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.v5i6.7620

KINETIKA ADSORPSI ZAT WARNA *MALACHITE GREEN* PADA SILIKA *XEROGEL* HASIL SINTESIS ABU TERBANG

Adsorption Kinetics of Malachite Green Dye on Silica Xerogel Synthesized from Fly Ash

Riska Himaylia Putri & Edi Nasra
Universitas Negeri Padang
himayliaputri@gmail.com

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Sep 7, 2025	Sep 28, 2025	Oct 9, 2025	Oct 14, 2025

Abstract

The increasing activity of the textile industry has led to a surge in wastewater containing synthetic dyes such as Malachite Green, which are toxic and resistant to natural degradation. This study aims to investigate the adsorption kinetics of Malachite Green using silica xerogel synthesized from fly ash as an environmentally friendly adsorbent. The synthesis was conducted using the sol-gel method, involving washing with 3 M HCl, extraction with 7 M NaOH, and re-precipitation using HCl until hydrogel formation, followed by drying to produce xerogel. XRF analysis showed an increase in SiO_2 content from 44.06% to 69.09%, indicating successful silica purification. Adsorption tests revealed a maximum capacity of 21.329 mg/g with an optimal contact time of 90 minutes. Kinetic analysis indicated that the adsorption process followed a pseudo-second-order model with an R^2 value of 0.983, suggesting a chemisorption mechanism involving interactions between silanol groups (-SiOH) on the xerogel surface and dye molecules. These findings demonstrate that fly ash-based silica xerogel has significant potential as an effective, sustainable, and economical adsorbent for dye wastewater treatment in the textile industry.

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

Keywords: Fly Ash; Silica Xerogel; Malachite Green; Adsorption; Pseudo-Second-Order Kinetics

Abstrak: Peningkatan aktivitas industri tekstil telah menyebabkan lonjakan limbah cair yang mengandung zat warna sintetis seperti *Malachite Green*, yang bersifat toksik dan sulit terdegradasi secara alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kinetika adsorpsi *Malachite Green* menggunakan silika *xerogel* hasil sintesis dari abu terbang (*fly ash*) sebagai adsorben ramah lingkungan. Sintesis dilakukan melalui metode *sol-gel*, dengan tahapan pencucian menggunakan HCl 3 M, ekstraksi dengan NaOH 7 M, serta pengendapan kembali menggunakan HCl hingga terbentuk hidrogel yang dikeringkan menjadi *xerogel*. Hasil analisis XRF menunjukkan peningkatan kandungan SiO_2 dari 44,06% menjadi 69,09%, yang mengindikasikan keberhasilan proses pemurnian silika. Uji adsorpsi menunjukkan kapasitas maksimum sebesar 21,329 mg/g dengan waktu kontak optimum selama 90 menit. Analisis kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model orde semu dua dengan nilai $R^2 = 0,983$, mengindikasikan bahwa mekanisme yang terjadi bersifat *chemisorption* melalui interaksi antara gugus silanol (-SiOH) pada permukaan *xerogel* dan molekul zat warna. Temuan ini menunjukkan bahwa silika *xerogel* berbasis abu terbang memiliki potensi sebagai adsorben yang efektif, berkelanjutan, dan ekonomis untuk pengolahan limbah zat warna dari industri tekstil.

Kata Kunci: Abu Terbang; Silika Xerogel; *Malachite Green*; Adsorpsi; Kinetika Orde Semu Dua.

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan dan kerusakan ekologi merupakan permasalahan serius yang kian meningkat akibat pesatnya industrialisasi, termasuk dalam sektor tekstil di Indonesia. Salah satu sumber utama pencemaran berasal dari limbah cair hasil proses pencelupan yang mengandung zat warna sintetis. Limbah ini tidak hanya berasal dari industri tekstil, tetapi juga dari industri lain seperti kertas, kulit, kosmetik, makanan, dan plastik. Menurut Eltaweil et al., (2020) lebih dari 1.000 ton zat warna digunakan setiap tahun, dengan 10–15% di antaranya terbuang ke lingkungan perairan tanpa pengolahan, menyebabkan perubahan warna air dan penurunan kualitas lingkungan secara signifikan. Zat warna ini bersifat non-biodegradable dan karsinogenik (Raval et al., 2017), sehingga menimbulkan dampak jangka panjang bagi ekosistem dan kesehatan manusia.

Salah satu zat warna yang banyak ditemukan dalam limbah industri adalah Malachite green. Pewarna ini digunakan secara luas karena biaya rendah dan warna cerah yang dihasilkan (Anggraini et al., 2024). Namun, Malachite green diketahui memiliki efek toksik, karsinogenik, dan dapat merusak sistem imun serta reproduksi (Nasra, et al., 2021). Meskipun

telah dilarang di beberapa negara oleh lembaga seperti FDA, penggunaannya masih terjadi karena kemudahan akses dan efisiensi produksinya.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan zat warna dari air limbah, termasuk pengendapan kimia, ekstraksi pelarut, elektrodeposisi, dan ultrafiltrasi. Di antara teknik-teknik tersebut, adsorpsi merupakan salah satu metode yang paling menjanjikan karena efisien, ramah lingkungan, murah, serta mudah diaplikasikan (Afriani et al., 2024). Sejumlah material telah dikaji sebagai adsorben Malachite green, seperti selulosa kulit pisang kepok(Anggraini et al., 2024), batang jagung (Romadhoni, 2019), kulit matoa (Hartati et al., 2023), karbon aktif (Febriani et al., 2022) yang menunjukkan kapasitas penyerapan bervariasi mulai dari 9,24 mg/g hingga 625 mg/g.

Meskipun demikian, penggunaan adsorben sintetis seperti karbon aktif, silika komersial, dan resin penukar ion memiliki kendala biaya dan ketahanan bahan. Oleh karena itu, upaya pemanfaatan bahan limbah sebagai alternatif adsorben terus berkembang. Salah satu alternatif yang potensial adalah silika xerogel, yaitu material berpori tinggi yang diperoleh melalui proses pengeringan gel. Silika xerogel memiliki keunggulan berupa luas permukaan yang besar, stabilitas termal dan kimia, serta porositas tinggi yang ideal untuk aplikasi adsorpsi (Guzel et al., 2021). Umumnya silika xerogel disintesis dari prekursor seperti TMOS dan TEOS, tetapi biaya yang tinggi dan sifat toksiknya menjadi hambatan. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan sumber silika alternatif yang murah dan ramah lingkungan.

Abu terbang (fly ash), yang merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara dalam PLTU, mengandung senyawa anorganik seperti silika (59%), alumina (24%), dan kalsium oksida (1,4%) (Kurniawati, 2014). Material ini belum banyak dimanfaatkan secara optimal dan umumnya dibuang ke tempat pembuangan akhir. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa abu terbang dapat dimanfaatkan sebagai sumber silika untuk pembuatan xerogel. Oleh karena itu, pemanfaatan abu terbang sebagai bahan baku pembuatan silika xerogel untuk mengadsorpsi Malachite green menjadi pendekatan yang bernilai ekonomis dan berwawasan lingkungan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kemampuan silika xerogel yang disintesis dari abu terbang dalam mengadsorpsi zat warna Malachite green.

METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari hingga April 2025 di Laboratorium Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Objek utama dalam penelitian ini adalah zat warna Malachite green yang akan diuji daya serapnya terhadap silika xerogel hasil sintesis dari abu terbang. Penelitian ini menggunakan berbagai peralatan laboratorium meliputi gelas ukur, labu ukur, pipet, botol semprot, stirrer magnetik, spatula logam, corong kaca, gelas kimia, lumpang, kertas saring, kertas pH, timbangan digital, oven, saringan dengan ukuran mesh 200, tungku, desikator, timbangan analitik (ABS 220-4), shaker, serta instrumen karakterisasi dengan XRF, dan spektrofotometer UV-Vis. Adapun bahan-bahan kimia yang digunakan mencakup xerogel yang berasal dari abu terbang, zat warna *Malachite green*, akuades, HCl teknis, kristal NaOH, dan HNO_3,

Preparasi Sampel Abu Terbang

Abu terbang sebanyak 100 gram direaksikan dengan 400 mL HCl 3 M selama 2 jam dan kemudian disaring. Residu dicuci hingga pH netral dan dikeringkan dalam oven 105°C selama 8 jam. Sampel kemudian dikarakterisasi menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) (Cynthia, 2024)

Pembuatan Natrium Silikat

Residu hasil ekstraksi silika sebanyak 5 gram direaksikan dengan 250 mL NaOH 7 M pada suhu 80°C selama 1 jam. Setelah disaring, diperoleh larutan natrium silikat.

Sintesis Silika Xerogel

Larutan natrium silikat direaksikan dengan HCl 3 M hingga pH 7 dan didiamkan selama 18 jam untuk membentuk hidrogel. Hidrogel kemudian dikeringkan pada suhu 70°C selama 5 jam, dicuci dengan aquades, lalu dikeringkan kembali pada suhu 120°C untuk mendapatkan xerogel. Karakterisasi dilakukan dengan instrumen FTIR, XRF, dan XRD (Cynthia, 2024).Persentase hasil dihitung dengan rumus:

$$Yield\ silika\ xerogel\ (\%\ massa) = \frac{massa\ silika\ xerogel}{massa\ \text{abu}\ terbang} \times 100\% \quad (1)$$

Kinetika Adsorpsi

Sebanyak 0,1 gram adsorben xerogel berbasis abu terbang dicampurkan dengan 25 mL larutan Malachite Green pada kondisi pH dan konsentrasi optimum. Campuran tersebut kemudian digojok menggunakan shaker dengan kecepatan 200 rpm pada variasi waktu 15,

30, 45, 60, 75, 90, 105, dan 120 menit. Setelah itu, larutan disaring dan filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum serapan Malachite Green. Model persamaan kinetika orde semu satu sebagai berikut :

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

Model kinetika adsorpsi orde semu dua sebagai berikut:

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k2q2} + \frac{1}{qe} t \qquad (3)$$

Keterangan:

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

qe: 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

Karakterisasi dengan XRF

Karakterisasi menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan untuk menganalisis kandungan unsur anorganik dalam abu terbang sebelum dan sesudah pencucian dengan larutan HCl, serta pada silika xerogel hasil sintesis. Abu terbang hasil analisis dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini:

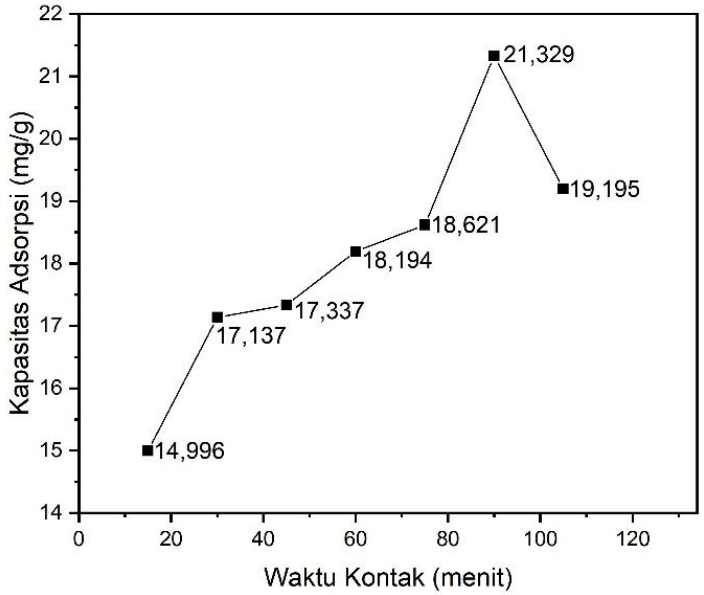
Tabel 1. Karakterisasi Abu Terbang Menggunakan XRF

Kandungan Senyawa	Komposisi (%)	
	Abu setelah dicuci HCl	Silika Xerogel yang disintesis
SiO_2	54,167	69,09
Fe2O3	16,824	0,399
Al2O3	16,226	14,48
CaO	5,219	1,463
MnO	0,339	0,019
As2O3	0,006	0,001
SrO	0,107	0,002
Y_2O_3	0,011	0
In_2O_3	0,062	0

Hasil analisis menunjukkan bahwa abu terbang sebelum pencucian mengandung SiO_2 (44,059%), Al_2O_3 (17,172%), dan Fe_2O_3 (14,608%) sebagai komponen utama. Setelah pencucian dengan HCl 3M, kandungan pengotor seperti CaO, SrO, dan In_2O_3 menurun signifikan, sementara kandungan SiO_2 meningkat menjadi 54,167%, menunjukkan efektivitas pencucian dalam menghilangkan logam-logam reaktif terhadap asam. Sintesis silika xerogel menggunakan metode sol-gel menghasilkan material dengan kemurnian SiO_2 sebesar 69,09%, sedangkan logam lain seperti Fe_2O_3, Al_2O_3, dan CaO menurun hingga <2%, bahkan Y_2O_3 dan In_2O_3 tidak terdeteksi.

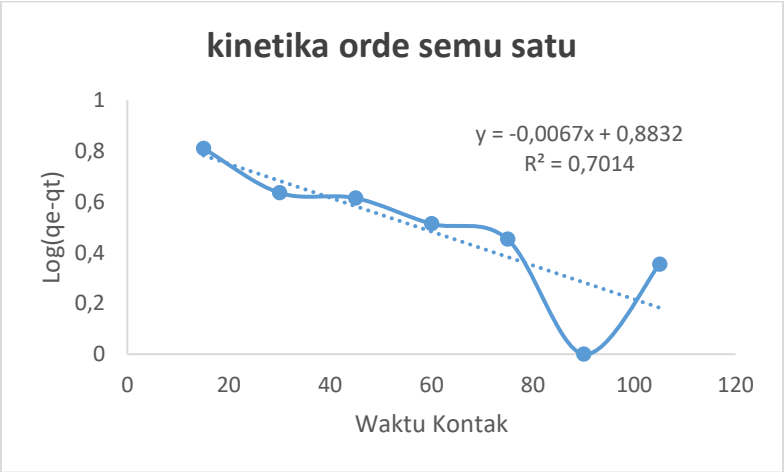
Kinetika Adsorpsi

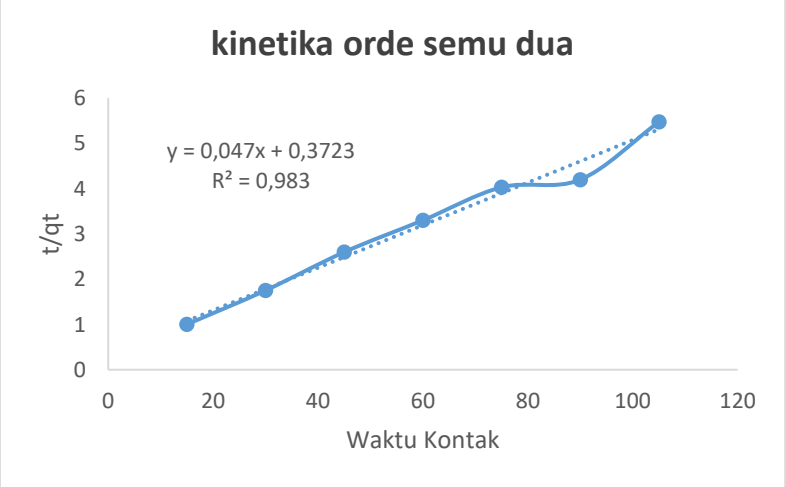
Kapasitas penyerapan pada proses adsorpsi dipengaruhi oleh waktu kontak antara adsorben dan adsorbat, yaitu durasi interaksi yang diperlukan agar proses berlangsung secara optimal. Faktor ini memiliki peran penting dalam memahami mekanisme adsorpsi, karena lamanya waktu kontak menentukan laju difusi serta peluang molekul adsorbat berinteraksi dengan situs aktif pada permukaan adsorben. Seiring bertambahnya waktu kontak, jumlah adsorbat yang terikat pada adsorben akan meningkat hingga tercapai kondisi kesetimbangan, di mana tidak terjadi lagi penambahan jumlah yang terserap. (Nasda M, et al 2023). Hubungan antara waktu kontak dan kapasitas adsorpsi *malachite green* ditampilkan pada gambar di bawah ini



Gambar 1. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Zat Warna *Malachite Green*

Berdasarkan gambar 1 waktu kontak optimum adsorpsi *Malachite green* oleh silika xerogel dari abu terbang tercapai pada menit ke-90 dengan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 21,329 mg/g. Peningkatan kapasitas adsorpsi terjadi seiring bertambahnya waktu kontak hingga mencapai kesetimbangan, sedangkan setelah melewati titik optimum kapasitas adsorpsi menurun akibat kejenuhan situs aktif dan terjadinya proses desorpsi. Data ini dapat digunakan sebagai referensi dalam penentuan parameter kinetika adsorpsi.





Hasil analisis kinetika adsorpsi *Malachite green* menggunakan silika xerogel yang disintesis dari abu terbang menunjukkan bahwa model kinetika orde semu dua memberikan tingkat kesesuaian yang lebih tinggi dibandingkan model orde semu satu. Nilai R^2 yang lebih tinggi pada model orde semu dua menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi Malachite Green oleh silika xerogel cenderung mengikuti kinetika orde semu dua, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi dikendalikan oleh interaksi kimia antara adsorben dan adsorbat. Rincian hasil tersebut ditampilkan pada Tabel 2 yang memuat parameter kinetika adsorpsi orde semu satu dan dua.

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 (min^{-1})	R^2
7,64	0,0154	0,7014	21,05	0,0022	0,983

Berdasarkan tabel 2 model orde semu dua menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,983, lebih tinggi dibandingkan dengan orde semu satu sebesar 0,7014. Nilai k_2 sebesar 0,0022 g/mg·menit dan q_e(model) sebesar 21,05 mg/g menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan q_e(eksperimen) 21,46 mg/g, sehingga proses adsorpsi *Malachite green* oleh silika xerogel dari abu terbang mengikuti kinetika orde semu dua. Hasil ini konsisten dengan hasil penelitian Eltaweil et al., (2020) yang melaporkan bahwa adsorpsi Malachite green pada material mesopori berbasis biochar juga mengikuti kinetika orde semu dua dengan nilai $R^2 >$ 0,98, menunjukkan dominasi proses *chemisorption*.

PEMBAHASAN

Sintesis Silika Xerogel

Pada tahap awal penelitian, abu terbang (fly ash) terlebih dahulu melalui proses pengolahan untuk menghilangkan kontaminan dan meningkatkan kemurnian silika yang akan dihasilkan. Proses ini diawali dengan pencucian menggunakan larutan HCl 3 M yang berfungsi melarutkan unsur-unsur logam, sehingga mengurangi kandungan senyawa oksida di dalam abu terbang. Oksida logam seperti Fe_2O_3, CaO, dan MnO bereaksi dengan HCl membentuk garam yang larut dalam air, sehingga mudah terpisahkan dari padatan. Dengan berkurangnya senyawa oksida logam tersebut, kemurnian dan persentase silika dalam abu terbang meningkat secara signifikan. Hasil analisis menggunakan XRF menunjukkan bahwa abu terbang sebelum pencucian mengandung SiO_2 (44,059%), Al_2O_3 (17,172%), dan Fe_2O_3 (14,608%) sebagai komponen utama. Setelah pencucian dengan HCl 3M, kandungan pengotor seperti CaO, SrO, dan In_2O_3 menurun signifikan, sementara kandungan SiO_2 meningkat menjadi 54,167%, menunjukkan efektivitas pencucian dalam menghilangkan logam-logam reaktif terhadap asam.

Setelah itu, abu terbang dikeringkan pada suhu 110 °C untuk menghilangkan kelembapan. Setelah preparasi dilakukan ekstraksi silika, abu terbang direaksikan dengan

larutan basa (NaOH). Pada pemanasan, NaOH akan terionisasi penuh menjadi ion Na^+ dan OH^-. Proses ini melarutkan senyawa silika di dalam abu terbang menjadi natrium silikat (Na_2SiO_3) dalam larutan (Minju et al., 2021). Reaksi yang terjadi:

$SiO_2(s)+2NaOH(aq)\rightarrow Na_2SiO3(aq)+H_2O$

Setelah larutan natrium silikat terbentuk, sisa padatan diendapkan melalui filtrasi dan residu dicuci dengan aquades hingga netral atau hampir netral pH tujuannya adalah untuk memisahkan padatan yang tidak larut (termasuk oksida-oksida non-silika) dari larutan silikat yang akan menjadi prekursor gel (Stefana et al., 2022). Dalam tahap berikutnya, penambahan HCl sangat penting untuk menurunkan pH larutan natrium silikat protonasi ion silikat menghasilkan senyawa asam silikat $Si(OH)_4$ yang selanjutnya mengalami reaksi kondensasi antar gugus silanol Si–OH, melepaskan molekul air, dan membentuk struktur jaringan silika gel (Witoon et al., 2011)Setelah pengeringan, gel ini berubah menjadi xerogel. Berdasarkan massa awal kandungan SiO_2 pada abu terbang dan massa akhir silika xerogel hasil sintesis, diperoleh yield sebesar 54,825 %.

Setelah pembentukan gel, aging dilakukan selama beberapa jam hingga beberapa hari untuk memungkinkan jaringan silika mereorganisasi, menguatkan ikatan, dan membentuk struktur mesopori yang stabil. Setelah aging, gel dipindahkan ke proses pengeringan untuk menghilangkan pelarut (air) dalam gel tersebutn(Cynthia, 2024). Sintesis silika xerogel menggunakan metode sol-gel menghasilkan material dengan kemurnian SiO_2 sebesar 69,09%, sedangkan logam lain seperti Fe_2O_3, Al_2O_3, dan CaO menurun hingga <2%, bahkan Y_2O_3 dan In_2O_3 tidak terdeteksi. Hasil ini membuktikan keberhasilan metode ekstraksi dan sintesis dalam menghasilkan silika xerogel berkualitas tinggi yang berpotensi sebagai adsorben karena luas permukaan tinggi, struktur amorf, dan stabilitas kimianya.

Kinetika Adsorpsi

Waktu kontak yang divariasikan yaitu 15, 30, 45, 60, 75, 90, dan 105 menit. Dari variasi tersebut diketahui bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak. . Adsorpsi *Malachite green* oleh silika dibagi menjadi dua tahap. Pada tahap awal proses adsorpsi, laju penyerapan berlangsung dengan cepat karena sebagian besar situs aktif pada permukaan silika xerogel masih tersedia, sehingga molekul zat warna *Malachite green* mudah terikat melalui gaya elektrostatik maupun interaksi kimia dengan gugus aktif seperti –SiOH dan –Si–O–Si. Seiring bertambahnya waktu, jumlah situs aktif yang kosong semakin

berkurang sehingga proses adsorpsi melambat akibat terjadinya kejenuhan permukaan (Vareda et al., 2020).

Menurut Eltaweil et al., (2020), pada tahap awal adsorpsi, mekanisme yang dominan adalah difusi film, yaitu perpindahan molekul dari larutan menuju permukaan adsorben. Sedangkan pada tahap selanjutnya, proses dikendalikan oleh difusi intrapartikel, yakni pergerakan molekul adsorbat ke dalam pori-pori adsorben. Setelah mencapai titik optimum, peningkatan kapasitas adsorpsi tidak lagi signifikan karena hampir seluruh situs aktif telah terisi, bahkan sebagian molekul adsorbat dapat terlepas kembali akibat tercapainya kondisi jenuh atau kesetimbangan dinamis.

Dalam penelitian ini, waktu kontak optimum diperoleh pada menit ke-90 dengan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 21,329 mg/g. Setelah melewati waktu tersebut, kapasitas adsorpsi mengalami penurunan yang disebabkan oleh kejenuhan permukaan serta kemungkinan terjadinya proses desorpsi. Hasil ini sejalan dengan temuan Nasda M, (2023), pada penelitian adsorpsi *Methylene Blue* menggunakan kulit matoa, di mana kapasitas adsorpsi meningkat hingga menit ke-90 sebelum mencapai kesetimbangan. Penentuan waktu kontak optimum memiliki peran penting dalam proses adsorpsi untuk mencapai efisiensi maksimum. Waktu kontak yang terlalu singkat belum memungkinkan tercapainya kesetimbangan, sedangkan waktu kontak yang terlalu lama tidak memberikan peningkatan kapasitas yang berarti dan dapat menyebabkan desorpsi sebagian molekul adsorbat kembali ke dalam larutan.

Hasil yang didapat pada tabel 2 menunjukkan kesesuaian masing-masing model kinetika terhadap adsorpsi zat warna *Malachite green* Nilai R^2 yang jauh lebih tinggi pada model orde semu dua (0,983) dibandingkan dengan orde semu satu (0,7014) menunjukkan bahwa model orde semu dua jauh lebih mampu menjelaskan variasi data eksperimen Selain itu, nilai Qe (model) dari orde semu dua sangat mendekati nilai kapasitas adsorpsi eksperimen yang menguatkan bahwa mekanisme adsorpsi di sistem ini lebih konsisten dengan kinetika orde semu dua daripada orde semu satu (Kumar & Chawla, 2014). Berdasarkan parameter tersebut, proses adsorpsi Malachite Green pada silika xerogel dari abu terbang kemungkinan besar dikendalikan oleh mekanisme *chemisorption*, di mana interaksi kimia antara molekul zat warna dan situs aktif permukaan silika menjadi tahap pengendali laju. Mekanisme ini lebih kompleks dibandingkan adsorpsi fisik karena melibatkan pembentukan ikatan kimia atau pertukaran elektron pada permukaan adsorben.

KESIMPULAN

Silika xerogel berhasil disintesis dari abu terbang melalui metode sol-gel dengan peningkatan kandungan SiO_2 dari 44,06% menjadi 69,09%. Material ini menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum terhadap *Malachite Green* sebesar 21,329 mg/g pada waktu kontak optimum 90 menit. Proses adsorpsi mengikuti model kinetika orde semu dua (R^2 = 0,983), menandakan mekanisme chemisorption. Dengan demikian, silika xerogel dari abu terbang berpotensi sebagai adsorben efektif dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah zat warna industri.

DAFTAR PUSTAKA

Afriani, R., Nasra, E., Kimia, P. S., Padang, U. N., Cd, I., & Kontak, W. (2024). *Variasi Waktu Kontak terhadap Penyerapan Ion Cd 2 + Menggunakan Xerogel dari Abu Terbang (Fly Ash)*. *8*, 18658–18662.

Anggraini, D., Nasra, E., Kimia, P. S., & Padang, U. N. (2024). *Penyerapan Malachite Green Menggunakan Selulosa Hasil Ekstrak Kulit Pisang Kepok (Musa Balbisiana Colla)*. *8*, 11956–11964.

Cynthia. (2024). *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu Penentuan Kondisi Optimum Waktu Aging Pada Sintesis Silika*. *2*, 50–53.

Edi Nasra, D Kurniawati, S B Etika, R. S. and A. R. (2021). *Effect of pH and Concentration on Biosorption Malachite Green and Rhodamine B Dyes using Banana Peel (Musa balbisiana Colla) as Effect of pH and Concentration on Biosorption Malachite Green and Rhodamine B Dyes using Banana Peel (Musa balbisiana Colla*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1788/1/012003

Eltaweil, A. S., Mohamed, H. A., & El-monaem, E. M. A. (2020). Mesoporous magnetic biochar composite for enhanced adsorption of malachite green dye : Characterization , adsorption kinetics , thermodynamics and isotherms. *Advanced Powder Technology*, *January*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.01.005

Febriani, A., Umaro, S. A., & Lutfi, M. (2022). *Kapasitas Adsorpsi Zat Warna Malachite Green Dan Violet Dye Menggunakan Metal Organic Frameworks (Fe-BDC)*. *10*(2).

Guzel, Aznar, E., & Deveci, H. (2021). *Low-cost silica xerogels as potential adsorbents for ciprofloxacin removal*. *22*(May). https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100483

Hartati, D., Kurniawati, D., & Nasra, E. (2023). *Optimasi Penyerapan Malachite Green Menggunakan Biosorben Kulit Matoa (Pometia pinnata) dengan Metode Batch*. *12*(2), 50–53.

Kumar, R., & Chawla, J. (2014). Removal of Cadmium Ion from Water/Wastewater by Nano-metal Oxides: A Review. *Water Quality, Exposure and Health*, *5*(4), 215–226. https://doi.org/10.1007/s12403-013-0100-8

Kurniawati, D. (2014). *Penyerapan Io Seng Timbal dan Krom Oleh Abu Terbang (Fly Ash Secara Statis*. 29–33.

Minju, N., Nair, B. N., & Savithri, S. (2021). Sodium silicate-derived aerogels: Effect of processing parameters on their applications. In *RSC Advances* (Vol. 11, Issue 25, pp. 15301–15322). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d0ra09793d

Nasda M, D. K. E. N. (2023). *Pengaruh Waktu Kontak dan Kecepatan Pengadukan Terhadap Penyerapan Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Biosorben Kulit Matoa (Pometia pinnata)*.

Raval, N. P., Shah, P. U., & Shah, N. K. (2017). Malachite green "' a cationic dye "' and its removal from aqueous solution by adsorption. *Applied Water Science*, *7*(7), 3407–3445. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0512-2

Romadhoni. (2019). *Isotermis Adsorpsi dan Termodinamika Adsorpsi Malasit Hijau pada Batang Jagung (Zea mays L.) Termodifikasi Asam Sitrat*.

Stefana, M., Varvara, R., Szabo, K., Plamada, D., Neme, S., Mitrea, L., Adrian, G., Ciont, C., Barta, G., & Vodnar, D. C. (2022). *Polysaccharide-Based Edible Gels as Functional Ingredients :* 1–24.

Vareda, J. P., Valente, A. J. M., & Durães, L. (2020). Silica aerogels/xerogels modified with nitrogen-containing groups for heavy metal adsorption. *Molecules*, *25*(12). https://doi.org/10.3390/molecules25122788

Witoon, T., Tatan, N., Rattanavichian, P., & Chareonpanich, M. (2011). Preparation of silica xerogel with high silanol content from sodium silicate and its application as CO2 adsorbent. *Ceramics International*, *37*(7), 2297–2303. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.03.020