

Pengaruh Perlit sebagai Adsorben pada Adsorpsi Zat Warna Metilen Biru

Mardiana Rimba Utami*, Kapti Riyani, Tien Setyaningtyas

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman. Jl. Dr. Soeparno, Karangwangkal, Purwokerto Utara, Jawa Tengah 53122

*Penulis korespondensi: mardianarimba@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.24198/cna.v12.n2.47170>

Abstrak: Aktivitas industri di zaman modern yang berkembang pesat dapat menyebabkan permasalahan lingkungan. Hal ini dikarenakan bertambahnya jumlah limbah yang dihasilkan akibat peningkatan produksi. Limbah zat warna tanpa pengolahan dapat menghambat penetrasi cahaya matahari, aktivitas fotosintesis, dan pertumbuhan biota air. Salah satu limbah zat warna yang sering ditemukan adalah metilen biru. Pengolahan zat warna metilen biru dapat menggunakan metode adsorpsi yang praktis, mudah dilakukan dengan biaya rendah. Penelitian ini menunjukkan aktivitas adsorpsi terbaik metilen biru oleh adsorben perlit terhadap parameter pH, waktu kontak, serta penentuan kinetika dan isoterm adsorpsi. Aktivitas terbaik perlit dalam mengadsorpsi metilen biru adalah pada pH 9 dengan waktu kontak 180 menit yang menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 3,873 mg/g. Kinetika adsorpsi yang digunakan mengikuti model pseudo orde dua dengan nilai k dan q berturut-turut sebesar 0,0055 g/(mg·menit⁻¹) dan 3,3102 mg/g, sedangkan isoterm adsorpsi mengikuti model isoterm Langmuir dengan nilai q_{maks} dan K_L berturut-turut sebesar 3,873 mg/g dan 0,5822 L/mg.

Kata kunci: adsorpsi, perlit, metilen biru.

Abstract: Rapidly developing modern industrial activities can cause environmental problems. This is due to an increase in the amount of waste generated due to increased production. Untreated waste dyes can inhibit sunlight penetration, photosynthetic activity, and aquatic biota growth. One common waste dye is methylene blue. A practical adsorption method is available for processing methylene blue dyes that is easy and inexpensive to perform. This study demonstrated the best adsorption activity of methylene blue by perlite adsorbent in terms of pH parameters, contact time, and determination of adsorption kinetics and isotherms. The best activity of perlite in the adsorption of methylene blue is at pH 9 and contact time of 180 min, resulting in a maximum adsorption capacity of 3,873 mg/g. The adsorption kinetics used followed a second-order pseudo-model with consecutive k and q values of 0.0055 g/mg.min and 3.3102 mg/g, while the adsorption isotherms followed the Langmuir isotherm model with q_{max} and K_L values of 3.873 mg/g and 0.5822 L/mg, respectively.

Keywords: adsorption, perlite, methylene blue.

PENDAHULUAN

Kegiatan industri yang berkembang pesat saat ini dapat menimbulkan permasalahan lingkungan. Hal ini disebabkan meningkatnya limbah akibat peningkatan produksi. Limbah cair yang dibuang tanpa pengolahan merupakan masalah serius bagi kehidupan manusia karena mempengaruhi kualitas air dan bersifat racun bagi ekosistem perairan. Salah satu kontaminan air adalah metilen biru, pewarna beracun. Metilen biru merupakan pewarna sintetis yang umum digunakan pada industri tekstil, kertas, karet, pestisida, cat (Mahanthappa *et al.* 2019), kulit, plastik, dan industri cat (Baunsele & Missa 2020). Pewarna sintetis mengandung senyawa dengan struktur molekul aromatik yang kompleks, sehingga sulit terdegradasi secara alami ketika dilepaskan ke

lingkungan (Kumar *et al.* 2011). Penggunaan pewarna sintetis yang tidak terkontrol dapat menyebabkan mutasi, alergi, toksisitas, dan kanker (Mahanthappa *et al.* 2019).

Proses pengolahan limbah melibatkan berbagai metode seperti koagulasi (Pratiwi dkk. 2019), elektrokoagulasi (Guna dkk. 2019), fotokatalisis (Afrozi dkk. 2016), filtrasi dan adsorpsi (Puspita dkk. 2021). Metode yang umum digunakan untuk mengolah limbah pewarna adalah adsorpsi. Adsorpsi adalah suatu proses di mana molekul-molekul dalam fasa gas atau cair berikatan dengan permukaan padat atau cair. Zat yang mengikat molekul disebut adsorben, dan molekul yang mengikat adsorben disebut adsorbat (Botahala 2019). Menurut Atkins (1997), adsorpsi diklasifikasikan menjadi dua jenis:

fisisorpsi dan kemisorpsi. Selama adsorpsi fisik (fisisorpsi), terjadi gaya van der Waals yang lemah antara adsorben dan adsorbat. Kemisorpsi adalah pertukaran atau pembagian elektron antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben (Syauqiah dkk. 2011; Sulistyawati 2020). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi antara lain konsentrasi adsorbat, pH, waktu kontak, dan suhu (Priyantha *et al.* 2015).

Perlite adalah batuan vulkanik amorf yang ditemukan di wilayah Mediterania. Karena struktur kaca dan kandungan SiO_2 sebanyak 74,33% dan Al_2O_3 sebanyak 12,75% (Darmawan *et al.* 2021), perlit dapat diklasifikasikan sebagai bahan pozzolanik alami. Karena kandungan silikanya yang tinggi, perlit memiliki sifat yang sangat baik sebagai adsorben. Banyak penelitian yang menyelidiki penggunaan perlit sebagai adsorben, seperti penghilangan besi (Primasari & Gustilisa 2016), penjernihan air (Zein dkk. 2020), dan penghilangan logam Cu (II) (Heltina & Khairat 2011). Namun perlit masih jarang digunakan sebagai adsorben metilen biru. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk membahas kapasitas adsorpsi perlit terhadap metilen biru sebagai alternatif mengatasi masalah pencemaran air dan dampak lingkungannya.

BAHAN DAN METODE

Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: alat-alat gelas, magnetic stirrer, pH meter (Lutron pH-222), oven (Mettler UN55), furnace (Neycraft Burnout Klin Oven JFF-2000), kertas saring, ayakan 120 mesh, alat sentrifugasi (Quantum), alat spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu 1601), dan alat spektrofotometer IR (Shimadzu IR Tracer-100).

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: akua DM, akuades, metilen biru (Merck), perlit, HNO_3 5% (Merck), HCl 0,1 M (Merck), dan NaOH 0,1 M (Merck).

Preparasi Perlit

Preparasi perlit dilakukan dengan memodifikasi penelitian Jin *et al.* (2021). Sebanyak 25 g perlit digerus dan disaring menggunakan ayakan 120 mesh, kemudian direndam dalam 100 mL larutan HNO_3 5% selama 1 jam, lalu dikeringkan dalam oven bersuhu 80°C selanjutnya dikalsinasi dalam furnace bersuhu 500°C selama 2 jam. Perlit yang telah diaktivasi kemudian dianalisis gugus fungsinya menggunakan spektrofotometer IR.

Penentuan pH Optimum Adsorpsi

Perlit yang telah dibuat sebelumnya diambil sebanyak 0,25 g kemudian dimasukkan ke dalam gelas beker berisi 250 mL metilen biru 10 ppm dengan variasi pH 3, 5, 7, 9, dan 11. Kemudian

diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 3 jam pada keadaan gelap. Sebanyak 10 mL sampel diambil untuk disentrifus pada kecepatan 1500 rpm selama 10 menit, kemudian supernatan diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 664,8 nm.

Penentuan Waktu Kontak Optimum dan Kinetika Adsorpsi

Sebanyak 0,25 g perlit dimasukkan ke dalam gelas beker berisi 250 mL metilen biru 10 ppm pada kondisi pH optimum. Kemudian diaduk selama 4 jam pada keadaan gelap. Sebanyak 10 mL sampel diambil pada 10 menit pertama, tiap 30 menit selanjutnya, dan tiap 1 jam setelah 2 jam pengadukan untuk disentrifus pada kecepatan 1500 rpm selama 10 menit. Supernatan yang diperoleh selanjutnya diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 664,8 nm.

Penentuan Isoterm Adsorpsi

Sebanyak 0,25 g perlit dimasukkan ke dalam gelas beker berisi 250 mL metilen biru pada kondisi pH optimum dengan variasi konsentrasi 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, dan 80 ppm. Kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama waktu kontak optimum pada keadaan gelap. Sebanyak 10 mL sampel diambil untuk disentrifus pada kecepatan 1500 rpm selama 10 menit, kemudian supernatan diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 664,8 nm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Gugus Fungsi Perlit

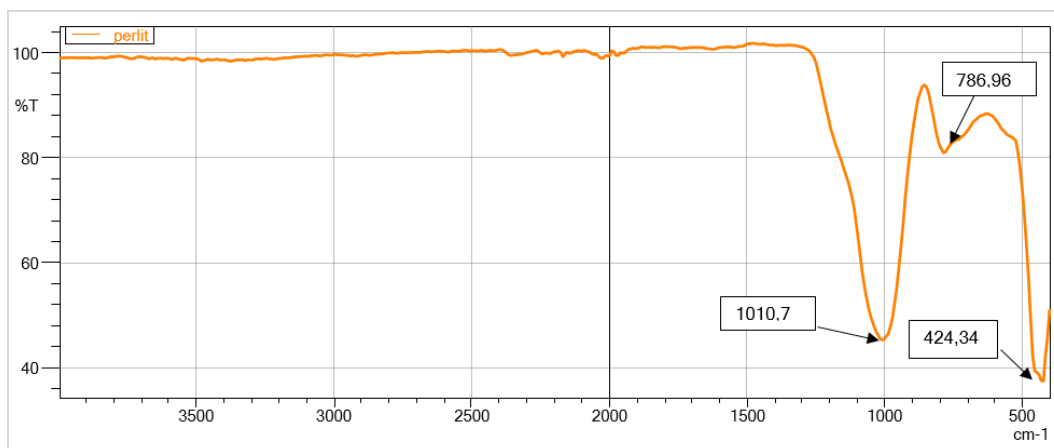
Spektra FTIR perlit ditunjukkan pada Gambar 1. Puncak yang teramati pada bilangan gelombang $1010,7\text{ cm}^{-1}$ disebabkan adanya vibrasi ulur asimetris pada gugus Si-O-M (M= Al atau Si), sedangkan pada bilangan gelombang $786,96\text{ cm}^{-1}$ merupakan hasil vibrasi ulur gugus silanol (Si-OH) (Luo *et al.* 2014). Bilangan gelombang $424,34\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi tekuk dari gugus siloksan (Si-O-Si) (Selengil & Yıldız 2022).

pH Optimum Adsorpsi

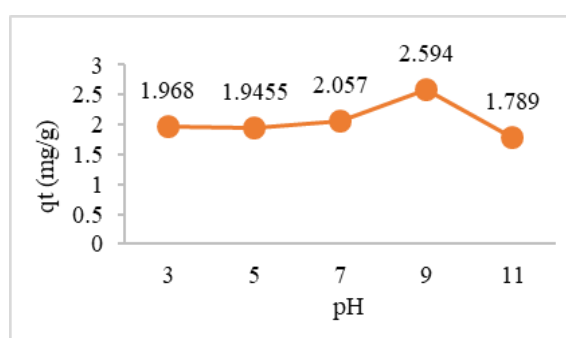
Pengukuran aktivitas adsorpsi maksimum dilakukan dengan menentukan kapasitas adsorpsi yang diperoleh, sesuai dengan persamaan 1.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{w} \dots \dots \dots (1)$$

dimana q_t adalah jumlah zat warna yang teradsorpsi dalam berbagai waktu (mg/g), C_0 dan C_t (mg/L) adalah konsentrasi fase cair metilen biru pada waktu awal dan waktu t , V adalah volume larutan (L), dan w adalah massa adsorben (g) (Badriyah & Putri 2017). Hubungan antara kapasitas adsorpsi (q_t) dengan variasi pH tersaji pada Gambar 2.

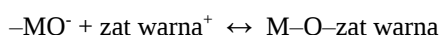


Gambar 1. Spektra FTIR perlit



Gambar 2. Hubungan antara kapasitas adsorpsi dengan pH

Berdasarkan Gambar 2, kapasitas adsorpsi maksimum (q_t) metilen biru berada pada pH 9, dan kapasitas adsorpsi sebesar 2,594 mg/g. Pada pH rendah, permukaan perlit menjadi bermuatan positif karena kelebihan ion H^+ (Sögüta *et al.* 2021) sehingga menimbulkan gaya tolak menolak dari perlit, sehingga mencegah kation metilen biru memenuhi permukaan perlit. Selanjutnya, peningkatan pH mengionisasi gugus silanol pada permukaan perlit, dan ion H^+ berpindah dari permukaan adsorben ke dalam larutan (İnan *et al.* 2022). Hal ini dapat mengakibatkan interaksi elektrostatik antara kation metilen biru dan permukaan perlit yang bermuatan negatif. Kapasitas adsorpsi perlit didukung oleh kandungan Si yang tinggi. Menurut Acemioğlu (2005) atom Si pada permukaan perlit membentuk gugus silanol yang dapat mengadsorpsi metilen biru. Atom oksigen (O^-) yang cukup reaktif dari gugus silanol dan siloksan perlit dapat berikatan dengan atom N^+ pada metilen biru, yang menyebabkan reaksi adsorpsi. Ketika nilai pH berada diatas 9, kapasitas adsorpsi kembali menurun, hal ini dapat terjadi akibat persaingan antara ion OH^- dengan atom O^- untuk berikatan dengan kation metilen biru. Berikut persamaan reaksi sederhana saat terjadi adsorpsi (Acemioğlu 2005).

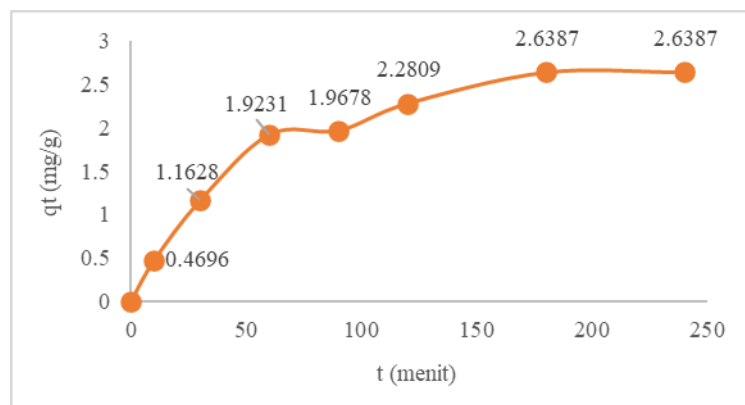


Waktu Optimum Adsorpsi

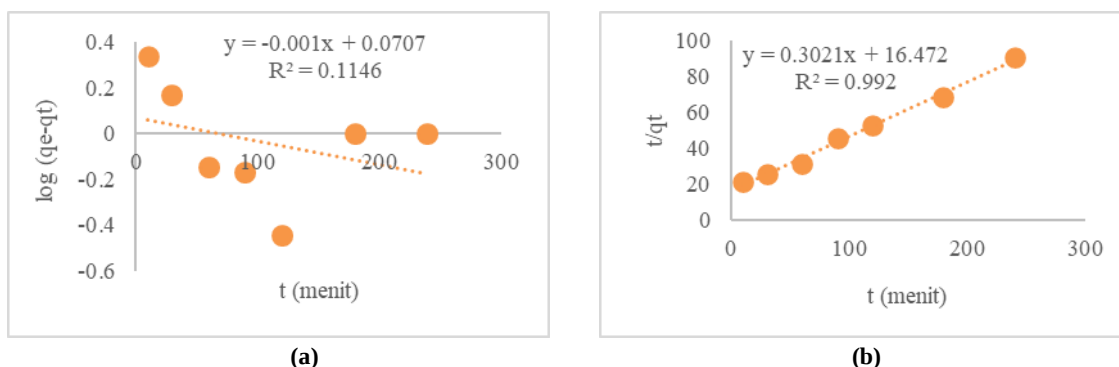
Penelitian ini menggunakan variasi waktu kontak adsorpsi 10, 30, 60, 90, 120, 180, dan 240 menit pada pH 9. Hasil yang diperoleh tersaji pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak maka semakin banyak molekul metilen biru yang teradsorpsi. Jumlah molekul metilen biru yang teradsorpsi meningkat dari 10 hingga 120 menit. Hal ini disebabkan karena permukaan adsorben tidak terisi banyak situs aktif dan metilen biru dapat berinteraksi dengan perlit. Akibatnya reaksi adsorpsi berlangsung cepat dan terus menerus serta cenderung stabil setelah 180 menit karena berkurangnya tempat adsorpsi (Zhao *et al.* 2017). Pada waktu kontak 180 menit dapat disimpulkan bahwa kapasitas adsorpsi optimal adalah 2,6387 mg/g. Oleh karena itu, waktu adsorpsi ideal perlit adalah 180 menit. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan laju adsorpsi metilen biru.

Kinetika Adsorpsi Metilen Biru

Kinetika adsorpsi menggambarkan proses penyerapan adsorbat oleh suatu adsorben sebagai fungsi waktu dan diukur dengan laju adsorpsi. Laju adsorpsi dapat ditentukan dari konstanta laju adsorpsi (k) dan orde reaksi yang diperoleh dari persamaan kinetika adsorpsi. Penentuan kinetika adsorpsi dilakukan dengan menggunakan pendekatan



Gambar 3. Hubungan antara waktu kontak dengan kapasitas adsorpsi



Gambar 4. Model kinetika adsorpsi metilen biru (a) Pseudo orde satu; (b) Pseudo orde dua

Tabel 1. Perhitungan kinetika adsorpsi metilen biru

Pseudo orde satu			Pseudo orde dua		
k (g/mg.menit ⁻¹)	q (mg/g)	R ²	k (g/mg.menit ⁻¹)	q (mg/g)	R ²
0,0023	1,1768	0,1146	0,0055	3,3102	0,992

persamaan kinetika adsorpsi yang paling tepat dengan membandingkan koefisien determinasi (R^2) atau linearitas kinetika yang digunakan (Pranoto 2022). Dua jenis persamaan yang digunakan untuk kinetika adsorpsi: orde satu semu menurut persamaan (2) dan orde kedua semu menurut persamaan (3).

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log } q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad \dots(2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e^2 k_2} + \frac{1}{q_e} t \quad \dots(3)$$

Penentuan kinetika adsorpsi pseudo orde satu dilakukan dengan membuat kurva hubungan antara $\log(q_e - q_t)$ dengan waktu (t), sedangkan kinetika adsorpsi pseudo orde dua dilakukan dengan membuat kurva hubungan antara t/q_t dengan waktu (t). Kurva penentuan model kinetika adsorpsi metilen biru dengan perlit tersaji pada Gambar 4.

Gambar 4 menunjukkan model kinetika adsorpsi metilen biru. Gambar (a) merupakan kinetika adsorpsi pseudo orde satu dengan nilai R^2 sebesar 0,1146, dan Gambar (b) merupakan kinetika adsorpsi pseudo orde dua dengan nilai R^2 sebesar 0,992. Berdasarkan kurva di atas dapat disimpulkan bahwa kinetika adsorpsi mengikuti pseudo orde dua karena nilai R^2 yang dihasilkan mendekati 1. Hal ini menunjukkan bahwa laju serapan perlit metilen biru per satuan waktu (dq/dt) berbanding lurus dengan kuadrat kapasitas adsorpsi kosong ($q_e - q_t$). Dengan meningkatnya konsentrasi larutan, laju adsorpsi semakin meningkat hingga tercapai kesetimbangan. Model kinetika yang diperoleh digunakan untuk menentukan nilai konstanta laju adsorpsi (k) dan kapasitas adsorpsi maksimum (q). Semakin tinggi nilai konstanta laju adsorpsi maka semakin cepat pula kapasitas adsorpsi adsorben (Baunsele & Missa 2020). Hasil kinetika adsorpsi ditunjukkan pada Tabel 1.

Isoterm Adsorpsi Metilen Biru

Proses adsorpsi dievaluasi menggunakan dua model isotherm: model Langmuir dan model Freundlich. Isoterm adsorpsi Langmuir didefinisikan sebagai kapasitas adsorpsi maksimum yang dihasilkan oleh satu lapisan (monolayer) pada suatu permukaan dengan jumlah lapisan identik yang terbatas, yang ditunjukkan pada Persamaan (4) (Ho 2004). Model Freundlich, sebaliknya, mengasumsikan bahwa ada banyak lapisan permukaan (multilayers) dan tidak seragam. Model isotherm ini juga menjelaskan bahwa adsorpsi terjadi secara fisik dan penyerapan yang lebih kuat terjadi pada permukaan adsorben. Adsorpsi fisik terjadi karena adanya ikatan van der Waals, yaitu lemahnya gaya tarik-menarik antara adsorbat dengan permukaan adsorben (Saputri 2020). Model isotherm Freundlich ditunjukkan pada persamaan (5)

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{Q_m \cdot K_L} \dots(4)$$

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{N} \log C_e \dots(5)$$

Dimana Q_m dan K_L pada Persamaan (4) adalah konstanta kapasitas (mg/g) dan energi adsorpsi (L/mg). Konstanta ini didapatkan dari nilai kemiringan dan intersep dari plot linear C_e/Q_e vs C_e . Sedangkan K_f dan N pada persamaan (5) merupakan konstanta Freundlich yang menggabungkan semua faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi yaitu kapasitas adsorpsi dan intensitas adsorpsi. Konstanta ini ditentukan dari plot $\log Q_e$ vs $\log C_e$ (Matouq *et al.* 2015).

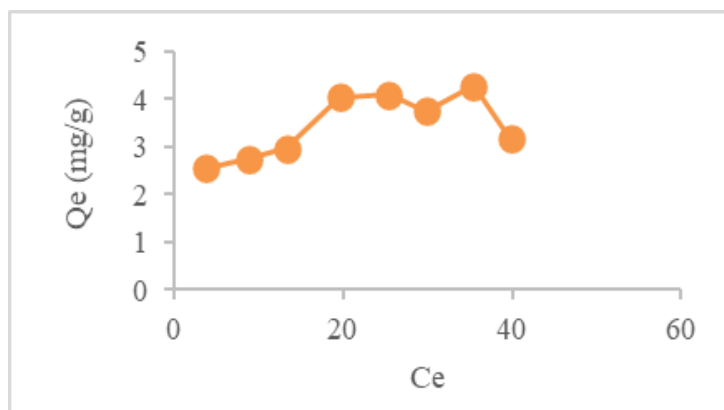
Isoterm adsorpsi dilakukan pada pH 9 dengan variasi konsentrasi metilen biru 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, dan 80 ppm. Hubungan antara konsentrasi metilen biru pada waktu kesetimbangan (C_e) dan kapasitas adsorpsi pada waktu kesetimbangan (Q_e) ditunjukkan pada Gambar 5. Sedangkan kurva

penentuan model isotherm adsorpsi disajikan pada Gambar 6.

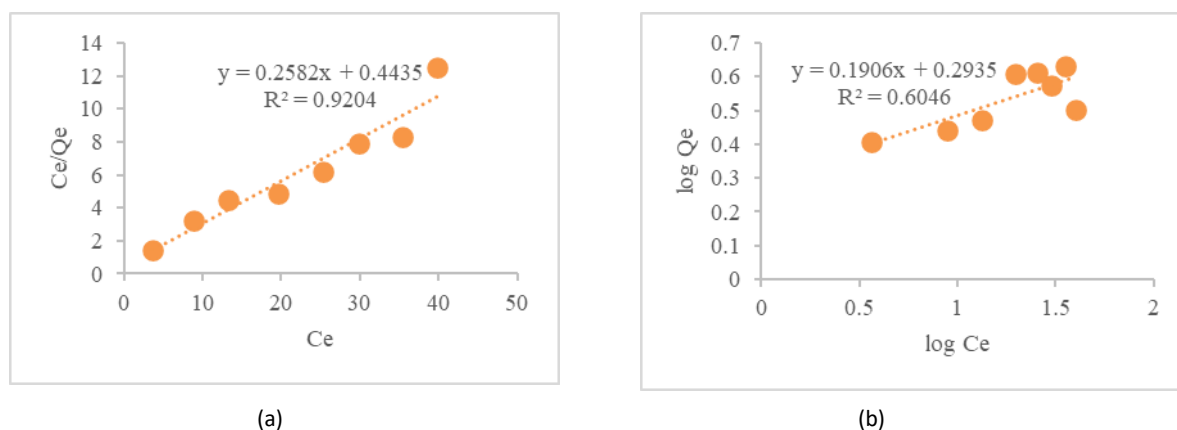
Gambar 5 menunjukkan hubungan antara C_e dan Q_e . Dari kurva tersebut dapat disimpulkan bahwa kenaikan nilai C_e sebanding dengan nilai Q_e . Hasil ini dapat digunakan untuk memandu penentuan model isotherm adsorpsi yang sesuai. Gambar 6 menunjukkan kurva model isotherm adsorpsi perlit. Gambar (a) merupakan model isotherm Langmuir dengan nilai R^2 sebesar 0,9204 dan Gambar (b) merupakan model isotherm Freundlich dengan nilai R^2 sebesar 0,6046. Berdasarkan kurva di atas dapat disimpulkan bahwa isotherm adsorpsi mengikuti model isotherm Langmuir karena nilai R^2 yang dihasilkan lebih besar dibandingkan model isotherm Freundlich. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi metilen biru bersifat kimia dan distribusi situs aktif pada permukaan perlit seragam (Doğan *et al.* 2000). Adsorpsi ini mempunyai situs aktif pada permukaan adsorben yang hanya mampu menampung satu ion yang teradsorpsi. Ketika semua situs aktif berikatan dengan adsorbat, maka proses adsorpsi berhenti dan mencapai keadaan setimbang, karena interaksi antara molekul metilen biru dan adsorben hanya terjadi dalam satu lapisan atau monolayer saja (Prasetyowati & Toeti 2014; Khaldun dkk. 2017). Pernyataan bahwa adsorpsi metilen biru bersifat kimia didukung oleh nilai energi adsorpsi (E) yang diperoleh. Perhitungan energi adsorpsi didasarkan pada persamaan energi bebas Gibbs (6).

$$E = -RT \ln K \dots(6)$$

dimana R merupakan tetapan gas umum (8,314 J/mol.K), T menyatakan suhu (Kelvin), dan K merupakan konstanta Langmuir dan Freundlich (L/mg). Energi yang dihasilkan pada isotherm Langmuir sebesar 1349,2707 KJ/mol. Menurut Agusriyadin (2020), apabila energi adsorpsi >20,9 kJ/mol maka adsorpsi termasuk adsorpsi kimia. Hasil isotherm adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 5. Kurva hubungan antara konsentrasi pada waktu kesetimbangan (C_e) dan kapasitas adsorpsi pada waktu kesetimbangan (Q_e)



Gambar 6. Model isoterm adsorpsi metilen biru (a) isoterm Langmuir; (b) isoterm Freundlich

Tabel 1. Perhitungan isoterm langmuir dan freundlich

Isoterm	K_L / K_F (L/mg)	q_{maks} (mg/g) / N	R^2	E (KJ/mol)
Langmuir	0,5822	3,873	0,9204	1349,2707
Freundlich	1,9656	5,2466	0,6046	-1685,6

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kinerja perlit teraktivasi asam nitrat optimum dalam mengadsorpsi *methylene blue* yaitu pada pH 9 dan waktu kontak 180 menit, dengan kapasitas adsorpsi maksimum 3,873 mg/g. Selain itu, dapat diketahui pula bahwa proses adsorpsi *methylene blue* mengikuti model kinetika pseudo orde dua dan isoterm Langmuir.

DAFTAR PUSTAKA

- Acemioğlu, B. (2005). Batch kinetic study of sorption of methylene blue by perlite. *Chemical Engineering Journal*. **106**(1): 73-81.
- Afrozi, A.S., Rahmat, S., Auring, R & Asep, N.S. (2016). Pengolahan limbah methylene blue secara fotokatalisis TiO_2 dengan penambahan Fe dan Zeolit. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIV*. Tangerang. 2 Desember 2018. pp. 29-36.
- Agusriyadin. (2020). Karakterisasi, kinetika, dan isoterm adsorpsi limbah ampas kelapa sebagai adsorben ion Cu(II). *Saintifi*. **6**: 104-115.
- Atkins, P. W. (1997). *Kimia Fisika Jilid 2*. Erlangga. Jakarta.
- Badriyah, L. & Putri, M.P. (2017). Kinetika adsorpsi cangkang telur pada zat warna metilen blue. *ALCHEMY: Journal of Chemistry*. **5**(3): 85-91.
- Baunsele, A.B. & Missa, H. (2020). Kajian kinetika adsorpsi metilen biru menggunakan adsorben sabut kelapa. *Akta Kimia Indonesia*. **5**(2): 76-85.
- Botahala, L. (2019). *Perbandingan Efektivitas Daya Adsorpsi Sekam Padi dan Cangkang Kemiri terhadap Logam Besi (Fe) pada Air Sumur Gali*. Deepublish. Yogyakarta.

- Darmawan, D.A., Agus, W., Hasudungan E.W. & Ijang, S. (2021). Characterization of perlite and expanded perlite from west sumatera, indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. **882**(2021): 012010
- Doğan, M., Alkan, M. & Onganer, Y. (2000). Adsorption of methylene blue from aqueous solution onto perlite. *Water, Air, and Soil Pollution*. **120**: 229-248.
- Guna, D.S.E., Ariyanto, E. & Juniar, H. (2019). Purifikasi methyl blue dengan metode elektrokoagulasi proses menggunakan aluminium (Al) sebagai plat elektroda. *Distilasi*. **4**(1): 21-30.
- Heltina, D & Khairat. (2011). Adsorpsi Logam Cu (II) Menggunakan perlit yang teraktivasi dengan asam klorida (HCl). *Prosiding SNTK TOPI*. Pekanbaru. 21-22 Juli 2011. pp. 32-37.
- Ho, Y. (2004). Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *Scientometrics*. **59**(1): 171-177.
- İnan, S., Kusumkar, V.V., Galamboš, M., Viglašová, E., Roskopfová, O. & Daño, M. (2022). Isotherm, kinetic, and selectivity studies for the removal of 133Ba and 137Cs from aqueous solution using Turkish Perlite. *Materials*. **15**(21): 7816.
- Jin, Z., Ying-Chun, G., Chan-Lu, L. & Dan, X. (2021). Synthesis and Visible-Light-Driven photocatalytic properties of floating BiFeO₃/expanding perlite photocatalysts. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*. **37**(5): 905-913.
- Khaldun, I., Aristia, A., & Sarah, F. (2017). Perbandingan daya serap serbuk gergaji kayu damar laut (*Shorea sp*) dan merbau (*Intsia sp*)

- terhadap logam Pb (II). *JIPi (Jurnal IPA dan Pembelajaran IPA)*. **1(1)**: 56-63.
- Kumar, P. S., Ramalingam, S. & Sathishkumar, K. (2011). Removal of methylene blue dye from aqueous solution by activated carbon prepared from cashew nut shell as a new low-cost adsorbent. *Korean Journal Of Chemical Engineering*. **28**: 149-155.
- Luo, W.J., Gao, Q., Wu, X.L. & Zhou, C.G. (2014). Removal of cationic dye (methylene blue) from aqueous solution by humic acid-modified expanded perlite: experiment and theory. *Separation Science and Technology*. **49(15)**: 2400-2411.
- Mahanthappa, M., Kottam, N. & Yellappa, S. (2019). Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using CuSCdS nanocomposite under visible light irradiation. *Applied Surface Science*. **475**: 828-838.
- Matouq, M., Jildeh, N., Qtaishat, M., Hindiyeh, M. & Al Syouf, M.Q. (2015). The adsorption kinetics and modeling for heavy metals removal from wastewater by Moringa pods. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **3(2)**: 775-784.
- Pranoto, O.L. (2022). Sintesis n-metil kitosan magnetik untuk penurunan kadar logam Pb (II). Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Jenderal Soedirman.
- Prasetiowati, Y & Toeti, K. (2014). Kapasitas adsorpsi bentonit teknis sebagai adsorben ion Cd^{2+} . *UNESA Journal of Chemistry*. **3(3)**: 194-200.
- Pratiwi, N.P.R.K., Sibaran, J. & Puspawati, N.M. (2019). Aplikasi koagulan alami ekstrak air kulit singkong (*Manihot esculenta*) dalam pengolahan limbah zat warna malachite green, remazol blue, dan indigosol violet. *Indonesian E-Journal of Applied Chemistry*. **7(2)**: 75-83.
- Primasari, B & Gustilisa, R. (2016). Studi kemampuan perlit sebagai adsorben untuk menyisahkan besi. *Jurnal Teknik Lingkungan*. **13**: 44-50.
- Priyantha, N., Navaratnee & Kulasooriya. (2015). Adsorption of heavy metal ion on rice husk: isotherm modelling and error analysis. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. **8**: 336-342.
- Puspita, R.D., Yeyen, M. & Widya, E.K. (2021). Pengolahan limbah domestik dengan kombinasi metode filtrasi arang aktif-sabut kelapa dan adsorpsi biji kelor. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumian Ke-III, UPN Veteran Yogyakarta*. 21 Agustus 2021. pp 147-156.
- Saputri, C. A. (2020). Kapasitas adsorpsi serbuk nata de coco (bacterial cellulose) terhadap ion Pb^{2+} menggunakan metode batch. *Jurnal Kimia (Journal of Chemistry)*. **14(1)**: 71-76.
- Selengil, U. & Yıldız, D. (2022). Investigation of the methylene blue adsorption onto waste perlite. *Desalin. Water Trea.* **262**: 235-247.
- Söğüta, E.G., Ergana, E., Kılıçb, N.Ç., Dönmezb, H. & Akbaşb, E. (2021). Methylene blue adsorption from aqueous solution by functionalized perlites: an experimental and computational chemistry study. *Desalin. Water Treat.* **217**: 391-410.
- Sulistyawati, E., Nandari, W.W., Nurchasanah, A.R. & Dewi, K.K. (2020). Kinetika adsorpsi mikrokapsul kitosan taut silang kalium persulfat terhadap zat warna methyl orange. *Jurnal Rekayasa Proses*. **14(1)**: 47-59.
- Syauqiah, I., Amalia, M. & Kartini, H.A. (2011). Analisis variasi waktu dan kecepatan pengaduk pada proses adsorpsi limbah logam berat dengan arang aktif. *Info-Teknik*. **12(1)**: 11-20.
- Zein, R., Oktaviani, R., Febiola, M., Annisyah, N., Alif, M.F. & Zilfa, Z. (2020). Pembuatan material komposit penjernih air dari campuran perlit dan cangkang pensil. *Chimica et Natura Acta*. **8(3)**: 119-125.
- Zhao, X., Yabin, L., Xiang, L., Heming, L. & Hang, Z. (2017). Removal of methylene blue from aqueous solution using expanded perlite. *Advances in Engineering Research*. **141**: 434-441.