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.v5i4.6315

PENGARUH PH DAN KONSENTRASI TERHADAP ADSORPSI ION LOGAM *CR*$^{3+}$ MENGGUNAKAN SILIKA *XEROGEL* DARI ABU TERBANG

The Influence of pH and Concentration on the Adsorption of *Cr*$^{3+}$ Metal Ions Using Silica *Xerogel* from Fly Ash

Putri Nugraha & Edi Nasra
Universitas Negeri Padang
putrinugraha0802@icloud.com

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
May 10, 2025	Jun 4, 2025	Jun 16, 2025	Jun 21, 2025

Abstract

Fly ash, a byproduct of coal combustion produced continuously, poses significant environmental risks if not utilized effectively. Its high silica content presents potential for conversion into *silica xerogel*, which can function as an adsorbent for heavy metal ions such as Cr^{3+}. This study aims to analyze the SiO_2 content in synthesized *silica xerogel* using X-Ray Fluorescence (XRF) analysis and to determine its optimum adsorption capacity based on variations in pH and Cr^{3+} ion concentration. Optimization was carried out at varying pH levels (2–6) and concentrations (100–300 ppm). XRF analysis revealed that the SiO_2 content in fly ash pretreated with 3M HCl was 54.167%, while the synthesized *silica xerogel* exhibited an increased SiO_2 content of 69.09%, with a *%yield* of 54.825%, indicating a relatively high silica purity. Adsorption tests showed maximum adsorption capacity at pH 4 and a Cr^{3+} concentration of 200 ppm, reaching 26.76 mg/g. The adsorption isotherm followed the Langmuir model with a determination coefficient of $R^2 = 0.9509$, indicating a strong fit between the model and the experimental data. These findings suggest that

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

silica xerogel derived from fly ash holds promise as an effective adsorbent for heavy metal wastewater treatment.

Keywords: Fly Ash; Adsorption; *Silica Xerogel*; Cr^{3+} Metal Ion; Langmuir Isotherm

Abstrak: Abu terbang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara yang dihasilkan secara kontinu dan dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan apabila tidak dimanfaatkan secara optimal. Kandungan silika yang tinggi dalam abu terbang memberikan potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan *silika xerogel*, yang dapat berfungsi sebagai adsorben ion logam berat seperti Cr^{3+}. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan SiO_2 pada *silika xerogel* hasil sintesis menggunakan analisis X-Ray Fluorescence (XRF), serta menentukan kapasitas adsorpsi optimum berdasarkan variasi pH dan konsentrasi ion Cr^{3+}. Optimasi dilakukan dengan variasi pH (2–6) dan konsentrasi (100–300 ppm). Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa kandungan SiO_2 pada abu terbang yang telah dicuci dengan HCl 3M sebesar 54,167%, sementara pada *silika xerogel* hasil sintesis meningkat menjadi 69,09%, dengan *%yield* sebesar 54,825%, yang menunjukkan kemurnian silika yang cukup tinggi. Uji adsorpsi menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum dicapai pada pH 4 dan konsentrasi 200 ppm, yaitu sebesar 26,76 mg/g. Model isoterm adsorpsi mengikuti model Langmuir dengan koefisien determinasi R^2 = 0,9509, yang menunjukkan kesesuaian model terhadap data eksperimental. Temuan ini mengindikasikan bahwa *silika xerogel* dari abu terbang berpotensi sebagai adsorben efektif dalam pengolahan limbah logam berat.

Kata Kunci: Abu Terbang; Adsorpsi; Silika Xerogel; Ion Logam Cr^{3+}; Isoterm Langmuir

PENDAHULUAN

Industri di Indonesia mengalami perkembangan pesat dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi yang memberikan kontribusi positif bagi kehidupan manusia, namun hal ini juga menyebabkan peningkatan limbah berbahaya yang mencemari lingkungan. Limbah yang dihasilkan, termasuk limbah B3 seperti sianida, zat warna, pelarut, dan logam berat, sulit diuraikan oleh mikroorganisme sehingga menjadi sumber pencemaran serius (Farida et al., 2019). Logam berat seperti thalium, kadmium, timbal, merkuri, nikel, tembaga, dan kromium dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia dan hewan akibat akumulasi dalam lingkungan (Han et al., 2020). Oleh karena itu, pengelolaan limbah industri yang tepat sangat penting untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan.

Logam kromium biasanya ditemukan dalam dua bentuk utama, yaitu trivalen (Cr (III)) dan heksavalen (Cr (VI)), yang dalam kondisi tertentu seperti lingkungan anaerob, pH, dan potensial reduksi tertentu dapat bersifat toksik dan korosif. Kromium ini sering dijumpai dalam limbah dari proses electroplating, di mana logam Cr (III) memiliki tingkat toksisitas

yang lebih rendah dan pada konsentrasi rendah berperan penting dalam metabolisme karbohidrat serta aktivasi hormon insulin dalam tubuh manusia (Sriatun, 2020). Namun, kekurangan logam Cr (III) dapat mengganggu pertumbuhan dan metabolisme lemak serta protein, sementara konsentrasi tinggi logam Cr (III) dapat menyebabkan keracunan akut maupun kronis. Konsentrasi logam berat di perairan sangat dipengaruhi oleh jumlah limbah yang masuk, sehingga peningkatan pembuangan limbah logam berat akan meningkatkan akumulasi logam tersebut di lingkungan (Dora Jati et al., 2024).

Bahaya yang ditimbulkan oleh ion Cr^{3+} perlu diatasi melalui metode pengolahan yang tepat, seperti penukaran ion menggunakan resin, pengendapan, filtrasi, dan adsorpsi (Dwi Lestari et al., 2023). Adsorpsi merupakan proses penyerapan zat pada permukaan adsorben yang menawarkan keuntungan berupa kesederhanaan, efektivitas, efisiensi tinggi, serta tidak menghasilkan zat beracun sebagai efek samping. Silika, yang merupakan polimer asam silikat dengan rumus kimia SiO_2, sering digunakan sebagai adsorben dalam proses ini dan banyak dimanfaatkan dalam berbagai industri serta kehidupan sehari-hari untuk menjaga kelembaban produk pangan, farmasi, dan barang elektronik. Salah satu bentuk silika yang efektif sebagai adsorben adalah silika xerogel (Yilmaz & Sezgin, 2024).

Silika xerogel merupakan bentuk silika gel yang telah kehilangan kadar airnya melalui proses peningkatan suhu dan tekanan, sehingga menghasilkan material dengan porositas tinggi, luas permukaan besar, dan ukuran pori yang sangat kecil, menjadikannya efektif sebagai adsorben (Yilmaz & Sezgin, 2024). Sintesis silika xerogel umumnya dilakukan dengan metode sol-gel pada suhu rendah, yang memungkinkan terbentuknya produk dengan kemurnian tinggi serta ukuran pori dan luas permukaan yang seragam. Abu terbang, limbah padat dari pembakaran batubara yang mengandung silika oksida (SiO_2) dalam jumlah besar, dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif untuk pembuatan silika xerogel melalui ekstraksi dan proses sol-gel (Imoisili et al., 2022). Pemanfaatan abu terbang ini tidak hanya mengurangi limbah industri, tetapi juga menghasilkan adsorben yang ekonomis dan efektif dalam mengadsorpsi ion logam berat Cr^{3+} berkat gugus aktif silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si) pada permukaannya, sehingga mendukung pelestarian lingkungan secara berkelanjutan (Hakim et al., 2023).

Penelitian oleh (Cynthia & Nasra, 2024) menunjukkan bahwa silika xerogel dapat diproduksi dari abu terbang yang mengandung sekitar 74,07% silika berdasarkan analisis XRF (Cynthia & Nasra, 2024). Selain itu, (Megasari et al., 2019) berhasil mensintesis silika xerogel

dari abu daun bambu yang memiliki kandungan silika sebesar 58,3% untuk digunakan sebagai adsorben uranium (Megasari et al., 2019). Sementara itu, Harimu (2022) memanfaatkan sekam padi yang diekstraksi dengan NaOH 12% untuk menghasilkan silika xerogel dengan rendemen 35,12%, yang efektif sebagai adsorben ion logam Cr^{3+} dengan kapasitas adsorpsi 0,9674 mg/g (Harimu, 2022). Ketiga penelitian ini menegaskan potensi berbagai limbah biomassa sebagai sumber silika berkualitas untuk sintesis silika xerogel yang berperan sebagai adsorben logam berat. Oleh karena itu, fokus penelitian ini adalah memanfaatkan abu terbang untuk bahan baku pembuatan silika xerogel yang akan dijadikan sebagai adsorben untuk mengadsorpsi ion logam Cr^{3+}.

METODE

Penelitian ini dilakukan pada bulan Februari 2025 sampai April 2025 di Laboratorium Penelitian Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gelas kimia, labu ukur, oven, batang pengaduk, spatula, magnetic bar beserta spin bar, botol semprot, corong kaca, pH meter, kertas saring, gelas ukur, timbangan digital, shaker, sementara itu, karakterisasi material dilakukan menggunakan intrumen X-Ray Fluorescense (XRF) dan Spektroskopi Serapan Atom (SSA). Selanjutnya, bahan-bahan yang digunakan dalam sintesis silika xerogel pada penelitian ini adalah abu terbang yang didapatkan dari PT. Semen Padang, larutan asam nitrat (HNO_3), asam klorida (HCl), kristal natrium hidroksida (NaOH), $Cr(NO_3)_3.9H2O$, dan aquades.

Sintesis Silika Xerogel

Sintesis silika xerogel dimulai dengan pembuatan natrium silikat dari 40 gram residu abu terbang yang telah dicuci sebelumnya menggunakan asam klorida (HCl) 3M yang kemudian direndam dalam larutan natrium hidroksida (NaOH) 7M, diaduk dan dipanaskan pada suhu 80℃ selama satu jam, kemudian disaring untuk memperoleh larutan natrium silikat. Larutan natrium silikat tersebut kemudian ditambahkan asam klorida (HCl) 3M hingga pH mencapai 7 dan didiamkan selama 18 jam, menghasilkan silika hidrogel sebagai residu setelah disaring. Silika hidrogel ini kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 70℃ selama 5 jam untuk menghilangkan kadar air sehingga terbentuk silika xerogel (Nur'aeni et al., 2017).

Selanjutnya, silika xerogel dianalisis menggunakan metode XRF untuk karakterisasi, serta kandungan silika dalam produk akhir dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\%\, Yield = \frac{Massa\ silika\ xerogel}{Massa\ abu\ terbang} \text{ x } 100\% \quad \text{(Zhang et al., 2024)}$$

Penentuan pH Optimum

Pada larutan Cr^{3+} dengan konsentrasi 100 ppm dan volume 25 mL, pH awal diukur kemudian diatur menjadi variasi nilai 2, 3, 4, 5, dan 6 menggunakan larutan HNO_3 atau NaOH. Setiap larutan kemudian dicampur dengan 0,1 gram silika xerogel yang berasal dari abu terbang dan diaduk menggunakan shaker pada kecepatan 150 rpm selama 30 menit. Setelah proses pengadukan selesai, larutan disaring untuk memisahkan filtrat yang selanjutnya dianalisis menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) guna mengukur konsentrasi Cr^{3+} yang masih tersisa dalam larutan. Dari hasil ini, pH optimum untuk adsorpsi logam Cr^{3+} dapat ditentukan.

Penentuan Konsentrasi Optimum

Larutan Cr^{3+} sebanyak 25 mL dengan konsentrasi bervariasi yaitu 100, 150, 200, 250, dan 300 ppm pada pH optimum disiapkan, kemudian masing-masing larutan dicampur dengan 0,1 gram xerogel yang berasal dari abu terbang. Campuran tersebut diaduk menggunakan shaker dengan kecepatan 150 rpm selama 30 menit. Setelah pengadukan selesai, larutan disaring untuk memperoleh filtrat yang kemudian dianalisis menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) guna mengukur konsentrasi Cr^{3+} yang tersisa. Data ini digunakan untuk menentukan konsentrasi Cr^{3+} optimum dalam proses adsorpsi.

HASIL

Sintesis Silika Xerogel

Silika xerogel disintesis menggunakan abu terbang sebagai bbahan baku, yang kandungannya nanti akan dianalisis menggunakan instrumen *X-Ray Fluorescense* (XRF) untuk memastikan kandungan-kandungan yang terdapat pada silika. Hasil analisis tersebut dapat dilihat pada tabel 1 berikut:

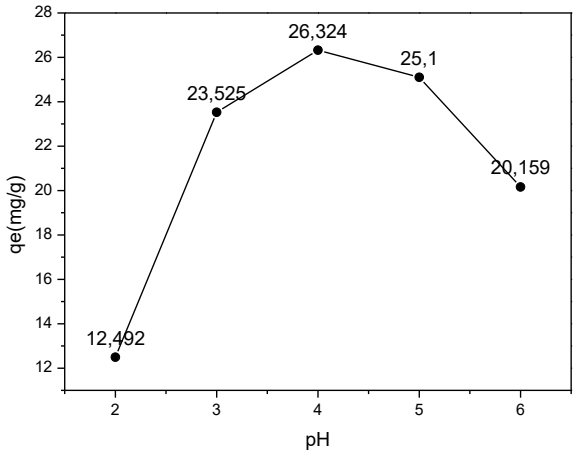
Tabel 1. Hasil Karakterisasi Abu Terbang Menggunakan XRF

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 pada tabel 1 dapat dilihat bahwa silika xerogel berhasil disintesis menggunakan abu terbang yang sebelumnya melalui proses pencucian dengan larutan HCl 3M sehingga meningkatkan kadar silika (SiO2) dalam abu terbang dari 54,167% hingga menjadi 69,09%.

Penentuan pH Optimum

Variasi pH larutan merupakan factor penting untuk mempengaruhi kelarutan ion logam serta muatan permukaan adsorben. Dalam penelitian ini, variasi pH yang diuji dimulai dari pH 2, 3, 4, 5, dan 6 seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 berikut:

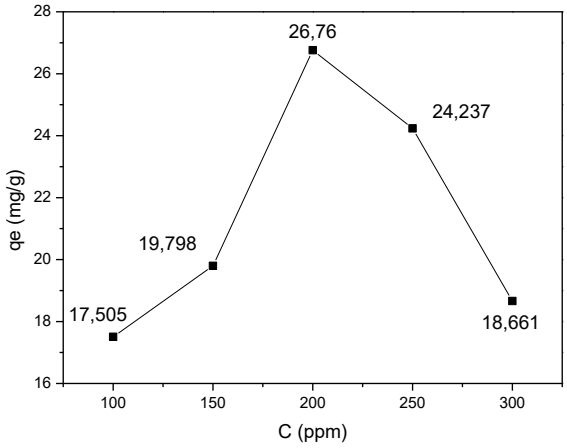


Gambar 1. Pengaruh pH Larutan Terhadap Penyerapan Ion Logam Cr^{3+}

Gambar 1 memperlihatkan bahwa pada pH 4 merupakan kondisi terbaik untuk penyerapan ion logam Cr^{3+} dengan kapasitas mencapai 26,324 mg/g. Pada pH ini, situs aktif dan struktur permukaan silika xerogel dapat mengikat ion Cr^{3+} secara optimal.

Penentuan Konsentrasi Optimum

Konsentrasi larutan merupakan faktor penting dalam menentukan kapasitas penyerapan maksimum dan efektivitas adsorpsi ion Cr^{3+} oleh silika xerogel pada berbagai tingkat konsentrasi yaitu antara 100 ppm hingga 300 ppm. Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 2 dibawah ini:



Gambar 2. Pengaruh Konsentrasi Larutan Terhadap Penyerapan Ion Logam Cr^{3+}

Berdasarkan gambar 2, dapat dilihat bahwa terjadinya peningkatan seiring dengan kenaikan konsentrasi dari 100 ppm hingga 200 ppm dan setelah itu mengalami penurunan. Dapat dilihat bahwa konentrasi optimum berada pada konsentrasi 200 ppm dengan penyerapan optimal sebesar 26,760 mg/g.

Model Isotherm

Kesetimbangan antara adsorben dan adsorbat ini dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich, yang diperoleh melalui kurva linear. Model isoterm yang paling sesuai ditentukan berdasarkan nilai regresi yang mendekati angka 1. Data hasil analisis model isoterm Langmuir dan Freundlich dapat dilihat pada tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Model Isotherm Penyerapan Ion Logam Cr^{3+}

Langmuir Model			Freundlich Model		
Qm (mg/g)	KL (L/mg)	R^2	Kf	n	R^2
19,193	0,090	0,9509	1,222	0,8667	0,1826

Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan hubungan yang kuat antara variabel yang diuji. Berdasarkan tabel 2, penyerapan ion logam Cr^{3+} oleh silika xerogel dari abu terbang mengikuti model isoterm Langmuir, karena nilai R^2 sebesar 0,9509 lebih mendekati angka 1.

PEMBAHASAN

Sintesis Silika Xerogel

Silika xerogel disintesis menggunakan abu terbang sebagai bahan baku utamanya, yang kandungan silikanya dianalisis dengan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*) untuk memastikan potensinya sebagai sumber silika. Kandungan silika ini penting karena menentukan kualitas xerogel yang dihasilkan. Selain itu, abu terbang juga dicuci dengan HCl 3M untuk menghilangkan pengotor berupa oksida logam sebelum dianalisis lebih lanjut. Hasil analisis yang didapatkan yaitu silika xerogel ini berhasil disintesis menggunakan abu terbang yang sebelumnya telah melalui proses pencucian dengan larutan HCl 3M untuk mengurangi kandungan pengotor berupa oksida logam seperti Al_2O_3, CaO, MnO, dan senyawa oksida lainnya. Proses pencucian ini bekerja dengan mengubah oksida-oksida logam tersebut menjadi garam-garam yang larut dan terbuang selama pencucian, sehingga meningkatkan kadar silika (SiO_2) dalam abu terbang hingga mencapai 54,167%.

Analisis lebih lanjut menggunakan instrumen XRF pada silika xerogel hasil sintesis menunjukkan kandungan silika yang lebih tinggi, yaitu sebesar 69,09%, sementara kandungan pengotor seperti Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, dan lainnya relatif rendah, dengan Al_2O_3 sebesar 14,48%. Kandungan Al_2O_3 yang masih cukup tinggi ini disebabkan oleh titik leleh Al_2O_3 yang sangat tinggi (2.053–2.072°C), sehingga tidak larut selama proses sintesis xerogel. Persentase SiO_2 yang dominan dalam xerogel menandakan bahwa produk yang dihasilkan memiliki tingkat kemurnian yang cukup tinggi dan kualitas yang baik sebagai bahan adsorben. Berdasarkan perbandingan jumlah SiO2 yang terdapat dalam abu terbang dengan massa silika xerogel yang telah disintesis didapatkan %Yield sebesar 54,825%. Dengan demikian, hasil karakterisasi ini membuktikan bahwa sintesis silika xerogel dari abu terbang tidak hanya berhasil dilakukan, tetapi juga menghasilkan material yang cukup murni.

Penentuan pH Optimum

Variasi pH larutan merupakan faktor penting yang memengaruhi kelarutan ion logam serta muatan permukaan adsorben selama proses penyerapan. Pengujian dengan variasi pH dilakukan untuk menentukan pada pH berapa kapasitas penyerapan ion Cr^{3+} mencapai tingkat optimal dan kondisi penyerapan menjadi stabil. Dalam penelitian ini, variasi pH yang diuji meliputi pH 2, 3, 4, 5, dan 6. Dari hasil penelitian memperlihatkan bahwa pH 4 merupakan kondisi terbaik untuk penyerapan ion logam Cr^{3+} dengan kapasitas mencapai

26,324 mg/g. Pada pH ini, situs aktif dan struktur permukaan silika xerogel dapat mengikat ion Cr^{3+} secara optimal. Sebaliknya, penyerapan Cr^{3+} paling rendah terjadi pada pH 2, yang disebabkan oleh tingginya konsentrasi ion H^+ dari penambahan HNO_3 sehingga terjadi persaingan antara ion H^+ dan Cr^{3+} dalam mengikat gugus aktif pada silika xerogel (Lestari et al., 2020). Pada kondisi asam dengan konsentrasi H^+ yang tinggi, protonasi situs aktif menyebabkan muatan positif pada permukaan, sehingga terjadi gaya tolak antara situs aktif dan ion Cr^{3+} yang juga bermuatan positif, sehingga kapasitas penyerapan menurun. Pada pH 3, penyerapan mulai meningkat karena jumlah HNO_3 yang lebih sedikit mengurangi protonasi, namun pada pH 5 dan 6, kapasitas penyerapan kembali menurun akibat terbentuknya endapan $Cr(OH)_3$ dari hidrolisis ion Cr^{3+} yang menghambat proses adsorpsi

Penentuan Konsentrasi Optimum

Variasi konsentrasi larutan merupakan faktor penting dalam menentukan kapasitas penyerapan maksimum dan efektivitas adsorpsi ion Cr^{3+} oleh silika xerogel pada berbagai tingkat konsentrasi, pada penelitian ini variasi konsentrasi nya yaitu antara 100 ppm hingga 300 ppm. Hasil pengujian kontak antara silika xerogel dan larutan dengan variasi konsentrasi tersebut dapat dilihat bahwa penyerapan ion logam Cr^{3+} meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi larutan dari 100 ppm hingga 200 ppm. Peningkatan ini terjadi karena situs aktif pada silika xerogel masih belum jenuh dan mampu menyerap ion Cr^{3+} secara efektif. Namun, saat konsentrasi mencapai 250 ppm hingga 300 ppm, kapasitas penyerapan mulai menurun akibat kejenuhan situs aktif. Penelitian menunjukkan bahwa kapasitas penyerapan optimal terjadi pada konsentrasi 200 ppm dengan nilai sebesar 26,760 mg/g.

Data hasil variasi konsentrasi ini dapat digunakan untuk menganalisis model isotherm adsorpsi. Isoterm adsorpsi menggambarkan hubungan antara jumlah adsorbat yang menempel pada permukaan adsorben dengan konsentrasi adsorbat dalam larutan saat mencapai keadaan setimbang (Amin et al., 2021). Kesetimbangan antara adsorben dan adsorbat ini dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich, yang diperoleh melalui kurva linear. Model isoterm yang paling sesuai ditentukan berdasarkan nilai regresi yang mendekati angka 1. Penentuan isoterm adsorpsi bertujuan untuk memahami pola interaksi antara adsorben dan adsorbat.

Model isoterm yang paling sesuai dengan data penelitian ditentukan melalui analisis regresi linear sederhana dengan memperhatikan nilai koefisien korelasi (R^2). Nilai R^2 yang

mendekati 1 menunjukkan hubungan yang kuat antara variabel yang diuji. Berdasarkan pada analisis nilai R^2, penyerapan ion logam Cr^{3+} oleh silika xerogel dari abu terbang mengikuti model isoterm Langmuir, karena nilai R^2 sebesar 0,9509 lebih mendekati angka 1. Model isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa permukaan adsorben bersifat homogen dan proses adsorpsi terjadi melalui interaksi pada situs aktif adsorben dalam satu lapisan tunggal (monolayer) (Zein et al., 2023).

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini dapat diketahui bahwa kadar SiO_2 pada abu terbang setelah pencucian dengan HCl 3M sebesar 54,167% dan yang terkandung pada silika xerogel yang telah disintesis yaitu sebesar 69,09%. Berdasarkan perbandingan jumlah SiO_2 yang terdapat dalam abu terbang dengan massa silika xerogel yang telah disintesis didapatkan %Yield sebesar 54,825 yang menandakan bahwa silika xerogel yang disintesis cukup murni. Selanjutnya, untuk pH dan konsentrasi optimum dalam penyerapan ion logam Cr^{3+} berada pada pH 4 dan konsentrasi 200 ppm beserta kapasitas adsorpsi maksimumnya sebesar 26,76 mg/g. Dari adsorpsi yang dilakukan antara silika xerogel dengan ion logam Cr^{3+} mengikuti model isotherm Langmuir yang mengasumsikan bahwa permukaan adsorben bersifat homogen dan proses adsorpsi terjadi melalui interaksi pada situs aktif adsorben dalam satu lapisan tunggal (monolayer).

DAFTAR PUSTAKA

Amin, N. A. A. M., Mokhter, M. A., Salamun, N., & Mahmood, W. M. A. W. (2021). Phosphate adsorption from aqueous solution using electrospun cellulose acetate nanofiber membrane modified with graphene oxide/sodium dodecyl sulphate. *Membranes*, *11*(7). https://doi.org/10.3390/membranes11070546

Cynthia, & Nasra, E. (2024). Penentuan Kondisi Optimum Waktu Aging Pada Sintesis Silika Xerogel Dari Limbah Abu Terbang. *Gudang Jurnal Multidisiplin Ilmu*, *2*, 50–53. https://doi.org/10.59435/gjmi.v2i2.282

Dora Jati, E., Murti, H., Susilo, B., Amru, K., Ningrum, H., Fahmi, S., Gadjah, U., Program, M. /, Lingkungan, M. P., Riset, B., Nasional, I., Pusat, /, Lingkungan, R., Bersih, T., Biomassa, R., & Bioproduk, D. (2024). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumian SATU BUMI Analisis Kadar Logam Berat Kromium (Cr) dalam Air dan Ikan Akibat Pembuangan Limbah Industri Penyamakan Kulit di Sungai Opak, Piyungan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta Universitas Pelita Bangsa 2).*

Dwi Lestari, Y., Tri Rahayuningtyas, M., Indrati Utami, L., & Nurma Wahyusi, K. (2023). Sintesis Silika Xerogel dari Sabut Kelapa dengan Metode Sol-Gel. In *Jurnal Teknik Kimia* (Vol. 17, Issue 2).

Farida, A., Ariyani, S., Erma Sulistyaningsih dan Laeli Kurniasari, N., Teknik Kimia, J., Teknik, F., & Wahid Hasyim Jl Menoreh Tengah, U. X. (2019). Pemanfaatan Limbah Kulit Jagung (Zea mays L.) sebagai Adsorben Logam Kadmiumdalam Larutan. *Inovasi Teknik Kimia*, *4*(2), 27–32.

Hakim, R., Azis Albar, M. J., Artikel Diterima Juni, S., & Koresponden, A. (2023). Ekstraksi Besi Oksida (Fe2O3) dari Limbah Abu Terbang (Fly Ash) sebagai Upaya Pengembangan Industri Ramah Lingkungan Informasi Artikel. *JOURNAL OF NATURAL SCIENCE AND TECHNOLOGY ADPERTISI*. http://jurnal.adpertisi.or.id/index.php/JNSTA/submissions

Han, T. W., Tseng, C. C., Cai, M., Chen, K., Cheng, S. Y., & Wang, J. (2020). Effects of cadmium on bioaccumulation, bioabsorption, and photosynthesis in Sarcodia suiae. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(4). https://doi.org/10.3390/ijerph17041294

Harimu, O. La. (2022). *Adsorpsi Ion Logam Kromium (Cr3+) menggunakan Silika Abu Sekam Padi* (Vol. 29, Issue 2).

Imoisili, P. E., Nwanna, E. C., & Jen, T. C. (2022). Facile Preparation and Characterization of Silica Nanoparticles from South Africa Fly Ash Using a Sol–Gel Hydrothermal Method. *Processes*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/pr10112440

Lestari, I., Mahraja, M., Farid, F., Gusti, D. R., & Permana, E. (2020). Penyerapan Ion Pb(II) menggunakan Adsorben Limbah Padat Lumpur Aktif Pengolahan Air Minum. *CHEMISTRY PROGRESS*, *13*(2). https://doi.org/10.35799/cp.13.2.2020.31391

Megasari, K., Herdiyanti, H., Nurliati, G., Kadarwati, A., Swantomo, D., BATAN Yogyakarta, K., Puspiptek Serpong Gedung, K., & Selatan, T. (2019). Sintesis Silika Xerogel dari Abu Daun Bambu sebagai Adsorben Uranium. In *Jurnal Forum Nuklir (JFN)* (Vol. 13, Issue 1). Bulan Mei.

Nur'aeni, D., Prabowo Hadisantoso, E., Suhendar, D. D., Kimia, J., Sains, F., Teknologi, D., Gunung, S., Bandung, D., Nasution, J. A. H., 105 Cibiru, N., & Bandung, K. (2017). *Adsorpsi Ion Logam Mn 2+ DAN Cu 2+ oleh Silika Gel dari Abu Ampas Tebu* (Vol. 4, Issue 2).

Sriatun, S. (2020). Modifikasi Zeolit Alam Menggunakan Trietanolamin (TEA) sebagai Adsorben Ion Logam Kromium (III). *Akta Kimia Indonesia*, *5*(2), 62. https://doi.org/10.12962/j25493736.v5i2.7807

Yilmaz, M. S., & Sezgin, D. (2024). Xerogel of fast kinetics and high adsorption capacity for cationic dye removal. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences – Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 189–197. https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00019

Zein, R., Akmal, C., Safni, S., Fauzia, S., & Ramadhani, P. (2023). Banana Stem (Musa balbisiana Colla) as Potential Biosorbent to Remove Methylene Blue Dye in Wastewater: Isotherm, Kinetic, Thermodynamic Studies and Its Application. *Applied Environmental Research*, *45*(3). https://doi.org/10.35762/AER.2023015

Zhang, L., Wang, Q., Zhao, H., Song, R., Chen, Y., Liu, C., & Han, Z. (2024). Synthesis and Surface Strengthening Modification of Silica Aerogel from Fly Ash. *Materials*, *17*(7). https://doi.org/10.3390/ma17071614