



Adsorben Berbasis Campuran Andisol/Zeolit/Karbon Aktif untuk Penjernihan Air Gambut

(Andisol/Zelite/Active Carbon-based Adsorbent for Peat Water Treatment)

Devi Asriani^a, Pranoto Pranoto^a, Edi Pramono^{a*}, Ozi Adi Saputra^{b,c}

^aProgram Studi Kimia, FMIPA, Universitas Sebelas Maret
 Jalan Ir. Sutami 36 A, Kentingan Surakarta, 57126, Indonesia

^bSustainable Chemical Science and Technology, Taiwan International Graduate Program, Institute of Chemistry, Academia Sinica
 Taipei, 10617, Taiwan

^cDepartment of Chemical Engineering, College of Engineering National Taiwan University
 Taipei, 10617, Taiwan

*Corresponding author: edi.pramono.uns@staff.uns.ac.id

DOI: [10.20961/alchemistry.21.1.85539.138-148](https://doi.org/10.20961/alchemistry.21.1.85539.138-148)

Received 22 March 2024, Revised 20 December 2024, Accepted 8 January 2025, Published 28 March 2025

Kata kunci:

adsorpsi;
 tanah andisol;
 zeolit;
 karbon aktif;
 air gambut.

ABSTRAK. Andisol, karbon aktif, dan zeolit memiliki luas permukaan, porositas, dan kapasitas tukar ion yang efektif dalam menyerap kontaminan air. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pembuatan adsorben berbasis andisol/zeolit/active carbon dilanjutkan dan kinerja adsorpsi serta parameter kinetika adsorpsinya untuk penjernihan air gambut. Tanah andisol dan zeolit diaktivasi dengan larutan NaOH 3 M dan komposisi tanah andisol, zeolit, dan karbon aktif divariasikan dengan perbandingan berat 100:0:0; 0:100:0; 0:0:100; 50:25:25; 25:50:25; dan 25:25:50 (b/b). Data menunjukkan kapasitas adsorpsi terbesar dihasilkan oleh komposisi tanah andisol:zeolit:karbon aktif pada komposisi 25:50:25 yaitu 39,67 mg/g dengan persentase penghilangan sebesar 81,72%. Isoterm adsorpsi mengikuti isoterm Redlich-Peterson. Analisis kinetika menunjukkan bahwa adsorpsi mengikuti model kinetika pseudo orde dua dengan konstanta laju adsorpsi sebesar 0,32 g·mg⁻¹·min⁻¹ dan q_e sebesar 5,38 mg/g. Berdasarkan hasil tersebut campuran tanah andisol/zeolit/karbon aktif berpotensi digunakan sebagai adsorben dalam penjernihan air gambut.

Keywords:

adsorption;
 andisol soil;
 zeolite;
 activated carbon;
 peat water.

ABSTRACT. Andisol, Activated Carbon, and Zeolite have a high specific surface area, porosity, and ion exchange capacity, effectively absorbing water impurities. This study aims to study the andisol/zeolite/active carbon-based adsorbent preparation and its adsorption capacity for peat water treatment. Andisol soil and zeolite were activated with NaOH 3 M solution and the composition of Andisol Soil/Zeolite/Activated Carbon were varied of 100:0:0; 0:100:0; 0:0:100; 50:25:25; 25:50:25; and 25:25:50 (wt%). Data shows that the largest adsorption capacity obtained for Andisol/Zeolite/Activated Carbon composition of 25:50:25 (wt%) of 39.67 mg/g and 81.72% for removal percentage. The isotherm adsorption followed Redlich-Peterson isotherm. The kinetics analysis showed that the adsorption followed the pseudo-second-order kinetics model with an adsorption rate constant of 0.32 g·mg⁻¹·min⁻¹ and q_e of 5.38 mg/g. Based on these results, the mixture of andisol soil/zeolite/activated carbon has the potential to be used as an adsorbent in peat water purification.

PENDAHULUAN

Menurut penelitian Pusat Sumber Daya Geologi Kementerian ESDM, sekitar 50% lahan gambut Indonesia di pulau Kalimantan, 40% di pulau Sumatera, dan sisanya tersebar di pulau-pulau lainnya (Pusat Sumber Daya Geologi, 2010). Oleh karena itu, air yang terdapat di lahan gambut berpotensi untuk dikelola sebagai pengganti air bersih. Air gambut umumnya terdapat di dataran rendah dan rawa. Air gambut bersifat asam (pH <5), memiliki kandungan organik tinggi dan berwarna merah kecoklatan yang terbentuk dari pembusukan tanaman di lingkungan lembab dengan kandungan oksigen rendah (Rusdianasari *et al.*, 2019). Air gambut jika dikonsumsi secara terus menerus dapat memicu kerusakan gigi dan masalah kesehatan lainnya.

Cite this as: Asriani, D., Pranoto, P., Pramono, E., and Saputra, O. A., 2025. Teknologi Adsorben Berbasis Campuran Andisol/Zelite/Karbon Aktif untuk Penjernihan Air Gambut. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 21(1), 138-148. <https://dx.doi.org/10.20961/alchemistry.21.1.85539.138-148>.

Menurut [Consolin-Filho \(2007\)](#), metode adsorpsi sangat efektif dalam menghilangkan logam berat dari air, meskipun hanya menggunakan proses adsorpsi yang relatif sederhana. Selain itu, proses persiapannya mudah dan pembiayaannya relatif murah. Beberapa penelitian tentang metode adsorpsi air gambut salah satunya yaitu penelitian [Wahyuni \(2023\)](#) menggunakan adsorben limbah tongkol jagung untuk menghilangkan logam besi pada air gambut dengan efektivitas penyerapan yang diperoleh sebesar 99,66%.

Beberapa bahan dapat digunakan sebagai adsorben, contohnya tanah andisol, karbon aktif, dan zeolit. Andisol efektif dalam menyerap logam berat ([Rohman *et al.*, 2018](#)). [Pranoto \(2023\)](#) menggunakan andisol sebagai adsorben penghilang ion metal dalam air dan persentase adsorpsi yang dihasilkan sebesar 72,59%. Zeolit dapat menyerap logam berbahaya dalam air ([Sulaiman *et al.*, 2020](#)). Penelitian [Velarde \(2024\)](#) melaporkan bahwa zeolit dapat menyerap logam Cd dan logam berat lainnya di dalam air hingga 84,4%. Karbon aktif atau sering disebut sebagai karbon berpori, digunakan sebagai adsorben dalam penghilangan warna ([Saifuddin *et al.*, 2020](#)). Selain itu, karbon aktif juga telah terbukti mengurangi nilai *chemical oxygen demand* (COD), *total suspended solids* (TSS), *total dissolved solids* (TDS), dan *biochemical oxygen demand* (BOD) pada air ([Sholeh and Budiastuti, 2020](#)). Hal ini disebabkan karena luas permukaan karbon aktif (bubuk atau butiran). [Sumila \(2023\)](#) melaporkan penggunaan karbon aktif tandan kosong kelapa sawit mampu menghingkan logam Fe pada air gambut dan didapatkan hasil hingga 91%.

Untuk meningkatkan proses adsorpsi dapat dicampurkan dua atau lebih adsorben, seperti penelitian yang telah dilakukan oleh [Samura \(2022\)](#) menggunakan komposit alam bentonit dan ampas tebu sebagai penjernih air limbah dapat menurunkan BOD, COD, dan TDS. [Putra \(2022\)](#) meneliti adsorben limbah cangkang telur dan abu gosok dan mengaplikasikannya pada air sungai Mahakam dapat menurunkan kadar logam berat besi (Fe) dan timbal (Pb). Sementara itu, berdasarkan kajian literatur yang kami lakukan belum ada penelitian yang mengaplikasikan kombinasi andisol, zeolit, dan karbon aktif dalam aplikasi penjernihan air gambut.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mempelajari pengaruh adsorben berbasis campuran andisol, zeolit, dan karbon aktif terhadap penjernihan air gambut. Data adsorpsi dianalisis kesesuaian dengan beberapa model isoterm dan kinetika adsorpsi terhadap air gambut. Campuran andisol, zeolit, dan karbon aktif diharapkan akan saling meningkatkan luas permukaan dan meningkatkan gugus aktif.

METODE PENELITIAN

Pretreatment, Aktivasi, dan Preparasi Adsorben

Tanah andisol dari Cemoro Kandang, Gunung Lawu, Jawa Tengah dan Zeolit dari Klaten, Jawa Tengah dicuci dengan akuades lalu dikeringkan pada suhu ruang, dihaluskan dan diayak dengan saringan 150 mesh. Sampel kemudian dicuci kembali dengan aquades lalu dikeringkan pada suhu 105 °C selama 4 jam ([Pranoto *et al.*, 2019](#)). Kemudian, sebanyak 50 g adsorben (andisol dan zeolit) dilakukan aktivasi dengan 250 mL larutan NaOH (Merck) 3 M pada rasio (b/v) dan diaduk dengan pada temperatur 70 °C selama 5 jam. Adsorben dinetralkan dan dikeringkan dalam oven selama 4 jam pada temperatur 105 °C. Tanah andisol yang telah kering diayak dengan ayakan 150 mesh ([Pranoto *et al.*, 2020](#)). Karbon aktif yang digunakan yaitu karbon aktif komersial. Hasil sebelum dan setelah aktivasi dilakukan pengujian karakteristik menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR IR Prestige-21 SHIMADZU) dan X-Ray Diffraction (XRD- Bruker D8 Advance).

Uji Kinerja Adsorben Terhadap Adsorpsi Air Gambut

Penentuan komposisi optimum

Sebanyak 0,5 g campuran Andisol/Zeolit/Karbon Aktif ditambahkan 100 mL air gambut dengan variasi komposisi (b/b) dalam persen 100:0:0, 0:100:0, 0:0:100, 50:25:25, 25:50:25, dan 25:25:50. Sesudah itu, diaduk pada suhu ruang selama 60 menit. Larutan disaring dan filtratnya diuji menggunakan UV-Vis (Hitachi). Perbandingan campuran Andisol/Zeolit/Karbon Aktif dapat dilihat pada [Tabel 1](#).

Tabel 1. Variasi komposisi adsorben.

Komposisi	Tanah Andisol	Zeolit	Karbon Aktif
A	100	0	0
B	0	0	100
C	0	100	0
D	50	25	25
E	25	50	25
F	25	25	50

Isoterm Adsorpsi Campuran Andisol/Zelolit/Karbon Aktif Terhadap Air Gambut

Proses isoterm adsorpsi dilakukan dengan variasi massa adsorben. Andisol/Zelolit/Karbon Aktif dimasukkan ke dalam 100 mL air gambut dengan variasi massa adsorben yang berbeda-beda dan diaduk pada suhu ruang. Air gambut disaring dan diukur absorbansinya menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 360 nm.

Pemodelan isoterm adsorpsi yang diujikan yaitu isoterm Langmuir, Freundlich, Elovich, dan Redlich-Peterson berturut-turut ditunjukkan pada [Persamaan 1 – 4](#) (Ayawei *et al.*, 2017).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L \cdot q_m} \quad (1)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

dengan C_e merupakan konsentrasi adsorbat saat setimbang (mg/g), q_e merupakan jumlah adsorbat dalam adsorben saat kesetimbangan, K_L merupakan konstanta Langmuir yang berhubungan dengan kapasitas adsorpsi (mg/g), q_m merupakan kapasitas adsorpsi maksimum, K_F merupakan kapasitas adsorpsi (L/mg), dan $\frac{1}{n}$ merupakan intensitas adsorpsi.

$$\ln \frac{C_e}{q_e} = \ln K_e q_m - \frac{q_e}{q_m} \quad (3)$$

dengan K_e merupakan konstanta isoterm Elovich, q_m merupakan kapasitas adsorpsi maksimal.

$$\ln \frac{C_e}{q_e} = \beta \ln C_e - \ln A \quad (4)$$

dengan A merupakan konstanta Redlich-Peterson ($L \cdot g^{-1}$), β merupakan eksponen, C_e merupakan konsentrasi fase cair adsorben pada kesetimbangan ($mg \cdot L^{-1}$), dan q_e merupakan kapasitas adsorbat setimbang pada adsorben ($mg \cdot g^{-1}$).

Kinetika Adsorpsi Campuran Andisol/Zelolit/Karbon Aktif Terhadap Air Gambut

Proses adsorpsi dilakukan dengan penambahan 0,5 g campuran andisol/zeolit/karbon aktif dengan perbandingan 25% andisol, 50% zeolit, dan 25% karbon aktif ke dalam 100 mL air gambut dengan variasi waktu 15, 30, 45, 60, 75, dan 90 menit pada suhu ruang. Air gambut disaring dan diukur absorbansinya sebelum dan setelah adsorpsi diukur dengan menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 360 nm..

Pemodelan kinetika adsorpsi akan dicoba pada pemodelan Pseudo Orde 1, Pseudo Orde 2, Elovich, dan Weber-Morris berturut-turut ditunjukkan pada [Persamaan 5 – 8](#) (Wulandari *et al.*, 2023).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} - \frac{1}{k_s q_e^2} - \frac{1}{q_e} t \quad (6)$$

dengan q_t merupakan kapasitas adsorpsi pada waktu t (menit) (mg/g), q_e merupakan kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan (mg/g), k_1 merupakan konstanta laju dari pseudo orde 1 (min^{-1}), k_s merupakan konstanta laju dari Pseudo Orde 2 ($g \cdot mg^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), dan t merupakan waktu kontak (menit).

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (7)$$

dengan β merupakan konstanta desorpsi, α merupakan konstanta laju dari kinetika Elovich kinetik ($mg/g \cdot \text{min}$), q_t merupakan kapasitas adsorpsi pada waktu t , dan t merupakan waktu kontak (menit).

$$q = k_{id} \sqrt{t} + B \quad (8)$$

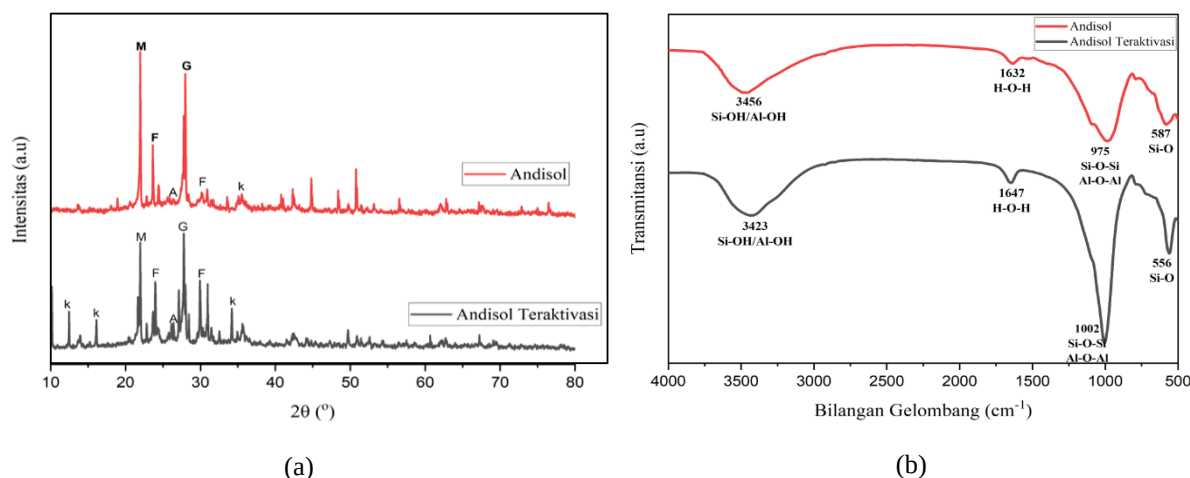
dengan k_{id} merupakan konstanta laju dari kinetika Weber-Morris ($mg/(g \cdot \text{min}^{0,5})$), B merupakan kapasitas adsorpsi (mg/g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivasi dan Karakterisasi Tanah Andisol

Sebelum dilakukan aktivasi, kandungan alofan di dalam tanah Andisol dianalisis menggunakan metode pH NaF untuk mengetahui pH tanah Andisol. Menurut [Valle *et al.* \(2015\)](#), analisis NaF didasarkan pada pelepasan ion OH^- dari larutan lempung dan pertukaran antara OH^- dan F^- sehingga menambah keasaman (pH) dan pembentukan fluoroaluminat. Jumlah ion OH^- yang dilepaskan sebanding dengan jumlah Al aktif dalam tanah liat. Hasil pengujian NaF diperoleh nilai pH sebesar 11 yang menunjukkan bahwa mengandung alofan pada sampel tanah Andisol. [Munir \(1996\)](#) melaporkan bahwa pH di atas 9,4 menunjukkan tingginya kandungan alofan di dalam tanah. NaF dapat menyebabkan reaksi cepat bila ditambahkan ke sampel alofan. Artinya, F dapat bereaksi dengan Al untuk menghancurkan struktur dan melepaskan OH^- ([Parfitt and Hemni, 1980](#)).

Tanah andisol diaktivasi secara kimia dengan cara direndam dalam larutan NaOH. Hal ini bertujuan untuk memperbaiki sifat fisika dan kimia tanah Andisol serta melarutkan pengotor sehingga pori-pori tanah andisol menjadi besar dan lebih terbuka yang akan menaikkan luas permukaan tanah andisol ([Pranoto *et al.*, 2020](#)). Tanah andisol teraktivasi kemudian dianalisis dengan XRD dan FTIR, dan hasilnya ditunjukkan pada [Gambar 1](#).



Gambar 1. (a) Difraktogram tanah andisol sebelum dan sesudah aktivasi dan (b) Spektra FTIR tanah andisol alam dan aktivasi.

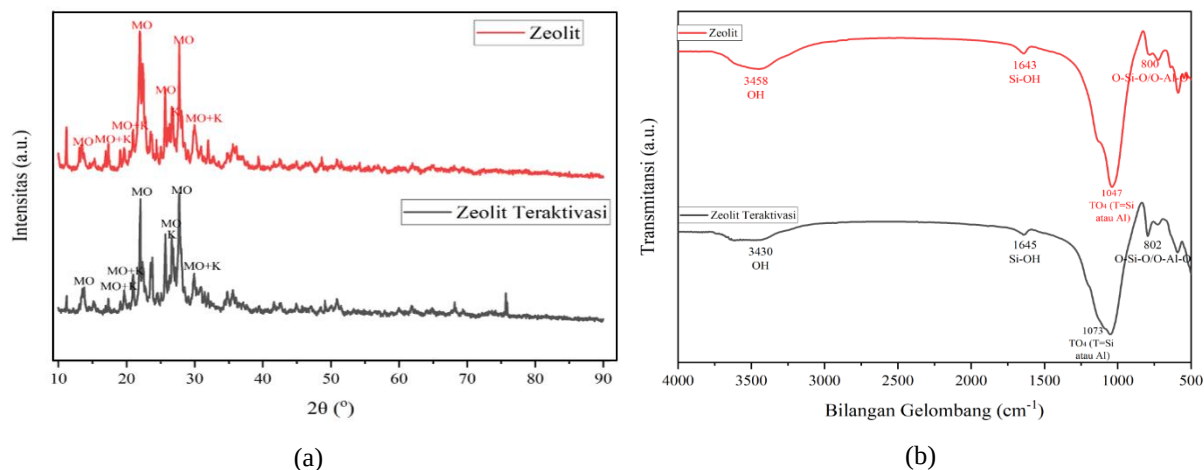
[Gambar 1a](#) menunjukkan tanah andisol sebelum aktivasi memiliki kandungan mineral alofan (JCPDS 38-0449) sesuai dengan 2θ sebesar $26,46^\circ$, gibsit (JCPDS 07-0324) pada 2θ sebesar $27,98^\circ$, kaolinit (JCPDS 80-0886) pada 2θ sebesar $35,52^\circ$, monmorilonit (JCPDS 02-0014) pada 2θ sebesar $21,96^\circ$, serta feldspars (JCPDS 84-0710) pada 2θ sebesar $23,64^\circ$ dan $26,46^\circ$. Tanah andisol setelah aktivasi mengandung jenis mineral alofan (JCPDS 38-0449) sesuai dengan 2θ sebesar $26,43^\circ$, gibsit (JCPDS 07-0324) pada 2θ sebesar $27,91^\circ$; $52,43^\circ$; dan $64,56^\circ$, kaolinit (JCPDS 80-0886) pada 2θ sebesar $12,45^\circ$, $16,10^\circ$, dan $35,58^\circ$, monmorilonit (JCPDS 02-0014) pada 2θ sebesar $21,95^\circ$; serta feldspars (JCPDS 84-0710) pada 2θ sebesar $23,64^\circ$, $29,94^\circ$, dan $30,27^\circ$.

Berdasarkan [Gambar 1a](#) dapat dilihat difraktogram pasca aktivasi menunjukkan adanya pergeseran dan penurunan intensitas beberapa puncak, serta munculnya puncak-puncak baru. Munculnya puncak-puncak baru disebabkan oleh larutnya pengotor akibat proses aktivasi. Terlarutnya pengotor membuka pori-pori pada permukaan tanah Andisol dan mengubah struktur mineral komponennya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh [Widjonarko \(2003\)](#) dan [Heraldry \(2004\)](#), aktivasi tanah andisol dalam suasana asam maupun basa dapat menyebabkan larutnya pengotor yang terdapat di dalam rongga dan pori-pori tanah. Proses ini akan meningkatkan luas permukaan dan keasaman total tanah.

[Gambar 1b](#) menunjukkan tanah andisol sebelum dan setelah aktivasi memiliki gugus Si-OH/Al-OH , H-O-H , Si-O-Si/Al-O-Al , dan Si-O namun memiliki bilangan gelombang yang berbeda. Bilangan gelombang pada tanah andisol sebelum aktivasi yaitu sebesar 3456 cm^{-1} , 1632 cm^{-1} , 975 cm^{-1} , dan 587 cm^{-1} . Setelah diaktivasi terjadi pergeseran bilangan gelombang yaitu sebesar 3423 cm^{-1} , 1647 cm^{-1} , 1002 cm^{-1} , dan 556 cm^{-1} . Hal ini menunjukkan pada spektra FTIR bahwa aktivasi telah melarutkan pengotor sehingga menghasilkan vibrasi yang kuat dengan pergeseran panjang gelombang ([Pranoto, 2011](#)).

Aktivasi dan Karakterisasi Zeolit

Zeolit diaktivasi dengan larutan NaOH yang bertujuan untuk menghilangkan pengotor yang tercampur atau terikat pada zeolit, seperti kation berupa logam Na, K, Ca, dan Fe yang terdapat pada zeolit alam, dan sebagai proses penguraian Al–O sehingga memungkinkan gugus hidroksil pada Si–O aktif mengadsorpsi. Hasil XRD dan FTIR ditunjukkan pada [Gambar 2](#).



Gambar 2. (a) Difraktogram XRD zeolit sebelum dan sesudah aktivasi dan (b) Spektra FTIR zeolit alam dan aktivasi.

Hasil XRD zeolit berdasarkan [Gambar 2a](#), mineral utama dari zeolit adalah mordenit dan klinoptilolit (JCPDS). Mineral mordenit sebelum aktivasi ditunjukkan pada daerah 2-theta 13,34°, 17,32°, 19,61°, 21,93°, 25,66°, 27,73°, dan 29,97°; dan klinoptilolit yang ditunjukkan pada daerah 2 theta 17,32°; 20,96°; 29,88°. Mineral mordenit setelah aktivasi ditunjukkan pada daerah 2-theta 13,50°, 17,34°, 19,61°, 21,93°, 25,66°, 27,73°, dan 29,97°, dan klinoptilolit yang ditunjukkan pada daerah 2 theta 17,34°, 19,61°, 26,60°, 29,97°.

Pada [Gambar 2a](#) dapat dilihat bahwa adanya perubahan turunnya intensitas beberapa puncak mordenit dan klinoptilolit pada difraktogram zeolit setelah aktivasi yang mengindikasikan bahwa saat dilakukannya aktivasi dengan NaOH terjadi penurunan kristinitas material tetapi tidak signifikan bersamaan dengan larutnya pengotor. Berdasarkan hasil pengujian XRD, diperoleh bahwa zeolit alam dari klaten banyak menghasilkan struktur mineral modernit ($\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{K}_2[4(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{40}]\cdot 28\text{H}_2\text{O}$). Sifat zeolit alam klaten memiliki struktur yang sama dengan zeolit Wonosari Gunung Kidul seperti penelitian yang dilakukan oleh [Kismolo \(2008\)](#), zeolit dari daerah gunung kidul mengandung kristal mordenit dan klinoptilolit.

Hasil FTIR zeolit berdasarkan [Gambar 2b](#), zeolit sebelum dan setelah aktivasi memiliki gugus fungsi yang sama yaitu O–H, Si–OH, H–O–H, TiO_4 , dan O–Si–O/O–Al–O namun memiliki bilangan gelombang yang berbeda. Bilangan gelombang pada zeolit sebelum aktivasi yaitu sebesar 3458 cm^{-1} , 1643 cm^{-1} , 1047 cm^{-1} , dan 800 cm^{-1} . Setelah diaktivasi terjadi pergeseran bilangan gelombang yaitu 3430 cm^{-1} , 1645 cm^{-1} , 1078 cm^{-1} , dan 802 cm^{-1} . Ketika zeolit diaktivasi dengan larutan NaOH, maka vibrasi ulur internal zeolit menyebabkan pergeseran spektral ke bilangan gelombang yang lebih tinggi pada spektrum FTIR ([Sadowska et al., 2012](#)). Berdasarkan [Gambar 2b](#), diketahui bahwa terjadinya pergeseran bilangan gelombang antara zeolit alam dan zeolit aktif pada bilangan gelombang 3458 cm^{-1} menjadi 3430 cm^{-1} menunjukkan bahwa vibrasi ulur O–H yang terhidrasi ([Pardoyo et al., 2009](#)). Gugus O–H ini memberikan informasi bahwa ada air (hidrat) yang dimiliki oleh kristal zeolit ([Faisal et al., 2015](#)). Perubahan intensitas transmitansi ini disebabkan dari zeolit alam yang masih mempunyai pengotor organik maupun anorganik yang di tunjukkan pada bilangan gelombang 3458 cm^{-1} ketika di aktivasi menggunakan NaOH terjadi larutnya pengotor sehingga intensitas menurun.

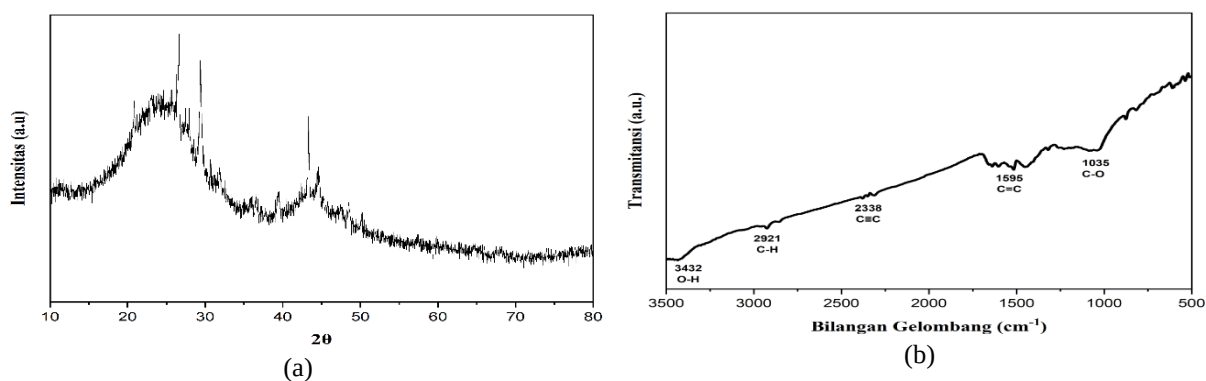
Pergeseran bilangan gelombang juga terjadi pada 1643 cm^{-1} menjadi 1645 cm^{-1} menunjukan vibrasi dari air. Serapan pada bilangan berkisar 1047 cm^{-1} dan 1073 cm^{-1} adalah serapan yang menunjukkan adanya vibrasi ulur asimetris Si–O atau Al–O pada TO_4 (T=Si atau Al). Serapan ini berkaitan dengan ikatan internal dari struktur yang berhubungan dengan TO_4 tetrahedral pada kisi zeolit (T=Si atau Al) yang merupakan unit struktur yang utama ([Araújo et al., 2013](#)). Vibrasi 800 cm^{-1} dan 802 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur simetris eksternal O–Si–O/O–Al–O

yang merupakan interpretasi dari serapan ikatan pada unit struktur utama zeolit yang berbentuk simetris, vibrasi tekuk Si–O ini termasuk ikatan eksternal dari kerangka zeolit (Araújo *et al.*, 2013).

Ketika zeolit diaktivasi dengan larutan NaOH, maka vibrasi ulur internal zeolit menyebabkan pergeseran ke bilangan gelombang yang lebih tinggi pada spektrum FTIR (Kresnadipayana, 2012). Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa terjadinya pergeseran bilangan gelombang antara zeolit alam dan zeolit aktif pada bilangan gelombang 3458 cm^{-1} menjadi 3430 cm^{-1} , perubahan intensitas transmitansi ini disebabkan dari zeolit alam yang masih mempunyai pengotor organik maupun anorganik yang di tunjukkan pada bilangan gelombang 3458 cm^{-1} ketika di aktivasi menggunakan NaOH terjadi larutnya pengotor sehingga intensitas menurun. Pergeseran bilangan gelombang juga terjadi pada 1047 cm^{-1} menjadi 1073 cm^{-1} dan 1643 cm^{-1} menjadi 1645 cm^{-1} yang merupakan serapan Si–OH atau Al–OH.

Karakterisasi Karbon Aktif

Gambar 3a menunjukkan bahwa profil difraksi sinar-X karbon aktif. Berdasarkan Hasil difraktogram tersebut menunjukkan bahwa seluruh padatan memiliki puncak melebar pada daerah $20 - 30^\circ$ yang merupakan puncak karakteristik karbon dan terdapat pula puncak pada daerah 26° , 29° , 43° , dan 44° menandakan kehadiran silika yang masih amorf dengan permukaan yang heterogen (Hidayu and Muda, 2016; Thuan *et al.*, 2016). Hal ini sesuai dengan penelitian Govindarajan and Jayalakshmi (2011) yang menunjukkan bahwa kalsinasi ampas tebu akan menghasilkan puncak pada daerah $23 - 29^\circ$ yang menunjukkan adanya kristobalit dan kalsit. Analisis FTIR dilakukan untuk mengetahui gugus fungsionalnya. Hasil analisis spektra IR ditunjukkan pada Gambar 3b. Spektra FTIR karbon aktif pada Gambar 3b menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki gugus fungsi yaitu O–H, C=C, C–H, C–O. Gugus fungsi C–O dan O–H menunjukkan karbon aktif tersebut bersifat polar yang dapat digunakan untuk adsorben zat polar seperti menjernihkan air, gula dan alkohol (Mentari *et al.*, 2018).

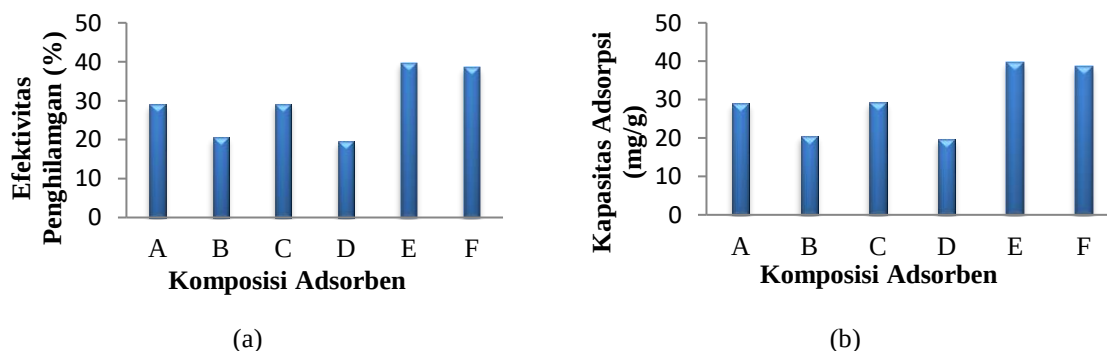


Gambar 3. (a) Difraktogram karbon aktif dan (b) Spektra FTIR karbon aktif.

Kinerja Adsorpsi Pada Penjernihan Air Gambut

Optimasi Komposisi Andisol/Zeolit/Karbon Aktif Terhadap Penjernihan Air Gambut

Hasil pengujian pengaruh komposisi dan waktu kontak adsorben terhadap efektivitas dan kapasitas adsorpsi air gambut ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Persen efektivitas penghilangan air gambut menjadi air bersih dan (b) Pengaruh komposisi adsorben terhadap kapasitas adsorpsi air gambut.

Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa kondisi optimum adsorben terhadap penyerapan air gambut pada komposisi tanah andisol:zeolit:karbon aktif pada komposisi (25:50:25) dengan kapasitas adsorpsi 39,6 mg/g dengan persentase penyerapan sebesar 81,72%. Hal ini dimungkinkan karena pada komposisi campuran tersebut dapat terdispersi dengan baik dalam larutan dan mempunyai luas permukaan adsorben yang besar sehingga interaksi antara gugus aktifnya dengan asam humat pada air gambut akan lebih banyak dengan menggunakan campuran antara tanah andisol, zeolit, dan karbon aktif. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 2. Setelah mengalami perlakuan pH, air gambut mengalami kenaikan sebesar 43,75% serta TDS air gambut mengalami penurunan sebesar 25,71%.

Tabel 2. Data nilai pH dan nilai TDS pada air gambut sebelum dan setelah perlakuan.

Parameter	Hasil		Kadar maksimum yang diperbolehkan (Permenkes Nomor 2, 2023)
	Sebelum	Setelah	
pH	4,8	6,9	6,5 – 8,5
TDS	350 mg/L	260 mg/L	<300 mg/L

Isoterm Adsorpsi Campuran Andisol/Zeilin/Karbon Aktif Terhadap Air Gambut

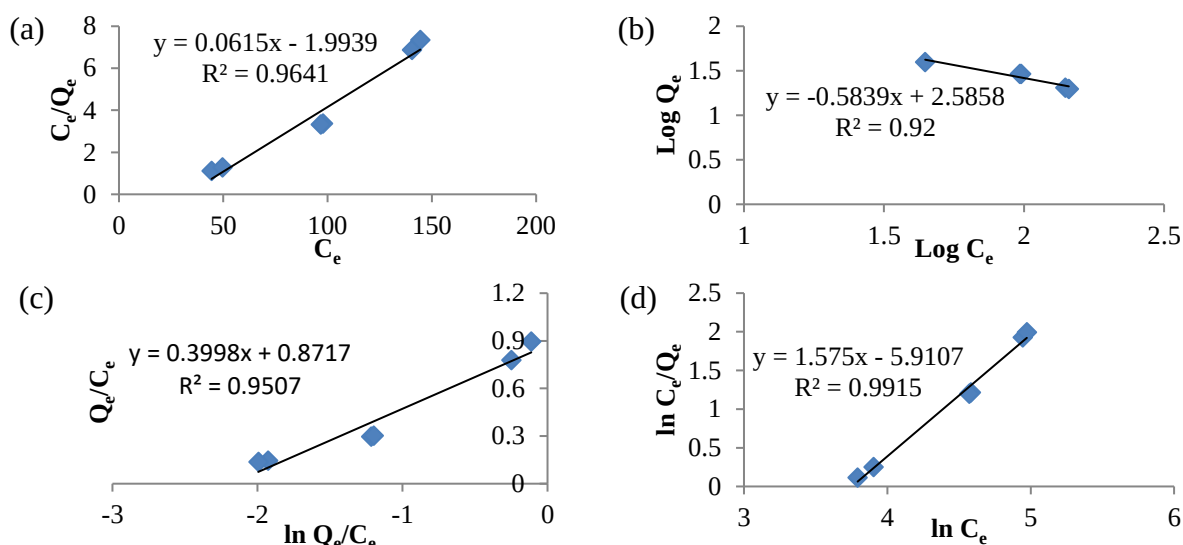
Empat model isoterm adsorpsi yaitu Langmuir, Freundlich, Elovich, dan Redlich-Peterson telah dipelajari dalam penelitian ini untuk menentukan mekanisme interaksi air gambut dengan tanah andisol, zeolit, dan karbon aktif. Studi isoterm adsorpsi dilakukan dengan cara mengetahui hubungan kesetimbangan antara jumlah molekul yang teradsorpsi pada permukaan (q_e) dengan konsentrasi adsorbat pada saat kesetimbangan dalam fasa cair (C_e).

Pada Tabel 3, nilai kapasitas adsorpsi maksimum (q_{max}) pada model isoterm Langmuir yaitu sebesar -0,50 L/mg dan nilai konstanta Langmuir sebesar -33,33 L/mg. Namun, parameter K_L yang dihasilkan bernilai negatif sehingga nilai R_L juga bernilai negatif. Nilai R_L negatif tidak dapat digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi (Ayawei *et al.*, 2017). Nilai n pada isoterm Freundlich yaitu sebesar -1,71 L/mg. Nilai n pada isoterm Freundlich menunjukkan bagaimana berlangsungnya proses adsorpsi. Pada pemodelan Elovich, terdapat parameter berupa q_{max} yang merupakan kapasitas adsorpsi maksimum yang memiliki nilai 2,50. K_E merupakan konstanta isoterm Elovich yang memiliki nilai -1,08 L/mg. Nilai β model isoterm Redlich-Peterson menunjukkan bahwa proses adsorpsi air gambut terjadi pada ukuran molekul yang kecil, karena nilai β lebih besar dari 1.

Tabel 3. Parameter-parameter pada tiap pemodelan isoterm adsorpsi Andisol/Zeilin/Karbon Aktif.

Model	Parameter	Hasil
Langmuir	Persamaan	$y = 0,0615x - 1,9939$
	R^2	0,9641
	q_m	-0,50
	K_L	-33,33
Freundlich	Persamaan	$y = -0,5839x + 2,5858$
	R^2	0,92
	n	-1,71
	K_f	385,03
Elovich	Persamaan	$y = 0,3998x + 0,8717$
	R^2	0,9507
	K_E	-1,08
	q_{max}	2,50
Redlich-Peterson	Persamaan	$y = 1,575x - 5,9107$
	R^2	0,9915
	β	1,575
	A	1,77

Keempat model yang digunakan pada penelitian ini diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) $\geq 0,9$ atau mendekati 1, seperti terlihat pada Gambar 5. Nilai R^2 model isoterm Langmuir, Freundlich, Elovich, dan Redlich-Peterson masing-masing sebesar 0,9641; 0,92; 0,9507; dan 0,9915. Berdasarkan nilai R^2 tersebut, keempat model isoterm dapat digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi air gambut, namun model isoterm Redlich-Peterson mempunyai nilai R^2 tertinggi dan mengasumsikan adanya keberadaan penghalang padatan diantara pori dan adsorbat (Elma and Mu'min, 2021).

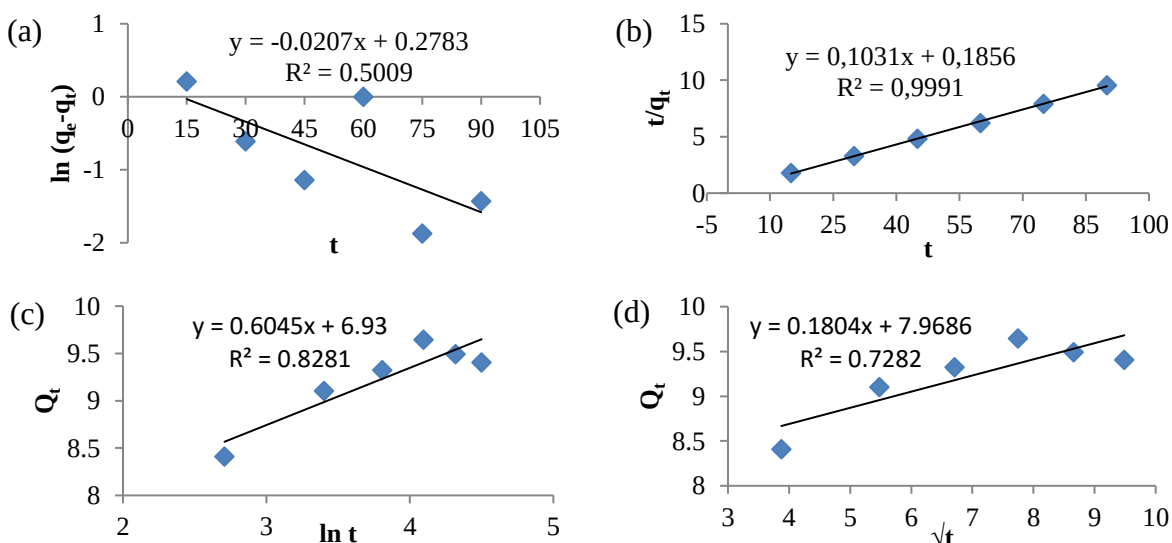


Gambar 5. Grafik linearisasi persamaan model isotherm (a) Langmuir, (b) Freundlich, (c) Elovich, dan (d) Redlich-Peterson pada proses adsorpsi air gambut.

Isoterm Redlich-Peterson dapat digunakan untuk mewakili kesetimbangan adsorpsi pada rentang konsentrasi yang luas dan menggabungkan tiga parameter, yaitu Langmuir, Henry, dan Freundlich. Oleh karena itu, mekanisme adsorpsinya tercampur dan tidak mengikuti adsorpsi monolayer yang ideal (Ayawei *et al.*, 2017). Pemodelan isotherm Redlich-Peterson memiliki parameter A yaitu konstanta Redlich-Peterson (L/g) dan indeks heterogenitas β antara 1 dan 0. Isoterm Redlich-Peterson memiliki ketergantungan linear pada konsentrasi dan fungsi eksponensial yang disederhanakan menjadi isotherm linear. Jika $\beta = 1$, isothermnya disederhanakan menjadi isotherm Langmuir. Jika β jauh lebih besar dari 1, maka menjadi persamaan Freundlich; jika $\beta = 0$, menjadi persamaan Henry. Tabel 3 menunjukkan nilai β air gambut sebesar 1,575. Oleh karena itu, pemodelan isothermal didasarkan pada isotherm Freundlich dengan proses adsorpsi yang dapat diterapkan baik secara homogen maupun heterogen (Ayawei *et al.*, 2017).

Kinetika Adsorpsi Campuran Andisol/Zeolit/Karbon Aktif Terhadap Air Gambut

Model kinetika adsorpsi digunakan untuk menjelaskan persamaan laju dalam proses adsorpsi padat-cair. Data eksperimen disesuaikan dengan model, yang menentukan posisi laju dan orde reaksi (Wang and Guo, 2020). Untuk menentukan model kinetika reaksi pada adsorpsi air gambut dilakukan dengan menggunakan empat model kinetika reaksi, yaitu pseudo orde 1, pseudo orde 2, Elovich, dan Weber-Morris. Hasil kinetika adsorpsi air gambut dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Studi kinetika adsorpsi air gambut (a) model pseudo orde 1 (b) model pseudo orde 2 (c) model Elovich dan (d) model Weber-Morris.

Data kinetika adsorpsi air gambut dianalisis menggunakan empat model kinetika yang banyak digunakan dalam sistem cair-padat, yaitu pseudo orde pertama, pseudo orde kedua, Elovich, dan Weber-Morris. Model kinetika yang sesuai dipilih berdasarkan perbandingan nilai koefisien determinasi (R^2), nilai R^2 yang mendekati satu ialah model yang sesuai. Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 4 diperoleh nilai R^2 dan nilai parameter persamaan untuk masing-masing model kinetika masing-masing sebesar 0,5009; 0,9991; 0,8281; dan 0,7282.

Tabel 4. Parameter-parameter pada tiap pemodelan kinetika adsorpsi Andisol/Zeolit/Karbon Aktif.

Model	Parameter	Hasil
Pseudo Orde 1	Persamaan	$y = -0,0207x + 0,2783$
	$K_1 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	-0,0207
	R^2	0,5009
Pseudo Orde 2	Persamaan	$y = 0,1031x + 0,1856$
	$K_2 \text{ (g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$	0,32
	q_e	5,38
	R^2	0,9991
Elovich	Persamaan	$y = 0,6045x + 6,93$
	β	1,65
	R^2	0,8281
Weber-Morris	Persamaan	$y = 0,1804x + 7,9686$
	$K_{id} \text{ (mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-0.5}\text{)}$	0,1804
	B	7,9686
	R^2	0,7282

Berdasarkan nilai R^2 dari masing-masing model kinetika yang diperoleh maka model pseudo orde dua mendekati 1 dan mempunyai nilai tertinggi yaitu 0,9991, maka merupakan model kinetika yang cocok dibandingkan dengan tiga model kinetik lainnya. Berdasarkan perbandingan nilai konstanta laju (k) yang tercantum pada Tabel 3, menunjukkan bahwa nilai konstanta laju pada kinetika pseudo orde dua lebih besar daripada pseudo orde satu dan Weber-Morris. Nilai konstanta laju pada kinetika pseudo orde dua sebesar $0,35 \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Artinya, 1 g adsorben mampu mengadsorpsi 0,34 mg adsorbat dalam waktu 1 menit. Kebanyakan model adsorpsi kinetik cocok dengan model kinetika orde kedua karena data adsorpsi untuk keseluruhan kisaran waktu kontak sebagian besar adalah adsorpsi dengan tingkat penyisihan adsorbat yang kecil dan berlangsung lambat sehingga memungkinkan laju adsorpsinya dikontrol oleh mekanisme adsorpsi secara kimia (Mahmud *et al.*, 2012).

KESIMPULAN

Proses aktivasi pada Andisol/Zeolite/Karbon Aktif dapat melarutkan pengotor yang ada pada material. Setelah dilakukan aktivasi Andisol/Zeolite/Karbon Aktif mengalami perubahan karakteristik. Perubahan ditandai dengan adanya gugus baru pada spektra FTIR, perubahan difraktogram XRD Pada spektra FTIR tanah andisol sesudah aktivasi dan zeolit sesudah aktivasi. Pemodelan isoterm adsorpsi air gambut mengikuti pemodelan isoterm Redlich-Peterson dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9915. Pemodelan kinetika adsorpsi Andisol/Zeolite/Karbon Aktif untuk air gambut mengikuti pemodelan pseudo orde dua, yaitu adsorpsi secara kimia (chemisorpsi). Campuran adsorben Andisol/Zeolite/Karbon Aktif dapat mengadsorpsi air gambut dengan kondisi terbaik pada komposisi 25:50:25 (b/b) dengan kapasitas adsorpsi sebesar 39,67 mg/g dan persentase penyerapan sebesar 81,72%.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

DA: Penyiapan sampel, pengolahan dan analisis data, penyusunan manuskrip; P: Supervisi; EP: data analisis, supervisi dan revisi manuskrip; OAS: review dan revisi manuskrip.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Sebelas Maret atas pendanaan pada hibah Grup Riset No. 194.2/UN27.22/PT.01.03/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayawei, N., Ebelegi, A.N., and Wankasi, D., 2017. Modeling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017, 3039817. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>.
- Consolin-Filho, N., Venancio, E.C., Barriquello, M.F., Hechenleitner, A.A.W., and Pineda, E.A.G., 2007. Methylene Blue Adsorption onto Modified Lignin from Sugar Cane Bagasse. *Ecletica Quimica*, 32, 63–70. <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v32.4.2007.p63-70>.
- Araújo, J.A., Cruz, F.T., Cruz, I.H., and Cardoso, D., 2013. Encapsulation of Polymers in CTA-MCM-41 via Microemulsion. *Microporous and Mesoporous Materials*, 180, 14–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.05.010>.
- Elma, N.N., and Mu'min, B., 2021. Studi Isoterm dan Kinetika Adsorpsi Bahan Organik Alami (Boa) pada Air Gambut Terhadap Karbon Aktif Kayu Ulin dengan Sistem Batch. *Jernih: Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa*, 4, 1–12. <https://doi.org/10.20527/jernih.v4i2.957>.
- Faisal, M., Suhartana, U., and Pardoyo, P., 2015. Zeolit Alam Termodifikasi Logam Fe Sebagai Adsorben Fosfat (PO_4^{3-}) pada Air Limbah. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 18, 91–95. <https://doi.org/10.14710/jksa.18.3.91-95>.
- Govindarajan, D., and Jayalakshmi, G., 2011. XRD, FTIR, and SEM Studies on Calcined Sugarcane Bagasse Ash Blended Cement. *Archives of Physics Research*, 2, 38–44.
- Herald, E., Pranoto, dan Prowida, D., 2004. Studi Karakterisasi dan Aktivasi Tanah Andisol Alam serta Aplikasinya Sebagai Adsorben Logam Berat Zn Menggunakan Metode Kolom. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 3, 32–42.
- Hidayu, A.R., and Muda, N., 2016. Preparation and Characterization of Impregnated Activated Carbon from Palm Kernel Shell and Coconut Shell for CO_2 Capture. *Procedia Engineering*, 148, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.463>.
- Kismolo, E., Nurmaniwaty, N., and Suyatno, T., 2008. Optimasi Pemanfaatan Zeolit Alam dari Gunung Kidul untuk Reduksi Kadar Cesium dalam Limbah Radioaktif Cair. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:191137633>.
- Mahmud, M., Notodarmojo, S., Padmi, T., and Soewondo, P., 2012. Adsorpsi Bahan Organik Alami (Boa) Air Gambut pada Tanah Lempung Gambut Alami dan Teraktivasi: Studi Keseimbangan Isoterm dan Kinetika Adsorpsi. *Infoteknik*, 13, 28–38. <https://doi.org/10.20527/INFOTEK.V13I1.1813>.
- Mentari, V.A., Handika, G., and Maulina, S., 2018. Perbandingan Gugus Fungsi dan Morfologi Permukaan Karbon Aktif dari Pelempah Kelapa Sawit Menggunakan Aktivator Asam Fosfat (H_3PO_4) dan Asam Nitrat (HNO_3). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 7, 16–20. <https://doi.org/10.32734/jtk.v7i1.1629>.
- Munir, M., 1996. *Tanah-Tanah Utama Indonesia*. Pustaka Jaya, Jakarta, 315.
- Pardoyo, P., Listiana, L., and Darmawan, A.T., 2009. Pengaruh Perlakuan HCl pada Kristalinitas dan Kemampuan Adsorpsi Zeolit Alam terhadap Ion Ca^{2+} . *Jurnal Sains dan Matematika*, 17, 100–104.
- Parfitt, R.L., and Hemmi, T., 1980. Structure of Some Allophanes from New Zealand. *Clays and Clay Minerals*, 28, 285–294. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1980.0280407>.
- Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan Hidup, 2023. Kementerian Kesehatan. Jakarta.
- Pranoto, 2011. Pemanfaatan Adsorben Alofan Gunung Vulkanik Jawa Sebagai Penjerap Logam Berat untuk Meningkatkan Kualitas Air Minum di Perkotaan. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:93845794>.
- Pranoto, Martini, T., and Anandita, E.P., 2019. Activation and Characterization of Andisol Soil and Fly Ash Composite In Adsorption of Lead (II) Metal Ion. *Journal of Physics: Conference Series*, 1295, 12012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1295/1/012012>.
- Pranoto, Martini, T., and Ratnasari, R.M., 2023. Synergism of Andisol Soil and Foundry Sand Mixture as Adsorbent of Nickel (II) Metal Ion. *Journal of Physics: Conference Series*, 2556, 12010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2556/1/012010>.
- Pranoto, P., Martini, T., and Maharditya, W., 2020. Uji Efektivitas dan Karakterisasi Komposit Tanah Andisol/Arang Tempurung Kelapa untuk Adsorpsi Logam Berat Besi (Fe). *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 16, 50–66. <https://doi.org/10.20961/alchymy.16.1.33286.50-65>.

- Putra, A.S.P., Munir, R., and Natalisanto, A.I., 2022. Studi Adsorpsi Logam Berat Besi (Fe) dan Timbal (Pb) Air Sungai Mahakam oleh Limbah Cangkang Telur dan Abu Gosok. *Progressive Physics Journal*, 3, 179–183. <https://doi.org/10.30872/ppj.v3i2.929>.
- Pusat Sumber Daya Geologi. 2010. *Laporan Inventarisasi Gambut di Daerah Sungai Pawan, Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Rohman, M.N., Sunarto, S., and Pranoto, P., 2018. Potensi Adsorben Komposit Tanah Andisol-Karbon Aktif untuk Menurunkan Kadar Logam Besi (Fe) pada Air Sumur di Kecamatan Srandakan, Kabupaten Bantul. In: *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi dan Saintek III*. SNPBS, 5 Mei 2018, Auditorium Moh. Djazman, Universitas Muhammadiyah Surakarta, pp. 247–252.
- Rusdianasari, R., Bow, Y., and Dewi, T., 2019. Peat Water Treatment by Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 258, 012013. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012013>.
- Sadowska K., Góra-Marek K., Datka J., 2012. Hierarchic Zeolites Studied by IR Spectroscopy: Acid Properties of Zeolite ZSM-5 Desilicated with NaOH and NaOH/tetrabutylamine hydroxide. *Vibrational Spectroscopy*, 63, 418–425, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2012.09.007>.
- Saifuddin, S., Lisa, A., Amalia, Z., Faridah, F., and Elfiana, E., 2020. Applications of Micro Size Anorganic Membrane of Clay, Zeolite and Active Carbon as Filters for Peat Water Purification. *Journal of Physics: Conference Series*, 1450, 12010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012010>.
- Samura, L., Burhannudinnur, M., Prakoso, S., Rosyidan, C., Putra, R.H., Urbiyanto, G.A., and Auliya, H., 2022. Pemanfaatan Komposit Natural Bentonite dan Ampas Tebu Sebagai Penjernih Air Limbah Industri Tahu Harapan Maju. *Jurnal Abdi Masyarakat Indonesia (JAMIN)*, 4. <https://doi.org/10.25105/jamin.v4i2.13440>.
- Sholeh, M., and Budiastuti, S., 2020. The Effect of Adsorbent Composition: Quartz Sand/Andisol Soil/Zeolite/Activated Carbon Against Mn, Fe, BOD, and COD in Citarum River Eater Cleaning Progress. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 11, 645–652. <https://doi.org/10.31838/srp.2020.10.97>.
- Sulaiman, K.O., Sajid, M., and Alhooshani, K., 2020. Application of Porous Membrane Bag Enclosed Alkaline Treated Y-Zeolite for Removal of Heavy Metal Ions from Water. *Microchemical Journal*, 152, 104289. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104289>.
- Sumila, S., Asri, A., and Wahyuni, D., 2023. Uji Kinerja Karbon Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Sebagai Reusable Adsorbent Logam Besi pada Air Gambut. *Jurnal Fisika: Fisika Sains dan Aplikasinya*, 8, 17–22.
- Thuan, T. V., Thinh, P. V., Quynh, B.T.P., Cong, H.T., Tam, D.T., and Bach, L.G., 2016. Production of Activated Carbon from Sugarcane Bagasse by Chemical Activation with ZnCl₂: Preparation and Characterization Study. *Research Journal of Chemical Sciences*, 6, 42–47.
- Valle, S.R., Carrasco, J., Pinochet, D., Soto, P., and Mac Donald, R., 2015. Spatial Distribution Assessment of Extractable Al, (NaF) PH and Phosphate Retention as Tests to Differentiate among Volcanic Soils. *CATENA*, 127, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.011>.
- Velarde, L., Nikjoo, D., Escalera, E., and Akhtar, F., 2024. Bolivian Natural Zeolite as a Low-Cost Adsorbent for the Adsorption of Cadmium: Isotherms and Kinetics. *Heliyon*, 10, e24006. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24006>.
- Wahyuni, D., Harmawanda, S., Nurhanisa, M., Hasanuddin, H., Zulfian, Z., and Nurhasanah, N., 2023. Efektivitas Karbon Aktif dari Limbah Tongkol Jagung (*Zea mays*) dengan Variasi Aktivator Asam Klorida dalam Penyerapan Logam Besi pada Air Gambut. *Jurnal Fisika*, 13, 10–19. <https://doi.org/10.15294/jf.v13i1.42778>.
- Wang, J., and Guo, X., 2020. Adsorption Kinetic Models: Physical Meanings, Applications, and Solving Methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>.
- Widjanarko, D.M., and Christina, Y., 2003. Pengaruh H₂SO₄ dan NaOH Terhadap Luas Permukaan dan Keasaman Alofan. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 2.
- Wulandari, R., Riyanto, C.A., and Martono, Y., 2023. Kinerja Karbon Aktif Daun Eceng Gondok pada Penurunan Kadar Fosfat Artifisial dan Surfaktan dalam Limbah Detergen. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 19, 149–161. <https://doi.org/10.20961/alchemy.19.2.65626.149-161>.