

Original Article

STUDI ADSORPSI CONGO RED PADA KITOSAN BERBASIS SELONGSONG PUPA *BLACK SOLDIER FLY*

Linda Hevira*

Universitas Mohammad Natsir Bukittinggi , Sumatera Barat, Indonesia

Email: lindahevira@gmail.com

***Journal of Science and Clinical Pharmacy Research*, Vol. 2 No. 1 Edisi Februari 2026**

Hal 106-119 <https://journal.umnyarsi.ac.id/index.php/JSCPR>

Received: 2 Januari 2026 :: Accepted: 28 Januari 2026 :: Published: 10

Februari 2026

Abstrak

Pencemaran limbah cair yang mengandung zat warna sintetis, menjadi permasalahan lingkungan yang juga relevan dalam bidang industri dan laboratorium farmasi. Salah satu dari zat warna tersebut adalah Congo Red, yang bersifat stabil, sulit terdegradasi, dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan perairan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan kitosan yang umumnya disintesis dari kulit udang, kali ini disintesis dari selongsong pupa Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*). Uji adsorpsi dilakukan secara batch dengan variasi pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal zat warna. Kitosan-BSF sebelum dan setelah menyerap congo red dikarakterisasi menggunakan FTIR dan SEM-EDS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh pH larutan dan nilai pH_{PZC} kitosan. Persen adsorpsi meningkat pada pH di bawah pH_{PZC} akibat adanya interaksi elektrostatik antara permukaan kitosan yang bermuatan positif dan molekul Congo Red yang bermuatan negatif. Waktu kontak mempengaruhi laju pencapaian kesetimbangan adsorpsi, sementara semakin meningkat konsentrasi awal cenderung menurunkan persen adsorpsi. Hasil ini menunjukkan bahwa kitosan dari selongsong pupa Black Soldier Fly berpotensi sebagai adsorben alternatif yang bernilai tambah, dan ramah lingkungan serta mendukung prinsip keberlanjutan untuk pengolahan limbah zat warna.

Kata kunci: kitosan; Black Soldier Fly; Congo Red; adsorpsi; limbah cair

Abstract

Pollution of liquid waste containing synthetic dyes is an environmental problem that is also relevant in the industrial and pharmaceutical laboratories. One of these dyes is Congo Red, which is stable, difficult to degrade, and has the potential to cause negative impacts on the aquatic environment. This study aims to produce the ability of chitosan which is generally synthesized from shrimp shells, this time synthesized from the

pupa sheath of the Black Soldier Fly (Hermetia illucens). The adsorption test was carried out in batches with variations in pH, contact time, and initial concentration of the dye. Chitosan-BSF before and after absorbing Congo Red was characterized using FTIR and SEM-EDS. The results showed that the adsorption process was greatly influenced by the environmental pH and the pHPZC value of chitosan. The adsorption percentage increased at pH below pHPZC due to the electrostatic interaction between the chitosan surface which produces a positive signal and the Congo Red molecule which produces a negative signal. Contact time affected the rate of achieving adsorption equilibrium, while increasing the initial concentration tended to decrease the adsorption percentage. These results indicate that chitosan from Black Soldier Fly pupae casings has the potential to be an alternative adsorbent that has added value and is environmentally friendly and supports the principle of the desire for dye waste processing.

Keywords: Chitosan; Black Soldier Fly; Congo Red; Adsorption; Liquid Waste

Pendahuluan

Limbah cair yang mengandung zat warna sintetis merupakan salah satu sumber pencemar lingkungan yang banyak dihasilkan oleh industri tekstil, kertas, dan percetakan. Salah satu zat warna yang sering ditemukan dalam limbah industri adalah Congo Red, yaitu zat warna anionik yang bersifat stabil, sulit terdegradasi secara alami, dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan perairan. Keberadaan Congo Red dalam badan air dapat menghambat penetrasi cahaya, mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik, serta berpotensi bersifat toksik apabila terakumulasi dalam jangka panjang.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi pencemaran zat warna, seperti koagulasi-flokulasi, oksidasi kimia, dan filtrasi membran. Namun, metode-metode tersebut umumnya memerlukan biaya operasional yang tinggi, penggunaan bahan kimia tambahan, serta berpotensi menghasilkan lumpur sekunder. Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang lebih sederhana, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah zat warna (Hevira, Ighalo, & Sondari, 2025). Adsorpsi merupakan salah satu metode yang banyak dikaji karena kemudahannya dalam pengoperasian, efisiensi yang tinggi, serta fleksibilitas dalam penggunaan berbagai jenis material adsorben (Hevira, Ighalo, & Sondari, 2025).

Dalam beberapa tahun terakhir, pengembangan adsorben berbasis biomaterial semakin mendapat perhatian. Kitosan merupakan salah satu biopolimer alami yang banyak digunakan sebagai adsorben karena memiliki gugus fungsi amina dan hidroksil yang mampu

berinteraksi dengan berbagai polutan, termasuk zat warna (Zein et al., 2023). Umumnya, kitosan diperoleh dari limbah perikanan seperti kulit udang dan kepiting. Namun, ketersediaan bahan baku tersebut bersifat musiman dan kompetitif dengan industri pangan, sehingga diperlukan sumber alternatif yang lebih berkelanjutan (Septiani et al., 2023).

Pupa Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) merupakan limbah dari proses budidaya serangga yang saat ini berkembang pesat untuk pengolahan limbah organik (Afkar et al., 2020). Budidaya *Black Soldier Fly* (BSF) atau Lalat Tentara Hitam merupakan model ekonomi sirkular karena prinsipnya yang "zero waste" (tanpa limbah), di mana setiap fase hidupnya memberikan nilai ekonomi dan ekologis (Mahmood et al., 2021). Larva dari BSF dapat mengonversi sampah organik dan juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber protein pakan ternak (Wardhana, 2016). Konversi sampah organik dari larva BSF ini menghasilkan sisa kotoran (frass) yang bisa digunakan sebagai pupuk organik (Susilo et al., 2024). Prepupa dan pupa BSF dapat diekstraksi untuk menghasilkan minyak yang digunakan dalam pembuatan kosmetik (Nugrahati & Nugroho, 2024). Disamping itu selongsong pupa BSF yang ditinggalkan saat menjadi lalat, mengandung kitin yang dapat dikonversi menjadi kitosan (Soetemans et al., 2020). Kitosan yang dihasilkan mengandung anti oksidan (Lagat et al., 2021) dan dalam hal ini bisa dimanfaatkan sebagai bahan adsorben (Sulistiaawaty et al., 2022). Pemanfaatan selongsong pupa BSF memberikan nilai tambah pada limbah biologi, tetapi juga mendukung konsep pengolahan limbah yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Triunfo et al., 2022).

Kinerja adsorpsi kitosan terhadap zat warna dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, antara lain pH larutan, nilai pHPZC (point of zero charge), waktu kontak, dan konsentrasi awal zat warna. Nilai pHPZC menentukan muatan permukaan adsorben, yang berperan penting dalam interaksi elektrostatik antara kitosan dan molekul Congo Red yang bersifat anionik. Selain itu, waktu kontak mempengaruhi laju pencapaian kesetimbangan adsorpsi, sedangkan konsentrasi awal zat warna menentukan gradien konsentrasi antara larutan dan permukaan adsorben (Hevira, Ighalo, Sondari, et al., 2025).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan kitosan yang diperoleh dari pupa Black Soldier Fly sebagai adsorben Congo Red, dengan fokus pada pengaruh pH larutan, pHPZC, waktu kontak, dan konsentrasi awal terhadap persen adsorpsi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai potensi kitosan berbasis pupa BSF sebagai adsorben

alternatif yang sederhana, murah, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah zat warna.

Metode Penelitian

1 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pupa Black Soldier Fly sebagai sumber kitin, NaOH, HCl, Congo Red sebagai zat warna. Larutan penyangga digunakan untuk pengaturan pH. Alat gelas laboratorium, pengaduk magnetik, pH meter, shaker, Spektrofotometer UV-Vis dan karakterisasi menggunakan FTIR serta SEM-EDS.

2 Preparasi Kitosan dari Pupa Black Soldier Fly

Pupa Black Soldier Fly dibersihkan dan dikeringkan, kemudian dihaluskan. Proses ekstraksi kitin dilakukan melalui tahap demineralisasi dan deproteinasi menggunakan larutan asam dan basa. Kitin yang diperoleh selanjutnya dikonversi menjadi kitosan melalui proses deasetilasi (Hevira, Ighalo, Sondari, et al., 2025). Kitosan yang dihasilkan dikeringkan dan digunakan sebagai adsorben dalam penelitian ini.

3 Penentuan pH_{PZC} (Point of Zero Charge)

Nilai pH_{PZC} kitosan ditentukan menggunakan metode drift pH. Larutan dengan pH awal yang bervariasi disiapkan, kemudian ditambahkan 0,025 g kitosan dan dikocok selama 24 jam. Setelah mencapai kesetimbangan, pH akhir diukur dan nilai pH_{PZC} ditentukan dari titik perpotongan antara pH awal dan pH akhir.

4. Uji Adsorpsi Batch Congo Red

4.1 Pengaruh pH Larutan

Uji adsorpsi dilakukan pada berbagai pH larutan untuk mengetahui pengaruh pH terhadap persen adsorpsi Congo Red. Sebanyak 25 mg kitosan-BSF ditambahkan ke dalam larutan Congo Red 10 mg/L dengan range pH (2-8), kemudian dikocok selama waktu 60 menit. Setelah proses adsorpsi, larutan dipisahkan dan konsentrasi sisa Congo Red dianalisis dengan Spektrofotometer UV-Vis.

4.2 Pengaruh Waktu Kontak

Untuk mempelajari pengaruh waktu kontak, proses adsorpsi dilakukan pada waktu kontak yang bervariasi dengan kondisi pH optimum yang sudah didapatkan sebelumnya dengan konsentrasi awal congo red 10 mg/L. Persen adsorpsi ditentukan pada interval waktu (0-75 menit) untuk mengetahui waktu optimum adsorpsi.

4.3 Pengaruh Konsentrasi Awal

Pengaruh konsentrasi awal Congo Red terhadap proses adsorpsi dipelajari dengan memvariasikan konsentrasi awal zat warna pada kondisi pH dan waktu kontak optimum. Persen adsorpsi dihitung pada konsentrasi 10 - 400 mg/L.

5 Perhitungan Persen Adsorpsi

Persen adsorpsi Congo Red dihitung berdasarkan perbedaan konsentrasi awal dan konsentrasi akhir zat warna dalam larutan setelah proses adsorpsi, menggunakan Spektrofotometer UV-Vis.

Persamaan:

$$\% \text{ Adsorpsi} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \%$$

Dimana

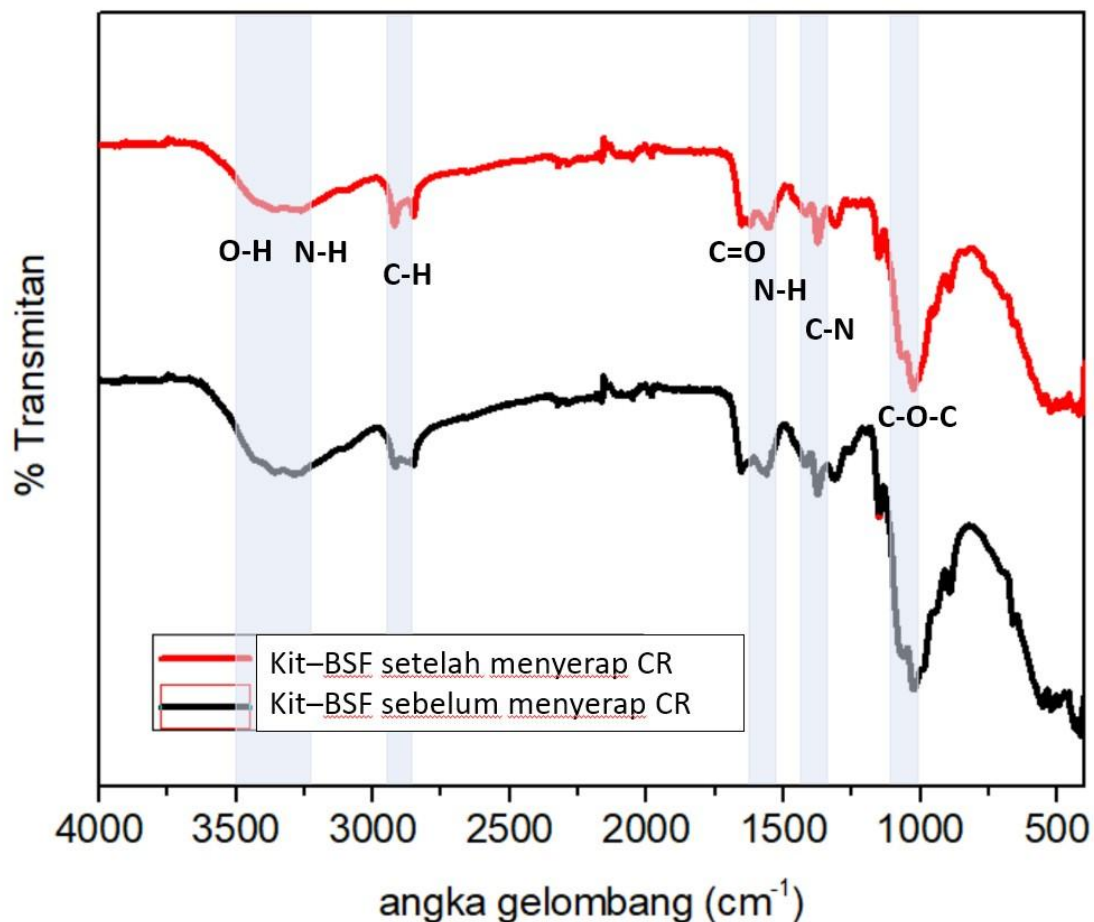
Co= konsentrasi awal congo red (mg/L)

Ce = konsentrasi akhir congo red (mg/L)

Hasil dan Pembahasan

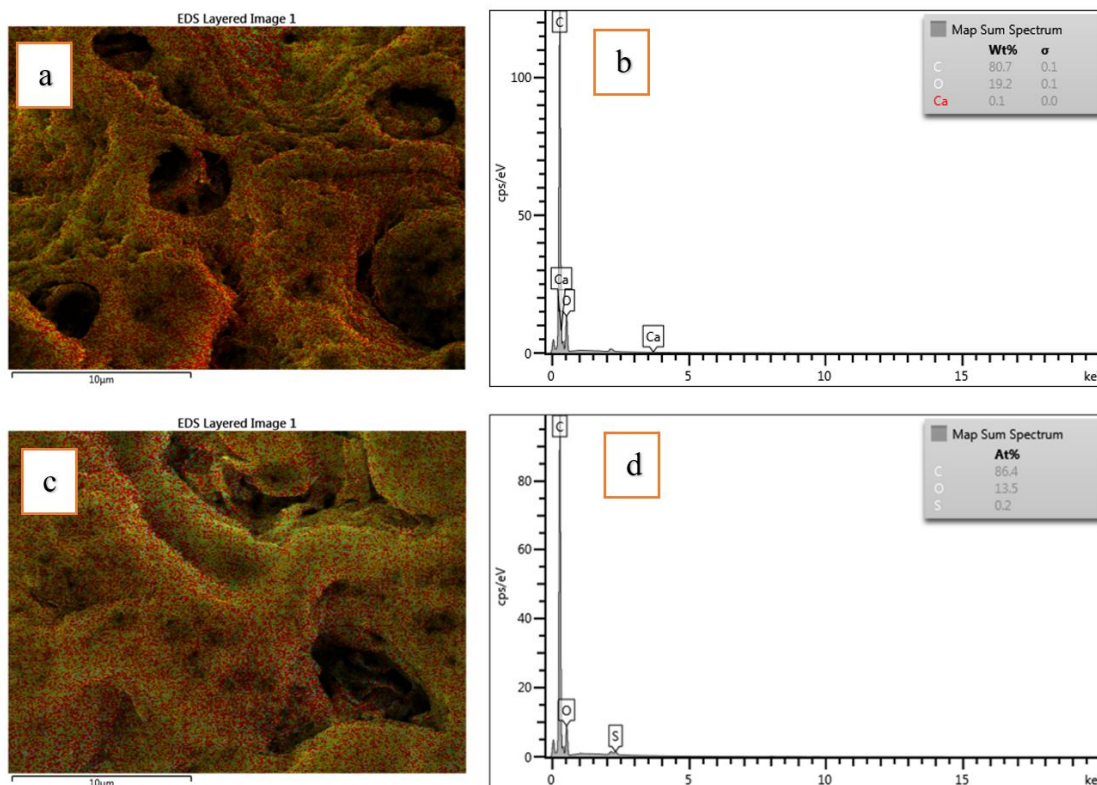
1. Karakterisasi Kitosan dari Pupa Black Soldier Fly

Karakterisasi kitosan dari pupa Black Soldier Fly dilakukan untuk memastikan keberadaan gugus fungsi yang berperan dalam proses adsorpsi. Spektrum FTIR menunjukkan adanya pita serapan khas gugus amina ($-\text{NH}_2$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) yang merupakan karakteristik utama kitosan (Lin et al., 2021). Gugus-gugus ini berperan penting dalam interaksi antara permukaan adsorben dan molekul Congo Red melalui ikatan elektrostatik dan ikatan hidrogen (Liu et al., 2014).



Gambar 1. Perbandingan spektrum FTIR kitosan-BSF sebelum dan setelah menyerap Congo Red

Spektrum FTIR kitosan-BSF pada Gambar 1, menunjukkan pita lebar pada daerah 3200–3500 cm^{-1} yang berkaitan dengan regangan O–H dan N–H. Setelah adsorpsi Congo Red, terjadi perubahan intensitas dan pergeseran pita pada daerah tersebut yang menunjukkan keterlibatan gugus hidroksil dan amina dalam proses adsorpsi. Pita pada daerah 2850–2950 cm^{-1} yang merepresentasikan regangan C–H alifatik tidak mengalami perubahan signifikan, menandakan stabilitas struktur tulang punggung kitosan. Perubahan intensitas pita pada daerah 1650–1550 cm^{-1} (C=O dan N–H amida) serta 1400–1300 cm^{-1} (C–N) mengindikasikan adanya interaksi antara gugus amina kitosan (Dompeipen, 2017) dan molekul Congo Red. Sementara itu, tidak ditemukannya pita serapan baru setelah adsorpsi menunjukkan bahwa proses adsorpsi terjadi karena interaksi fisik dan elektrostatik tanpa merusak struktur kimia kitosan.



Gambar 2. (a) Gambar SEM-EDS permukaan kitosan sebelum adsorpsi. (b) Spektrum EDS kitosan sebelum adsorpsi Congo Red. (c) SEM-EDS kitosan setelah adsorpsi Congo Red. (d) Spektrum EDS kitosan setelah adsorpsi Congo Red

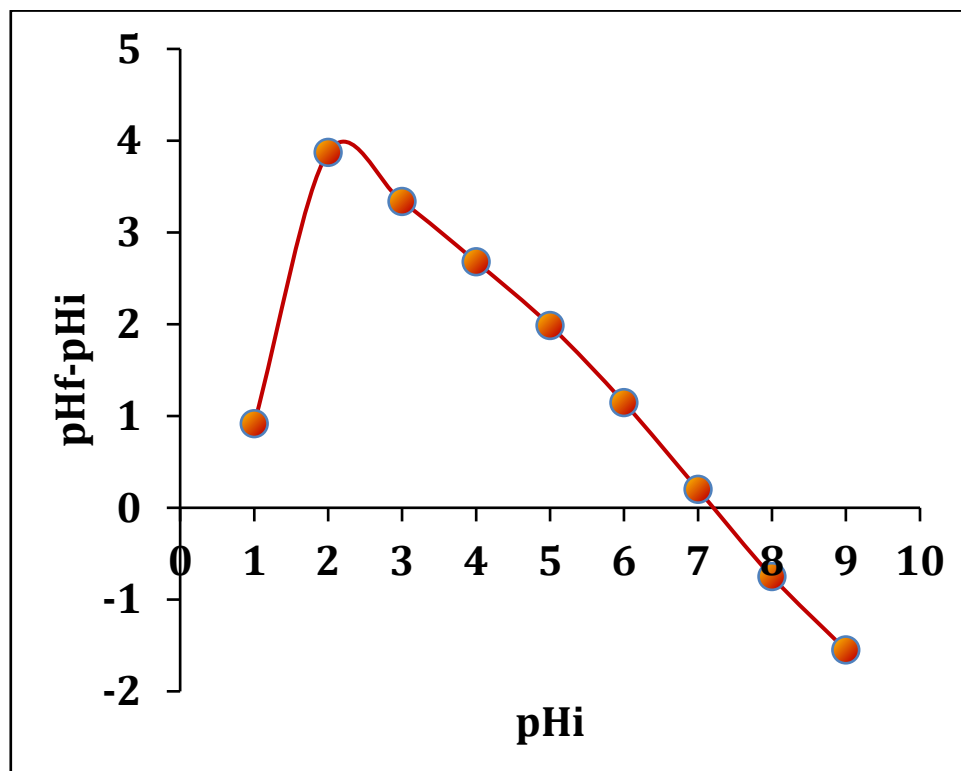
Pada Gambar 2. (a) menunjukkan citra SEM permukaan kitosan dengan struktur berpori dan tidak beraturan, yang mengindikasikan ketersediaan situs aktif untuk proses adsorpsi. Pemetaan unsur (EDS layered) memperlihatkan distribusi unsur C dan O yang dominan, mencerminkan karakteristik khas kitosan sebagai polisakarida. Keberadaan Ca dalam jumlah sangat kecil menunjukkan sisa mineral yang masih terdeteksi dari bahan asal pupa BSF. Spektrum EDS pada gambar 2 (b) mengonfirmasi bahwa komposisi utama material didominasi oleh karbon (C) dan oksigen (O), yang berasal dari rantai polimer kitosan. Intensitas Ca yang sangat rendah menunjukkan bahwa proses demineralisasi telah berlangsung efektif dan mineral tidak lagi mendominasi struktur material.

Pada Gambar (c) menunjukkan perubahan morfologi permukaan setelah proses adsorpsi, di mana pori-pori tampak lebih tertutup dan permukaan menjadi lebih homogen. Pemetaan unsur memperlihatkan distribusi unsur baru yang berkaitan dengan molekul Congo Red, menandakan bahwa zat warna telah teradsorpsi dan menutupi sebagian permukaan kitosan. Spektrum EDS pada gambar (d) menunjukkan

munculnya unsur sulfur (S), yang merupakan penanda khas gugus sulfonat ($-\text{SO}_3^-$) dari Congo Red. Kehadiran unsur ini menjadi bukti langsung keberhasilan adsorpsi Congo Red pada permukaan kitosan. Dominasi unsur C dan O yang masih tetap terlihat, menandakan bahwa struktur dasar kitosan masih terjaga setelah proses adsorpsi.

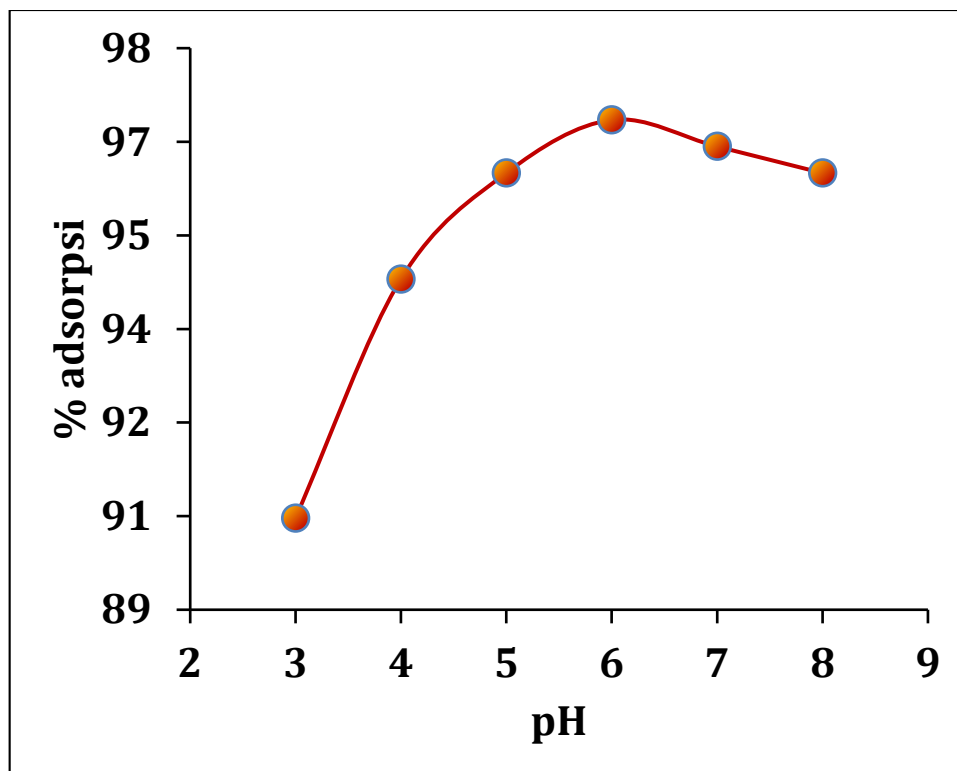
2. Pengaruh pH dan pHPZC terhadap Persen Adsorpsi Congo Red

pH larutan merupakan salah satu faktor paling penting dalam proses adsorpsi zat warna, terutama untuk adsorben berbasis kitosan. Penentuan nilai pHPZC dilakukan untuk mengetahui kondisi muatan permukaan kitosan dari pupa BSF. Berdasarkan hasil pengujian, nilai pHPZC kitosan berada pada kisaran pH 7,2.



Gambar 3. pH pzc dari kitosan berbasis selongsong pupa maggot.

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa gugus amina pada kitosan terprotonasi sehingga permukaan adsorben bermuatan positif. Kondisi ini meningkatkan interaksi elektrostatis antara permukaan kitosan dan molekul Congo Red yang bermuatan negatif, sehingga persen adsorpsi menjadi lebih tinggi. Persen adsorpsi Congo Red pada Gambar 4. menunjukkan kecenderungan meningkat pada kondisi pH larutan di bawah nilai pH_{PZC} .

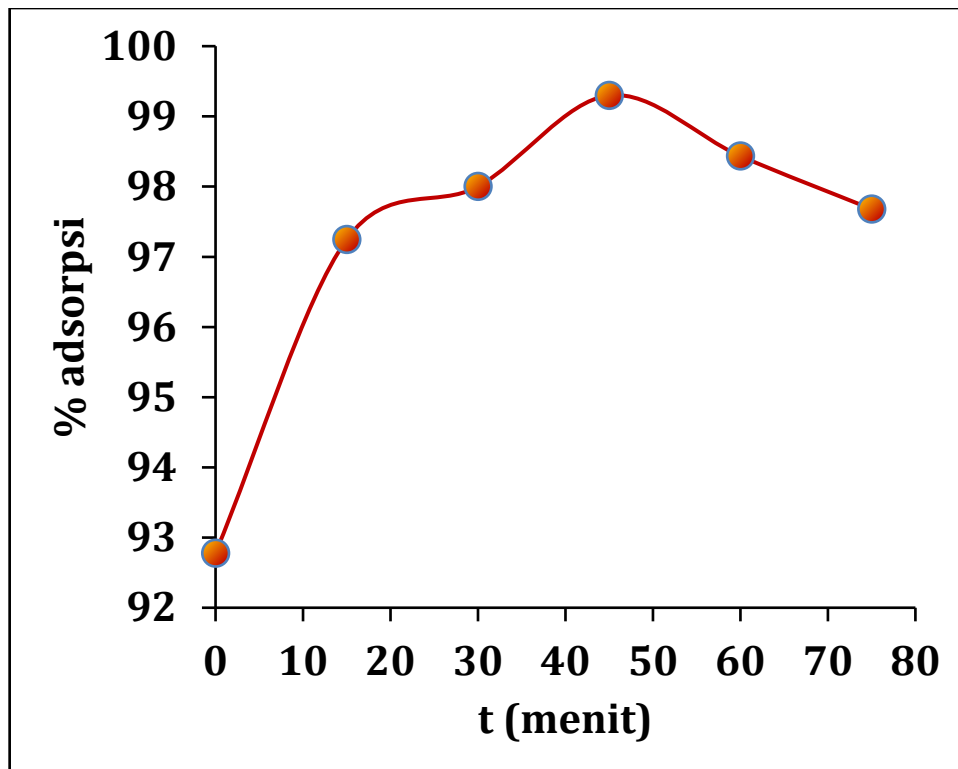


Gambar 4. Pengaruh pH terhadap persen adsorpsi congo red oleh kitosan-BSF

Sebaliknya, pada pH di atas pH_{PZC} , muatan permukaan kitosan cenderung negatif akibat deprotonasi gugus amina. Hal ini menyebabkan terjadinya gaya tolak-menolak antara adsorben dan zat warna, sehingga persen adsorpsi mengalami penurunan.

3. Pengaruh Waktu Kontak terhadap Persen Adsorpsi

Pengaruh waktu kontak terhadap persen adsorpsi Congo Red ditunjukkan oleh peningkatan adsorpsi yang cepat pada tahap awal proses. Pada menit-menit awal, banyaknya situs aktif yang masih tersedia pada permukaan kitosan menyebabkan molekul zat warna dapat dengan mudah teradsorpsi. Persen adsorpsi Congo Red meningkat tajam pada awal waktu kontak hingga sekitar 15 menit, kemudian meningkat secara perlahan dan mencapai kondisi optimum pada waktu sekitar 40–45 menit dengan efisiensi adsorpsi mendekati 99%. Hal ini menunjukkan bahwa pada tahap awal proses adsorpsi berlangsung cepat karena banyaknya situs aktif pada permukaan kitosan yang masih tersedia (Handayani et al., 2024).



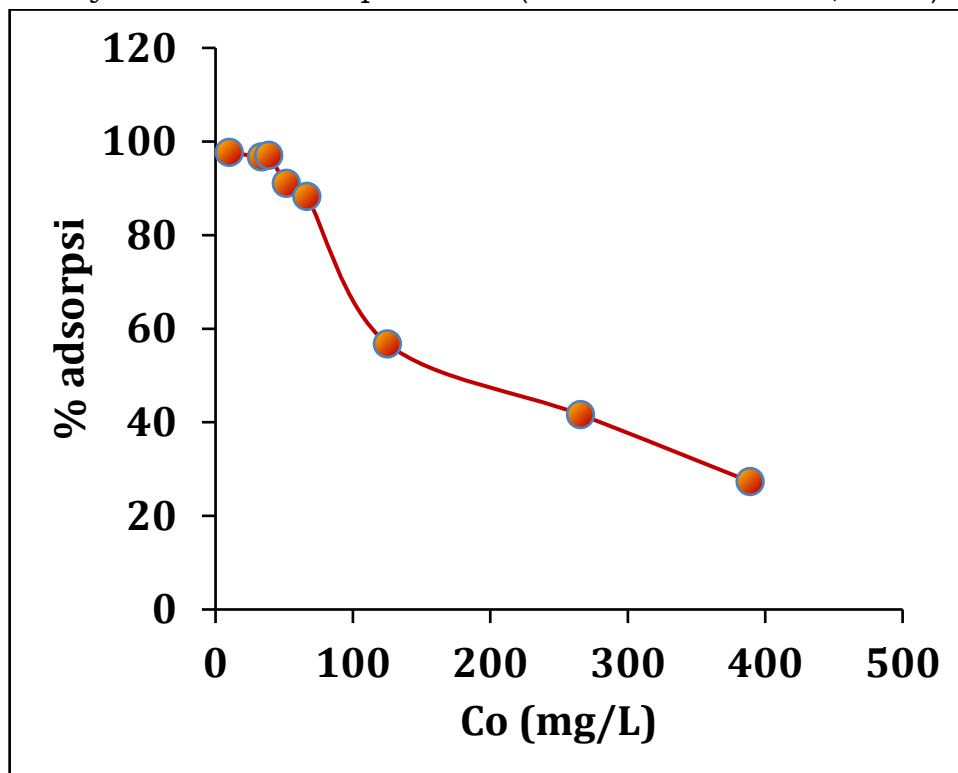
Gambar 5. Pengaruh waktu kontak terhadap persen adsorpsi

Pada Gambar 5, dapat dilihat persen adsorpsi semakin meningkat seiring dengan pertambahan waktu kontak. Waktu kontak optimum ditentukan berdasarkan kondisi ketika persen adsorpsi relatif stabil dan kondisi mendekati kesetimbangan pada waktu 45 menit. Setelah itu pertambahan waktu kontak tidak lagi meningkatkan persen adsorpsi. Penurunan persen adsorpsi pada waktu kontak yang lebih lama dapat disebabkan oleh kejenuhan situs aktif sehingga cenderung desorpsi (Fauzia et al., 2015). Selain itu juga dapat disebabkan oleh redistribusi molekul zat warna di permukaan adsorben atau karena terjadi penutupan pori sorben.

4. Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Persen Adsorpsi

Variasi konsentrasi awal Congo Red menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap persen adsorpsi. Pada konsentrasi awal yang lebih rendah, persen adsorpsi relatif tinggi karena jumlah molekul zat warna sebanding dengan ketersediaan situs aktif pada permukaan kitosan. Pada Gambar 6, menunjukkan bahwa persen adsorpsi Congo Red tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal rendah (sekitar 50–100 mg/L) dengan efisiensi mendekati 100% (Harja et al., 2022). Namun, seiring dengan peningkatan konsentrasi awal, persen adsorpsi cenderung menurun. Peningkatan konsentrasi awal menyebabkan penurunan

persen adsorpsi secara signifikan hingga sekitar 25–30% pada konsentrasi tinggi (± 400 mg/L). Hal ini disebabkan oleh keterbatasan jumlah situs aktif adsorben dibandingkan dengan jumlah molekul zat warna dalam larutan (Grabi et al., 2021). Kondisi ini menyebabkan tidak semua molekul Congo Red dapat teradsorpsi secara optimal. Pada konsentrasi tinggi, jumlah molekul Congo Red melebihi kapasitas adsorben, menyebabkan terjadinya kejenuhan situs aktif dan menurunnya efisiensi adsorpsi relatif (da Silva Alves et al., 2021).



Gambar 6. Pengaruh Konsentrasi terhadap kapasitas penyerapan

Kesimpulan

Kitosan yang dihasilkan dari pupa Black Soldier Fly menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengadsorpsi zat warna Congo Red. Faktor pH larutan dan nilai pHPZC berperan penting dalam menentukan efisiensi adsorpsi, di mana persen adsorpsi meningkat pada kondisi pH di bawah pHPZC akibat dominasi interaksi elektrostatik. Waktu kontak mempengaruhi laju adsorpsi hingga tercapai kondisi kesetimbangan, sedangkan peningkatan konsentrasi awal zat warna cenderung menurunkan persen adsorpsi akibat keterbatasan jumlah situs aktif adsorben. Berdasarkan hasil tersebut, kitosan dari pupa Black Soldier Fly berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben alternatif yang sederhana, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah

cair yang mengandung zat warna, termasuk limbah yang berkaitan dengan aktivitas farmasi dan kesehatan lingkungan.

Bibliografi

- Afkar, K., Masrufah, A., Fawaid, A. S., Alvarizi, W., Khoiriyah, L., Khoiriyah, M., Kafi, A., Faradilla, R. S., Amsah, R., Hidayah, N. N., Salsabella, A., Ayu, D., Nazwa, R., Fadila, S. N., Eka, U., Sari, K., Naim, I., Nur, S., Itsnaini, R., & Ramadhan, M. N. (2020). Budidaya Maggot Bsf (Black Soldier Fly) Sebagai Pakan Alternatif Ikan Lele (*Clarias Batracus*) Di Desa Candipari, Sidoarjo Pada Program Holistik Pembinaan Dan Pemberdayaan Desa (Php2D). *Journal of Science and Social Development*, 3, 10–16.
- da Silva Alves, D. C., Healy, B., Pinto, L. A. d. A., Cadaval, T. R. S., & Breslin, C. B. (2021). Recent developments in Chitosan-based adsorbents for the removal of pollutants from aqueous environments. *Molecules*, 26(3). <https://doi.org/10.3390/molecules26030594>
- Dompeipen, E. J. (2017). Isolasi Dan Identifikasi Kitin Dan Kitosan Dari Kulit Udang Windu (*Penaeus Monodon*) Dengan Spektroskopi Inframerah. *Majalah BIAM*, 13(1), 31–41.
- Fauzia, S., Furqani, F., Zein, R., & Munaf, E. (2015). Adsorption and reaction kinetics of tatzine by using *Annona muricata* L seeds. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(1), 573–582.
- Gabi, H., Derridj, F., Lemlikchi, W., & Guénin, E. (2021). Studies of the potential of a native natural biosorbent for the elimination of an anionic textile dye Cibacron Blue in aqueous solution. *Scientific Reports*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88657-y>
- Handayani, T., Ramadhani, P., & Zein, R. (2024). Modelling studies of methylene blue dye removal using activated corn husk waste : Isotherm , kinetic and thermodynamic evaluation. *South African Journal of Chemical Engineering*, 47(January), 15–27.
- Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10093-3>
- Hevira, L., Ighalo, J. O., & Sondari, D. (2025). Adsorption indigo carmine using chitosan from black soldier fly (*Hermetia illucens* L .): Insights into scalable application in real wastewater systems. *Inorganic Chemistry Communications*, 174(P1), 114011. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114011>
- Hevira, L., Ighalo, J. O., Sondari, D., & Hanifah, A. S. (2025). Evaluating the efficiency and scalability of chitosan from black soldier fly in removing Congo red from wastewater. *Bioresource Technology Reports*, 30(September 2024), 102132.

- <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102132>
- Lagat, M. K., Were, S., Ndwigah, F., Kemboi, V. J., Kipkoech, C., & Tanga, C. M. (2021). Antimicrobial activity of chemically and biologically treated chitosan prepared from black soldier fly (*Hermetia illucens*) pupal shell waste. *Microorganisms*, 9(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122417>
- Lin, Y. S., Liang, S. H., Lai, W. L., Lee, J. X., Wang, Y. P., Liu, Y. T., Wang, S. H., & Lee, M. H. (2021). Sustainable extraction of chitin from spent pupal shell of black soldier fly. *Processes*, 9(6), 1–9. <https://doi.org/10.3390/pr9060976>
- Liu, S., Ding, Y., Li, P., Diao, K., Tan, X., Lei, F., Zhan, Y., Li, Q., Huang, B., & Huang, Z. (2014). Adsorption of the anionic dye Congo red from aqueous solution onto natural zeolites modified with N,N-dimethyl dehydroabietylamine oxide. *Chemical Engineering Journal*, 248, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.026>
- Mahmood, S., Zurbrugg, C., Tabinda, A. B., Ali, A., & Ashraf, A. (2021). Sustainable Waste Management at Household Level with Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*). *Sustainability*, 13(9722), 1–18. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9722>
- Nugrahati, C. N. A., & Nugroho, R. A. (2024). Lauric acid of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae oil as cosmetic ingredient. *Biology Education*, 21(1), 14–19.
- Septiani, W., Rachmawati, R., & Zulfikar, M. A. (2023). *Adsorpsi Zat Warna Tekstil Direct Blue 14 Menggunakan Kitosan Termodifikasi Dan Komposit Kitosan Termodifikasi Bentonit Adsorption Of Direct Blue 14 Textile Dye By Modified Chitosan And Modified Chitosan Bentonite Composites*. 27–36.
- Soetemans, L., Uyttebroek, M., & Bastiaens, L. (2020). Characteristics of chitin extracted from black soldier fly in different life stages. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 3206–3214. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.041>
- Sulistiawaty, L., Foliatini, Nurdiani, & Puspita, F. (2022). Isolasi dan Karakterisasi Kitin dan Kitosan dari Pupa Black Soldier Fly (BSF). *Warta Akab*, 46(1), 56–62.
- Susilo, H., Nurmayulis, N., Syahbana, M. A., & Sodik, A. H. (2024). The Potential of Frass BSF as an Organic Fertilizer for Making Sustainable Agriculture a Reality. *Jurnal Biologi Tropis*, 24(2), 209–215. <https://doi.org/10.29303/jbt.v24i2.6782>
- Triunfo, M., Tafi, E., Guarnieri, A., Salvia, R., Scieuzo, C., Hahn, T., Zibek, S., Gagliardini, A., Panariello, L., Coltelli, M. B., De Bonis, A., & Falabella, P. (2022). Characterization of chitin and chitosan derived from *Hermetia illucens*, a further step in a circular economy process. *Scientific Reports*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10423-5>
- Wardhana, A. (2016). Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as an Alternative Protein Source for Animal Feed. *WARTAZOA*.

- Indonesian Bulletin of Animal and Veterinary Sciences*, 26(2), 069–078. <https://doi.org/10.14334/wartazoa.v26i2.1218>
- Zein, R., Satrio Purnomo, J., Ramadhani, P., Safni, Alif, M. F., & Putri, C. N. (2023). Enhancing sorption capacity of methylene blue dye using solid waste of lemongrass biosorbent by modification method. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(2), 104480. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104480>