

PEMANFAATAN ABU TERBANG SEBAGAI GEOPOLIMER UNTUK ADSORPSI LOGAM BERAT Mn

Aprilina Purbasari^{1,2*}, Nita Aryanti^{1,2}, Vitus Dwi Yunianto Budi Ismadi¹

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*Email: aprilina.purbasari@che.undip.ac.id

Abstrak

Geopolimer merupakan polimer anorganik yang tersusun dari ikatan Si-O-Al. Geopolimer dapat diperoleh dari material alumino-silikat seperti abu terbang yang direaksikan dengan aktivator alkali. Pada penelitian ini, abu terbang yang merupakan limbah padat dari proses pembakaran batubara dimanfaatkan sebagai geopolimer dengan aktivator alkali campuran larutan NaOH 10 N dan larutan natrium silikat. Geopolimer yang diperoleh digunakan untuk mengadsorpsi logam berat mangan (Mn). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi, yaitu konsentrasi awal larutan logam berat Mn dan waktu kontak, dipelajari pada penelitian ini selain dilakukan juga kajian isoterm dan kinetika adsorpsi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal larutan logam berat Mn maka semakin rendah efisiensi adsorpsi yang diperoleh. Sementara itu proses adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer mencapai kesetimbangan setelah 120 menit. Berdasarkan kajian isoterm dan kinetika adsorpsi yang telah dilakukan, adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang mengikuti model isoterm Langmuir dan model kinetika order dua semu.

Kata kunci: abu terbang, adsorpsi, aktivator alkali, geopolimer, logam berat Mn

1. PENDAHULUAN

Geopolimer merupakan polimer anorganik yang tersusun dari ikatan Si-O-Al dengan struktur tiga dimensi amorf hingga semikristalin. Geopolimer dapat diperoleh dengan mereaksikan material alumino-silikat dengan aktivator alkali, yaitu larutan alkali atau campuran larutan alkali dan larutan alkali silikat, pada suhu rendah (di bawah 100 °C). Material alumino-silikat dapat berupa mineral alam seperti kaolin atau limbah padat seperti abu terbang, abu biomasa, dan terak. Geopolimer dapat diaplikasikan sebagai semen, pelapis, perekat, komposit, enkapsulasi limbah, dan adsorben (Davidovits, 2017).

Abu terbang merupakan material partikulat halus yang terbawa gas cerobong pada tungku pembakaran industri dengan bahan bakar batubara. Kandungan utama abu terbang adalah silika dan alumina. Abu terbang dapat dibedakan menjadi abu terbang *class F* dengan kandungan silika, alumina, dan besi oksida mencapai 70% yang berasal dari batubara antrasit dan bituminous; serta abu terbang *class C* dengan kandungan silika, alumina, dan besi

oksida mencapai 50% yang berasal dari batubara sub-bituminus dan lignit. Partikel abu terbang berbentuk bola dengan diameter bervariasi 0,5-300 µm. Pada umumnya partikel abu terbang berongga dan dalam rongga tersebut dapat berisi partikel lain yang lebih kecil ukurannya (Sherly dan Kumar, 2011).

Penggunaan batubara sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik dan industri di Indonesia yang cenderung mengalami peningkatan, yaitu diprediksi dari 23% pada tahun 2011 menjadi 46% pada tahun 2030, akan menghasilkan volume limbah abu terbang yang juga meningkat (BPPT, 2013). Salah satu upaya untuk mengatasinya adalah dengan memanfaatkan abu terbang sebagai geopolimer yang digunakan sebagai adsorben logam berat. Logam berat merupakan logam yang mempunyai densitas tinggi paling tidak 5 kali lebih besar dibandingkan air (Ohiagu dkk., 2022). Salah satu logam berat yang sering dijumpai di perairan adalah mangan (Mn) dalam bentuk ion Mn^{2+} yang berasal dari kegiatan penambangan dan industri. Adanya logam berat Mn di perairan dengan kadar melebihi yang diizinkan dapat

menyebabkan masalah estetika, organoleptis, dan juga masalah kesehatan karena beracun dan tidak dapat terurai (Jiang dkk., 2016; Munawar dkk., 2023). Kadar maksimum Mn yang diperbolehkan dalam air minum adalah 0,4 mg/l (Permenkes, 2010), sementara untuk keperluan higiene sanitasi adalah 0,5 mg/l (Permenkes, 2017). Salah satu metode yang banyak digunakan untuk menyisihkan logam berat Mn adalah adsorpsi karena prosesnya sederhana dengan efisiensi yang tinggi dan berbiaya rendah (Siyal dkk., 2018; Rasaki dkk, 2019).

Pada penelitian ini, abu terbang yang merupakan limbah padat dimanfaatkan sebagai bahan baku geopolimer dan digunakan untuk mengadsorpsi logam berat Mn. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi, yaitu konsentrasi awal larutan logam berat dan waktu kontak, dipelajari pada penelitian ini selain dilakukan juga kajian isoterm dan kinetika adsorpsi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pemanfaatan limbah padat abu terbang untuk pengolahan air limbah yang mengandung logam berat Mn.

2. METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu terbang, NaOH flakes komersial (98%), larutan natrium silikat komersial (fraksi massa padat 0,35 dan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=3,2$), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Merck), dan aquades. Abu terbang yang digunakan berasal dari pembangkit listrik di Jawa Timur dan mempunyai kandungan oksida utama SiO_2 (42,4%), Al_2O_3 (22,6%), dan Fe_2O_3 (9,4%) berdasarkan analisis XRF (*X-Ray Fluorescence*) sehingga dapat dikategorikan sebagai abu terbang *class F*. Abu terbang diayak dengan ayakan standar berukuran 200 mesh sebelum digunakan sebagai bahan baku geopolimer.

Pada pembuatan geopolimer, abu terbang dicampur dengan aktivator alkali menggunakan *mixer* selama 10 menit. Perbandingan massa abu terbang dan aktivator alkali adalah 2,5:1. Aktivator

alkali terdiri dari campuran larutan NaOH 10 N dan larutan natrium silikat dengan perbandingan massa 1:1. Pasta geopolimer yang diperoleh kemudian ditempatkan pada cetakan berukuran 5x5x5 cm dan didiamkan selama 24 jam. Selanjutnya geopolimer dilepas dari cetakan dan dipanaskan di oven pada suhu 60 °C selama 6 jam. Geopolimer kemudian didiamkan selama 7 hari pada suhu kamar sebelum digerus dan diayak dengan ayakan standar berukuran 50 mesh untuk digunakan sebagai adsorben.

Proses adsorpsi logam berat Mn oleh adsorben geopolimer dilakukan secara curah dan dilakukan pada kondisi operasi pH 5, suhu kamar, jumlah adsorben 0,2 g untuk 100 ml larutan logam berat, kecepatan pengadukan 200 rpm dengan variasi konsentrasi awal larutan logam berat dan waktu kontak. Adsorpsi logam berat Mn juga dilakukan dengan adsorben abu terbang. Efisiensi adsorpsi logam berat Mn dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi adsorpsi Mn (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

C_0 dan C_e masing-masing adalah konsentrasi ion logam berat Mn saat awal dan saat setimbang. Konsentrasi ion logam berat Mn dianalisis dengan AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*).

Karakterisasi abu terbang dan geopolimer dilakukan menggunakan analisis SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray*), XRD (*X-Ray Diffraction*), luas permukaan BET (Brunauer-Emmett-Teller), dan FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*).

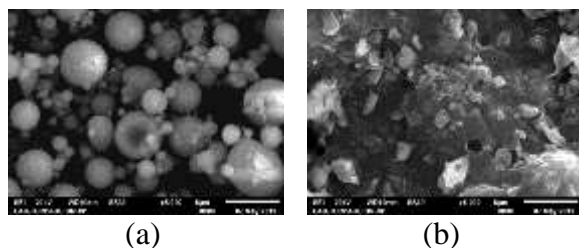
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Geopolimer dari Abu Terbang

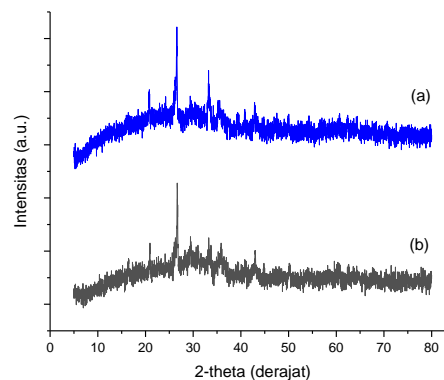
Abu terbang direaksikan dengan aktivator alkali, yaitu campuran larutan NaOH 10 N dan larutan Na-Silikat, untuk membentuk geopolimer. Proses aktivasi alkali tersebut mengubah partikel abu terbang yang berbentuk bola menjadi geopolimer yang mempunyai fase kontinyu

serta berbentuk amorf dan berpori. Menurut Davidovits (2017), geopolimer mempunyai struktur tiga dimensi amorf hingga semi-kristalin. Mikrostruktur abu terbang dan geopolimer dengan analisis SEM ditunjukkan oleh Gambar 1. Struktur geopolimer yang amorf juga dapat dilihat dari hasil analisis XRD seperti ditunjukkan Gambar 2. Puncak difraksi yang menunjukkan adanya kristal tampak relatif kurang tajam pada geopolimer dibandingkan pada abu terbang.

Abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai ukuran lolos ayakan standar 200 mesh, sedangkan geopolimer setelah proses penggerusan mempunyai ukuran lolos ayakan standar 50 mesh. Berdasarkan hasil analisis luas permukaan BET, abu terbang mempunyai luas permukaan 12,14 m²/g dan geopolimer mempunyai luas permukaan 27,20 m²/g (Purbasari dkk., 2020). Hasil ini menunjukkan bahwa geopolimer dengan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan abu terbang dapat digunakan sebagai adsorben yang lebih baik dibandingkan abu terbang (Siyal dkk., 2018; Rasaki dkk, 2019).



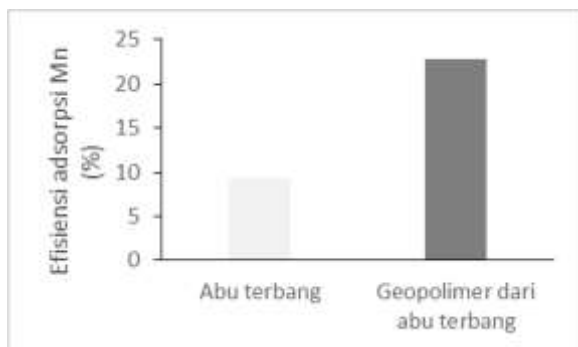
(a) (b)
Gambar 1. Hasil analisis SEM abu terbang (a) dan geopolimer dari abu terbang (b).



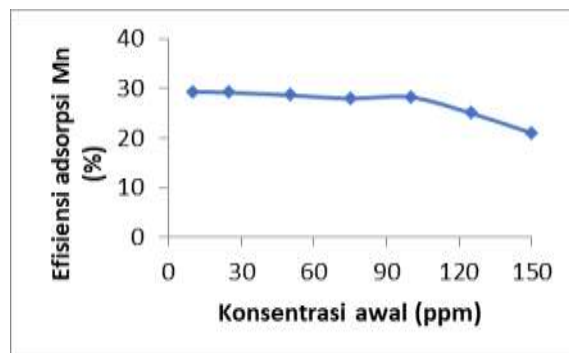
Gambar 2. Hasil analisis XRD abu terbang (a) dan geopolimer dari abu terbang (b).

3.2. Perbandingan Hasil Adsorpsi Logam Berat Mn oleh Abu Terbang dan Geopolimer

Geopolimer yang diperoleh dengan bahan baku abu terbang digunakan untuk mengadsorpsi logam berat ion mangan (Mn^{2+}) dengan kondisi operasi pada pH 5, suhu kamar, jumlah adsorben 0,2 g untuk 100 ml larutan logam berat dengan konsentrasi 100 ppm, kecepatan pengadukan 200 rpm, dan waktu kontak 2 jam. Sebagai pembanding, proses adsorpsi logam berat juga dilakukan dengan abu terbang pada kondisi operasi yang sama. Efisiensi adsorpsi dengan adsorben geopolimer dan abu terbang ditunjukkan oleh Gambar 3. Efisiensi adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer lebih besar dibandingkan abu terbang (Purbasari dkk., 2020). Hal ini disebabkan karena selain geopolimer mempunyai luas permukaan yang lebih besar dibandingkan abu terbang, adanya muatan negatif dari Al pada geopolimer akan menarik muatan positif dari ion logam berat (Mn^{2+}) (Cheng dkk., 2012).



Gambar 3. Efisiensi adsorpsi logam berat Mn oleh abu terbang dan geopolimer.



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi awal terhadap efisiensi adsorpsi logam berat Mn.

3.3. Proses Adsorpsi Logam Berat Mn Oleh Geopolimer

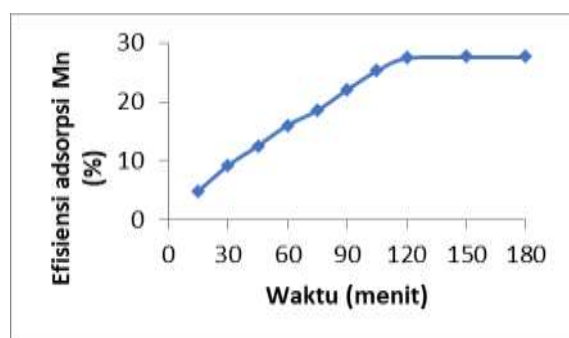
Proses adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dilakukan dengan variasi konsentrasi awal larutan logam berat Mn dan waktu kontak.

3.3.1. Pengaruh Konsentrasi Awal Larutan

Proses adsorpsi dapat dipengaruhi oleh konsentrasi awal larutan. Pada variasi konsentrasi awal larutan, variabel operasi yang dibuat tetap adalah larutan logam berat sebanyak 100 ml, jumlah adsorben geopolimer 0,2 g, pH 5, suhu kamar, kecepatan pengadukan 200 rpm, dan waktu kontak 2 jam. Semakin tinggi konsentrasi logam berat maka efisiensi adsorpsi akan semakin menurun seperti ditunjukkan oleh Gambar 4. Hal ini disebabkan pada konsentrasi adsorbat (logam berat Mn) yang rendah maka adsorben (geopolimer) memiliki permukaan yang cukup untuk mengadsorpsi adsorbat, tetapi jika konsentrasi adsorbat dinaikkan terus-menerus maka permukaan adsorben tidak cukup lagi untuk mengadsorpsi adsorbat (Duan dkk., 2016).

3.3.2. Pengaruh waktu kontak

Variabel operasi yang dibuat tetap pada variasi waktu kontak adalah larutan logam berat dengan konsentrasi 100 ppm sebanyak 100 ml, jumlah adsorben geopolimer 0,2 g, pH 5, kecepatan pengadukan 200 rpm, dan suhu kamar. Semakin lama waktu kontak maka semakin meningkat efisiensi adsorpsi hingga pada suatu saat efisiensi adsorpsi tidak berubah lagi atau proses adsorpsi telah mencapai kesetimbangan. Proses adsorpsi logam berat Mn telah mencapai kesetimbangan setelah 120 menit seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.



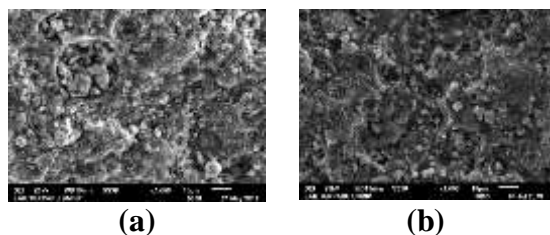
Gambar 5. Pengaruh waktu terhadap efisiensi adsorpsi logam berat Mn.

3.4. Karakteristik geopolimer sebelum dan setelah proses adsorpsi logam berat Mn

3.4.1. Hasil Analisis SEM-EDX

Mikrostruktur geopolimer setelah proses adsorpsi logam berat ditunjukkan oleh Gambar 6, sementara hasil analisis SEM-EDX ditunjukkan oleh Tabel 1. Pada geopolimer setelah adsorpsi, logam Mn

menunjukkan peningkatan jumlah dibandingkan pada geopolimer sebelum adsorpsi (Purbasari dkk., 2020).



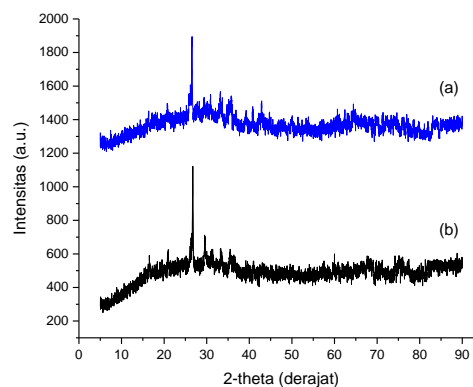
Gambar 6. Hasil analisis SEM geopolimer sebelum (a) dan setelah (b) proses adsorpsi logam berat Mn.

Tabel 1. Komposisi unsur hasil analisis EDX pada G (geopolimer sebelum proses adsorpsi) dan G-Mn (geopolimer setelah proses adsorpsi logam Mn).

Komposisi (%-massa)	G	G-Mn
Si	36,39	41,48
Al	20,86	21,86
Na	22,90	3,44
Ca	13,18	19,14
Fe	6,11	6,38
Cu	0,27	0,57
Zn	0,22	0,34
Mn	0,07	6,78

3.4.2. Hasil Analisis XRD

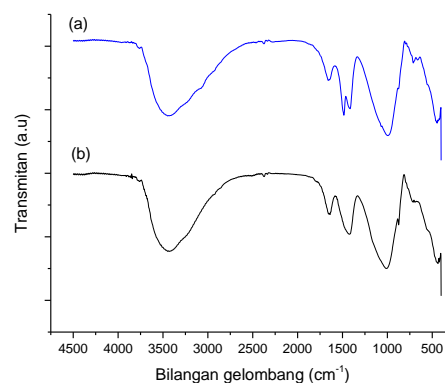
Hasil analisis XRD geopolimer dari abu terbang sebelum dan setelah proses adsorpsi logam berat Mn ditunjukkan oleh Gambar 7. Intensitas dari puncak-puncak pada geopolimer setelah proses adsorpsi tampak mengalami penurunan dibandingkan pada geopolimer sebelum proses adsorpsi. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi logam berat telah terjadi pada permukaan geopolimer (Karthikeyan dan Ilango, 2008; Sarkar dkk., 2018).



Gambar 7. Hasil analisis XRD geopolimer sebelum (a) dan sesudah (b) proses adsorpsi logam berat Mn.

3.4.3. Hasil Analisis FTIR

Hasil analisis FTIR pada geopolimer dari abu terbang sebelum dan setelah proses adsorpsi logam berat Mn ditunjukkan oleh Gambar 8. Adapun kandungan gugus fungsional pada geopolimer baik sebelum maupun setelah proses adsorpsi logam berat Mn ditunjukkan oleh Tabel 2.



Gambar 8. Hasil analisis FTIR geopolimer sebelum (a) dan sesudah (b) proses adsorpsi logam berat Mn.

Tabel 2. Gugus fungsional pada G (geopolimer sebelum proses adsorpsi) dan G-Mn (geopolimer setelah proses adsorpsi logam Mn) berdasarkan bilangan gelombang (cm^{-1}).

Bilangan gelombang (cm^{-1})			Keterangan
Teori	G	G-Mn	
470	445,56	435,91	<i>Bending vibration</i> (Si-O-Si dan O-Si-O)
795	711,73	713,66	<i>Symmetrical stretching vibration</i> (Si-O-Si)
1008	995,27; 1066,64	1010,70	<i>Asymmetrical vibration</i> (Si(Al)-O)
1410-1570	1415,75; 1485,19	1421,54	<i>Stretching vibration</i> (O-C-O)
1600-1700	1653,00	1639,49	<i>Bending vibration</i> (HOH)
2200-3600	3431,36	3429,43	<i>Stretching vibration</i> (-OH, HOH)

Geopolimer sebelum dan setelah proses adsorpsi logam berat mengandung gugus fungsional yang sama, yaitu Si-O-Si dan O-Si-O (*bending vibration*), Si-O-Si (*symmetrical stretching vibration*), Si(Al)-O (*asymmetrical vibration*), O-C-O (*stretching vibration*), HOH (*bending vibration*), serta -OH dan HOH (*stretching vibration*) (Lee dan van Deventer, 2002; Davidovits, 2008). Adanya gugus O-C-O menunjukkan adanya karbonat yang dapat terbentuk dari CO_2 atmosferik, sedangkan gugus -OH dan HOH menunjukkan adanya air atmosferik yang teradsorpsi (Nath dkk., 2016).

Puncak-puncak gugus fungsional pada geopolimer setelah proses adsorpsi mengalami sedikit pergeseran bilangan gelombang jika dibandingkan pada geopolimer sebelum proses adsorpsi. Intensitas puncak dari grup O-C-O pada geopolimer setelah proses adsorpsi tampak lebih kecil dibandingkan pada geopolimer sebelum proses adsorpsi. Hal ini disebabkan proses adsorpsi yang berlangsung pada larutan asam dapat

melarutkan karbonat yang terbentuk pada geopolimer (Bouguermouh dkk., 2017).

3.5. Kajian Isoterm dan Kinetika Adsorpsi

Untuk adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang, model kesetimbangan isoterm adsorpsi yang dikaji adalah model Langmuir dan Freundlich, sementara model kinetika adsorpsi yang dikaji adalah model order satu semu dan order dua semu.

Pada model Langmuir, adsorben diasumsikan mempunyai permukaan homogen dan masing-masing molekul adsorben hanya dapat mengadsorpsi satu molekul adsorbat. Persamaan yang berlaku adalah:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

atau

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (3)$$

dimana C_e adalah konsentrasi saat setimbang, q_e adalah jumlah ion logam berat yang teradsorpsi pada kesetimbangan, q_m adalah kapasitas maksimum adsorpsi, dan K_L adalah konstanta Langmuir.

Pada model Freundlich, adsorben diasumsikan mempunyai permukaan heterogen dan masing-masing molekul adsorben mempunyai kemampuan adsorpsi yang berbeda. Persamaan yang berlaku adalah:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

K_F adalah konstanta Freundlich yang berhubungan dengan kapasitas adsorpsi, sedangkan $1/n$ berhubungan dengan intensitas adsorpsi. Harga $1/n < 1$ mengindikasikan adsorpsi yang baik (Al-Harashsheh dkk., 2015).

Adapun persamaan yang berlaku untuk model kinetika order satu semu adalah:

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

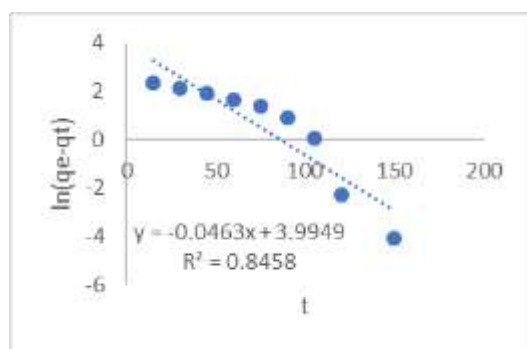
dan pada model kinetika order dua semu adalah:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (6)$$

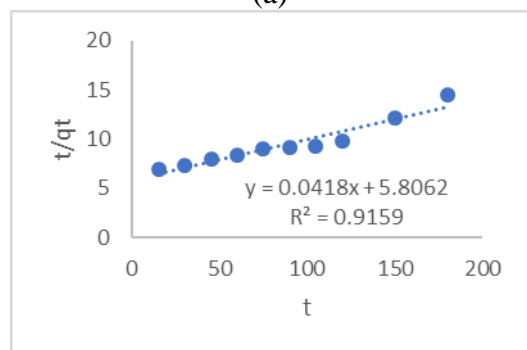
dimana k_1 dan k_2 masing-masing adalah konstanta kecepatan order satu semu dan order dua semu, sedangkan q_e dan q_t masing-masing adalah jumlah ion logam yang teradsorpsi pada kesetimbangan dan pada waktu t . Model kinetika order satu semu mengasumsikan proses adsorpsi dikendalikan secara fisika, sementara order dua semu dikendalikan secara kimia (Ge dkk., 2015).

3.5.1. Kajian model isoterm adsorpsi

Plot linier untuk model isoterm Langmuir (persamaan (3)) dan Freundlich (persamaan (4)) ditunjukkan oleh Gambar 9 dan parameter isoterm yang diperoleh pada masing-masing model isoterm ditunjukkan oleh Tabel 3.



(a)



(b)

Gambar 9. Plot linier model isoterm Langmuir (a) dan Freundlich (b) pada adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang.

Tabel 3. Parameter isoterm adsorpsi pada adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang.

Model Langmuir		Model Freundlich	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
q_m (mg.g^{-1})	20,161	$1/n$	0,651
K_L (l.mg^{-1})	0,084	K_F ($\text{mg.g}^{-1}.(\text{l.mg}^{-1})^{1/n}$)	3,523
R^2	0,971	R^2	0,916

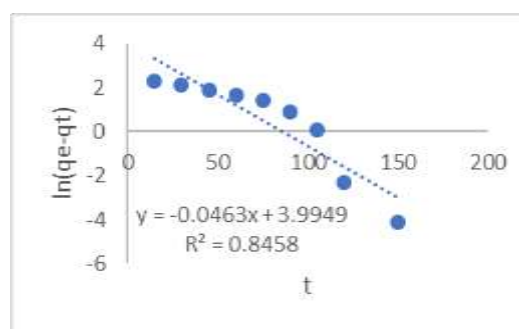
Model isoterm Langmuir lebih sesuai untuk menjelaskan adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang, yaitu adsorpsi monolayer, berdasarkan nilai R^2 yang diperoleh (mendekati ~ 1). Karakteristik model isoterm Langmuir dapat dinyatakan dengan faktor separasi tak berdimensi (R_L) yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (7)$$

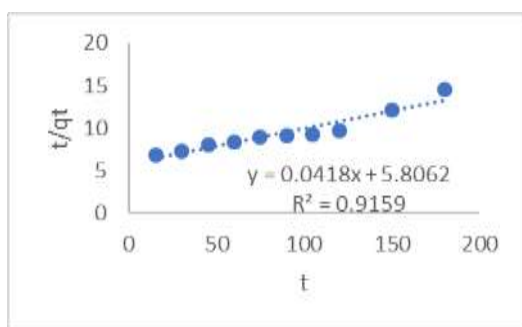
dimana K_L adalah konstanta Langmuir dan C_0 adalah konsentrasi awal. Proses adsorpsi dikategorikan *favorable* jika $0 < R_L < 1$; *unfavorable* jika $R_L > 1$; linier jika $R_L = 1$, dan *irreversible* jika $R_L = 0$ (Ayawei dkk., 2017). Nilai R_L pada adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang dengan konsentrasi awal 10-150 ppm sebesar 0,559-0,078 sehingga dapat dikategorikan adsorpsi yang *favorable*.

3.5.2. Kajian model kinetika adsorpsi

Gambar 10 menunjukkan plot linier untuk model kinetika adsorpsi order satu semu (persamaan (5)) dan order dua semu (persamaan (6)). Adapun Tabel 4 menunjukkan parameter kinetika adsorpsi yang diperoleh.



(a)



(b)

Gambar 10. Plot linier model kinetika order satu semu (a) dan order dua semu (b) pada adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang.

Tabel 4. Parameter kinetika adsorpsi pada adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang.

Model order satu semu		Model order dua semu	
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
q_e (mg.g^{-1})	54,320	q_e (mg.g^{-1})	23,923
k_1 (min^{-1})	0,0463	k_2 ($\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$)	0,0003
R^2	0,846	R^2	0,916

Proses adsorpsi logam berat Mn mengikuti model kinetika order dua semu berdasarkan harga R^2 yang lebih besar dibandingkan pada order satu semu. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang dikendalikan oleh proses adsorpsi kimia (Abas dkk., 2013; Nguyen dkk., 2019).

4. KESIMPULAN

Abu terbang telah dapat dibuat menjadi geopolimer dengan aktivator alkali dan digunakan sebagai adsorben logam berat Mn. Pada proses adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang, konsentrasi awal dan waktu kontak berpengaruh terhadap efisiensi adsorpsi yang diperoleh. Semakin tinggi konsentrasi awal larutan logam berat Mn maka efisiensi adsorpsi yang diperoleh akan menurun. Adapun semakin lama waktu kontak maka efisiensi akan meningkat dan mencapai

kesetimbangan setelah 120 menit. Hasil kajian isoterm dan kinetika adsorpsi menunjukkan bahwa adsorpsi logam berat Mn oleh geopolimer dari abu terbang mengikuti model isoterm Langmuir dan model kinetika order dua semu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abas, S.N.A., Ismail, M.H.S., Kamal, M.L. dan Izhar, S. (2013). Adsorption process of heavy metals by low-cost adsorbent: A review. *World Applied Sciences Journal*, 28(11), 1518-1530.
- Al-Harashsheh, M.S., Al-Zboon, K., Al-Makhadmeh, L., Hararah, M., dan Mahasneh, M. (2015). Fly ash based geopolymer for heavy metal removal: A case study on Copper removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 1669–1677.
- Ayawei, N., Ebelegi, A.N., dan Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017, 3039817.
- Bouguermouh, K., Bouzidi, N., Mahtout, L., Pérez-Villarejo, L., dan Martínez-Cartas, M.L. (2017). Effect of acid attack on microstructure and composition of metakaolin-based geopolymers: The role of alkaline activator. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 463, 128-137.
- BPPT. (2013). *Outlook energi Indonesia*. Jakarta: Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- Cheng, T.W., Lee, M.L., Ko, M.S., Ueng, T.H., dan Yang, S.F. (2012). The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 56, 90-96.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer: Chemistry and applications*. 2nd ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 335-350.

- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., dan Ren, D. (2016). Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolimer for removal of Cu(II) from wastewater. *Ceramics International*, 42, 13507-13518.
- Ge, Y., Cui, X., Kong, Y., Li, Z., He, Y., dan Zhou, Q. (2015). Porous geopolimeric spheres for removal of Cu(II) from aqueous solution: Synthesis and evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 244–251.
- Jiang, Z., Cao, B., Su, G., Lu, Y., Zhao, J., Shan, D., Zhang, X., Wang, Z., dan Zhang, Y. (2016). Comparison on the Surface Structure Properties along with Fe(II) and Mn(II) Removal Characteristics of Rice Husk Ash, Inactive *Saccharomyces cerevisiae* Powder, and Rice Husk. *BioMed Research International*, 2016, 7183951.
- Karthikeyan, G. dan Ilango, S.S. (2008). Equilibrium sorption studies of Fe, Cu and Co ions in aqueous medium using activated carbon prepared from *Recinius communis* Linn. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 12(2), 81-87.
- Lee, W.K.W. dan van Deventer, J.S.J. (2002). Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211, 49-66.
- Munawar, A., Mulyanto, D., dan Asrifah, R.R.D. (2023). Equilibrium studies for the removal of manganese (Mn) from aqueous solution using natural zeolite from West Java, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 10(2), 4191-4198.
- Nath, S.K., Maitra, S., Mukherjee, S., dan Kumar, S. (2016). Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 758-765.
- Nguyen, K.M., Nguyen, B.Q., Nguyen, H.T., dan Nguyen, H.T.H. (2019). Adsorption of arsenic and heavy metals from solutions by unmodified iron-ore sludge. *Applied Sciences*, 9(4), 619.
- Ohiagu, F.O., Chikezie, P.C., Ahaneku, C.C., dan Chikezie, C.M. (2022). Human exposure to heavy metals: toxicity mechanisms and health implications. *Material Science & Engineering International Journal*, 6(2), 78-87.
- Permenkes. (2010). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Permenkes. (2017). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, dan Pemandian Umum*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Purbasari, A., D. Ariyanti, D. dan S. Sumardiono. (2020). Preparation and application of fly ash-based geopolimer for heavy metal removal. *AIP Conf. Proc.*, 2197(050006), 1-5.
- Rasaki, S.A., Bingxue, Z., Guarecuco, R., Thomas, T., dan Minghui, Y. (2019). Geopolymer for use in heavy metals adsorption, and advanced oxidative processes: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 213, 42-58.
- Sarkar, C., Basu, J.K., dan Samanta, A.N. (2018). Synthesis of mesoporous geopolimeric powder from LD slag as superior adsorbent for Zinc (II) removal. *Advanced Powder Technology*, 29, 1142-1152.
- Sherly, R. dan Kumar, S.S. (2011). Valuable products from fly ash – A

review. *Journal of Industrial Pollution Control*, 27(2), 113-120.

Siyal, A.A., Shamsuddin, M.R., Khan, M.I., Rabat, N.E., Zulfiqar, M., Man, Z., Siame, J., dan Azizli, K.A. (2018). A review on geopolymers as emerging materials for the adsorption of heavy metals and dyes. *Journal of Environmental Management*, 224, 327-339.