ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia

Official Website: https://jurnal.uns.ac.id/alchemy

ISSN 1412-4092
EISSN 2443-4183

Preparasi Karbon Aktif Sekam Padi dan Serbuk Gergaji Kayu Jati melalui Proses Refluks sebagai Adsorben Larutan Multi Ion Fe(II)/Cu(II)

(*Preparation of Activated Carbon from Rice Husk and Teak Sawdust using Reflux Process as Adsorbent for Multi Ion Fe(II)/Cu(II) Solutions*)

Cucun Alep Riyanto[a*], Yohanes Ariesto[a], Fidelis Tertius Aluh Christyawardana[a], Yehez Kiel Sandy Pradana[a], Nicho Vernanda Wina Puspita[a], Iga Permata Sari[a], Jose D Michael Yonggulemba[a], Marturia Ester Tumbelaka[a], Sarawinda Hutagalung[a], Fuady Hanief[b], Wawan Rustyawan[b]

[a]*Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Kristen Satya Wacana*
Jalan Diponegoro 52-60, Salatiga, Jawa Tengah, 50711, Indonesia
[b]*Research and Technology Innovation (RTI), Pertamina*
Jalan Raya Bekasi KM 20, Pulogadung, Jakarta Timur, 13920, Indonesia

[*]*Corresponding author: cucun.riyanto@uksw.edu*

DOI:10.20961/alchemy.21.1.92401.104-120

Received 19 August 2024, Revised 25 November 2024, Accepted 24 December 2024, Published 28 March 2025

Kata kunci:

adsorben;
karbon aktif;
refluks;
sekam padi;
serbuk gergaji kayu jati.

ABSTRAK. Sekam padi dan serbuk gergaji kayu jati merupakan bahan berlignoselulosa yang berpotensi sebagai bahan karbon aktif. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh proses refluks terhadap karakter karbon aktif sekam padi (RHAC) dan serbuk gergaji kayu jati (TSAC) sebagai adsorben. Sekam padi dan serbuk gergaji kayu jati dikarbonisasi pada suhu 400 °C lalu direfluks menggunakan larutan NaOH 2 N pada suhu 100 °C. Karbon diimpregnasi dengan rasio karbon:H_3PO_4 1:3 (b/b). Karbon aktif RHAC/TSAC diaplikasikan menjerap multi ion Fe(II)/Cu(II) diikuti studi kinetika dan isoterm adsorpsinya. Hasil penelitian menunjukkan karbon aktif RHAC dan TSAC memiliki gugus aktif O–H, C-H *stretching*, C≡C, C=C/C=O, C–H, dan P=O dengan dominasi unsur C (~53%) dan O (~48,1%). Karbon aktif TSAC 2321 hasil refluks memiliki luas permukaan terbesar mencapai 49,6795 m^2/g. Kajian kinetika adsorpsi multi ion Fe(II)/Cu(II) dengan RHAC dan TSAC mengikuti pemodelan *pseudo second order* (PSO), sedangkan kajian isoterm adsorpsi multi ion Fe(II)/Cu(II) mengikuti beragam pemodelan seperti Redlich-Peterson, Elovich, dan Jovanovich. Kapasitas adsorpsi terbaik RHAC 232 pada ion Fe(II) dan RHAC 2321 pada ion Cu(II) berturut-turut sebesar 0,3426 mg/g dan 0,4134 mg/g. Karbon aktif TSAC 232 dan 2321 cenderung menjerap ion Cu(II) dengan kapasitas adsorpsi masing-masing sebesar 0,4609 mg/g dan 0,5556 mg/g.

Keywords:

activated carbon;
adsorbent;
reflux;
rice husk;
teak sawdust.

ABSTRACT. Rice husks and teak wood sawdust are lignocellulosic materials with potential as activated carbon sources. This study aims to determine the effect of the reflux process on the characteristics of RHAC and TSAC as an adsorbent. The rice husk and teak sawdust were carbonized at 400 °C and refluxed using 2 N NaOH solution at 100 °C. The carbon was impregnated using 30% H_3PO_4 with a carbon: H_3PO_4 ratio 1:3 (w/w). The RHAC/TSAC was applied to adsorb multi-ions Fe(II)/Cu(II), and its adsorption kinetics and isotherms studies were studied. The results showed that the RHAC and TSAC had O-H, C–H stretching, C≡C, C=C/C=O, C-H, and P=O functional groups with the dominance of C (~53%wt) and O (~48.1%wt) elements. The refluxed TSAC 2321 has the largest surface area of 49.6795 m^2/g. The adsorption kinetics study of the Fe(II)/Cu(II) multi-ion using RHAC and TSAC follows the pseudo-second-order (PSO) modeling, while the adsorption isotherm study of the Fe(II)/Cu(II) multi-ion using RHAC and TSAC follows various models such as Redlich-Peterson, Elovich, and Jovanovich. The best adsorption capacity of RHAC 232 on Fe(II) ions and RHAC 2321 on Cu(II) ions is 0.3426 mg/g and 0.4134 mg/g, respectively. The TSAC 232 and 2321 tend to adsorb Fe(II) and Cu(II) ions with an adsorption capacity reaching 0.4609 mg/g and 0.5556 mg/g, respectively.

Cite this as: Riyanto, C. A., Ariesto, Y., Christyawardana, F. T. A., Pradana, Y. K. S., Puspita, N. H. W., Sari, I. P., Yonggulemba, J. D. M., Tumbelaka, M. E., Hutagalung, S., Hanief, F., and Rustyawan, W., 2025. Preparasi Karbon Aktif Sekam Padi dan Serbuk Gergaji Kayu Jati melalui Proses Refluks sebagai Adsorben Larutan Multi Ion Fe(II)/Cu(II). *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 21(1), 104-120. https://dx.doi.org/10.20961/alchemy.21.1.92401.104-120.

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

PENDAHULUAN

Beras merupakan bahan makanan pokok utama di Indonesia. Produksi beras pada bulan April hingga Juni 2020 lalu mencapai 10,5 juta ton di atas produksi jagung yang hanya mencapai 1,01 ton (Prabawanti, 2020). Sekam padi diperoleh dari limbah buang produksi bulir padi menjadi beras (~78%) dan sekam padi (~22%). Sekam padi yang terpisah dari beras akan menjadi limbah dan jika dibakar akan menjadi masalah bagi lingkungan. Sekam padi merupakan bahan berlignoselulosa, namun di dalam sekam padi terdapat kandungan silika yang tinggi. Kandungan sekam padi terdiri dari 50% selulosa, 25 – 30% lignin, dan 15 – 20% silika (Sanka *et al*., 2020). Gabungan kelompok tani (Gapoktan) Tani Subur merupakan kelompok tani yang berada pada kelurahan Tambakboyo, Ambarawa, Kabupaten Semarang. Berdasarkan data pada bulan April 2020 yang dihimpun oleh Kementrian Pertanian, Gapoktan Tani Subur melakukan penggilingan padi dengan rata-rata 1,5 ton dan menghasilkan sekam padi seberat 0,33 ton (3300 kg) setiap harinya (Media, 2020). Sekam padi yang dihasilkan selama ini dimanfaatkan untuk membakar bata merah, alas kandang ayam, dan abu gosok. Selain sekam padi, bahan baku pembuatan karbon aktif yang potensial dari tumbuh-tumbuhan adalah serbuk gergaji kayu. Serbuk kayu merupakan salah satu limbah organik yang sering dijumpai dalam industri pengrajinan.

Pembakaran sekam padi secara langsung akan menghasilkan emisi karbon monoksida (CO) sebesar 200 – 2000 mg per meter kubik keadaan standar (mg/Nm^3) dan emisi nitrogen oksida (NO_x) antara 200 – 300 mg/Nm^3 (Armesto *et al*., 2002). Selain menimbulkan masalah lingkungan, hal ini menunjukkan bahwa para petani masih belum mampu memanfaatkan limbah sekam padi secara maksimal. Sama seperti limbah sekam padi, biasanya limbah serbuk kayu hanya diolah dengan dibakar sehingga menimbulkan asap dan emisi CO_2 dan berdampak membahayakan lingkungan (Wardani *et al*., 2017). Limbah akan berdampak negatif terhadap lingkungan jika dibiarkan membusuk, ditumpuk, atau dibakar sehingga perlu adanya pengolahan dan pemanfaatan limbah serbuk kayu yang lebih ramah lingkungan (Maulana *et al*., 2020). Salah satu alternatif untuk mengurangi volume limbah adalah pemanfaatan serbuk kayu sebagai bahan baku pembuatan adsorben (Sudarja *and* Caroko, 2012). Berdasarkan penelitian Sa'diyah *et al*. (2021), pembuatan karbon aktif dari serbuk gergaji kayu yang berasal dari berbagai jenis kayu berpotensi sebagai bahan baku karbon aktif karena memiliki kandungan karbon mencapai 63,7%. Menurut penelitian Surbakti *et al*. (2016), karbon aktif serbuk gergaji kayu karet dapat menjerap limbah logam Cd sebesar 5,007 mg/L (9,69%), logam Cu sebesar 7,896 mg/L (48,36%), dan logam Pb sebesar 23,632 mg/L (72,17%). Oleh karena itu, maka secara umum, serbuk sekam padi dan gergaji kayu jati berpotensi sebagai bahan baku karbon aktif.

Beberapa penelitian telah menemukan adanya kandungan silika pada sekam padi memiliki potensi untuk menghasilkan silika murni. Pemanfaatan silika murni sudah diterapkan dalam masyarakat contohnya pembuatan keramik (Stochero *et al*., 2017), katalis, material komposit, zeolit, dan adsorben dalam bentuk silika gel (Shaban *et al*., 2017). Selain silika, sekam padi juga kaya akan selulosa, sama halnya dengan serbuk gergaji kayu jati. Selulosa dalam sekam padi harus dimanfaatkan agar sekam padi tidak terbuang percuma. Semua materi yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin mempunyai potensi yang dapat digunakan sebagai prekursor untuk karbon aktif (FitzPatrick *et al*., 2010; Xiao *et al*., 2012). Perlu perlakuan secara khusus untuk memanfaatkan selulosa pada sekam padi sebagai bahan karbon aktif karena kandungan selulosa yang lebih tinggi dibanding dengan kandungan silika.

Penelitian Liou *and* Wu (2009) memperkenalkan agen basa dan agen asam sebagai *pre-treatment* (pre-aktivasi) sekam padi guna meningkatkan kualitas karbon aktif dengan teknik refluks. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa terjadi penurunan abu sebesar 92% dengan luas permukaan karbon aktif hanya mencapai 700 m^2/g. Hasil ini masih dibawah material ber-lignin lainnya seperti ampas tebu dan kulit kacang tanah yang mampu mencapai luas permukaan 1132 m^2/g (Castro *et al*., 2000) dan 2114 m^2/g (Azevedo *et al*., 2007). Hal ini disebabkan oleh kandungan abu ampas tebu dan kulit kacang tanah sangat rendah. Penelitian Luo *et al*. (2018) menggunakan asam fosfat sebagai bahan untuk mengaktivasi karbon aktif dan diperoleh hasil luas area maksimum sebesar 1365 m^2/g. Angka ini sudah melampaui luas area dari bahan ampas tebu, tetapi masih di bawah bahan kulit kacang tanah. Penelitian Rahim *et al*. (2015) melakukan tahap karbonisasi sebelum pre-aktivasi dan aktivasi, peneliti berhasil mensintesis karbon aktif dan nanosilika sebagai adsorben dengan hasil adsorben silika yang diperoleh memiliki dimensi 7 nm berdistribusi beragam dan karbon aktif yang diperoleh bersifat amorf yang terlihat dari pelebaran puncak difraktogram XRD pada sekitar 24,6° dan 44,2°.

Penelitian Choirunnisa (2022) menggunakan karbon aktif serbuk gergaji kayu jati yang termodifikasi surfaktan dengan rasio 1:3 memiliki komposisi 56,87% karbon; 33,94% oksigen; 5,44% fosfat; 2,44% silika; dan 0,90% natrium. Kandungan silika dan logam lain pada karbon aktif diperkirakan dapat menurunkan kemampuan

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

dari karbon aktif karena silika dapat menempati pori pada karbon aktif (Riyanto *et al*., 2021a), sehingga diperlukan upaya untuk mengurangi kandungan silika tersebut, salah satunya dengan metode refluks. Pada penelitian ini akan dilakukan proses refluks menggunakan agen basa NaOH pada sampel serbuk sekam padi dan kayu jati setelah tahap karbonisasi serta aktivasi menggunakan asam fosfat dengan rasio impregnasi 1:3 (karbon : H_3PO_4 30%, b/b).

Peneliti Aprilia *et al*. (2020) melakukan modifikasi pada karbon aktif sekam padi menggunakan HDTMA-Br sebagai adsorben ion nitrat dan diperoleh hasil efisiensi adsorpsi mencapai 97,345%. Hasil lainnya diperoleh pada penelitian Widyasari *et al*. (2021) menggunakan karbon aktif sekam padi untuk menjerap ion Cd(II) dengan hasil adsorpsi mencapai 99,94% dan kapasitas adsorpsi mencapai 2,068 mg/g. Penggunaan sumber karbon aktif lain seperti serbuk gergaji kayu jati pernah dilakukan sebagai adsorben metilen biru (MB), ion Cd(II), dan ion Cu(II) dengan kapasitas adsorpsi pada MB, ion Cd(II), dan ion Cu(II) berturut-turut mencapai 614, 208, and 182 mg/g (Nguyen *et al*., 2019). Hasil penelitian lainnya menunjukkan kemampuan adsorpsi karbon aktif serbuk gergaji kayu jati pada ion Ni(II) dalam limbah *electroplating* mencapai 27.94% (Sa'diyah *et al*., 2023).

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, belum ditemukan kajian terkait efektivitas dan selektivitas adsorpsi multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif sekam padi dan serbuk gergaji kayu jati. Pada penelitian ini juga membandingkan karakteristik karbon aktif sekam padi dan serbuk gergaji kayu jati dengan dan tanpa proses refluks, sehingga akan didapatkan karakter yang lebih berpotensi sebagai adsorben multi ion Fe(II)/Cu(II). Keunggulan yang diharapkan adalah diperoleh karbon aktif sekam padi dan serbuk gergaji kayu jati yang lebih selektif dalam penjerapan ion logam.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Instrumen Penelitian

Bahan baku pada penelitian ini adalah sekam padi (*Oriza sativa*) dan serbuk gergaji kayu jati (*Tectona grandis L.f.*). Sekam padi diperoleh dari penggilingan gabah daerah Watuagung (Kabupaten Semarang) dan serbuk gergaji kayu jati diperoleh dari industri furnitur di daerah Kemiri (Salatiga). Bahan kimia yang digunakan adalah *pro analysis grade* (Merck) seperti $FeSO_4.7H_2O$, $CuSO_4.5H_2O$, H_3PO_4, NaOH, dan HCl. Bahan lainnya seperti reaktan Ferrover (HACH), reaktan Cuver (HACH), dan akuades. Peralatan yang digunakan meliputi pipet ukur, gelas *beaker*, labu Erlenmeyer, corong, tabung reaksi, dan set perangkat *stirrer* disediakan oleh Laboratorium Kimia.

Instrumen pengujian yang digunakan adalah Spektrofotometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) (Shimadzu Prestige 21, UGM), *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX) (SEM Quanta FEG 450, RTI Pertamina), Spektrometer *Surface Area Analyzer* (Quantachrome Nova Touch 4LX – UII Yogyakarta, Quantachrome Nova – RTI Pertamina), dan Spektrofotometer UV-Vis (PG T60 Instruments, UKSW).

Preparasi Karbon Aktif

Sekam padi dan serbuk kayu jati dibersihkan lalu dicuci dan dikeringkan dalam oven selama 24 jam (T = 60 – 80 °C). Selanjutnya, sampel dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 30 *mesh* dan disimpan dengan nama *Ground Rice Husk* (GRH) dan *Ground Teak Sawdust* (GTS). Sampel GRH dan GTS diproses karbonisasi selama 60 menit (T = 400 °C) menggunakan *furnace*, hasil karbon yang diperoleh dinamakan *Carbonized Rice Husk* (CRH) dan *Carbonized Teak Sawdust* (CTS). Sampel yang diperoleh lalu diayak menggunakan ayakan 30 *mesh* dan disimpan (Hananto, 2022; Rahim *et al*., 2015; Riyanto *et al*., 2022)

Sebagian sampel CRH disiapkan lalu di-refluks dengan penambahan NaOH 2 N ke dalam kolf yang berisi CRH dan direfluks selama 2 jam (T = 100 °C) lalu dinetralkan menggunakan HCl 1 N dan akuades hingga pH 7. Padatan hasil selanjutnya dikeringkan menggunakan oven selama 24 jam (T = 110 °C). Sampel selanjutnya disimpan dan diberi nama *Base Carbonized Rice Husk* (BCRH). Prosedur yang sama dilakukan dengan mengganti CRH dengan CTS sehingga diperoleh *Base Carbonized Teak Sawdust* (BCTS) (Hananto *et al*., 2022; Riyanto *et al*., 2022).

Pada tahap selanjutnya, sampel CRH dan BCRH diaktivasi selama 24 jam menggunakan H_3PO_4 30% melalui proses impregansi dengan rasio 1:3 (karbon:H_3PO_4, b/b). Hasil impregnasi kemudian disaring dan endapan dikeringkan dengan oven selama 24 jam (T = 100 °C). Karbon aktif yang diperoleh lalu diaktivasi secara fisika dengan menggunakan *furnace* selama 60 menit (T = 600 – 700 °C). Karbon aktif kemudian dinetralkan (pH = 7) dengan menggunakan NaOH dan akuades. Setelah mencapai pH netral, karbon aktif dikeringkan dengan oven selama 24 jam (T = 100 °C). Karbon aktif yang diperoleh dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan berukuran 60 mesh. Hasil metode aktivasi diberi kode sampel *Rice Husk Activated Carbon* (RHAC) dengan masing-masing

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

kode 232 (dari CRH) dan 2321 (dari BCRH). Prosedur sama dilakukan dengan mengganti CRH dengan CTS dan BCRH dengan BCTS sehingga diperoleh TSAC (*Teak Sawdust Activated Carbon*) dengan masing-masing kode 232 (dari CTS) dan 2321 (dari BCTS) (Hananto *et al*., 2022; Riyanto *et al*., 2022).

Aplikasi adsorpsi multi ion Fe(II)/Cu(II)

Uji kinetika adsorpsi dilakukan dengan penambahan 100 mg karbon aktif RHAC ke dalam 25 mL larutan ion Fe(II)/Cu(II) pada konsentrasi 2 mg/L. Proses adsorpsi dilakukan melalui proses pengadukan selama 20 – 90 menit. Uji isoterm adsorpsi dilakukan dengan penambahan 10 – 200 mg karbon aktif RHAC ke dalam 25 mL larutan ion Fe(II)/Cu(II) pada konsentrasi 2 mg/L selama waktu optimum tiap jenis RHAC melalui metode pengadukan (Riyanto *et al*., 2021b; Riyanto *and* Prabalaras, 2019; Zhang *et al*., 2013). Hasil proses adsorpsi disaring dan dilakukan penambahan reaktan HACH pada filtrat sesuai jenis logam yang diuji. Campuran lalu dihomogenisasi menggunakan vortex dan diuji menggunakan spektrofotometer UV-Vis (λ ion Fe(II) = 516 nm, λ ion Cu(II) = 560 nm). Perlakuan yang sama diulang menggunakan karbon aktif TSAC. Efektivitas adsorpsi ditentukan berdasarkan nilai persen adsorpsi menggunakan Persamaan (1) (Kul *et al*., 2023).

$$\%Adsorpsi = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100\% \quad (1)$$

Kajian adsorpsi multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC dan TSAC dilakukan melalui pemodelan kinetika dan isoterm adsorpsi. Ploting pemodelan kinetika adsorpsi dilakukan pada Kinetika Orde 1 (Persamaan (2)), *Pseudo Second Order* (Persamaan (3)), Elovich (Persamaan (4)), dan Webber Morris (Persamaan (5)) (Benjelloun *et al*., 2021; Largitte and Pasquier, 2016; Sumanjit *et al*., 2016).

Kinetika Orde 1: $\ln C_t = -k_1 t + \ln C_o$ (2)

Kinetika *Pseudo Second Order* (PSO): $\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} t + \left(\frac{1}{k_2 Q_e^2}\right)$ (3)

Kinetika Elovich: $Q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$ (4)

Kinetika Weber-Morris (Difusi Intrapartikel): $Q_t = k_3 \sqrt{t} + B$ (5)

dengan C_t merupakan konsentrasi adsorbat pada waktu t (mg/L), C_o merupakan konsentrasi adsorbat mula-mula (mg/L), k_1 merupakan tetapan laju reaksi kinetika Orde 1 (m/s) (Kurniawati *et al*., 2016), Q_t merupakan jumlah adsorbat pada waktu t (mg/g), Q_e merupakan jumlah adsorbat pada saat kesetimbangan (mg/g), k_2 merupakan tetapan laju reaksi kinetika PSO (g/mg·min) (Sumanjit *et al*., 2016), α, β merupakan konstanta pemodelan Kinetika Elovich, k_3 merupakan konstanta laju dari kinetika Weber-Morris (mg/(g·min^{0,5}), dan B merupakan kapasitas adsorpsi (mg/g) (Tan *and* Hameed, 2017).

Ploting pemodelan isoterm adsorpsi dilakukan pada isoterm Freundlich (Persamaan (6)), Redlich Peterson (Persamaan (7)), Elovich (Persamaan (8)), dan Jovanovich (Persamaan (9)) (Ayawei *et al*., 2017; Dada *et al*., 2021).

Isoterm Freundlich: $\text{Log } Q_e = \text{Log } K_F + \frac{1}{n_F} \text{Log Ce}$ (6)

Isoterm Redlich-Peterson: $\ln\left(\frac{C_e}{Q_e}\right) = \beta \ln C_e - \ln A_{R-P}$ (7)

Isoterm Elovich: $\ln\left(\frac{Q_e}{C_e}\right) = \ln K_E Q_{max} - \frac{Q_e}{Q_{max}}$ (8)

Isoterm Jovanovich: $\text{Ln } Q_e = \text{Ln } Q_{max} + K_J C_e$ (9)

dengan Q_e merupakan jumlah adsorbat pada saat kesetimbangan (mg/g), K_F merupakan kontansta isoterm Freundlich (kapasitas adsorpsi), n_F merupakan faktor heterogenitas (intensitas adsorpsi), C_e merupakan konsentrasi adsorbat pada saat kesetimbangan (mg/L), β merupakan eksponen isoterm Redlich-Peterson ($0 \leq \beta \leq 1$), A_{R-P} merupakan konstanta isoterm Redlich-Peterson (L/g), K_E merupakan konstanta kesetimbangan isoterm Elovich (L/mg), Q_{max} merupakan kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g), dan K_J merupakan konstanta isoterm Jovanovic (L/g) (Dada *et al*., 2021).

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

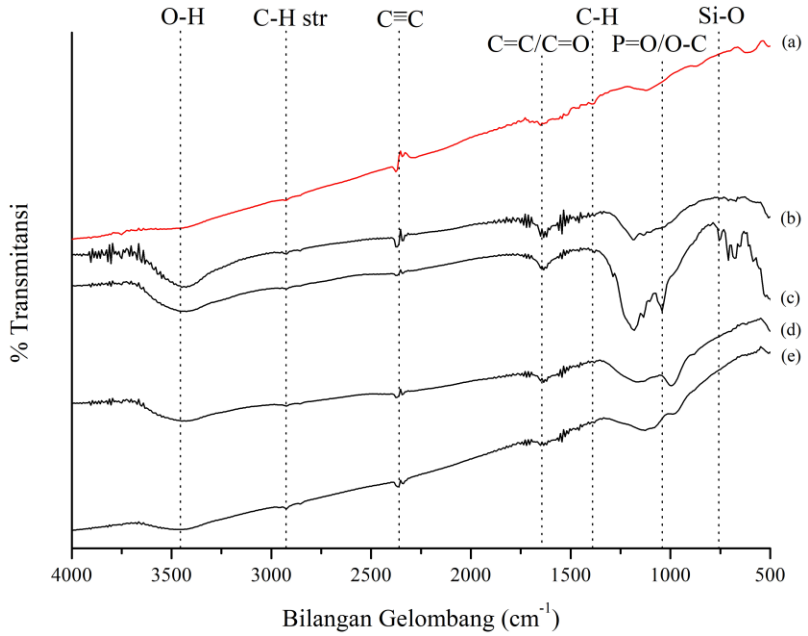
Karakterisasi Sampel

Karbon aktif sekam padi (RHAC) dan serbuk gergaji kayu jati (TSAC) diuji menggunakan FTIR pada bilangan gelombang antara 4000 – 400 cm^{-1} untuk mengetahui keberadaan gugus fungsional. Karbon aktif RHAC dan TSAC diuji menggunakan spektrometer SEM-EDX untuk mengetahui topologi dan komposisi pada permukaannya. Pengujian ukuran distribusi pori dan luas permukaan pada karbon aktif RHAC dan TSAC dilakukan menggunakan instrumen *Surface Area Analyzer* (SAA).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil karakterisasi FTIR pada RHAC dan TSAC

Hasil karakterisasi spektra FTIR yang disajikan pada Gambar 1 menunjukkan vibrasi gugus fungsional yang ada pada material karbon aktif (standar/komersial) maupun karbon aktif RHAC dan TSAC dengan dan tanpa proses refluks.



Gambar 1. Spektra FTIR pada karbon aktif (a) standar/komersial, (b) RHAC 232 (tanpa refluks), (c) RHAC 2321 (refluks), (d) TSAC 232 (tanpa refluks), dan (e) TSAC 2321 (refluks).

Berdasarkan rekapitulasi Tabel 1, puncak spektra FTIR yang terdeteksi pada karbon aktif RHAC dan TSAC menyerupai puncak spektrum FTIR pada karbon aktif standar dengan puncak serapan pada bilangan gelombang 3425,58 cm^{-1} (O–H); 2924,09 cm^{-1} (C–H *stretching*); 2291,43 cm^{-1} (C≡C); 1620,21 cm^{-1} (C=C/C=O); dan 1401,18 cm^{-1} (C–H) (Luo *et al*., 2018; Mistry, 2009). Adanya puncak serapan baru pada bilangan gelombang 1220–1180 cm^{-1} diperkirakan sebagai vibrasi ikatan P=O/O–C dari ikatan P=OOH/C–O–P (Luo *et al*., 2018; Puziy *et al*., 2002). Munculnya seragan gugus tersebut sebagai hasil dari proses impregnasi menggunakan H_3PO_4. Pada karbon aktif yang melalui proses refluks (RHAC 2321) masih terdeteksi puncak vibrasi gugus Si–O yang mengasumsikan masih adanya kandungan silika pada karbon aktif RHAC 2321 (Mistry, 2009; Riyanto *et al*., 2024). Hasil karakterisasi ini nantinya akan diperkuat dengan data karakterisasi SEM-EDX untuk mengetahui kadar atau persentase unsur silika yang terkandung (Riyanto *et al*., 2021a; Riyanto *et al*., 2022).

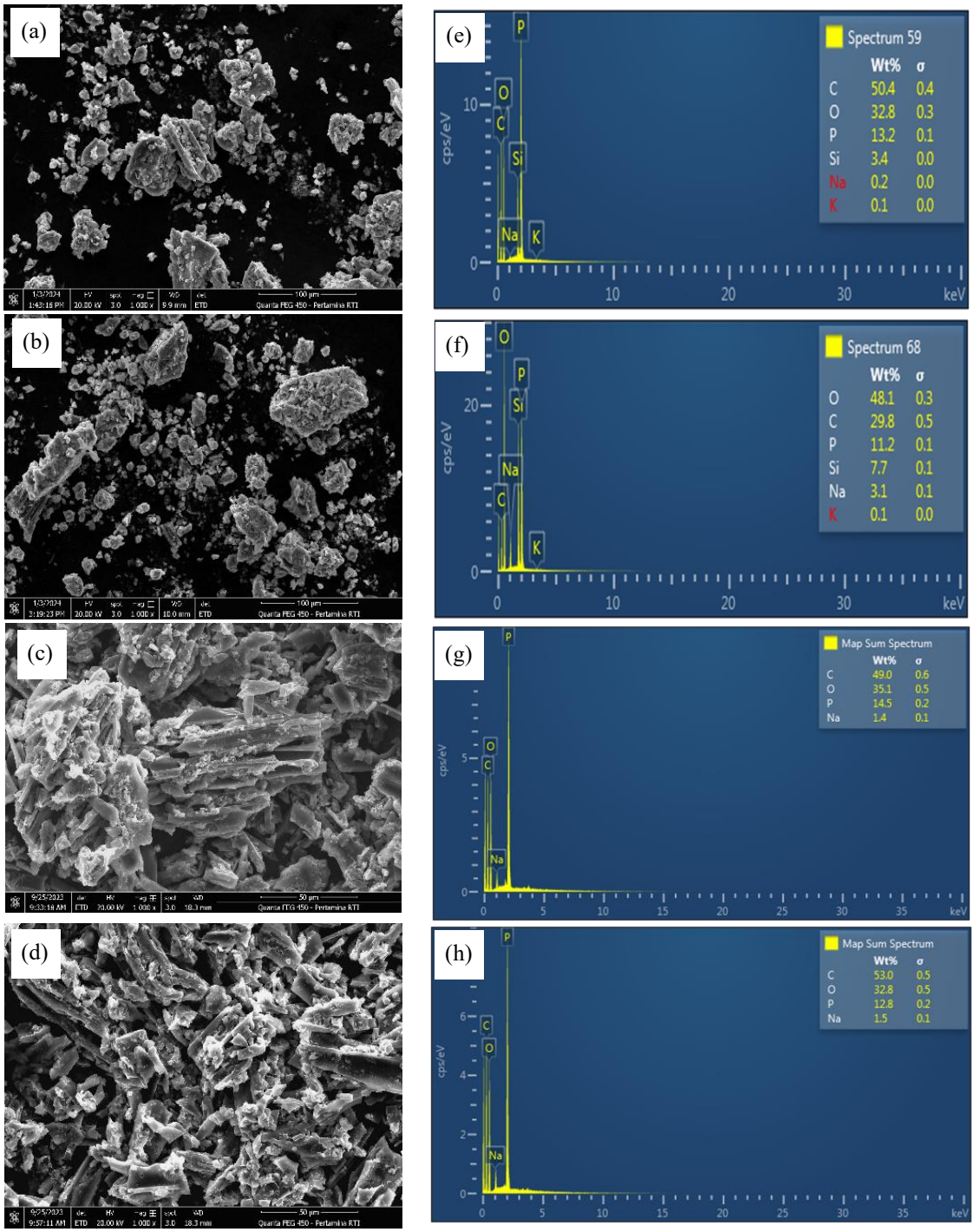
Tabel 1. Gugus fungsional RHAC dan TSAC berdasarkan analisis FTIR.

Sampel	Bilangan Gelombang Gugus Fungsional (cm^{-1})						
	-O-H	-C-H Str	C≡C	C=C/C=O	-C-H	P=O/C-O	Si-O
AC Standar	3510,45	2931,80	2291,43	1635,64	1388,75	-	-
RHAC 232	3425,58	2924,09	2276,00	-	1404,18	1188,15	756,10
RHAC 2321	3425,58	2924,09	2291,43	1620,21	1404,18	1180,44	756,10
TSAC 232	3425,58	2924,09	2291,43	1620,21	1404,18	1180,44	-
TSAC 2321	3448,72	2924,09	2299,15	1604,77	1404,18	1180,44	-

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

Hasil karakterisasi SEM-EDX pada RHAC dan TSAC

Analisis SEM dikenal luas untuk mengkaji morfologi dan karakter permukaan material, serta EDX untuk mengetahui kuantitas dalam persen untuk kandungan setiap unsur pada material. Hasil karakterisasi karbon aktif RHAC dan TSAC disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Citra SEM pada karbon aktif (a) RHAC 232, (b) RHAC 2321, (c) TSAC 232, dan (d) TSAC 2321 serta EDX pada karbon aktif (e) RHAC 232, (f) RHAC 2321, (g) TSAC 232, dan (h) TSAC 2321 pada perbesaran 1000x.

Berdasarkan Gambar 2 diketahui bahwa komposisi unsur tertinggi adalah karbon (C) dan oksigen (O). Nilai % unsur C tertinggi ada pada karbon aktif TSAC 2321 sebesar 53% dan %unsur O tertinggi ada pada karbon aktif RHAC 2321 sebesar 48,1%. Selain unsur C dan O, juga ditemukan unsur lainnya, yaitu fosfor (P), silika (Si), natrium (Na), dan kalium (K). Unsur P terdeteksi karena penggunaan H_3PO_4 sebagai aktivator dalam proses

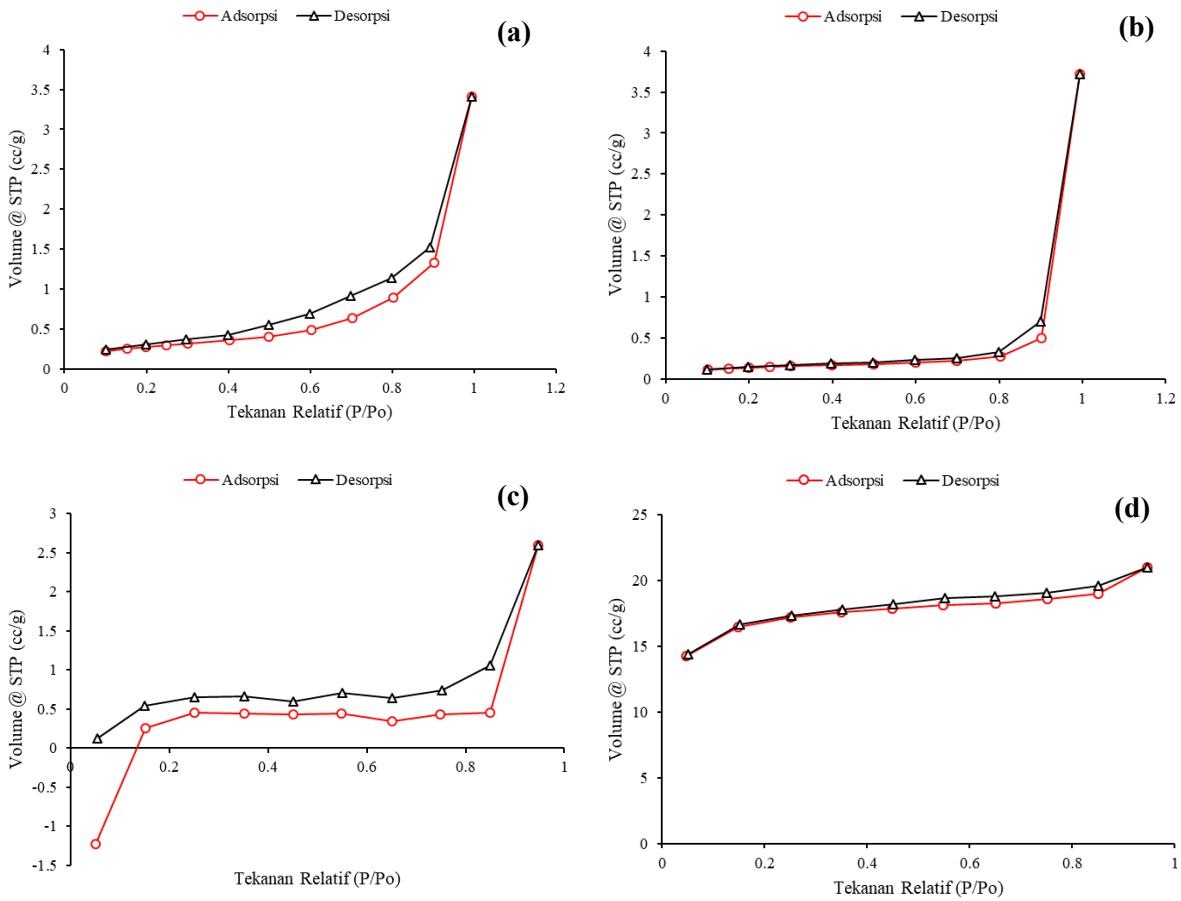
Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

aktivasi kimia (impregnasi) selama pembuatan karbon aktif RHAC dan TSAC. Unsur Na terdeteksi karena penggunaan NaOH dalam proses netralisasi setelah proses aktivasi kimia (impregnasi). Unsur lainnya yaitu K terdeteksi sebagai kontaminan, adanya unsur K diperkirakan berasal dari penggunaan pupuk pada tanah sebagai media pertumbuhan tanaman padi tumbuh yang terdistribusi ke bagian tanaman padi hingga ke kulit sekam padi (Singh *et al*., 2019; Sukyankij *et al*., 2023).

Pada karbon aktif RHAC, terdeteksi adanya unsur Si dimana nilai %unsur Si pada karbon aktif RHAC 2321 (dengan refluks) menghasilkan kadar Si yang lebih tinggi dibandingkan karbon aktif RHAC 232 (tanpa refluks). Hal ini dimungkinkan karena proses refluks yang dilakukan setelah *raw material* melalui proses karbonisasi pada suhu 400 °C selama 1 jam menyebabkan karakter unsur silika menjadi lebih stabil dan kristalin. Pada proses pemanasan di rentang 400 – 1200 °C, sifat kristalinitas silika meningkat karena ikatan Si–O yang terbentuk menjadi lebih kuat dan stabil (Goltsman *and* Yatsenko, 2024; Sarangi *et al*., 2011; Shrestha *et al*., 2023). Oleh karena itu, unsur silika yang terbentuk akibat proses karbonisasi menjadi lebih sulit untuk di-ekstrak ketika dilarutkan dengan NaOH selama proses refluks. Hasil deteksi unsur Si pada sampel RHAC ini menjadi konfirmasi hasil FTIR yang menunjukkan adanya serapan interaksi gugus Si–O (Riyanto *et al*., 2022).

Hasil karakterisasi permukaan BET/BJH pada karbon aktif RHAC dan TSAC

Hasil analisis karbon aktif RHAC dan TSAC berikutnya adalah uji permukaan karbon aktif berupa hasil luas permukaan dan distribusi pori. Plot adsorpsi N_2 pada pemodelan isoterm adsorpsi tiap karbon aktif disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva isoterm adsorpsi-desorpsi N_2 pada karbon aktif (a) RHAC 232, (b) RHAC 2321, (c) TSAC 232, dan (d) TSAC 2321.

Hasil plot kurva isoterm adsorpsi-desorpsi N_2 pada karbon aktif RHAC dan TSAC selanjutnya digunakan untuk menentukan luas permukaan serta distribusi pori mencakup diameter dan volume pori (Tabel 2). Berdasarkan data pada Tabel 2, karbon aktif TSAC 2321 memiliki luas permukaan terbesar yaitu 49,6795 m^2/g, sedangkan luas permukaan terkecil pada karbon aktif TSAC 232 yaitu 1,1612 m^2/g. Total volume pori terbesar

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

pada karbon aktif RHAC 2321 yaitu 6,710 x 10^{-2} cc/g dan total volume pori terkecil pada karbon aktif TSAC 232 yaitu 0,041482 x 10^{-2} cc/g. Rerata diameter pori terbesar pada karbon aktif RHAC 2321 yaitu 48,1835 nm dan total volume pori terkecil pada karbon aktif TSAC 2321 yaitu 1,30883 nm. Proses refluks memberikan efek berbeda pada karbon aktif RHAC dan TSAC dimana pada karbon aktif RHAC proses karbonisasi disertai refluks menghasilkan luas permukaan yang lebih kecil namun diameter pori bertambah. Pada karbon aktif TSAC, proses refluks memberikan efek sebaliknya dimana TSAC 2321 (dengan refluks) memiliki luas permukaaan yang lebih besar dan diameter pori lebih kecil dibandingkan TSAC 232 (tanpa refluks).

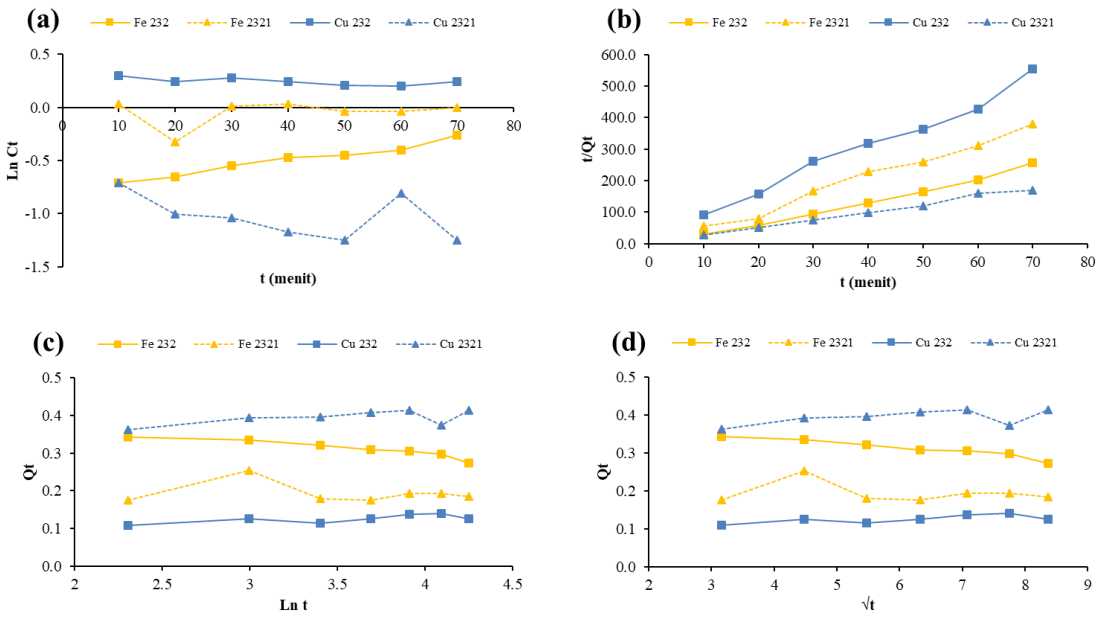
Tabel 2. Distribusi luas permukaan, total volume pori, dan rerata diameter pori karbon aktif RHAC dan TSAC.

Karbon aktif	S_{BET} (m^2/g)	V_T (cm^3/g)	D_P (nm)
RHAC 232	12,010 m^2/g	6,276 × 10^{-2} cc/g	20,9033
RHAC 2321	5,570 m^2/g	**6,710 × 10^{-2} cc/g**	**48,1835**
TSAC 232	1,1612 m^2/g	0,401482 × 10^{-2} cc/g	6,91495
TSAC 2321	**49,6795 m^2/g**	3,2511 × 10^{-2} cc/g	1,30883

S_{BET}: M_{BET} luas permukaan; **V_T**: total volume pori dengan jari-jari < 1245,79 saat P/Po = 0,992250; **D_P**: rerata diameter pori

Hasil kinetika dan isoterm adsorpsi RHAC pada larutan multi ion Fe(II)/Cu(II)

Kinetika adsorpsi dilakukan untuk mengetahui proses adsorpsi kontaminan (adsorbat) pada suatu adsorben meliputi laju adsorpsi dan kapasitas adsorpsi. Hasil plot pemodelan kinetika adsorpsi pada RHAC disajikan pada Gambar 4 serta hasil plot pemodelan isoterm adsorpsi pada RHAC disajikan pada Gambar 5.



Gambar 4. Plot pemodelan kinetika adsorpsi larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC 232 dan RHAC 2321 (a) Orde 1, (b) *Pseudo Second Order* (PSO), (c) Elovich, dan (d) Weber-Morris.

Dari plot kurva pemodelan kinetika adsorpsi larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC 232 dan RHAC 2321 (Gambar 4), nilai linearitas (R^2) tertinggi diperoleh pada pemodelan Pseudo Orde Dua (PSO) (Tabel 3). Pemodelan PSO ini mengasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi secara kimia (kemisorpsi) dimana laju reaksi dibatasi oleh jumlah adsorbat yang berinteraksi dengan situs aktif pada adsorben melalui pertukaran elektron (Ho *and* McKay, 1999; Revellame *et al*., 2020).

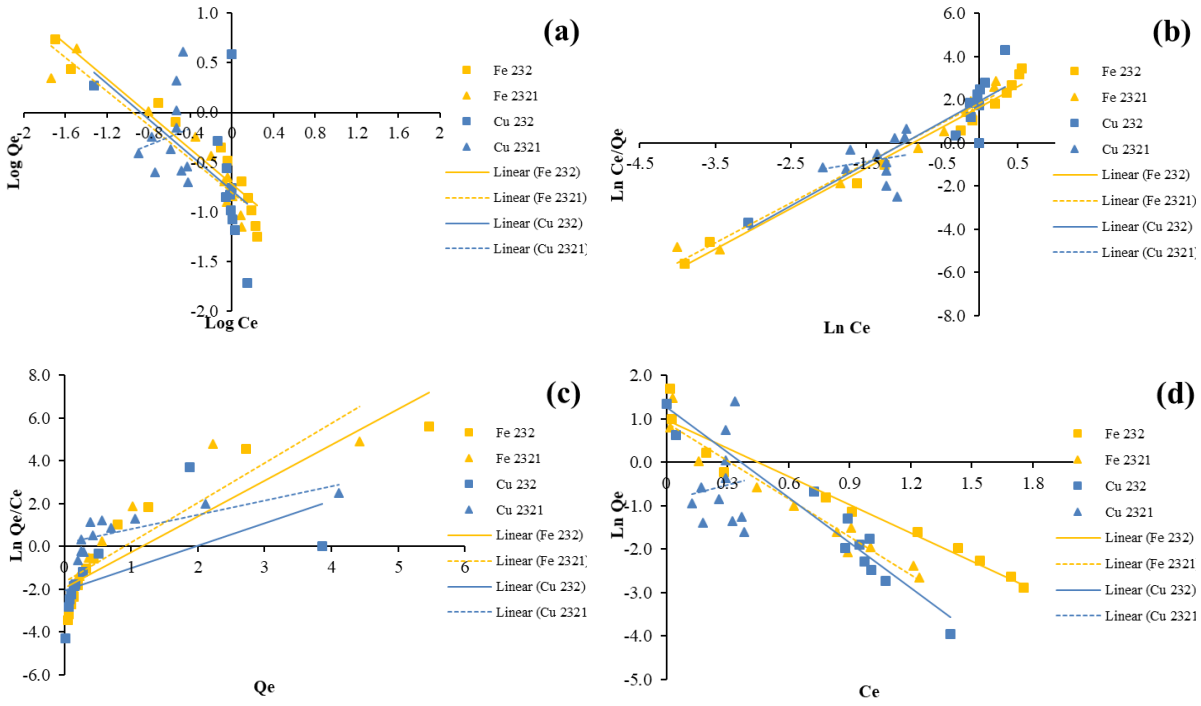
Berdasarkan pemodelan PSO, dapat ditentukan parameter tetapan laju reaksi (k_2) dan jumlah adsorbat pada saat kesetimbangan (Q_e, teoritis). Pada Tabel 3 ditemukan bahwa beberapa parameter k_2 bernilai negatif pada RHAC 232 yaitu -0,1230 g/mg.min (Fe(II)) dan pada RHAC 2321 yaitu -4,6250 g/mg.min (Fe(II)). Nilai negatif ini mengindikasikan bahwa secara sistem kesetimbangan, reaksi bergeser ke arah kiri (reaktan) atau proses adsorpsi seolah-olah tidak terjadi (tidak dapat didefinisikan). Dengan kata lain, proses adsorpsi hanya terjadi pada RHAC 232 dan RHAC 2321 terhadap ion Cu(II) dengan nilai k_2 masing-masing adalah 2,4445 dan 3,2477

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

g/mg.min serta Q_e masing-masing adalah 0,1382 dan 0,4058 mg/g. Nilai kapasitas adsorpsi ion Cu(II) pada RHAC 2321 yang lebih tinggi menunjukkan bahwa proses refluks mampu meningkatkan kapasitas RHAC pada ion Cu(II).

Plot kurva dan sebaran parameter pemodelan isoterm adsorpsi larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC 232 dan RHAC 2321 disajikan pada Gambar 5 dan Tabel 4. Pada RHAC 232, nilai linearitas (R^2) tertinggi diperoleh pada ion Fe(II) dengan nilai 0,9785 (Redlich-Peterson) dan pada ion Cu(II) dengan nilai 0,9391 (Jovanovich). Pada RHAC 2321, nilai linearitas (R^2) tertinggi diperoleh pada ion Fe(II) dengan nilai 0,9728 (Redlich-Peterson) dan pada ion Cu(II) dengan nilai 0,6717 (Elovich).

Berdasarkan penelitian Ayawei *et al*. (2017), nilai parameter β pada pemodelan Redlich-Peterson adalah pada rentang 0 s/d 1, sedangkan pada penelitian ini nilai β > 1 sehingga pemodelan ini dianggap tidak valid. Hasil ini selaras dengan hasil pemodelan kinetika adsorpsi sebelumnya dimana proses adsorpsi ion Fe(II) pada RHAC 232 dan 2321 tidak dapat didefinisikan. Dengan demikian, proses adsorpsi pada RHAC 232 dan 2321 cenderung terjadi pada ion Cu(II) dimana pada RHAC 232 mengikuti pemodelan Jovanovic dan pada RHAC 2321 mengikuti pemodelan Elovich. Pemodelan Jovanovich mengasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi secara *monolayer* dalam interaksi secara adsorpsi fisika (Majd *et al*., 2022). Pemodelan Elovich mengasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi secara *multilayer* dimana situs adsorpsi dapat bertambah secara fungsi eksponensial (Aldemir *et al*., 2023).



Gambar 5. Plot pemodelan isoterm adsorpsi larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC 232 dan RHAC 2321 (a) Freundlich, (b) Redlich-Peterson, (c) Elovich, dan (d) Jovanovich.

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

Tabel 3. Parameter tiap pemodelan kinetika adsorpsi pada larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC dan TSAC.

Model	Parameter	RHAC 232		RHAC 2321		TSAC 232		TSAC 2321	
		Ion Fe(II)	Ion Cu(II)	Ion Fe(II)	Ion Cu(II)	Ion Fe(II)	Ion Cu(II)	Ion Fe(II)	Ion Cu(II)
Orde 1	R^2	0,9694	0,4949	0,0663	0,2742	0,0646	0,0023	0,608	0,7054
	k_1 (m/s)	-0,007	0,0012	-0,0015	0,0051	0,0013	-0,0008	-0,0028	0,0163
PSO	R^2	**0,9924**	**0,982**	**0,9865**	**0,9903**	**0,9209**	**0,9613**	**0,9914**	**0,9958**
	k_2 (g/mg.min)	-0,1230	2,4445	-4,6250	3,2477	61,9291	-2,6832	-3,6545	0,7617
	Q_e (mg/g)	0,2704	0,1382	0,1837	0,4058	0,0889	0,3961	0,0546	0,5618
Elovich	R^2	0,8684	0,5715	0,0266	0,3898	0,197	0,0215	0,8389	0,6013
	α	$-5,5458\times10^{-8}$	7,3599	$-2,2607\times10^{-17}$	$1,5666\times10^{7}$	0,4959	$-2,9606\times10^{-27}$	$-8,9378\times10^{-5}$	$5,2514\times10^{6}$
	β	-31,25	78,7402	-153,8462	55,2486	81,9672	-128,2051	-32,1543	38,9105
Weber-Morris	R^2	0,9309	0,5452	0,0431	0,3214	0,1352	0,0196	0,7319	0,641
	k_3 (mg/g.min^{0,5})	-0,0123	0,0046	-0,0031	0,0061	0,0038	-0,0027	-0,0108	0,0098
	B (mg/g)	0,3866	0,0976	0,2122	0,3574	0,0655	0,4279	0,138	0,4632

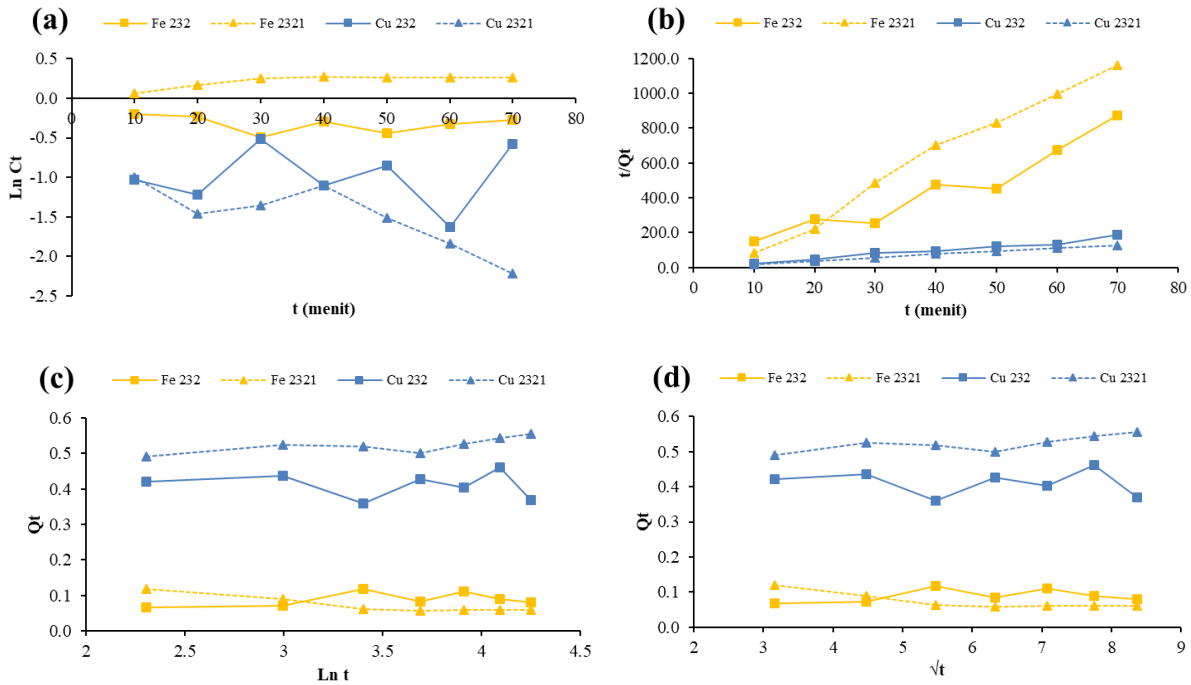
Tabel 4. Parameter tiap pemodelan isoterm adsorpsi pada larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC dan TSAC.

Model	Parameter	RHAC 232		RHAC 2321		TSAC 232		TSAC 2321	
		Ion Fe(II)	Ion Cu(II)	Ion Fe(II)	Ion Cu(II)	Ion Fe(II)	Ion Cu(II)	Ion Fe(II)	Ion Cu(II)
Freundlich	R^2	0,9086	0,3061	0,8827	0,0238	0,1795	0,0426	0,9094	0,0131
	K_F	0,1918	0,1620	0,1571	1,0007	0,1421	1,0787	0,2752	0,8606
	n_F	-1,1377	-1,1084	-1,1848	2,4178	0,5182	3,9324	-1,0964	7,7519
Redlich-Peterson	R^2	**0,9785**	0,7849	**0,9728**	0,0467	0,0483	0,3274	**0,9778**	0,3003
	β	1,879	1,949	1,8461	0,5864	-0,9299	0,836	1,9121	0,7186
	A_{R-P} (L/g)	0,1918	0,1412	0,1571	1,0007	0,1421	0,8940	0,2752	1,1885
Elovich	R^2	0,811	0,3744	0,8034	**0,6717**	**0,9259**	**0,595**	0,8866	**0,396**
	K_E (L/mg)	26,0035	8,8272	22,9001	0,8986	74,9832	0,5610	17,5723	1,5641
	Q_{max} (mg/g)	-0,5968	-0,9502	-0,5371	-1,4970	-0,5419	-1,6863	-0,6944	-1,9467
Jovanovich	R^2	0,951	**0,9391**	0,9477	0,0108	0,18	0,0286	0,9378	0,1426
	Q_{max} (mg/g)	2,6634	3,5619	2,4878	0,4138	0,0278	0,8744	3,4515	0,3990
	K_J (L/g)	2,1643	3,469	2,9117	-1,1916	-1,6254	1,5807	2,0145	-3,5254

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

Hasil kinetika dan isoterm adsorpsi TSAC pada larutan multi ion Fe(II)/Cu(II)

Hasil plot kinetika adsorpsi TSAC pada larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) disajikan pada Gambar 6 dan Tabel 3. Hasil kinetika adsorpsi TSAC 232 pada ion Fe(II) dan Cu(II) mengikuti pemodelan PSO dengan nilai R^2 sebesar 0,9209 (Fe(II)) dan 0,9613 (Cu(II)). Hasil kinetika adsorpsi TSAC 2321 pada ion Fe(II) dan Cu(II) juga mengikuti pemodelan PSO dengan nilai R^2 sebesar 0,9914 (Fe(II)) dan 0,9958 (Cu(II)). Kedua hasil pada pemodelan PSO tersebut menunjukkan bahwa proses adsorpsi cenderung dipengaruhi situs aktif pada karbon aktif dan berlangsung secara kimia (kemisorpsi) (Ho *and* McKay, 1999; Revellame *et al*., 2020). Berdasarkan plot pemodelan PSO, maka dapat ditentukan parameter tetapan laju reaksi (k_2) dan jumlah adsorbat pada saat kesetimbangan (Q_e, teoritis). Pada Tabel 3 ditemukan bahwa beberapa parameter k_2 bernilai negatif yaitu pada TSAC 232 yaitu -2,6832 g/mg.min (Cu(II)) dan pada TSAC 2321 yaitu -3,6545 g/mg.min (Fe(II)). Nilai negatif ini mengindikasikan bahwa secara sistem kesetimbangan, reaksi bergeser ke arah kiri (reaktan) atau dengan kata lain proses adsorpsi tidak terjadi (tidak dapat didefinisikan). Proses adsorpsi hanya terjadi pada TSAC 232 untuk ion Fe(II) dan TSAC 2321 pada ion Cu(II) dengan nilai k_2 masing-masing adalah 61,9291 dan 0,7617 g/mg.min serta Q_e masing-masing adalah 0,0889 dan 0,5618 mg/g. Pada hasil pemodelan kinetika adsorpsi ini menunjukkan bahwa proses refluks berpengaruh pada selektivitas penjerapan jenis ion logam.

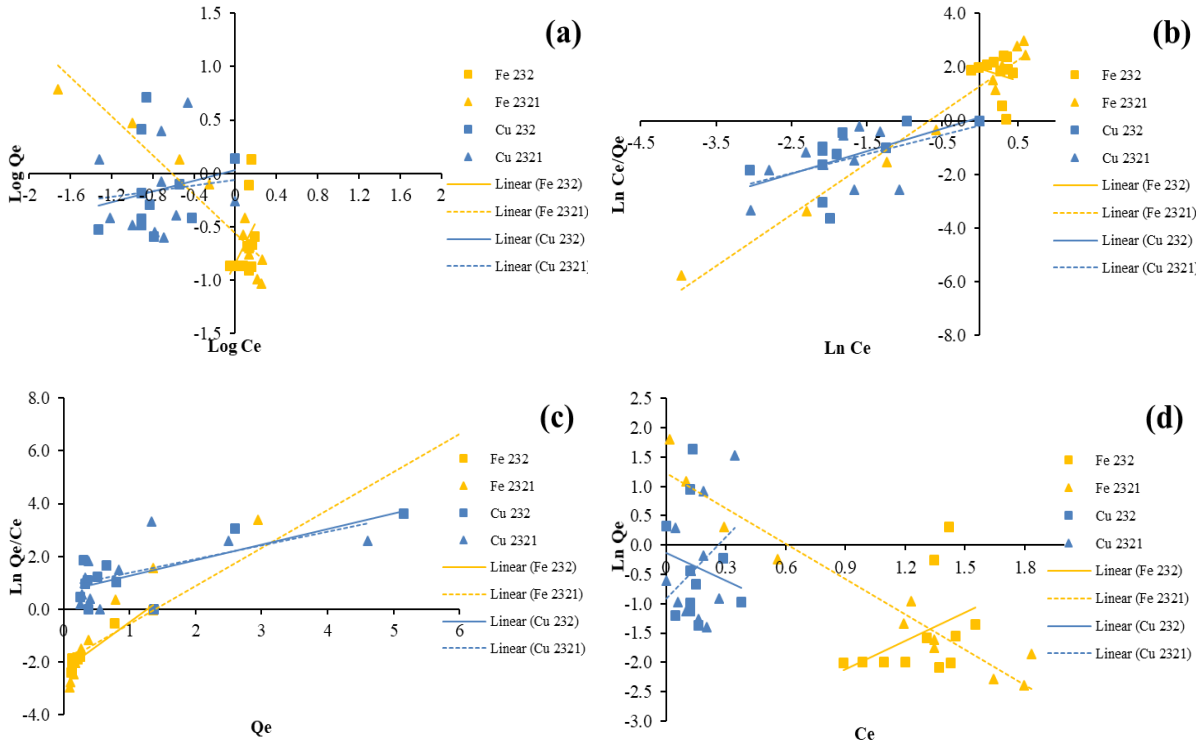


Gambar 6. Plot pemodelan kinetika adsorpsi larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif TSAC 232 dan TSAC 2321 (a) Orde 1, (b) Pseudo Orde Dua (PSO), (c) Elovich, dan (e) Weber-Morris.

Pada hasil plot pemodelan isoterm adsorpsi larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif TSAC 232 dan TSAC 2321 (Gambar 7 dan Tabel 4), diperoleh hasil bahwa adsorpsi ion Fe(II)/Cu(II) pada TSAC 232 mengikuti pemodelan Elovich dengan nilai R^2 sebesar 0,9259 dan 0,595. Hasil plot pada TSAC 232 tersebut menunjukkan nilai R^2 pada adsorpsi ion Fe(II) lebih tinggi dibandingkan ion Cu(II), hal ini memperkuat data kinetika adsorpsi ion Fe(II)/Cu(II) dimana proses adsorpsi menggunakan TSAC 232 hanya terjadi pada ion Fe(II). Pada adsorpsi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan TSAC 2321 mengikuti pemodelan yang berbeda yaitu pada ion Fe(II) mengikuti pemodelan Redlich-Peterson (R^2 = 0,9778) dan pada ion Cu(II) mengikuti pemodelan Elovich (R^2 = 0,396). Meskipun nilai R^2 pada adsorpsi ion Fe(II) cukup tinggi (mendekati 1) namun nilai parameter β mencapai 1,9121, dimana berdasarkan penelitian (Ayawei *et al*., 2017), nilai parameter β pada pemodelan Redlich-Peterson adalah pada rentang 0 s/d 1, sehingga hasil pemodelan ini dianggap tidak valid. Hasil ini juga sesuai dengan data plot kinetika adsorpsi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan TSAC 2321 yang menunjukkan data bahwa proses adsorpsi hanya terjadi pada ion Cu(II). Hasil pemodelan isoterm adsorpsi ion Fe(II) menggunakan TSAC 232 dan ion Cu(II) menggunakan TSAC 2321 masing-masing mengikuti pemodelan Elovich yang mengasumsikan

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

bahwa proses adsorpsi terjadi secara *multilayer* dimana situs adsorpsi dapat bertambah secara fungsi eksponensial (Aldemir *et al*., 2023).



Gambar 7. Plot pemodelan isoterm adsorpsi larutan multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif TSAC 232 dan TSAC 2321 (a) Freundlich, (b) Redlich-Peterson (c) Elovich, dan (d) Jovanovich.

Efektivitas dan Selektivitas Adsorpsi RHAC dan TSAC pada Larutan Multi Ion Fe(II)/Cu(II)

Berdasarkan hasil plot pemodelan kinetika dan isoterm adsorpsi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC dan TSAC dapat diketahui bahwa proses refluks berpengaruh pada kapasitas adsorpsi maupun selektivitas adsorpsi. Kajian selektivitas adsorpsi dapat ditentukan berdasarkan data kinetika adsorpsi dengan menghitung nilai %adsorpsi sesuai perlakuan variasi waktu. Berdasarkan Tabel 5, terlihat bahwa proses adsorpsi pada RHAC lebih dulu mencapai kondisi optimum pada ion Fe(II) dibandingkan Cu(II) dengan nilai %adsorpsi mencapai 73,64% (RHAC 232). Akan tetapi, nilai %adsorpsi ini cenderung menurun pada RHAC 2321 untuk ion Fe(II), hal ini diperkirakan karena adanya kenaikan %unsur Si akibat proses refluks sehingga mengganggu kesetimbangan adsorpsi (Gambar 2). Di sisi lain, hasil berbeda diperoleh pada nilai %adsorpsi ion Cu(II) menggunakan RHAC 2321 yang meningkat menjadi 85,23% dibandingkan RHAC 232 dengan nilai 31,58%. Hal ini menunjukkan bahwa proses refluks berpengaruh pada karakter selektivitas adsorpsi karbon aktif RHAC, dimana RHAC 232 (tanpa refluks) cenderung menjerap ion Fe(II) dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,3426 mg/g dan RHAC 2321 (refluks) cenderung menjerap ion Cu(II) dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,4134 mg/g.

Tabel 5. Efektivitas adsorpsi karbon aktif RHAC pada larutan multi ion Fe(II)/Cu(II).

Menit ke-	RHAC 232				RHAC 2321			
	Fe(II)		Cu(II)		Fe(II)		Cu(II)	
	C (mg/L)	%Ads	C (mg/L)	%Ads	C (mg/L)	%Ads	C (mg/L)	%Ads
0	1,8607	0,00	1,7819	0,00	1,7341	0,00	1,9400	0,00
10	**0,4904**	**73,64**	1,3482	24,34	1,0309	40,55	0,4904	74,72
20	0,5213	71,98	1,2778	28,29	**0,7221**	**58,36**	0,3658	81,14
30	0,5770	68,99	1,3247	25,66	1,0137	41,54	0,3545	81,73
40	0,6265	66,33	1,2778	28,29	1,0309	40,55	0,3092	84,06
50	0,6388	65,67	1,2309	30,92	0,9623	44,51	**0,2865**	**85,23**
60	0,6698	64,00	**1,2192**	**31,58**	0,9623	44,51	0,4451	77,06
70	0,7687	58,69	1,2778	28,29	0,9966	42,53	0,2865	85,23

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

Pada proses adsorpsi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif TSAC juga mengalami fenomena yang serupa dengan karbon aktif RHAC (Tabel 6), dimana proses adsorpsi lebih dulu mencapai optimum pada ion Fe(II) dengan nilai %adsorpsi mencapai 43,34% (TSAC 232). Penurunan nilai %adsorpsi ion Fe(II) terjadi pada TSAC 2321, namun nilai %adsorpsi ion Cu(II) meningkat menjadi 95,33% dibandingkan TSAC 232 sebesar 90,37%. Proses refluks pada karbon TSAC mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi pada ion Cu(II), dimana pada TSAC 232 sebesar 0,4609 mg/g dan pada TSAC 2321 mencapai 0,5556 mg/g.

Tabel 6. Efektivitas adsorpsi karbon aktif TSAC pada larutan multi ion Fe(II)/Cu(II).

Menit ke-	TSAC 232				TSAC 2321			
	Fe(II)		Cu(II)		Fe(II)		Cu(II)	
	C (mg/L)	%Ads	C (mg/L)	%Ads	C (mg/L)	%Ads	C (mg/L)	%Ads
0	1,0804	0,00	2,0403	0,00	1,5358	0,00	2,3311	0,00
10	0,8148	24,58	0,3553	82,59	**1,0605**	**30,95**	0,3681	84,21
20	0,7939	26,52	0,2943	85,58	1,1777	23,31	0,2323	90,03
30	**0,6122**	**43,34**	0,5995	70,62	1,2884	16,11	0,2570	88,97
40	0,7449	31,05	0,3309	83,78	1,3079	14,84	0,3311	85,80
50	0,6401	40,75	0,4286	78,99	1,2949	15,68	0,2200	90,56
60	0,7240	32,99	**0,1966**	**90,37**	1,2949	15,68	0,1583	93,21
70	0,7589	29,75	0,5629	72,41	1,2949	15,68	**0,1089**	**95,33**

Perbedaan selektivitas adsorpsi pada multi ion Fe(II)/Cu(II) menggunakan karbon aktif RHAC dan TSAC dapat disebabkan karena perbedaan kandungan logam dan ion di dalam larutan yang memiliki muatan serta sifat yang berbeda sehingga proses adsorpsi menjadi lebih kompleks (Batool *et al*., 2018; Riyanto *et al*., 2021b). Beberapa penelitian lainnya menunjukkan bahwa perbedaan jari-jari ionik logam juga berpengaruh pada proses interaksi adsorbat dengan adsorben dimana efek sterik mampu mempercepat penjerapan ion dengan jari-jari ionik besar hingga mencapai titik jenuh dan ion dengan jari-jari ionik kecil cenderung lebih mudah berdifusi ke situs yang tidak dapat dijangkau oleh ion dengan jari-jari hidrasi yang lebih besar (Bohli, 2013; Xing *et al*., 2016). Berdasarkan penelitian (Krishnamoorthy *et al*., 2020; Zaranyika *and* Chirinda, 2011) menyatakan bahwa diameter ionik masing-masing ion Fe(II) dan Cu(II) adalah d = 0,77Å dan d = 0,73 Å. Penelitian Parlar *and* Yortsos (1988) juga menjelaskan adanya fenomena perkolasi dalam proses adsorpsi, dimana distribusi pori dan topologi permukaan dari adsorben mampu berpengaruh pada tingkat kejenuhan permukaan adsorben. Pada suatu titik, adsorben akan jenuh dan melepaskan adsorbat sehingga seolah-olah teregenerasi lalu menjerap adsorbat kembali.

KESIMPULAN

Karbon aktif RHAC dan TSAC memiliki gugus aktif O–H, C–H *stretching*, C≡C, C=C/C=O, C–H, dan P=O/O–C dengan nilai persentase unsur pada karbon aktif RHAC dan TSAC didominasi oleh unsur C (~53%) dan O (~48,1%). Proses refluks setelah karbonisasi berpengaruh pada karakter luas permukaan karbon aktif dengan luas permukaan terbesar ada pada karbon aktif TSAC 2321 (refluks) sebesar 49,6795 m²/g, namun tidak berpengaruh pada karbon aktif RHAC 2321. Pada kajian kinetika adsorpsi, proses adsorpsi multi ion Fe(II)/Cu(II) mengikuti pemodelan PSO. Pada kajian isoterm adsorpsi, proses adsorpsi multi ion Fe(II)/Cu(II) mengikuti pemodelan yang bervariasi seperti Redlich-Peterson, Elovich, dan Jovanovich. Proses refluks pada pembuatan karbon aktif dapat mempengaruhi kualitas adsorpsi khususnya kapasitas dan selektivitas adsorpsi. Karbon aktif RHAC 232 (tanpa refluks) cenderung menjerap ion Fe(II) dengan kapasitas adsorpsi yaitu 0,3426 mg/g dan RHAC 2321 (refluks) cenderung menjerap ion Cu(II) dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,4134 mg/g. Karbon aktif TSAC 232 (tanpa refluks) dan 2321 (refluks) cenderung menjerap ion Cu(II) dengan kapasitas adsorpsi masing-masing sebesar 0,4609 mg/g dan 0,5556 mg/g. Dengan kata lain, adsorpsi ion Fe(II) terbaik ada pada karbon aktif RHAC 232 dan adsorpsi ion Cu(II) terbaik ada pada karbon aktif TSAC 2321.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

KONTRIBUSI PENULIS

CAR: Supervisi, Konseptualisasi, Metodologi, Analisis Data, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip; YA, FTAC, YKSP, NVWP, IPS, JDMY, dan MET: Asisten Penelitian dan Analisis Data; SH: Kolaborator pendanaan; FH dan WR: Kolaborator instrumentasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti berterimakasih atas bantuan pendanaan penelitian melalui Skema Hibah Penelitian Fundamental Tahun Anggaran 2023 (No. Kontrak: 055/SPK-PW/RIK/7/2023) kepada Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) untuk pembelian bahan kimia (*reagent*) dan analisis material karbon aktif RHAC dan TSAC.

DAFTAR PUSTAKA

Aldemir, A., Turan, A., Kul, A.R., and Koyuncu, H., 2023. Comprehensive Investigation of Basic Red 46 Removal by Pinecone Adsorbent: Experimental, Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies. *International Journal of Environmental Science* and *Technology*, 20, 2601–2622. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04456-6.

Aprilia, Y., Arnelli, A., and Astuti, Y., 2020. Modification of Activated Carbon from Rice Husk Using Hexadecyltrimethylammonium Bromide (HDTMA-Br) Surfactant and ZnCl2 Activator and Microwaves for Nitrate Ion Adsorption. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 23, 377–382. https://doi.org/10.14710/JKSA.23.11.377-382.

Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., and Otero, J., 2002. Combustion Behaviour of Rice Husk in a Bubbling Fluidised Bed. *Biomass* and *Bioenergy*, 23, 171–179. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00046-6.

Ayawei, N., Ebelegi, A.N., and Wankasi, D., 2017. Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–11. https://doi.org/10.1155/2017/3039817.

Azevedo, D.C.S., Araújo, J.C.S., Bastos-Neto, M., Torres, A.E.B., Jaguaribe, E.F., and Cavalcante, C.L., 2007. Microporous Activated Carbon Prepared from Coconut Shells Using Chemical Activation with Zinc Chloride. *Microporous* and *Mesoporous Materials*, 100, 361–364. https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2006.11.024.

Batool, F., Akbar, J., Iqbal, S., Noreen, S., and Bukhari, S.N.A., 2018. Study of Isothermal, Kinetic, and Thermodynamic Parameters for Adsorption of Cadmium: An Overview of Linear and Nonlinear Approach and Error Analysis. *Bioinorganic Chemistry* and *Applications*, 1, 3463724. https://doi.org/10.1155/2018/3463724.

Benjelloun, M., Miyah, Y., Akdemir Evrendilek, G., Zerrouq, F., and Lairini, S., 2021. Recent Advances in Adsorption Kinetic Models: Their Application to Dye Types. *Arabian Journal of Chemistry*, 14, 103031. https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2021.103031.

Bohli, T., 2013. Comparative Study of Bivalent Cationic Metals Adsorption Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) on Olive Stones Chemically Activated Carbon. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 04. https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000158.

Castro, J.B., Bonelli, P.R., Cerrella, E.G., and Cukierman, A.L., 2000. Phosphoric Acid Activation of Agricultural Residues and Bagasse from Sugar Cane: Influence of the Experimental Conditions on Adsorption Characteristics of Activated Carbons. *Industrial* and *Engineering Chemistry Research*, 39, 4166–4172. https://doi.org/10.1021/IE0002677.

Choirunnisa, D.A., 2024. *Modifikasi Karbon Aktif Serbuk Gergaji Kayu dengan Surfaktan dalam Penjerap Limbah Timbal*. Tugas Akhir. Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga.

Dada, A.O., Adekola, F.A., Odebunmi, E.O., Ogunlaja, A.S., and Bello, O.S., 2021. Two–Three Parameters Isotherm Modeling, Kinetics with Statistical Validity, Desorption and Thermodynamic Studies of Adsorption of Cu(II) Ions onto Zerovalent Iron Nanoparticles. *Scientific Reports 2021*, 11, 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-021-95090-8.

FitzPatrick, M., Champagne, P., Cunningham, M.F., and Whitney, R.A., 2010. A Biorefinery Processing Perspective: Treatment of Lignocellulosic Materials for the Production of Value-Added Products. *Bioresource Technology*, 101, 8915–8922. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.125.

Goltsman, B.M., and Yatsenko, E.A., 2024. Modern Fluxing Materials and Analysis of Their Impact on Silicate Structures: A Review. *Open Ceramics*, 17, 100540. https://doi.org/10.1016/J.OCERAM.2024.100540.

Hananto, F.T., 2022. *Pengaruh Metode Pre-Aktivasi dan Rasio Impregnasi Asam Fosfat terhadap Karakteristik*

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

Karbon Aktif Sekam Padi. Tugas Akhir. Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga.

Ho, Y.S., and McKay, G., 1999. Pseudo-Second Order Model for Sorption Processes. *Process Biochemistry*, 34, 451–465. https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5.

Krishnamoorthy, A., Sakthivel, P., Devadoss, I., and Illayaraja Muthaiyaa, V.M., 2020. Structural, Morphological and Photoluminescence Characteristics of Cd0.9-XZn0.1S Quantum Dots: Effect of Fe^{2+} Ion. *Optik*, 205, 164220. https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2020.164220.

Kul, A.R., Koyuncu, H., Turan, A., and Aldemir, A., 2023. Comparative Research of Isotherm, Kinetic, and Thermodynamic Studies for Neutral Red Adsorption by Activated Carbon Prepared from Apple Peel. *Water, Air,* and *Soil Pollution*, 234, 1–26. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06392-8.

Kurniawati, P., Wiyantoko, B., Kurniawan, A., and Purbaningtias, T.E., 2016. Kinetic Study of Cr(VI) Adsorption on Hydrotalcite Mg/Al with Molar Ratio 2:1. *Eksakta*, 13, 11–21. https://doi.org/10.20885/eksakta.vol13.iss1-2.art2.

Largitte, L., and Pasquier, R., 2016. A Review of the Kinetics Adsorption Models and Their Application to the Adsorption of Lead by an Activated Carbon. *Chemical Engineering Research* and *Design*, 109, 495–504. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.006.

Liou, T.H., and Wu, S.J., 2009. Characteristics of Microporous/Mesoporous Carbons Prepared from Rice Husk under Base- and Acid-Treated Conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 693–703. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.06.056.

Luo, Y., Li, D., Sun, X., Cao, Q., and Liu, X., 2018. The Performance of Phosphoric Acid in the Preparation of Activated Carbon-Containing Phosporus Species from Rice Husk Residue. *Journal of Materials Science*,. https://doi.org/10.1007/s10853-018-03220-x.

Majd, M.M., Kordzadeh-Kermani, V., Ghalandari, V., Askari, A., and Sillanpää, M., 2022. Adsorption Isotherm Models: A Comprehensive and Systematic Review (2010−2020). *Science of the Total Environment*, 812. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151334.

Maulana, L.F., Imami Ghozali, H., Fikri, M.H., Agustina, E.I., and Ali, M., 2020. Pemanfaatan Limbah Serbuk Kayu di Desa Ranjok Kecamatan Gunung Sari Kabupaten Lombok Barat Menjadi Biomass Pellet Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal PEPADU*, 1, 133–138. https://doi.org/10.29303/jurnalpepadu.v1i1.87.

Media, K., 2020. *Kisah Sukses Gapoktan Tani Subur Kabupaten Semarang Giling Padi 1,5 Ton Per Hari*. <https://jateng.tribunnews.com/2020/04/21/kisah-sukses-gapoktan-tani-subur-kabupaten-semarang-giling-padi-15-ton-per-hari> (diakses 23 Mei 2023).

Mistry, B.D., 2009. *A Handbook of Spectroscopic Data Chemistry (UV, IR, PMR, 13CNMR* and *Mass Spectroscopy)*. Oxford Book Company, Jaipur, India.

Nguyen, H.D., Tran, H.N., Chao, H.P., and Lin, C.C., 2019. Activated Carbons Derived from Teak Sawdust-Hydrochars for Efficient Removal of Methylene Blue, Copper, and Cadmium from Aqueous Solution. *Water*, 11, 2581. https://doi.org/10.3390/W11122581.

Parlar, M., and Yortsos, Y.C., 1988. Percolation Theory of Vapor Adsorption—Desorption Processes in Porous Materials. *Journal of Colloid* and *Interface Science*, 124, 162–176. https://doi.org/10.1016/0021-9797(88)90337-2.

Prabawanti, M.A.H., 2020. *Kementan Perkirakan Produksi Beras Indonesia Surplus 6,4 Juta Ton*. <https://money.kompas.com/read/2020/05/01/123000326/kementan-perkirakan-produksi-beras-indonesia-surplus-64-juta-ton?page=all> (diakses pada 13 Juli 2020).

Puziy, A.M., Poddubnaya, O.I., Martínez-Alonso, A., Suárez-García, F., and Tascón, J.M.D., 2002. Synthetic Carbons Activated with Phosphoric - Acid I. Surface Chemistry and Ion Binding Properties. *Carbon*, 40, 1493–1505. https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00317-7.

Rahim, M.A.A., Ismail, M.M., and Mageed, A.M.A., 2015. Production Of Activated Carbon And Precipitated White Nanosilica From Rice Husk Ash. *International Journal of Advanced Research*, 3, 491–498.

Revellame, E.D., Fortela, D.L., Sharp, W., Hernandez, R., and Zappi, M.E., 2020. Adsorption Kinetic Modeling Using Pseudo-First Order and Pseudo-Second Order Rate Laws: A Review. *Cleaner Engineering* and *Technology*, 1, 100032. https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032.

Riyanto, C.A., Kurniawan, E., and Aminu, N.R., 2021a. Pengaruh NaOH dan Suhu Aktivasi Terhadap Karakteristik Karbon Aktif Sekam Padi Teraktivasi H_3PO_4. *Rafflesia Journal of Natural* and *Applied Sciences*, 1, 59–68. https://doi.org/10.33369/rjna.v1i2.16864.

Riyanto, C.A., Pattiserlihun, A., Kurniawan, E., Andiani, B.Y., and Perdani, F.P., 2022. Surface Analysis of Activated Carbon from Rice Husk Based on Carbonization and Activation Method. *Proceeding of the 1st International Conference on Standardization* and *Metrology (Iconstam) 2021*, 2664, 020005.

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

https://doi.org/10.1063/5.0103325.

Riyanto, C.A., and Prabalaras, E., 2019. The Adsorption Kinetics and Isoterm of Activated Carbon from Water Hyacinth Leaves (Eichhornia Crassipes) on Co(II). *Journal of Physics: Conference Series*, 1307. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1307/1/012002.

Riyanto, C.A., Raharjianti, B.M., and Aminu, N.R., 2021b. Studi Kinetika dan Isoterm Adsorpsi Ion Fe (III) dan Mn (II) pada Karbon Aktif Batang Eceng Gondok. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 15, 44–55. https://doi.org/10.26578/JRTI.V15I1.6633.

Riyanto, C.A., Yonggulemba, J.D.M., Stefani, D.A., Brotosudarmo, T.W., Anggaran, D., Pradana, Y.K.S., Ariesto, Y., Christyawardana, F.T.A., Sari, I.P., Puspita, N.V.W., and Lutiyono, L., 2024. Selektivitas Adsorpsi Campuran Biner Fe(II)/Cu(II) Menggunakan Karbon Aktif dari Sekam Padi dan Serbuk Gergaji Kayu Jati: *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 10, 58–68. https://doi.org/10.22487/KOVALEN.2024.V10.I1.17060.

Sa'diyah, K., Suharti, P.H., Hendrawati, N., Pratamasari, F.A., and Rahayu, O.M., 2021. Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu Sebagai Karbon Aktif Melalui Proses Pirolisis dan Aktivasi Kimia. *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, 4, 91. https://doi.org/10.25273/cheesa.v4i2.8589.91-99.

Sa'diyah, K., Susanto, Witasari, W.S., and Hendrawati, N., 2023. The Making of Adsorbents from Teak Sawdust through the Pyrolysis Process with the Influence of NaOH Activator Concentration. *AIP Conference Proceedings*, 2531. https://doi.org/10.1063/5.0125814/2887500.

Sanka, P.M., Rwiza, M.J., and Mtei, K.M., 2020. Removal of Selected Heavy Metal Ions from Industrial Wastewater Using Rice and Corn Husk Biochar. *Water, Air, & Soil Pollution 2020 231:5*, 231, 1–13. https://doi.org/10.1007/S11270-020-04624-9.

Sarangi, M., Nayak, P., and Tiwari, T.N., 2011. Effect of Temperature on Nano-Crystalline Silica and Carbon Composites Obtained from Rice-Husk Ash. *Composites Part B: Engineering*, 42, 1994–1998. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.05.026.

Shaban, M., Abukhadra, M.R., Hamd, A., Amin, R.R., and Abdel Khalek, A., 2017. Photocatalytic Removal of Congo Red Dye Using MCM-48/Ni2O3 Composite Synthesized Based on Silica Gel Extracted from Rice Husk Ash; Fabrication and Application. *Journal of Environmental Management*, 204, 189–199. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.08.048.

Shrestha, D., Nayaju, T., Kandel, M.R., Pradhananga, R.R., Park, C.H., and Kim, C.S., 2023. Rice Husk-Derived Mesoporous Biogenic Silica Nanoparticles for Gravity Chromatography. *Heliyon*, 9, e15142. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15142.

Singh, R., Srivastava, P., Singh, P., Sharma, A.K., Singh, H., and Raghubanshi, A.S., 2019. Impact of Rice-Husk Ash on the Soil Biophysical and Agronomic Parameters of Wheat Crop under a Dry Tropical Ecosystem. *Ecological Indicators*, 105, 505–515. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.04.043.

Stochero, N.P., Marangon, E., Nunes, A.S., and Tier, M.D., 2017. Development of Refractory Ceramics from Residual Silica Derived from Rice Husk Ash and Steel Fibres. *Ceramics International*, 43, 13875–13880. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.07.111.

Sudarja, and Caroko, N., 2012. Kaji Eksperimental Efektifitas Penyerapan Limbah Cair Industri Batik Taman Sari Yogyakarta Menggunakan Arang Aktif Mesh 80 dari Limbah Gergaji Kayu Jati. *Ilmiah Semesta Teknika*, 14, 50–58. https://doi.org/10.18196/st.v15i1.443.

Sukyankij, Saychol, Sukyankij, Sopida, and Panich-Pat, T., 2023. Effect of Co-Fertilizer Application and Dolomite Amendments on Yield and Grain Quality of Rice Grown on Post-Active Acid Sulfate Soil. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 45, 311–321. https://doi.org/10.17503/AGRIVITA.V45I2.4079.

Sumanjit, Rani, S., and Mahajan, R.K., 2016. Equilibrium, Kinetics and Thermodynamic Parameters for Adsorptive Removal of Dye Basic Blue 9 by Ground Nut Shells and Eichhornia. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S1464–S1477. https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2012.03.013.

Surbakti, A., Sukendi, S., and Taer, E., 2016. Komposit Karbon Aktif dari Bahan Serbuk Gergaji Kayu Karet dan Nanomagnetik Fe_3O_4 + PVDF Sebagai Bahan Penyerap Limbah Cair Berbasis Logam Berat. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 3, 42. https://doi.org/10.31258/dli.3.1.p.42-46.

Tan, K.L., and Hameed, B.H., 2017. Insight into the Adsorption Kinetics Models for the Removal of Contaminants from Aqueous Solutions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 74, 25–48. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.024.

Wardani, R.A.K., Jumiati, and Puspita Sari, D., 2017. Pemanfaatan Limbah Gergaji Kayu Sebagai Media Tanam Jamur dan Kain Perca untuk Bahan Baku dalam Packaging Fung – Cube. *Proceeding Biology Education Conference*, 23 September 2023, Surakarta, Indonesia, 14, pp. 83–87.

Widyasari, E., Supriadi, S., and Said, I., 2021. Adsorption Capacity of Activated Charcoal Made of Rice Husk on

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183

Cd(II) Metal Ions. *Jurnal Akademika Kimia*, 10, 213–217. https://doi.org/10.22487/J24775185.2021.V10.I4.PP213-218.

Xiao, H., Peng, H., Deng, S., Yang, X., Zhang, Y., and Li, Y., 2012. Preparation of Activated Carbon from Edible Fungi Residue by Microwave Assisted K_2CO_3 Activation—Application in Reactive Black 5 Adsorption from Aqueous Solution. *Bioresource Technology*, 111, 127–133. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.02.054.

Xing, B., Vecitis, C.D., and Senesi, N., 2016. *Engineered Nanoparticles* and *the Environment: Biophysicochemical Processes* and *Toxicity*. John Wiley & Sons, New Jersey.

Zaranyika, M.F., and Chirinda, T., 2011. Heavy Metal Speciation Trends in Mine Slime Dams: A Case Study of Slime Dams at a Goldmine in Zimbabwe. *Journal of Environmental Chemistry* and *Ecotoxicology*, 3, 103–115.

Zhang, Y., Pan, K., and Zhong, Q., 2013. Characteristics of Activated Carbon and Carbon Nanotubes as Adsorbents To Remove Annatto (Norbixin) in Cheese Whey. *Journal of Agricultural* and *Food Chemistry*, 61, 9230–9240. https://doi.org/10.1021/jf402537y.

Copyright © 2025, Universitas Sebelas Maret, ISSN 1412-4092, e ISSN 2443-4183