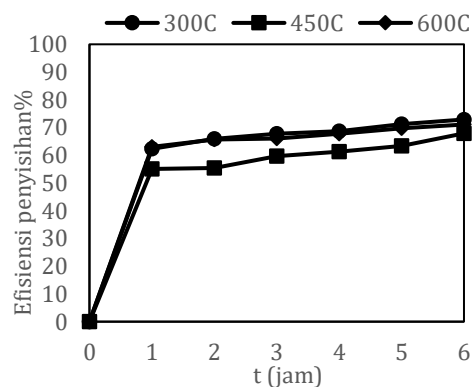
Gambar 1 Kapasitas adsorpsi fosfat dengan variasi suhu pirolisis biochar



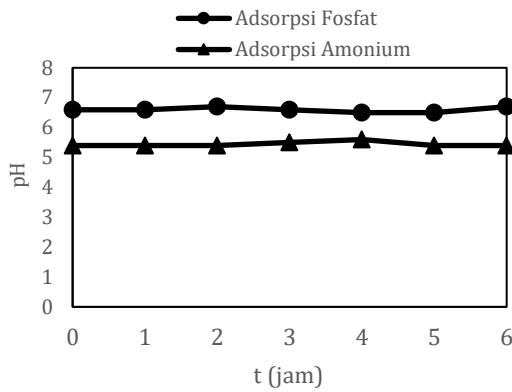
Gambar 2. Efisiensi penyisihan fosfat dengan variasi suhu pirolisis biochar



Gambar 3. Kapasitas adsorpsi amonium dengan variasi suhu pirolisis biochar



Gambar 4. Efisiensi penyisihan amonium dengan variasi suhu pirolisis biochar

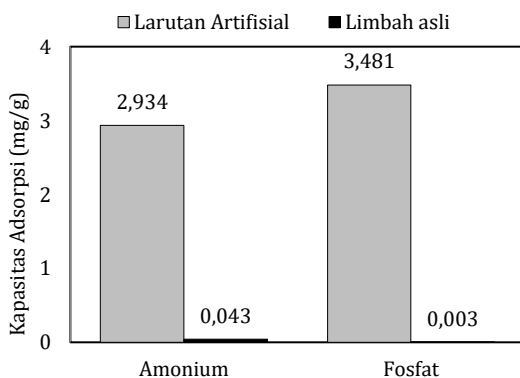


Gambar 5. pH selama percobaan

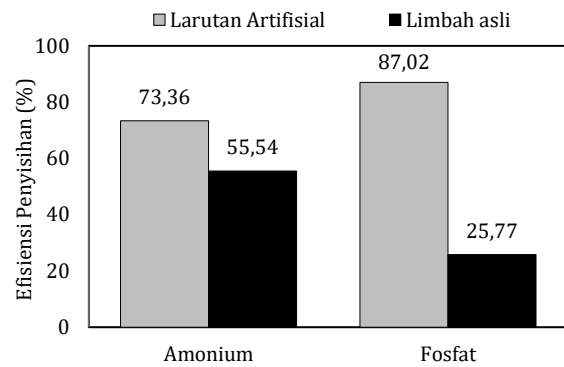
Rata-rata pH larutan artifisial selama percobaan dapat dilihat pada Gambar 5. pH larutan cenderung lebih tinggi pada percobaan untuk penyisihan fosfat dibandingkan dengan amonium. pH larutan mempengaruhi pertukaran ion dan mempengaruhi efisiensi proses adsorpsi (Ahmad dkk, 2014). Penelitian Mukherjee dkk (2011) menemukan permukaan biochar memiliki muatan positif pada pH yang rendah, sedangkan permukaan biochar pada pH yang tinggi cenderung bermuatan negatif.

Pada penelitian adsorpsi ini, percobaan dengan kapasitas adsorpsi yang paling tinggi dipilih untuk memprediksi penyisihan kontaminan dengan menggunakan sampel limpasan pertanian yang asli. Karena itu, digunakan biochar yang dipirolisis pada suhu 600°C untuk penyisihan fosfat, dan biochar 300°C untuk penyisihan amonium.

Kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan menggunakan sampel limpasan asli dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7. Limpasan yang digunakan untuk percobaan ini dengan konsentrasi awal amonium 0,388 mg/L dan fosfat 0,05 mg/L dengan pH larutan 5,8. Dari hasil percobaan, didapatkan kapasitas biochar dalam menyisihkan amonium dan fosfat jauh lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan larutan artifisial. Hal ini dapat disebabkan oleh terganggunya absorpsi pencemar akibat persaingan dengan ion-ion lain yang terdapat pada limpasan pertanian yang asli.



Gambar 6. Kapasitas adsorpsi fosfat dan amonium pada sampel limpasan pertanian asli



Gambar 7. Efisiensi penyisihan fosfat dan amonium pada sampel limpasan pertanian asli

Pada studi ini, kinetika adsorpsi juga dilihat dengan pendekatan model *Pseudo first order*, *Pseudo second order*, dan juga model difusi intra partikel seperti yang disajikan pada Tabel 1. Model yang paling mendekati adalah yang memiliki nilai R^2 mendekati 1. Hasil perhitungan menunjukkan penyisihan fosfat menggunakan biochar dengan variasi suhu pirolisis biochar 300°C dan 600°C lebih cocok digambarkan dengan model difusi intra partikel. Sedangkan mekanisme penyisihan fosfat dengan biochar yang dipirolisis pada suhu 450°C lebih cocok digambarkan dengan model *Pseudo 1st order*, begitu juga dengan penyisihan amonium menggunakan biochar yang dipirolisis dengan semua variasi suhu pirolisis. Dari model kinetika adsorpsi, dapat dilihat laju kinetika pada penyisihan fosfat lebih tinggi menggunakan biochar yang dipirolisis dengan suhu yang tinggi (600°C), sesuai dengan kapasitas adsorpsi maksimum yang didapatkan dari hasil percobaan juga didapatkan menggunakan biochar pada suhu tersebut. Namun demikian, pada penyisihan amonium, laju adsorpsi yang didapatkan pada model hampir sama menggunakan biochar yang dipirolisis dengan suhu 300°C dan 600°C. Pada percobaan adsorpsi, kapasitas adsorpsi menggunakan biochar yang dipirolisis dengan suhu 300°C dan 600°C juga tidak jauh berbeda.

Secara fisik, model *Pseudo 1st order* menggambarkan terjadinya adsorpsi pada permukaan eksternal dan internal dari material adsorpsi. Pada model ini, proses adsorpsi dianggap masih pada tahap permulaan dan situs aktif tempat kontaminan terjerap juga masih berjumlah sedikit (Wang & Guo, 2020).

Model difusi intra partikel menggambarkan bahwa mekanisme adsorpsi terjadi pada bagian internal padatan dengan difusi ke bagian dalam adsorben (Yagub dkk, 2014). Pada model ini, ada empat tahap yang terjadi dalam proses absorpsi yakni perpindahan molekul ke permukaan media adsorpsi, difusi melalui lapisan batas permukaan media adsorpsi, adsorpsi dipermukaan media adsorpsi dan difusi intra partikel ke dalam bagian media adsorpsi.

Tabel 1. Kinetika adsorpsi

No	Suhu pirolisis biochar (°C)	Pseudo 1 st order			Pseudo 2 nd order			Difusi Intra Partikel		
		K (/h)	q _e (mg/g)	R ²	K (/h)	q _e (mg/g)	R ²	K (/h)	C (mg/g)	R ²
<i>Penyisihan fosfat</i>										
1	300	1,006	1,186	0,706	0,087	2,974	0,498	1,076	0,643	0,773
2	450	0,566	2,025	0,795	0,110	3,133	0,533	0,988	0,356	0,773
3	600	1,055	3,106	0,970	0,278	2,040	0,825	1,370	0,260	0,976
<i>Penyisihan amonium</i>										
1	300	1,445	1,465	0,858	2,925	0,089	0,505	1,090	0,649	0,778
2	450	1,073	1,536	0,844	0,099	3,054	0,578	1,009	0,502	0,832
3	600	1,484	1,281	0,826	0,081	3,061	0,477	1,055	0,673	0,752

4. Kesimpulan

Dari studi ini dapat disimpulkan bahwa biochar jerami padi dengan bentuk *coarse* memiliki potensi dalam menyisihkan fosfat dan amonium dari limpasan pertanian yang terkontaminasi. Kapasitas adsorpsi fosfat lebih tinggi menggunakan biochar dengan suhu pirolisis 600°C dibandingkan suhu pirolisis 300°C dan 450°C, sedangkan penyisihan amonium lebih baik dengan menggunakan biochar yang dipirolisis pada suhu yang lebih rendah yakni pada suhu 300°C. Kinetika adsorpsi menunjukkan model difusi intra partikel merupakan model yang paling cocok untuk menggambarkan mekanisme adsorpsi pada penyisihan fosfat dengan suhu pembakaran biochar 300°C dan 600°C. Sedangkan untuk penyisihan fosfat dengan biochar yang dipirolisis pada suhu 450°C, serta semua variasi pirolisis biochar untuk menyisihkan amonium, terlihat lebih cocok dimodelkan dengan kinetika adsorpsi *Pseudo 1st order*.

Penyisihan menggunakan limpasan pertanian asli menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan larutan artifisial. Aktivasi biochar dapat dilakukan untuk lebih mengoptimalkan penyisihan kontaminan fosfat dan amonium dari limbah asli.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>

An, T., & Nguyen, H. (2015). *Removal and Recovery of Phosphorus From Municipal Wastewater By Adsorption Coupled With Crystallization*. June. <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/38985>

Chen B.L., Chen Z.M. (2009). Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. *Chemosphere*. 76:127–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.02.004>

Gao, F., Xue, Y., Deng, P., Cheng, X., & Yang, K. (2015). Removal of aqueous ammonium by biochars derived from agricultural residuals at different pyrolysis temperatures. *Chemical Speciation &*

Bioavailability, 27(2), 92–97. <https://doi.org/10.1080/09542299.2015.1087162>

George Tchobanoglous, F. L. B. (2002). *Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse-Fourth edition* (B. J. C. and J. M. Morries (ed.); Fouth ed.). McGraw-Hill, Inc.

Mateo-Sagasta, J., & Jacob, B. (2011). Agriculture and water quality interactions: a global overview: Solaw Background Thematic Report - TR08. *Water*, 45. <http://www.fao.org/3/a-bl092e.pdf>

Mukherjee, A., Zimmerman, A. R., & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163(3–4), 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.021>

Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-2479-1991 tentang pengujian kadar ammonium dalam air dengan alat spektrofotometer secara Nessler

Standar Nasional Indonesia (SNI) 6989.31-2005 tentang cara uji kadar fosfat dengan spektrofotometer secara asam askorbat

Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson K.T. Fortier C.A., Lima I. M. (2011) Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. *J. Agr. Food Chem.* 59, 2501–2510. <https://doi.org/10.1021/jf104206c>

Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390(January), 122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>

Xiang, W., Zhang, X., Chen, J., Zou, W., He, F., Hu, X., Tsang, D. C. W., Ok, Y. S., & Gao, B. (2020). Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 252, 126539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>

Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>

Zhou, L., Xu, D., Li, Y., Pan, Q., Wang, J., Xue, L., & Howard, A. (2019). Phosphorus and nitrogen adsorption capacities of biochars derived from feedstocks at different pyrolysis temperatures. *Water (Switzerland)*, 11(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w11081559>