MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v5i4.6591

KINETIKA ADSORPSI ION CU^{2+} DENGAN ADSORBEN SILIKA *XEROGEL* DARI ABU TERBANG

Adsorption Kinetics of Cu^{2+} Ions Using Silica Xerogel Adsorbent Derived from Fly Ash

Mila Lusy Tri Nandi & Edi Nasra
Universitas Negeri Padang
milalusytrinandi123@gmail.com

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
May 22, 2025	Jun 20, 2025	Jul 2, 2025	Jul 7, 2025

Abstract

Contamination by heavy metal ions such as Cu^{2+} in water sources poses a serious environmental issue due to their toxic effects on living organisms. This study aims to evaluate the adsorption kinetics of Cu^{2+} ions using silica xerogel synthesized from fly ash. The synthesis was carried out via the sol-gel method, and material characterization was performed using X-Ray Fluorescence (XRF) to determine the silica content. The adsorption process was conducted in batch mode with contact time variations of 30, 60, 90, 120, 150, and 180 minutes. Analysis results showed that the fly ash contained 54.167% silica, and the optimal adsorption capacity was achieved at 150 minutes with a value of 44.982 mg/g. The adsorption kinetics were best described by the pseudo-second-order model, indicated by a coefficient of determination (R^2) of 0.99947, suggesting that the adsorption process follows a chemisorption mechanism. These findings imply that silica xerogel derived from fly ash has significant potential as an effective adsorbent for environmental remediation of Cu^{2+} ion contamination.

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

Keywords: Silica Xerogel; Metal Ion Adsorption; Pseudo-Second-Order Kinetics; Fly Ash; Chemisorption

Abstrak: Kontaminasi ion logam berat seperti Cu^{2+} dalam sumber air merupakan isu lingkungan yang serius karena sifat toksiknya terhadap organisme hidup. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinetika adsorpsi ion Cu^{2+} menggunakan *silika xerogel* yang disintesis dari abu terbang. Sintesis dilakukan melalui metode *sol-gel*, dan karakterisasi material dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) untuk menentukan kandungan silika. Proses adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan variasi waktu kontak 30, 60, 90, 120, 150, dan 180 menit. Hasil analisis menunjukkan bahwa abu terbang mengandung silika sebesar 54,167%, dan kapasitas adsorpsi optimum diperoleh pada waktu kontak 150 menit sebesar 44,982 mg/g. Model kinetika adsorpsi yang paling sesuai adalah model orde semu dua, ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,99947, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung melalui mekanisme kemisorpsi. Temuan ini mengimplikasikan bahwa *silika xerogel* dari abu terbang berpotensi sebagai adsorben efektif untuk remedi lingkungan terhadap kontaminasi ion Cu^{2+}.

Kata Kunci: *Silika Xerogel*; Adsorpsi Ion Logam; Kinetika Orde Semu Dua; Abu Terbang; Kemisorpsi.

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia telah memicu pertumbuhan industri yang signifikan. Di satu sisi, ini memberikan kontribusi positif bagi masyarakat melalui penyediaan kebutuhan, penguatan ekonomi, dan penyediaan lapangan kerja. Namun di sisi lain, perluasan industri juga membawa dampak negatif, terutama peningkatan pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh pembuangan limbah industri yang tidak terkendali. Di antara berbagai jenis limbah industri, limbah yang mengandung logam berat menjadi perhatian utama karena dampaknya yang besar (L. Hadi Adha, Zaeni Asyhadie, 2020) .

Tembaga merupakan salah satu logam esensial yang dibuthkan dalam tubuh. Meskipun tembaga dibutuhkan tubuh dalam jumlah kecil, kadar berlebih bersifat toksik dan mengganggu metabolisme. Batas aman tembaga dalam darah menurut WHO adalah 0,8-1,2 mg/kg (Anggraini & Fitria, 2021). Melampaui batas ini membahayakan. Oleh karena itu, pengurangan ion Cu^{2+} dalam limbah diperlukan untuk melindungi lingkungan (Amanah et al., 2022).

Penanganan ion Cu^{2+} di perairan biasanya melibatkan metode seperti pengendapan kimia, pelarutan, filtrasi membran, pertukaran ion, dan koagulasi. Sayangnya, teknik-teknik ini seringkali memiliki kendala dalam hal biaya, efisiensi, dan dampak lingkungan. Dalam konteks ini, metode adsorpsi muncul sebagai alternatif yang lebih sering digunakan dan lebih efisien untuk meningkatkan kualitas pengolahan limbah (Ni'mah et al., 2024).

Metode adsorpsi, efektif dalam mengurangi kadar logam berat, zat warna sintetis, dan kontaminan kimia lainnya di udara, bekerja dengan menggunakan adsorben—material yang mampu menarik dan menahan zat lain pada permukaannya. Kualitas adsorben sangat ditentukan oleh luas permukaan yang besar dan volume pori yang sesuai (Bilgiç & Çimen, 2019). Efektivitas metode ini sangat bergantung pada kemampuan dan jenis adsorben dalam mengikat molekul target (Amor Nurdila et al., 2015). Berbagai material, baik organik maupun anorganik, dapat dimanfaatkan sebagai adsorben. Contoh adsorben organik dengan kemampuan baik dalam mengikat logam berat meliputi kulit durian, sekam padi, dan kulit pisang kepok (Afriani & Nasra, 2024). Sebagai ilustrasi, arang aktif dari kulit durian dilaporkan mampu menyerap 0,4951 mg/g ion Cd^{2+} (Marlinawati et al., 2015), sekam padi dapat menyerap 0,3205 mg/g ion Cu^{2+} (Halim, 2021), dan kulit pisang kepok memiliki kapasitas adsorpsi 1,773 mg/g untuk ion Cu^{2+} (Alifaturrahma & Hendriyanto, 2018). Selain itu, silika xerogel dari abu terbang batu bara merupakan contoh adsorben anorganik yang berpotensi (Cynthia & Nasra, 2024).

Proses adsorpsi cairan pada permukaan padatan dapat dipelajari melalui kinetika adsorspi. Kinetika adsorpsi merupakan salah satu parameter yang sering diteliti untuk mengevaluasi karakteristeik dari adsorben yang digunakan terutama dalam rehabilitasi lingkungan. Ada banyak model kinetika adsorpsi yang telah dikembangkan untuk dapat digunakan sebagai sarana memprediksi laju adsorpsi suatu adsorbat pada adsorben tertentu (Nafi'ah, 2016). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan model kinetika yang sesuai pada proses adsorpsi ion Cu^{2+} dengan melihat kapasitas penyerapan silika xerogel dari abu terbang dalam variasi waktu kontak. Analisa kinetika didasarkan pada kinetika orde satu dan orde dua.

METODE

Penelitian ini dilakukan bulan November 2025 sampai dengan April 2025 di Laboratorium Penelitian Departemen kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.penelitian ini menggunakan alat-alat gelas seperti gelas

kimia, labu ukur, gelas ukur, pipet, spatula, batang pengaduk, *magnetik stirrer, spin bar,* corong kaca, kertas saring, botol semprot, pH meter, timbangan analitik, *hot plate*, oven, dan termometer. Sedangkan dalam karakterisasi menggunakan FTIR, XRD dan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) dan XRF. Adapun bahan yang digunakan yaitu abu terbang batu bara yang didapatkan dari PLTU Teluk Sirih Padang, garam $Cu(NO_3)_2.3H_2O$, Asam nitrat (HNO_3), asam klorida (HCl) teknis, kristal natrium hidroksida (NaOH), dan aquades.

Sintesis Silika Xerogel

Untuk membuat silika xerogel, 25 gram abu terbang yang sudah dicuci dengan HCl dilarutkan dalam 600 mL NaOH 7 M (Cynthia & Nasra, 2024). Campuran ini lalu diaduk selama 1 jam pada 80°C hingga menjadi larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) yang kental. Larutan ini disaring, kemudian ditambahkan HCl 3 M sampai pH-nya menjadi 7. Gel yang terbentuk didiamkan selama 18 jam di suhu ruang, lalu dikeringkan di oven 70°C selama 5 jam menjadi silika xerogel (Guzel Kaya et al., 2020). Silika xerogel yang dibuat ini selanjutnya dijelaskan dengan XRD dan FTIR. Jumlah silika xerogel dalam abu terbang batu bara dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\%\ yield = \frac{massa\ silika\ xerogel}{massa\ abu\ terbang} \times 100\% \qquad (1)$$

Kinetika Adsorpsi

50 mL larutan ion logam Cu^{2+} dikontakkan dengan 0,25 g adsorben silika xerogel pada konsentrasi larutan 250 ppm dan pH 3. . Larutan diaduk dengan kecepatan 200 rpm selama 30, 60, 90, 120 dan 150 menit. Larutan disaring dan konsentrasi sisa ion Cu^{2+} dalam larutan diukur menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) (Al-Qadri & Alsaiari, 2023). Model persamaan kinetika orde semu satu sebagai berikut (Nurhidayati et al., 2022 :

$$\log(q0 - qt) - \log qe - \frac{k1}{2.003}t \qquad (2)$$

Model kinetika adsorpsi orde semu dua sebagai berikut :

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q^2} + \frac{1}{qe}t \qquad (3)$$

Keterangan:

qt : jumlah zat yang terserap pada waktu tertentu (mg/g)

q_e: kapasitas adsorpsi saat keadaan setimbang (mg/g)

k_1: nilai tetapan psudo orde satu (min^{-1})

t: waktu kontak (menit)

k_2: nilai tetapan psudo orde dua (g/mg $.min^{-1}$)

HASIL

Sintesis Silika Xerogel

Silika xerogel merupakan material yang dapat disintesis dari abu terbang. Hasil sintesis silika xerogel dapat dikarakterisasi menggunkan XRF untuk melihat komposisi dan kadar senyawa yang terdapat dalam silika xerogel. Abu terbang sendiri memiliki kandungan silika yang besar sebagai komponen utama. Untuk menghilangkan oksida logam ini, digunakan HCl 3 M sebagai zat yang dapat melarutkan oksida logam lain. Hasil karakterisasi abu terbang dengan XRF dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil karakterisasi abu terbang dan silika xerogel dengan XRF

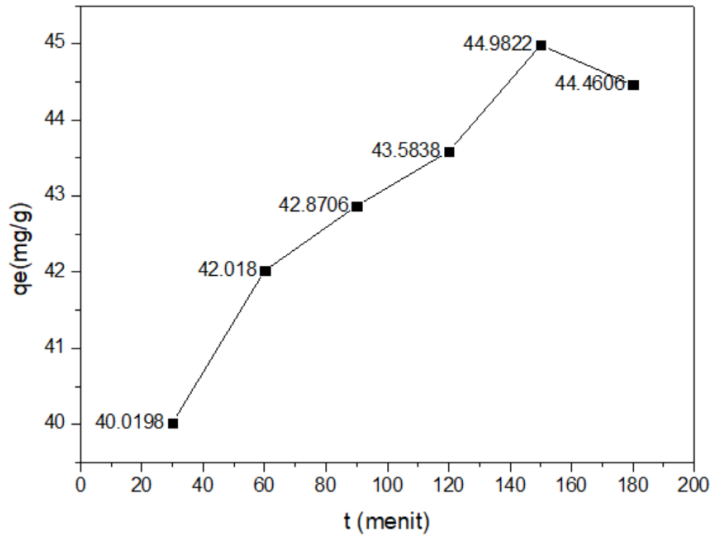
Kandungan Senyawa	Komposisi (%)	
	Abu setelah dicuci HCl	Silika Xerogel yang disintesis
SiO_2	54,167	69,09
Fe_2O_3	16,824	0,399
Al_2O_3	16,226	14,48
CaO	5,219	1,463
MnO	0,339	0,019
As_2O_3	0,006	0,001
SrO	0,107	0,002
Y_2O_3	0,011	0
In_2O_3	0,062	0

Berdasarkan tabel 1 didapatkan hasil bahwa pada abu terbang tidak hanya mengandung silika, namun juga mengandung oksida logam lain dengan persentase yang lebih sedikit. Silika merupakan komponen utama yang terkandung didalam abu terbang dengan persentase silika sebesar 54,167%. Hasil abu terbang yang dicuci dengan HCl selanjutnya akan disintesis menjadi silika xerogel. Silika xerogel yang dihasilkan akan dikarakterisasi

menggunakan XRF. Hasil XRF silika xerogel pada tabel 1 menjelaskan kandungan silika pada silika xerogel yaitu sebesar 69,09%.

Kinetika Adsorpsi

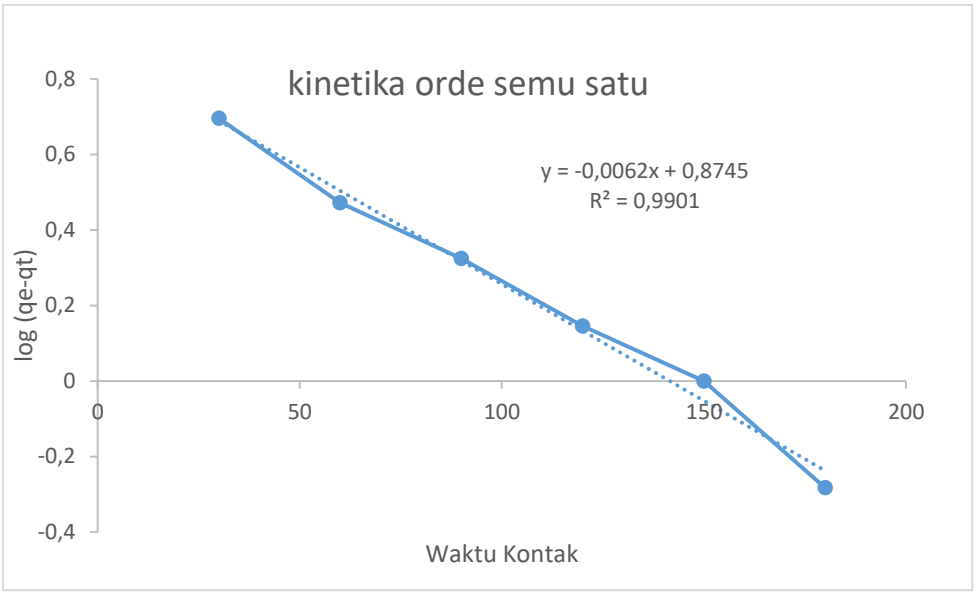
Waktu kontak merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kapasitas penyerapan ion logam Cu^{2+}. Waktu kontak dapat divariasikan untuk menentukan waktu penyerapan optimum silika xerogel, serta mengetahui hubungan waktu kontak dengan kapasitas penyerapan ion logam Cu^{2+}. Gambar dibawah menunjukkan hubungan antara kapasitas adsorpsi Cu^{2+} dengan waktu.



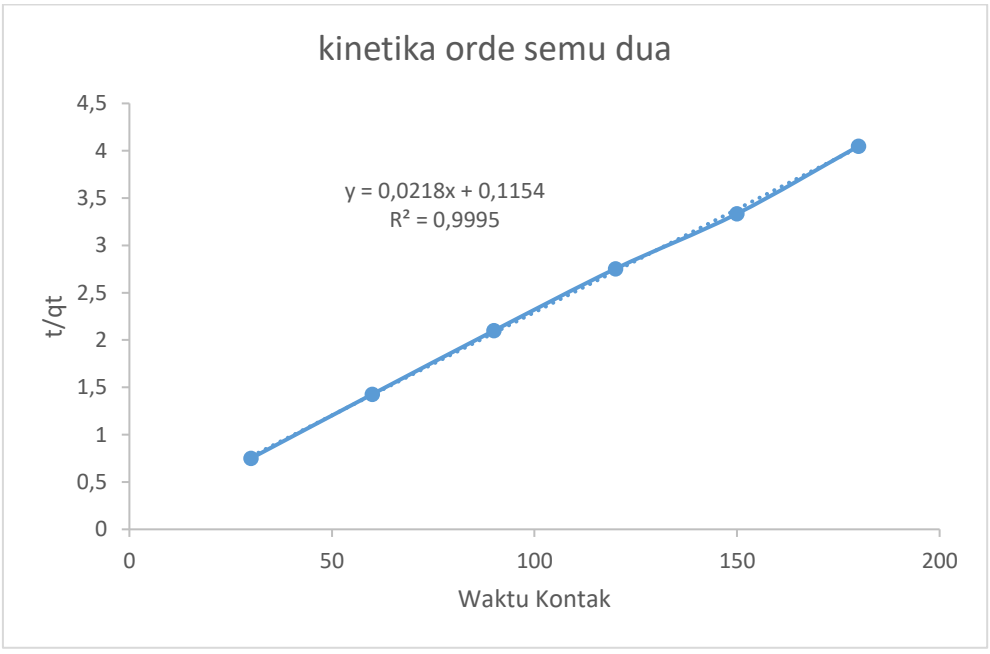
Gambar 1. Pengaruh waktu kontak terhadap ion logam Cu^{2+}

Berdasarkan gambar 1 disimpulkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya waktu. Waktu kesetimbangan adsorpsi terjadi pada 150 menit dengan kapasitas adsorpsi yang didapatkan adalah 44,982 mg/g. Data hasil variasi waktu kontak dapat digunakan untuk menganalisis kinetika adsorpsi.

a.



b.



Gambar 2. a. Grafik kinetika orde semu satu. b. Grafik kinetika orde semu dua

Berdasarkan grafik di atas nilai R^2 yang paling mendekati 1 yaitu pada pada kinetika orde semu dua. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi mengikuti kinetika orde semu dua, penjelasan lebih lanjut dipaparkan pada tabel 2 yang menunjukkan parameter kinetika adsorpsi orde semu satu dan orde semu dua berdasarkan grafik..

Tabel 2. Parameter kinetika adsorpsi orde semu satu dan orde semu dua

Kinetika orde semu satu			Kinetika orde semu dua		
Q_1 (mg/g)	K_1 (min^{-1})	R^2	Q_2 (mg/g)	K_2 (g/mg.min)	R^2
7,4905	0,0142	0,9901	45,9146	0,0041	0,99973

Data pada tabel 1 diperoleh nilai qe teoritis pada kinetika orde semu dua yaitu 45,91 mg/g paling mendekati nilai qe eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi ion Cu^{2+} oleh silika xerogel dari abu terbang mengikuti model kinetika orde semu dua. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Niu et al. (2019), yang menemukan bahwa adsorpsi ion Cu^{2+} menggunakan silika berpori nano juga mengikuti model kinetika orde semu dua (Niu et al., 2019).

PEMBAHASAN

Sintesis Silika Xerogel

Abu terbang yang digunakan dalam sintesis silika xerogel adalah abu terbang yang telah dicuci dengan HCl 3M. Proses pencucian abu terbang bertujuan untuk melarutkan logam-logam yang ada, yang pada akhirnya akan mengurangi jumlah senyawa oksida di dalamnya. Oksida-oksida logam seperti Fe_2O_3, CaO, MnO, dan lainnya akan bereaksi dengan larutan HCl 3 M, membentuk garam-garam yang mudah larut dalam air. Akibatnya, kandungan senyawa-senyawa oksida ini akan berkurang. Pengurangan kandungan oksida logam ini secara langsung menyebabkan peningkatan persentase kadar silika dalam abu terbang.

Analisis lebih lanjut dilakukan pada silika xerogel. Berdasarkan hasil XRF kandungan silika pada silika xerogel adalah 69,09%, sedangkan kandungan oksida logam lainnya seperti Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MnO dan oksida logam lainnya mengalami penurunan kadar. Hasil ini menunjukkan bahwa silika xerogel yang berhasil disintesis belum murni. Perbandingan jumlah SiO_2 yang terdapat pada abu terbang dan pada silika xerogel yang telah disintesis didapatkan *% yeild* sebesar 54,825 %.

Sintesis silika xerogel diawali dengan penambahan NaOH pada abu terbang sehingga menghasilkan natrium silikat (Na_2SiO_3). Reaksi pembentukan natrium silikat adalah:

$$SiO_{2\,(s)} + 2NaOH_{(l)} \rightarrow Na_2SiO_{3(s)} + H_2O_{(g)}$$

Saat dipanaskan, natrium hidroksida (NaOH) terurai sepenuhnya menjadi ion natrium (Na^+) dan ion hidroksida (OH^-). Atom oksigen (O) dalam silika (SiO_2) memiliki keelektronegatifan yang lebih besar, membuatnya cenderung lebih elektropositif dan membentuk zat antara $[SiO_2OH]^-$ yang tidak stabil. Dalam proses ini, terjadi pelepasan air (dehidrogenasi), di mana ion OH^- yang kedua berikatan dengan hidrogen. Dua ion Na^+ kemudian menetralkan muatan negatif yang terbentuk dan berinteraksi dengan ion silikat (SiO_3^{2-}), menghasilkan natrium silikat (Na_2SiO_3)(Safitri et al., 2020).

Penambahan HCl sangat penting dalam proses sintesis silika xerogel dari natrium silikat (Na_2SiO_3). HCl dapat berfungsi untuk netralisasi natrium silikat atau penurunan pH karena natrium silikat adalah basa lemah yang larut dalam air menghasilkan ion silikat ($SiO3^{2-}$) dan ion natrium (Na^+). Penurunan pH memicu protonasi ion silikat, mengubahnya menjadi asam silikat ($Si(OH)_4$). Asam silikat yang terbentuk selanjutnya bereaksi satu sama lain melalui proses polimerisasi. Dalam proses ini, gugus silanol (Si-OH) dari asam silikat saling berkondensasi, melepaskan molekul air dan membentuk rantai dan jaringan silika yang dikenal sebagai silika gel (Udaibah & Priyanto, 2017). Penghilangan molekul air pada silika gel akan menghsilkan silika xerogel. Perbandingan kandungan SiO_2 dalam abu terbang dengan massa silika xerogel hasil sintesis menunjukkan persentase hasil (yield) sebesar 54,825%.

Kinetika Adsorpsi

Variasi waktu kontak yang digunakan adalah 30, 60, 90, 120, 150 dan 180 menit. Berdasarkan variasi waktu ini didapatkan hasil bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya waktu. Adsorpsi Cu^{2+} oleh silika dibagi menjadi dua tahap. Reaksi tahap pertama adalah terjadinya reaksi permukaan, yang meningkatkan kapasitas adsorpsi, sekaligus membuat reaksi adsorpsi menjadi sangat cepat. Tahap kedua adalah adsorpsi bertahap, reaksi adsorpsi yang terjadi relatif lambat dan secara bertahap mencapai kesetimbangan di 150 menit (Al-Qadri & Alsaiari, 2023). Pada waktu kesetimbangan kapasitas adsorpsi yang diperoleh adalah 44,982 mg/g.

Proses kinetika adsorpsi bergantung pada sifat kimia dan fisika adsorben serta kondisi ketika adsorpsi sedang terjadi. Model kinetika adsorpsi menggambarkan persamaan laju pada proses adsorpsi padat-cair. Hasil yang diberikan pada tabel 2 menunjukkan kesesuaian masing-masing model kinetika terhadap adsorpsi ion Cu^{2+} oleh silika xerogel. Hasil yang diberikan pada tabel 2 menunjukkan kinetika adsorpsi digambarkan oleh model kinetika orde semu dua, karena model ini memiliki nilai regresi yang lebih mendekati 1 dibandingkan dengan model kinetika orde semu satu (Nurhidayati et al., 2022).

Berdasarkan Model kinetika orde semu dua menunjukkan bahwa penyerapan ion Cu^{2+} oleh silika xerogel kemungkinan besar terjadi melalui kemisorpsi (adsorpsi kimia). Dalam proses ini, ion Cu^{2+} akan membentuk ikatan kimia, umumnya ikatan kovalen, dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Ini berarti kemisorpsi melibatkan pertukaran atau berbagi elektron (gaya valensi) antara ion logam dan silika xerogel.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa silika xerogel yang disintesis dari abu terbang batu bara *(fly ash)* efektif sebagai adsorben untuk menghilangkan ion logam Cu^{2+} dari larutan berair. Model kinetika adsorpsi yang sesuai adalah kinetika orde semu dua dengan nilai regresi (R^2) 0,99973.

DAFTAR PUSTAKA

Afriani, R., & Nasra, E. (2024). Variasi Waktu Kontak terhadap Penyerapan Ion Cd2+ Menggunakan Xerogel dari Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Pendidikan Tambusai*, *8*, 18658–18662. https://jptam.org/index.php/jptam/article/view/15114%0Ahttps://jptam.org/index.php/jptam/article/download/15114/11521

Al-Qadri, F. A., & Alsaiari, R. (2023). Silica ash from waste palm fronds used as an eco-friendly, sustainable adsorbent for the Removal of cupper (II). *Archives of Environmental Protection*, *49*(2), 30–39. https://doi.org/10.24425/aep.2023.145894

Alifaturrahma, P., & Hendriyanto, O. (2018). Pemanfaatan Kulit Pisang Kepok Sebagai Adsorben Untuk Menyisihkan Logam Cu. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, *8*(2), 105–111.

Amanah, I. N., Indah, F., Indriyani, P., & Asriza, R. O. (2022). Pengaruh Jenis Asam Pada Aktivasi Cangkang Telur Sebagai Adsorben Logam Cu Pada Air Kolong. *Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat*, 117–122.

Amor Nurdila, F., Sumawati Asri, N., & Suharyadi, E. (2015). Adsorpsi Logam Tembaga

(Cu), Besi (Fe), dan Nikel (Ni) dalam Limbah Cair Buatan Menggunakan Nanopartikel Cobalt Ferrite (CoFe2O4) (Halaman 23 s.d. 27). *Jurnal Fisika Indonesia*, *19*(55), 23–27. https://doi.org/10.22146/jfi.24368

Anggraini, D. I., & Fitria, D. (2021). Uji Potensi Sari Buah Nanas (Ananas comosus L.) Terhadap Penurunan Kadar Logam Tembaga (Cu) Dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). *Jfsp*, *7*(1), 2579–4558. http://journal.ummgl.ac.id/index.php/pharmacy

Bilgiç, A., & Çimen, A. (2019). Removal of chromium(vi) from polluted wastewater by chemical modification of silica gel with 4-acetyl-3-hydroxyaniline. *RSC Advances*, *9*(64), 37403–37414. https://doi.org/10.1039/c9ra05810a

Cynthia, & Nasra, E. (2024). Penentuan Kondisi Optimum Waktu Aging Pada Sintesis Silika Xerogel Dari Limbah Abu Terbang. *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu*, *2*(2), 50–53.

Guzel Kaya, G., Yilmaz, E., & Deveci, H. (2020). Synthesis of sustainable silica xerogels/aerogels using inexpensive steel slag and bean pod ash: A comparison study. *Advanced Powder Technology*, *31*(3), 926–936. https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.013

Halim, A. (2021). Pembuatan Adsorben Dari Sekam Padi Sebagai Penyerap Logam Berat Tembaga (Cu) Dan Timbal (Pb) Dalam Air Limbah. *Sustainable Environmental and Optimizing Industry Journal*, *3*(2), 66–74. https://doi.org/10.36441/seoi.v3i2.448

L. Hadi Adha, Zaeni Asyhadie, R. K. (2020). *Digitalisasi Industri Dan Pengaruhnya Terhadap Ketenagakerjaan Dan Hubungan Kerja Di Indonesia*. *V*(2).

Marlinawati, Yusuf, B., & Alimuddin. (2015). Pemanfaatan Arang Aktif dari Kulit Durian (Durio zibethunu L.) sebagai Adsorben Ion Logam Kadmium (II). *Jurnal Kimia Mulawarman*, *13*(1), 23–27.

Nafi'ah, R. (2016). Kinetika Adsorpsi Pb (II) Dengan Adsorben Arang Aktif Dari Sabut Siwalan. *Jurnal Farmasi Sains Dan Praktis*, *I*(2), 28–37.

Ni'mah, Y. L., Pertiwi, A. C., & Suprapto, S. (2024). Adsorption of Cu(II) on silica gel synthesized from chemical bottle glass waste: Response surface methodology-Box Behnken design optimization. *South African Journal of Chemical Engineering*, *48*(January), 55–62. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.01.007

Niu, Y., Yu, W., Qin, Z., Nie, X., Yang, S., & Wan, Q. (2019). Adsorption characteristics of copper ion on nanoporous silica. *Acta Geochimica*, *38*(4), 517–529. https://doi.org/10.1007/s11631-019-00358-6

Nurhidayati, I., Mellisani, B., Puspita, F., & Rahmawati Putri, F. A. (2022). Penentuan Isoterm dan Kinetika Adsorpsi Ion Besi oleh Sedimen Sebagai Adsorben. *Warta Akab*, *46*(1). https://doi.org/10.55075/wa.v46i1.98

Safitri, O., Alrasyid, H., & Udyani, K. (2020). Pembuatan Silika Termodifikasi Dari Sekam Padi Sebagai Adsorben Logam Berat Pada Limbah Cair [Review]. *Jurnal Envirotek*, *12*(2), 19–24. https://doi.org/10.33005/envirotek.v12i2.53

Udaibah, W., & Priyanto, A. (2017). Synthesis and Structure Characterization of SiO2 from Petung Bamboo Leaf Ash (Dendrocalamus asper (Schult.f.) Backer ex Heyne). *Journal of Natural Sciences and Mathematics Research*, *3*(1), 215–220. https://doi.org/10.21580/jnsmr.2017.3.1.1697