



Adsorption Study of Carbon Chitosan Composite Beads from Ketapang Fruit Shell (*Terminalia catappa* L) on Methylene Blue Dyes

Kajian Adsorpsi Beads Komposit Kitosan Karbon Cangkang Buah Ketapang (*Terminalia catappa* L) Terhadap Zat Warna Metilen Biru

Ria Nurwidiyani¹, Chelin Dion Sigiro¹, Agus Martono Hadi Putranto¹, Deni Agus Triawan²

¹) Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Bengkulu
Jalan WR. Supratman, Kandang Limun, Muara Bangkahulu, Bengkulu, 38122

²) Program Studi D3, Laboratorium Sains Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Bengkulu, Jalan WR. Supratman, Kandang Limun, Muara Bangkahulu, Bengkulu, 38122

* Corresponding author: rianurwidiyani@unib.ac.id

Received: September 28, 2024 Accepted: October 28, 2024 Published: October 31, 2024

ABSTRACT

Carbon chitosan composite beads were synthesized using chitosan and activated carbon from Ketapang fruit shells (*Terminalia catappa* L) using PVA as a crosslinker. The adsorbent was synthesized with a chitosan: activated carbon ratio of 0.8 grams versus 0.2 grams. Material characterization using FTIR shows the presence of C-O, N-H, C-N, C=O, C-H, and -OH functional groups. The shift in wave number from 1198 cm⁻¹ on activated carbon to 1026 cm⁻¹ on activated carbon chitosan beads indicates that chitosan was successfully composited with activated carbon. Adsorption of carbon chitosan composite beads on methylene blue achieved maximum results at a contact time of 75 minutes using an adsorbent mass of 0.15 grams with an adsorption percentage reaching 97% with adsorption capacities of 1,582 mg/g. The adsorption kinetics follows a pseudo second order kinetic model with a k value of 1.3467 mg⁻¹s⁻¹.

Keywords: adsorption, kinetics, composite beads, methylene blue, ketapang fruit shell

PENDAHULUAN

Limbah zat warna masih menjadi masalah bagi lingkungan. Bergantinya trend fashion yang semakin cepat berdampak pada limbah industri tekstil yang semakin bertambah. Limbah utama dari industri tekstil yang berpotensi besar mencemari lingkungan adalah limbah zat warna. Limbah zat warna merupakan senyawa organik yang sukar terdegradasi dan akan terakumulasi di lingkungan (Idohou et al., 2020). Metilen biru

merupakan salah satu zat warna yang biasa digunakan dalam proses pewarnaan tekstil. Keberadaan zat warna metilen biru yang merupakan hazardous material di lingkungan akan memberikan dampak yang buruk bagi lingkungan maupun bagi kesehatan manusia. Berbagai metode telah digunakan untuk mengatasi limbah zat warna tersebut antara lain dengan metode adsorpsi, fotodegradasi, pengendapan, pertukaran ion, elektrokimia, maupun melalui oksidasi (Auta & Hameed,

2013). Metode adsorpsi merupakan metode yang paling umum digunakan karena kemudahan dalam aplikasi, efisiensi, biaya yang rendah serta energi yang rendah (Zahro & Adityosulindro, 2023).

Kitosan merupakan produk deasetilasi kitin yang banyak dihasilkan dari cangkang binatang laut seperti udang, kepiting, dan lobster. Kitosan merupakan biomaterial yang bersifat polikationik yang dapat digunakan sebagai adsorben ion logam dan zat warna dalam limbah (Suwazan & Nurhidayanti, 2022). Kitosan sebagai adsorben efektif untuk mengadsorpsi zat warna bermuatan negatif, agar dapat mengadsorpsi limbah zat warna bermuatan positif perlu dilakukan modifikasi terhadap kitosan. Karbon aktif memiliki gugus hidroksil dan gugus karboksil pada permukaannya sehingga cenderung bersifat polar karena memiliki ikatan -OH dan C-O (Efiyanti et al., 2020). Kitosan dapat dimodifikasi menggunakan arang aktif untuk meningkatkan daya adsorpsinya terhadap limbah zat warna yang bermuatan positif seperti Metilen Biru.

Ketapang (*T. catappa* L) merupakan jenis pohon perindang yang umum ditemukan di berbagai daerah. Daun dan buah Ketapang menjadi sampah organik yang banyak dihasilkan setiap harinya. Buah Ketapang memiliki komposisi berupa 16,60% selulosa, 24,70% hemiselulosa, dan 43,46% lignin. Kandungan lignin dalam cangkang buah Ketapang yang tinggi menyebabkan cangkang buah ketapang sukar terdegradasi serta berpotensi untuk dimanfaatkan untuk diolah menjadi bahan yang lebih bernilai ekonomis seperti arang aktif (Ariyanto et al., 2021).

Komposit kitosan karbon aktif dibentuk dalam bentuk beads. Keunggulan beads dalam aplikasi adsorpsi adalah kemudahan dalam proses pemisahan adsorben setelah proses adsorpsi. Fungsionalisasi dan penggunaan *crosslinker* dapat membantu meningkatkan kestabilan kimia dan kekuatan mekanik (Auta, 2013). Beads kitosan karbon dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer infra merah (FTIR) serta diaplikasikan untuk adsorpsi zat warna metilen biru dalam system batch dengan variasi waktu kontak dan massa adsorben.

METODOLOGI

Bahan dan Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi *orbital shaker*, *hot plate stirrer*, neraca analitik, mortar dan alu, seperangkat alat

pirolisis, oven, ayakan 100 *mesh*, dan peralatan gelas lainnya. Instrumen analisis meliputi spektrofotometer inframerah (Bruker, Germany), UV-Visible (Agilent Technology) dan micrometer sekrup.

Bahan yang digunakan penelitian ini adalah cangkang buah ketapang, Natrium Hidroksida p.a (Merck), Asam Klorida 37% pa (Merck), polivinil alkohol (BM=13.000-23.000), kitosan dengan derajat deasetilasi >75% produksi Himedia, asam asetat, Metilen biru, akuademineral, kertas saring Whatman 42, dan indikator pH universal.

Prosedur

Pembuatan Arang Teraktivasi HCl

Pembuatan arang dilakukan menggunakan teknik pirolisis pada suhu 300°C selama 6 jam (Triawan et al., 2023). Selanjutnya arang hasil pirolisis diaktivasi menggunakan HCl 0,1 M selama 24 jam dan selanjutnya dipisahkan dan dicuci menggunakan aquades hingga netral. Pengeringan arang aktif dilakukan pada suhu 105°C selama 1 jam.

Sintesis beads kitosan dan beads komposit karbon aktif

Pembuatan beads komposit kitosan-karbon aktif dilakukan berdasarkan metode Nowruzi et al, 2020 dengan beberapa modifikasi. Sebanyak 0,5 g serbuk PVA dilarutkan ke dalam 25 mL akuades dan diaduk menggunakan magnetic stirrer sampai larut pada suhu 70°C. Selanjutnya, 0,2 g karbon aktif dimasukkan kedalam 25 mL asam asetat 3% dan ditambahkan 0,8 g kitosan yang diaduk sampai didapatkan campuran yang berbentuk gel. Kedua larutan tersebut kemudian dicampur sambil terus diaduk selama 10 menit pada suhu 70°C (Nowruzi et al., 2020).

Pembentukan butiran-butiran beads dilakukan dengan memasukkan campuran kitosan-karbon kedalam syringe berukuran 1 mL dan diteteskan perlahan-lahan ke dalam gelas kimia yang berisi larutan NaOH 2,5 M. Beads yang terbentuk kemudian diaduk selama 1 jam untuk memperoleh struktur yang lebih keras, selanjutnya beads kitosan-karbon disaring dan dicuci dengan menggunakan akuades sampai pH netral. Adsorben yang sudah netral dikeringkan dengan oven pada suhu 100°C sampai mencapai berat konstan (Purnaningtyas et al., 2020). Sebagai control dilakukan pembuatan beads kitosan tanpa arang dengan prosedur serupa.

Karakterisasi adsorben

Adsorben yang telah dibuat dikarakterisasi menggunakan FTIR pada bilangan gelombang 4000 – 500 cm^{-1} dengan kecepatan pemindaian 32 scans/min dan resolusi 16 cm^{-1} untuk mengetahui gugus fungsinya.

Kajian Adsorpsi

Kajian adsorpsi diawali dengan penentuan daya adsorpsi dan efisiensi penyerapan yaitu dengan melakukan penyerapan metilen biru 25 mg/L menggunakan 0,1 gram karbon aktif, beads komposit kitosan karbon aktif, beads komposit karbon tidak aktif, beads kitosan. Absorbansi metilen biru sebelum dan setelah adsorpsi diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Kajian pengaruh waktu kontak adsorpsi dilakukan menggunakan adsorben beads kitosan karbon aktif sebanyak 0,15 gram pada larutan metilen biru dengan konsentrasi 25 mg/L dengan waktu kontak 15, 30, 45, 60, 75 dan 90 menit. Absorbansi metilen biru sebelum dan setelah adsorpsi diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Kajian pengaruh massa adsorben dilakukan dengan pada konsentrasi metilen biru 25 mg/L pada waktu kontak optimum dengan variasi massa adsorben 30, 60, 90, 120 dan 150 mg. Absorbansi metilen biru sebelum dan setelah adsorpsi diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum.

Analisis data

Kapasitas adsorpsi ditentukan menggunakan persamaan berikut (Nisa & Cahyanto, 2023).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Dengan :

- q_e = kapasitas adsorpsi (mg/g),
- C_0 = konsentrasi awal larutan (mg/L)
- C_e = konsentrasi akhir larutan (mg/L)
- m = massa adsorben (g)
- V = volume larutan (L)

Kajian kinetika adsorpsi dilakukan menggunakan model kinetika adsorpsi berikut.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2)$$

Dimana q_t adalah jumlah adsorbat yang terserap oleh adsorben pada waktu t (mg/g), q_e adalah jumlah adsorbat yang terserap oleh adsorben pada waktu kesetimbangan (mg/g), k_1 adalah konstanta laju reaksi dari pseudo order satu (1/menit).

Kinetika orde dua semu

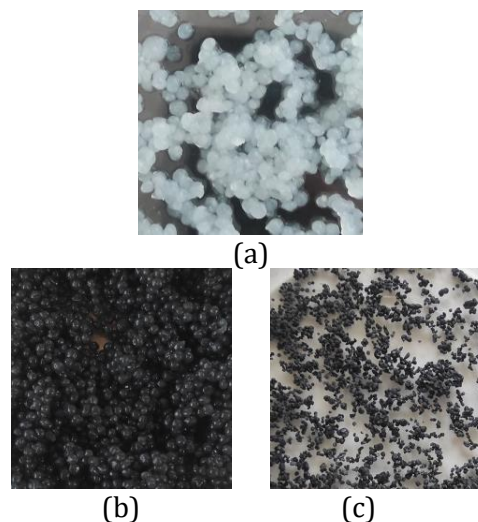
$$\frac{t}{q(t)} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

Dengan membuat grafik plot antara t/q_t vs t , dapat ditentukan q_e dan k_2 dari slope dan intersepnya (Nurhidayanti & Riyadi, 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi adsorben

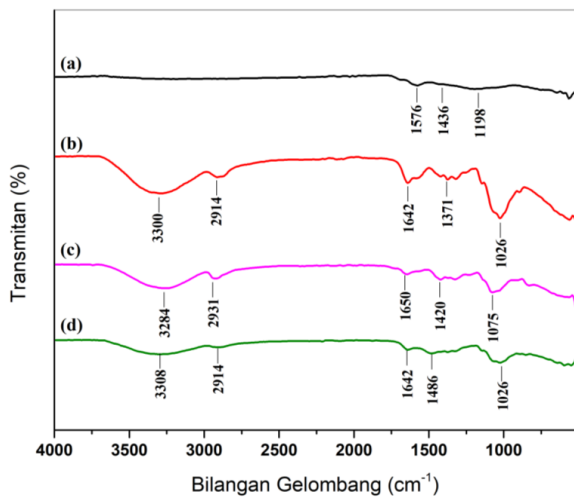
Beads kitosan yang dihasilkan dalam penelitian ini berbentuk bulat, berwarna putih dengan tekstur yang sedikit kenyal. Sedangkan beads komposit kitosan karbon aktif cangkang ketapang buah Ketapang memiliki bentuk bulat, berwarna hitam, dan struktur yang lebih kokoh dibandingkan beads kitosan tanpa arang. Beads yang terbentuk memiliki ukuran $\pm 2,84$ mm, ukuran yang diperoleh bersesuaian dengan penelitian Muangchinda et al, 2018 yang menyatakan bahwa ukuran beads terbaik untuk adsorpsi adalah ≤ 3 mm. Beads yang telah disintesis dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) beads kitosan, (b) beads kitosan karbon aktif cangkang ketapang, (c) beads kitosan karbon aktif setelah dikeringkan.

Hasil analisis gugus fungsi terhadap adsorben sebelum dilakukan adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 2. Secara umum beads komposit kitosan karbon baik teraktivasi maupun tanpa aktivasi dan beads kitosan

menunjukkan gugus fungsi yang tidak jauh berbeda. Pada daerah bilangan gelombang 3300 cm^{-1} sampai 3308 cm^{-1} muncul serapan yang menunjukkan gugus O-H tumpang tindih N-H (stretching). Gugus ini menunjukkan karakteristik kitosan dalam adsorben, yang mana gugus tersebut tidak muncul pada spektrum FTIR untuk karbon aktif. Selain itu, pita serapan pada daerah sekitar 1576 - 1650 cm^{-1} disebabkan oleh vibrasi ulur C=O pada cincin aromatik yang umumnya terdapat pada bahan berkarbon, seperti karbon aktif (Fatombi et al., 2019).



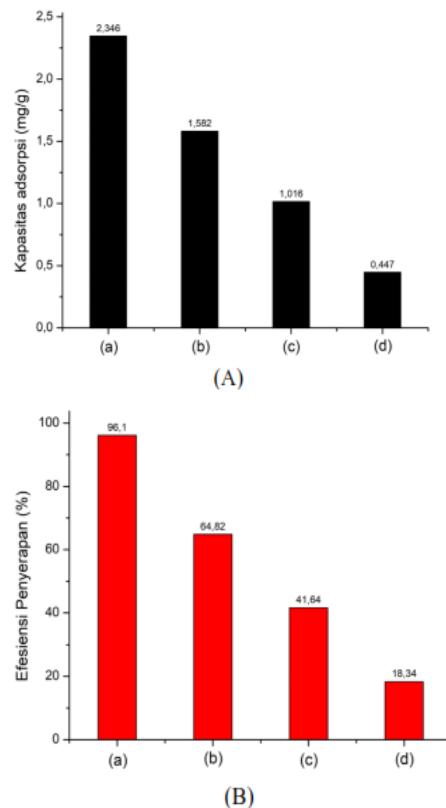
Gambar 2. Spektrum FTIR pada (a) karbon aktif, (b) beads kitosan, (c) beads kitosan-karbon aktif dan (d) beads kitosan karbon tidak aktif.

Pergeseran bilangan gelombang 1198 cm^{-1} pada karbon aktif dan 1026 cm^{-1} pada beads kitosan ke bilangan gelombang 1075 cm^{-1} menunjukkan bahwa komposit antara kitosan dan karbon aktif telah terbentuk. Hal ini didukung dengan berkurangnya intensitas serapan pada bilangan gelombang 1075 cm^{-1} pada beads kitosan karbon aktif. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Nowruz et al., 2020 yang menyatakan bahwa bilangan gelombang 1073 cm^{-1} menunjukkan N-H scissoring yang berasal dari gugus amina dan amida yang menunjukkan bahwa kitosan PVA telah terselimuti karbon aktif.

Daya Adsorpsi dan Efisiensi Penyerapan

Dilakukan perbandingan daya adsorpsi Metilen Biru menggunakan empat adsorben yaitu karbon aktif, karbon tidak aktif, beads kitosan, dan beads komposit kitosan karbon. Berdasarkan Gambar 3 dapat diketahui adsorben paling bagus untuk mengadsorpsi metilen biru berturut-turut adalah karbon aktif

(96,1%), beads komposit kitosan karbon aktif (64,82%), beads komposit kitosan karbon tidak aktif (41,64%), dan yang terakhir beads kitosan (18,34%). Karbon yang memiliki gugus-gugus fungsi seperti C=O, -COOH dalam larutan akan mudah melepas proton sehingga bermuatan negatif. Keberadaan muatan negatif inilah yang akan berinteraksi dengan Metilen Biru yang dalam larutan bermuatan positif melalui interaksi elektrostatis. Sedangkan beads sendiri memiliki gugus karakteristik berupa -NH yang dalam larutan dapat terprotonasi membentuk muatan positif sehingga akan lebih sulit berinteraksi dengan Metilen biru. Hal ini dapat menjelaskan bahwa beads komposit kitosan karbon memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik terhadap metilen biru daripada beads kitosan saja. Penggunaan kitosan secara langsung sebagai adsorben kurang efektif dikarenakan struktur kitosan yang kurang kuat dan tingkat selektivitas yang masih rendah sehingga diperlukan modifikasi (Keshvardoostchokami et al., 2021).

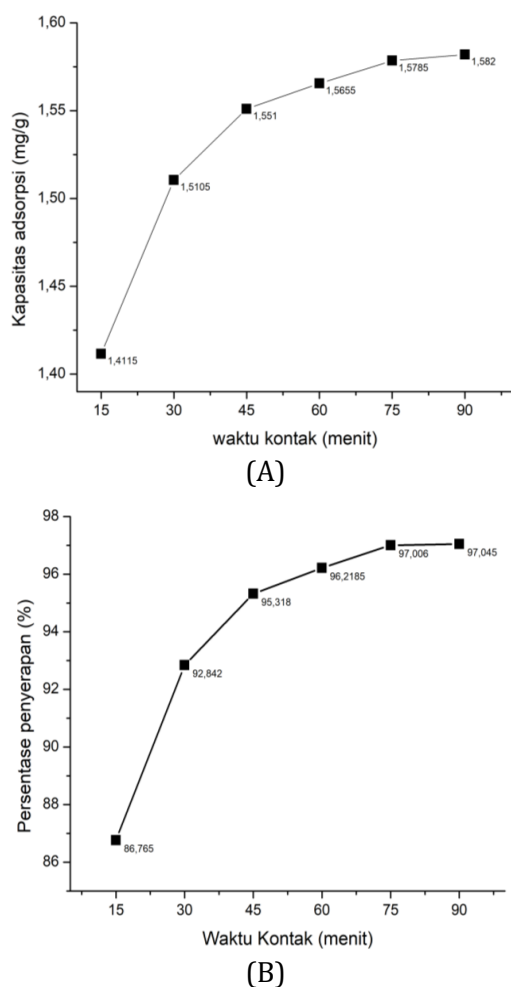


Gambar 3. (A) Kapasitas adsorpsi dan (B) Efisiensi Penyerapan (a) karbon aktif, (b) beads komposit karbon aktif, (c) beads komposit karbon tidak aktif, (d) beads kitosan karbon aktif terhadap Metilen Biru.

Beads komposit yang menggunakan karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih bagus dibandingkan beads komposit dengan arang tidak aktif, hal ini menunjukkan bahwa ada peran pori dalam proses adsorpsi Metilen Biru menggunakan beads komposit kitosan karbon.

Pengaruh waktu kontak adsorpsi

Waktu kontak merupakan faktor yang sangat penting dalam pengolahan limbah zat warna. Dalam penelitian ini dibutuhkan waktu 75 menit hingga adsorpsi mencapai kesetimbangan dengan persen adsorpsi 97,006%. Pada awal adsorpsi, persentase adsorpsi meningkat dengan tajam selanjutnya secara bertahap meningkat secara perlahan.



Gambar 4. (A) Kapasitas adsorpsi dan (B) persentase penyerapan Metilen Biru pada berbagai variasi waktu kontak pada beads komposit kitosan karbon cangkang Ketapang

Hal ini dikarenakan pada awal adsorpsi masih banyak sisi adsorben yang kosong

sehingga dapat berinteraksi dengan metilen biru secara optimal hingga mencapai kesetimbangan dimana jumlah metilen biru yang terserap pada beads komposit kitosan-karbon tidak lagi meningkat secara signifikan, keadaan ini dikarenakan sisi aktif dari adsorben semakin berkurang karena telah tertutupi oleh metilen biru (Triawan et al., 2017).

Kajian kinetika adsorpsi metilen biru menggunakan sabut kelapa mencapai waktu kesetimbangan pada waktu 75 menit dengan persentase adsorpsi sebesar 99,14% (Baunsele & Missa, 2020).

Model kinetika adsorpsi

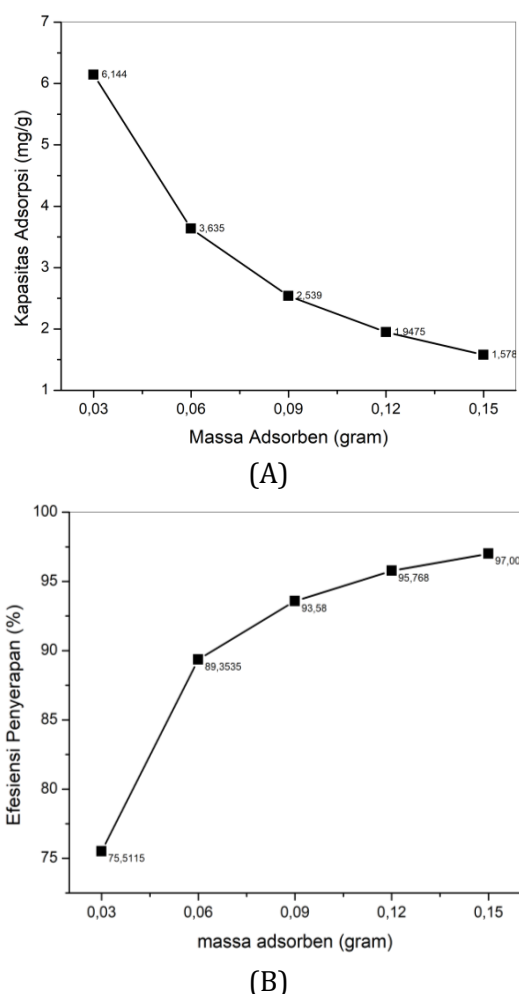
Kinetika adsorpsi dikaji berdasarkan dua model kinetika adsorpsi yaitu model kinetika pseudo first order dan model kinetika pseudo second order. Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai koefisien relatifitas untuk model pseudo first order sebesar 0,958 dan model pseudo second order sebesar 0,999. Sehingga dapat kita simpulkan bahwa adsorpsi Metilen biru menggunakan beads kitosan karbon cangkang Ketapang mengikuti model kinetika pseudo second order. Model pseudo second order menunjukkan bahwa mekanisme reaksi adsorpsi melibatkan lebih dari satu situs aktif (Purnaningtyas et al., 2020).

Tabel 1. Parameter kinetika adsorpsi beads komposit kitosan karbon cangkang Ketapang terhadap metilen biru

Pseudo First Order			Pseudo Second Order		
R ²	Q _e (mg/g)	K ₁ (min ⁻¹)	R ²	Q _e (mg/g)	K ₂ (mg·min ⁻¹)
0,958	0,0616	0,7566	0,999	0,6164	1,3467

Pengaruh Massa Adsorben

Massa adsorben sangat menentukan jumlah metilen biru yang teradsorpsi. Semakin besar massa adsorben maka jumlah situs aktif akan semakin meningkat sehingga jumlah Metilen biru yang dapat terserap juga semakin banyak. Dalam larutan dengan jumlah adsorbat yang tetap, bertambahnya massa adsorben justru akan menurunkan jumlah adsorbat teradsorpsi (Gambar 5). Hal ini disebabkan karena bertambahnya jumlah situs aktif dengan bertambahnya massa adsorben tidak diimbangi dengan bertambahnya jumlah adsorbat yang diserap sehingga distribusi partikel adsorbat dalam adsorben kecil.



Gambar 5. Pengaruh massa adsorben terhadap (A) kapasitas adsorpsi dan (B) persentase adsorpsi

KESIMPULAN

Beads komposit kitosan karbon efektif untuk mengadsorpsi zat warna Metilen biru pada waktu kontak 90 menit dan massa adsorben 0,15 gram dengan persentase adsorpsi mencapai 97%. Kinetika adsorpsi mengikuti model kinetika pseudo second order dengan nilai $k = 1,3467 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa modifikasi kitosan menggunakan karbon berhasil meningkatkan kemampuan adsorpsi kitosan terhadap zat warna yang bermuatan positif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Fakultas MIPA atas sarana prasarana penelitian dan pendukung pendanaan melalui penelitian dana PNPB Fakultas MIPA dengan Nomor Kontrak : 2672/UN30.12/HK/2024.

REFERENSI

- Ariyanto, E., Lestari, D. D., & Kharismadewi, D. (2021). Analisa Kemampuan Dan Kinetika Adsorpsi Karbon Aktif Dari Cangkang Ketapang Terhadap Zat Warna Metil Oranye. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 32(2), 166–178. <https://media.neliti.com/media/publications/455666-none-0e58b49f.pdf>
- Autal, M., & Hameed, B. H. (2013). Coalesced chitosan activated carbon composite for batch and fixed-bed adsorption of cationic and anionic dyes. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 105(2010), 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.12.021>
- Baunsele, A. B., & Missa, H. (2020). Kajian Kinetika Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Adsorben Sabut Kelapa. *Akta Kimia Indonesia*, 5(2), 76. <https://doi.org/10.12962/j25493736.v5i2.7791>
- Fatombi, J. K., Idohou, E. A., Osseni, S. A., Agani, I., Neumeyer, D., Verelst, M., Mauricot, R., & Aminou, T. (2019). Adsorption of Indigo Carmine from Aqueous Solution by Chitosan and Chitosan/Activated Carbon Composite: Kinetics, Isotherms and Thermodynamics Studies. *Fibers and Polymers*, 20(9), 1820–1832. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1107-y>
- Idohou, E. A., Fatombi, J. K., Osseni, S. A., Agani, I., Neumeyer, D., Verelst, M., Mauricot, R., & Aminou, T. (2020). Preparation of activated carbon/chitosan/Carica papaya seeds composite for efficient adsorption of cationic dye from aqueous solution. *Surfaces and Interfaces*, 21(September), 100741. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100741>
- Keshvardoostchokami, M., Majidi, M., Zamani, A., & Liu, B. (2021). A review on the use of chitosan and chitosan derivatives as the bio-adsorbents for the water treatment: Removal of nitrogen-containing pollutants. *Carbohydrate Polymers*, 273(September), 118625. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118625>
- Nisa, N. N., & Cahyanto, A. D. (2023). Isotherm Study, Adsorption Kinetics and Thermodynamics of Lead Using Combination Adsorbent of Chitosan and Coffee Ground Activated Carbon. *Jurnal*

- Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 14(3), 1–11.
<https://doi.org/10.21771/jrtpi.2023.v14.no3.p1-11>
- Nowruzzi, R., Heydari, M., & Javanbakht, V. (2020). Synthesis of a chitosan/polyvinyl alcohol/activate carbon biocomposite for removal of hexavalent chromium from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 209–216.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.044>
- Nurhidayanti, N., & Riyadi, A. (2024). Adsorption, Kinetic and Thermodynamic Studies for the Adsorption of Cadmium onto Combination of Chitosan and Coffee Ground Activated Carbon. *Rekayasa*, 17(1), 1–9.
<https://doi.org/10.21107/rekayasa.v17i1.20364>
- Purnaningtyas, M. A. K., Sudiono, S., & Siswanta, D. (2020). Synthesis of activated carbon/chitosan/alginate beads powder as an adsorbent for methylene blue and methyl violet 2b dyes. *Indonesian Journal of Chemistry*, 20(5), 1119–1130.
<https://doi.org/10.22146/ijc.49026>
- Suwazan, D., & Nurhidayanti, N. (2022). Efektivitas Kombinasi Kitosan dan Ampas Teh Sebagai Adsorben Alami dalam Menurunkan Konsentrasi Timbal Pada Limbah Cair PT PXL. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 37–44.
<https://doi.org/10.14710/jil.20.1.37-44>
- Triawan, D. A., Nesbah, N., Fitriani, D., Kimia, J., Matematika, F., Pengetahuan, I., & Universitas Bengkulu, A. (2017). Crude Palm Oil's (CPO) Fly Ash As A Low-Cost Adsorben For Removal of Methylen Blue (MB) From Aqueous Solution. *Jurnal Kimia Riset*, 2(1), 10–15.
- Triawan, D. A., Nurwidiyani, R., Nesbah, Hamurwani, D. S., Puteri, N. A., Nasution, A. V., & Yuliyani, U. (2023). Preparation of Liquid Smoke Made from Coffee Husk and Its Application as A Latex Coagulant. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 24(1), 1–8.
- Zahro, S. F., & Adityosulindro, S. (2023). Literature Review: Penggunaan Bahan Berbasis Limbah Sebagai Adsorben untuk Degradasi Zat Warna pada Air Limbah. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(3), 359–368.
<https://doi.org/10.14710/jkli.22.3.359-368>