

SINTESIS MANIK KOMPOSIT KARBON AKTIF/KARBOKSIMETIL SELULOSA/KITOSAN SEBAGAI ADSORBEN METILEN BIRU

Dhony Hermanto^{1,*}, Putri Jauhar Prihatini¹, Niza Yusnita Apriani¹, Lely Kurniawati¹, Murniati Murniati¹, Sapriani Hamdiani¹, Nurul Ismillayli¹, Siti Raudhatul Kamali²

¹Program Studi Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Mataram

²Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas MIPA, Universitas Mataram

*Corresponding Author Email: dhony.hermanto@unram.ac.id

ABSTRAK.

Pengembangan manik komposit yang terdiri dari kitosan, karboksimetil selulosa, dan karbon aktif untuk penghilangan zat warna sangat penting karena kemampuan penyerapannya yang baik dan manfaatnya bagi lingkungan. Dengan memanfaatkan sumber daya alam secara efisien untuk proses penghilangan zat warna yang efektif, penelitian ini mengembangkan manik komposit karbon aktif/karboksimetil selulosa/kitosan sebagai penyerap zat warna metilen biru. Bentuk permukaan komposit menunjukkan lebih banyak tonjolan, alur, dan pori-pori asimetris daripada karbon aktif, yang dapat meningkatkan kemampuan penyerapan zat warna. Analisis FTIR memverifikasi bahwa gugus fungsi seperti OH, NH, amina terprotonasi, dan karboksilat dari polimer penyusun yang terdapat dalam komposit karbon aktif/karboksimetil selulosa/kitosan. Gugus-gugus ini juga berfungsi sebagai situs aktif untuk penyerap zat warna. Hal ini sejalan dengan model isoterm Langmuir manik komposit, yang menunjukkan bahwa situs aktif yang homogen dan memberikan penyerapan pada satu lapisan (monolayer). Manik komposit menunjukkan stabilitas dalam larutan asam dan basa, dengan efektivitas penggunaan berulang dari adsorben dengan fleksibilitas dalam berbagai kondisi pengolahan air. Oleh karena itu, sintesis manik komposit karbon aktif/karboksimetil selulosa/kitosan menghadirkan solusi yang menjanjikan untuk pengolahan air limbah berkelanjutan berdasarkan komposit yang dapat terurai secara hayati dan ramah lingkungan.

Keyword: karbon aktif/karboksimetil selulosa/kitosan, manik komposit, zat warna metilen biru.

1. PENDAHULUAN

Lebih dari 735 ton pewarna diproduksi oleh industri tekstil setiap tahun, terdiri dari 40.000 pewarna berbeda dengan lebih dari 7000 struktur kimia yang berbeda (Slama et al., 2021). Selama proses industri, banyak pewarna limbah dilepaskan oleh alam, yang menyebabkan masalah pembuangan air. Pewarna tekstil telah diklasifikasikan menurut struktur kimianya, misalnya, azo, nitro, indigo, antrakuinon, ftalein, trifenil metil, nitrasi, dll. Di antara mereka, polusi dengan pewarna azo, terutama Metilen Biru (MB), baru-baru ini menarik lebih banyak perhatian karena tingkat keparahan polusi yang disebabkan oleh MB di lingkungan (Pathania et al., 2017). Pewarna MB memiliki stabilitas kimia yang baik dan membuatnya sulit terdegradasi oleh proses konvensional. Karena sifatnya yang sangat berbahaya, limbah pewarna ini dapat menyebabkan alergi, iritasi kulit, perubahan genetik, dan kanker. Ini juga akan mengganggu habitat perairan (Salazar-Rabago et al., 2017). Penghilangan MB penting untuk menciptakan masyarakat yang berkelanjutan.

Terdapat banyak metode untuk menghilangkan zat warna dalam air seperti pertukaran ion, koagulasi, fitodegradasi, reverse osmosis, elektrodialisis, dan mikrobiologi (Ardila-Leal et al., 2021; Değerli et al., 2019; Parimelazhagan et al., 2022). Namun, sebagian besar metode tersebut cukup mahal, memerlukan bahan tertentu, dan memerlukan teknologi tinggi untuk diterapkan. Teknik pengolahan air lain yang banyak digunakan adalah adsorpsi (Rafatullah et al., 2010). Proses yang efektif dan efisien, kapasitas penyerapan yang tinggi, kemampuan untuk digunakan kembali, biaya

operasional yang rendah, dan tidak adanya efek samping negatif dari adsorben merupakan potensi manfaat dari teknik adsorpsi. Teknik adsorpsi dapat menghentikan penyebaran pencemaran zat warna ke seluruh lingkungan, terutama di dalam air. Karbon aktif merupakan adsorben yang paling banyak digunakan karena memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan adsorben lainnya, sehingga dapat menyerap lebih banyak molekul adsorbat (Ganjoo et al., 2023; Saleem et al., 2019; Salleh et al., 2011). Hal ini dikarenakan adanya pori-pori penyerap zat warna pada karbon aktif (Gao et al., 2015). Salah satu sumber karbon aktif yang sering digunakan sebagai adsorben zat warna adalah limbah eceng gondok. Penyerapan komponen polar yang buruk merupakan kelemahan adsorben karbon aktif (Ania et al., 2007; Lee et al., 2013). Sifat alterasi gugus fungsi permukaan pada karbon aktif menunjukkan bahwa modifikasi yang tepat dapat meningkatkan fungsinya. Sifat material biokomposit yang sangat baik menjadikannya material yang ideal untuk dikombinasikan dengan karbon aktif dan selanjutnya dapat meningkatkan kinerja adsorben. Gugus fungsi yang melimpah terutama dikaitkan dengan heteroatom yang ada pada permukaan biokomposit dan sering dimodifikasi untuk meningkatkan kemampuan adsorpsinya. Karbon aktif yang dimodifikasi menggunakan kitosan dan pektin yang disintesis menjadi komposit manik telah digunakan untuk mengadsorpsi pewarna MB (Rahmah et al., 2023). Karbon aktif termodifikasi lainnya menggunakan kitosan dan alginat yang disintesis menjadi komposit manik telah digunakan untuk mengadsorpsi pewarna MB dan metil violet (MV) 2B dengan kapasitas adsorpsi maksimum 1,34 mmol/g untuk MB dan 1,23 mmol/g untuk MV 2B (Purnaningtyas et al., 2020). Modifikasi karbon aktif dengan kompleks polielektrolit (PEC) berbasis komposit berpotensi meningkatkan ketersediaan pori dan gugus fungsi reaktif pada permukaan adsorben, sehingga menjanjikan peningkatan kemampuan adsorben (Hermanto et al., 2024).

Penelitian ini mengembangkan manik komposit dengan menggabungkan PEC karboksimetil selulosa (CMC)–kitosan dengan karbon aktif dan CaCl_2 sebagai pengikat silang. CMC bersifat polianionik dan kitosan bersifat polikationik dapat berinteraksi membentuk PEC (Ismillayli et al., 2020). Setelah PEC terbentuk, gugus amino kitosan dan gugus karboksil CMC terlibat dalam interaksi elektrostatik sendiri yang memungkinkan polimer ini terhubung. Penambahan CaCl_2 sebagai agen pengikat silang meningkatkan integritas struktural, dan pori-pori teratur terbentuk, menghasilkan struktur jaringan yang terorkestrasi di dalam manik hidrogel. Dengan demikian, tujuan utama penelitian ini adalah untuk menyelidiki kemungkinan penggunaan manik-manik komposit yang terdiri dari karbon aktif, CMC, kitosan, dan CaCl_2 (pengikat silang) sebagai penyerap warna MB. pH, jumlah penyerap, dan konsentrasi zat warna dioptimalkan untuk penyerapan yang maksimal. Selanjutnya dijelaskan pula kajian model isoterm adsorpsi manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan terhadap pewarna MB.

2. METODE

2.1 Bahan Kimia

Eceng gondok yang diperoleh dari bendungan Aik Bukak Lombok, digunakan sebagai bahan sintesis karbon aktif yang digunakan dalam penelitian ini. Eceng gondok adalah tanaman air menahun yang mengapung bebas di perairan, dapat dengan cepat meningkatkan biomassa, komposisi kimianya yang dominan adalah selulosa dan hemiselulosa. Bahan kimia penelitian tambahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah MB (Dystar), kitosan (Sigma Life Science), dan CMC (Sigma-Aldrich). Bahan dengan level analitik dari Merck diperoleh antara lain asam asetat (CH_3COOH), asam

klorida (HCl), asam nitrat (HNO₃), natrium hidroksida (NaOH), dan kalsium klorida (CaCl₂). Air suling ganda digunakan dalam semua penyiapan dan pengenceran larutan.

2.2 Sintesis Karbon Aktif

Sampel eceng gondok dibersihkan dan dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 110 °C. Sampel yang telah kering dikarbonisasi pada suhu 600 °C dalam tanur selama 1 jam dan atmosfer N₂. Karbon kemudian diaktivasi dengan direndam selama 24 jam dalam 0,1 M HCl. Kemudian sampel disaring dan dinetralkan menggunakan 0,1 M NaOH, serta dibilas menggunakan air suling. Sampel yang diperoleh dikeringkan dalam oven selama 1 jam pada suhu 110 °C (Gao et al., 2015). Karbon aktif disimpan dalam desikator hingga digunakan.

2.3 Sintesis Manik Komposit Karbon Aktif/CMC/Kitosan

Sintesis manik komposit dilakukan dengan memodifikasi metodologi penelitian yang digunakan oleh Rahmah et al. (2023) dan Hermanto et al. (2022). Untuk membuat hidrosol kitosan, 1 g kitosan dilarutkan dalam 10 mL air suling ganda, dan ditambahkan 5 mL asam asetat 2%. Campuran diaduk selama 4 jam dan dibiarkan semalam. Kemudian, CaCl₂ ditambahkan ke dalam larutan campuran dan diaduk lagi hingga homogen untuk membentuk hidrosol kitosan. Untuk membuat hidrosol alginat, 1 g alginat dilarutkan dalam 14 mL air suling ganda dalam wadah terpisah, dicampur hingga homogen, dan dibiarkan semalam. Keesokan harinya, aduk hidrosol alginat setelah menambahkan 1 g karbon aktif. Manik-manik komposit dibuat dengan menyuntikkan 5 mL hidrosol alginat ke dalam hidrosol kitosan sambil diaduk. Setelah terbentuk, manik-manik komposit dibersihkan, dikeringkan dalam oven pada suhu 60 °C, dan disaring. FTIR digunakan untuk mengkarakterisasi manik-manik komposit. Manik-manik komposit disimpan dalam desikator hingga digunakan.

2.4 Optimalisasi Adsorpsi Pewarna

Larutan pewarna sebanyak 20 mg/L MB dibuat dalam larutan buffer pada berbagai variasi pH 1–9. Tambahkan 0,001 g serbuk manik komposit ke dalam labu Erlenmeyer dan 10 mL series larutan pewarna. Pada suhu kamar, pengocokan dilakukan selama 30 menit pada 200 rpm. Setelah menyaring bahan padat, filtrat larutan pewarna dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada 630 nm.

Manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan dalam dosis 0,02, 0,04, 0,06, 0,08, dan 0,1 mg digunakan untuk mempelajari dampak dosis adsorben. 10 mL larutan pewarna 500 mg/L MB ditambahkan ke dalamnya berbagai dosis adsorben. pH ideal pada tahap sebelumnya digunakan pada tahap ini. Pada suhu kamar, pengocokan dilakukan selama 30 menit pada 200 rpm. Setelah menyaring bahan padat, filtrat larutan pewarna dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada 630 nm.

Manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan digunakan sebagai adsorben pada berbagai konsentrasi pewarna (50, 75, 100, dan 125 mg/L) untuk melihat efek yang ditimbulkannya. pH ideal dan dosis adsorben optimum pada tahap sebelumnya digunakan pada tahap ini. Pada suhu kamar, pengocokan dilakukan selama 30 menit pada 200 rpm. Setelah menyaring bahan padat, filtrat larutan pewarna dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada 630 nm.

Manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan digunakan sebagai adsorben pada berbagai rentang waktu 5 hingga 180 menit digunakan untuk menentukan dampak waktu kontak. pH ideal, dosis adsorben dan konsentrasi pewarna optimum pada tahap sebelumnya digunakan pada tahap ini. Pada suhu kamar, pengocokan dilakukan selama 30 menit pada 200 rpm. Setelah menyaring bahan padat, filtrat larutan pewarna dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada 630 nm.

2.5 Model adsorpsi isothermal

Model adsorpsi isothermal menentukan MB berdasarkan variasi konsentrasi pada pH ideal dan data adsorpsi. Baik isothermal adsorpsi Freundlich maupun Langmuir digunakan dalam penelitian ini. Sifat reversibel adsorpsi dalam satu lapisan merupakan dasar persamaan Langmuir, yang dinyatakan dalam Persamaan 1 dan 2. Dengan menggunakan Persamaan 3 dan 4, rumus isothermal Freundlich diperoleh (Al-Harby et al., 2021).

$$Q_e = \frac{Q_m \times K_L \times C_e}{(1 + K_L C_e)} \quad 1)$$

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m K_L} + \frac{C_e}{Q_m} \quad 2)$$

$$Q_e = \frac{x}{m} = K_f + C_e^{1/n} \quad 3)$$

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad 4)$$

Dimana: m adalah massa adsorben (g); V adalah volume larutan (L); Q adalah kapasitas adsorpsi per berat molekul (mg/g); kapasitas adsorpsi maksimum (Q_m) dinyatakan dalam mg/g, sedangkan adsorbat yang teradsorpsi pada kesetimbangan (Q_e) dinyatakan dalam mg/g; C_0 adalah konsentrasi awal larutan (ppm); C_e adalah konsentrasi akhir larutan (ppm); K_f dan n adalah konstanta Freundlich, K_L adalah konstanta Langmuir.

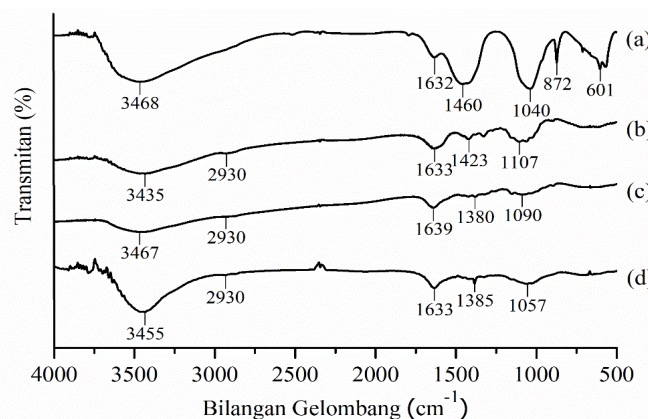
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposit dibuat dengan mencampur hidrosol CMC dengan karbon aktif, kemudian ditambahkan tetes demi tetes dengan cara diaduk ke dalam hidrosol kitosan yang telah dicampur dengan agen pengikat silang CaCl_2 . Komposit yang terbentuk berupa material granular hitam, padat, bulat, keras dengan ukuran dan bentuk seragam. Hasil sintesis manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan dapat dilihat pada Gambar 1. Manik granular berwarna hitam menunjukkan bahwa karbon aktif telah terimmobilisasi ke dalam material komposit.



Gambar 1. Hasil sintesis manik komposit karbon aktif/CMC/ kitosan

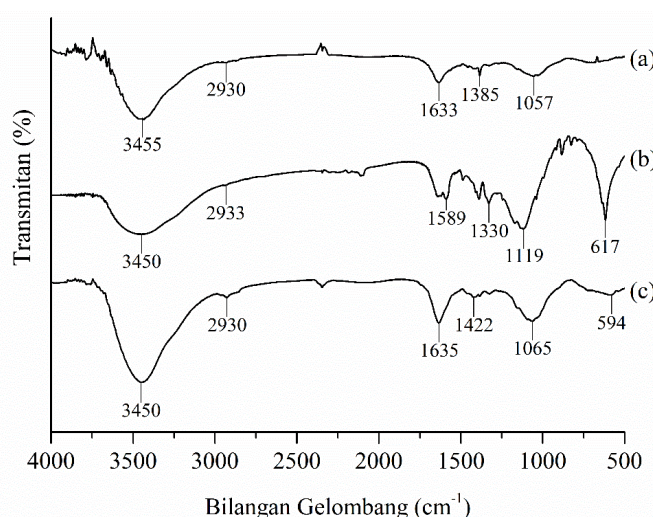
Gugus fungsional khas dari manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan dan material penyusunnya diidentifikasi melalui analisis FTIR, seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Spektrum FTIR (a) karbon aktif eceng gondok, (b) CMC, (c) kitosan, (d) manik komposit karbon aktif eceng gondok/CMC/kitosan

Berdasarkan Gambar 2, spektrum FITR menunjukkan gugus fungsi yang dimiliki oleh komposit dan komponen penyusunnya. Sebagai bahan prekursor, karbon aktif mengandung gugus fungsi OH, dibuktikan dengan adanya pita serapan pada 3468 cm^{-1} . Adanya gugus $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$, dan $\text{C}-\text{O}$ ditunjukkan dengan serapan pada 1793 , 1632 , dan 1040 cm^{-1} . Serapan pada 1460 cm^{-1} menunjukkan adanya pembengkokan gugus $\text{C}-\text{H}$, yang didukung oleh serapan pada 872 cm^{-1} . Sebaliknya, peregangan $\text{C}-\text{C}$ ditunjukkan dengan serapan pada 712 dan 601 cm^{-1} (Munene et al., 2020; Rahmah et al., 2023). Puncak karakteristik kitosan telah diamati pada 3467 , 1639 , 1459 , dan 1380 cm^{-1} , yang berhubungan dengan vibrasi gugus OH atau $\text{N}-\text{H}$, $\text{C}=\text{O}$ (dari amida I), pembengkokan gugus $\text{N}-\text{H}$ (dari amina primer), dan peregangan $\text{C}-\text{N}$. Penyerapan pada 2992 dan 2930 cm^{-1} menunjukkan vibrasi $\text{C}-\text{H}$ simetris dan asimetris. Sementara penyerapan pada 1090 cm^{-1} dikaitkan dengan peregangan $\text{C}-\text{N}$ (amina primer) (Danar et al., 2021; Hermanto et al., 2024). Spektrum CMC menunjukkan serapan pada 3435 , 2930 , 2870 , 1633 , dan 1423 cm^{-1} akibat vibrasi gugus OH, $\text{C}-\text{H}$ simetris dan asimetris, serta peregangan COO^- (dari karboksilat) simetris dan asimetris. Penyerapan pada 1107 cm^{-1} menunjukkan peregangan $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ (Hebeish & Sharaf, 2015). Spektrum komposit menunjukkan penyerapan gabungan zat prekursor, dengan beberapa penyerapan bergeser dan menghilang. Penyerapan gugus OH bergeser sedikit ke 3455 cm^{-1} , yang menunjukkan adanya interaksi ikatan hidrogen dalam komposit. Penyerapan gugus fungsi amina primer pada kitosan (1633 cm^{-1}) dan peregangan $\text{C}-\text{N}$ amina primer (1057 cm^{-1}) tidak teridentifikasi dalam komposit, yang menunjukkan bahwa $-\text{NH}_2$ terprotonasi ($-\text{NH}_3^+$) karena penambahan asam asetat ke kitosan selama sintesis komposit. Pergeseran penyerapan gugus fungsi karboksilat CMC dari 1633 dan 1423 menjadi 1632 dan 1385 cm^{-1} menunjukkan bahwa gugus ini berinteraksi dengan gugus lain, mungkin NH_3^+ . Pemeriksaan FTIR mengungkapkan pengayaan gugus fungsi dalam komposit karbon aktif/CMC/kitosan, termasuk hidroksil, amina terprotonasi, karbonil, dan karboksilat dari polimer penyusunnya (Hermanto et al., 2024).

Gugus fungsional khas dari manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan yang digunakan untuk berinteraksi ketika terjadi proses adsorpsi zat warna MB diidentifikasi melalui analisis FTIR, seperti yang terlihat pada Gambar 3.

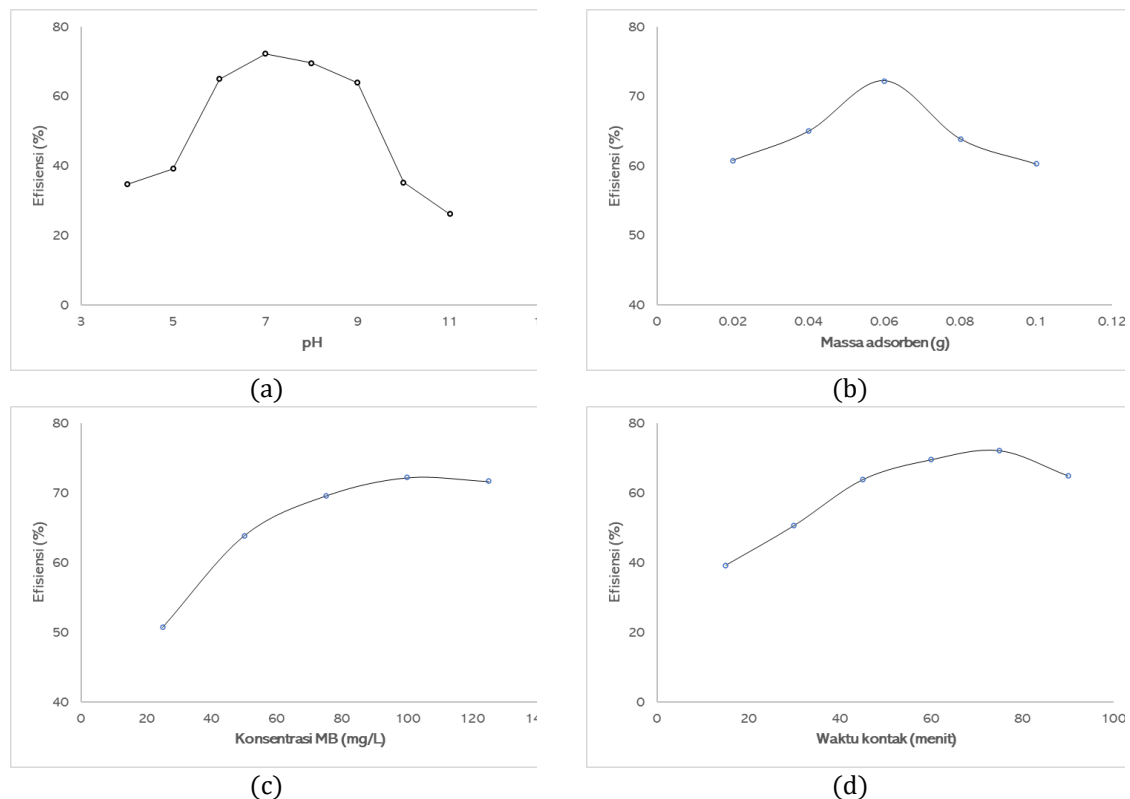


Gambar 3. Spektrum FTIR (a) manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan, (b) metilen biru, dan (c) manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan – metilen biru

Berdasarkan Gambar 3 pewarna MB menunjukkan puncak serapan pada 3450, 1638, 1589, dan 1119 cm^{-1} , yang menunjukkan adanya gugus NH/OH, C=N, C=C, dan C-O. Gugus karakteristik C-S-C pada pewarna MB ditunjukkan dengan serapan pada 617 cm^{-1} . Interaksi zat warna MB dengan komposit karbon aktif/CMC/kitosan kemungkinan terjadi pada banyak situs komposit aktif, ditunjukkan dengan pergeseran puncak komposit sebelum dan sesudah penyerapan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pergeseran terjadi pada penyerapan gugus -OH atau N-H, yang melebar dari 3455 menjadi 3450 cm^{-1} , serta penyerapan gugus karboksilat (COO^-) pada 1633 dan 1385 menjadi 1635 dan 1422 cm^{-1} . Karena gugus S^+ merupakan gugus aktif zat warna MB yang memberikan pengaruh pada MB sebagai pewarna kationik, gugus fungsinya dapat berinteraksi dengan gugus karboksilat atau gugus lain pada komposit yang memiliki muatan negatif. Sebaliknya, interaksi antara gugus fungsi MB dengan gugus -OH atau -NH dari komposit dapat terjadi melalui ikatan hidrogen dengan karakteristik puncak yang lebar. Hal ini didukung oleh pergeseran penyerapan C-S-C oleh zat warna MB dari 617 menjadi 594 cm^{-1} . Penelitian sebelumnya telah menunjukkan peran gugus amina terprotonasi dalam penyerapan zat warna. Penyerapan zat warna MB pada permukaan komposit dibuktikan dengan munculnya puncak-puncak MB pada komposit setelah penyerapan, seperti 1422 cm^{-1} (NO), 1380 cm^{-1} (CH) dan 594 cm^{-1} (C-S-C). Lebih jauh, munculnya puncak dalam spektrum manik komposit-MB sekitar 1090 cm^{-1} (C-O-O) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, menunjukkan pembentukan ikatan komposit baru dengan MB selama proses penyerapan (Hermanto et al., 2024; Rahmah et al., 2023). Hal ini memungkinkan adanya berbagai mekanisme dalam penyerapan, termasuk kemisorpsi. Studi FTIR memverifikasi bahwa gugus fungsi -OH, -NH, dan karboksilat dari komposit berfungsi sebagai situs aktif adsorben.

Pemilihan pH merupakan faktor krusial dalam menetapkan kondisi adsorpsi yang ideal. Kisaran pH 1-9 digunakan untuk mengeksplorasi pengaruh pH pada adsorpsi zat warna MB pada manik komposit karbon aktif/alginat/kitosan. Dosis adsorben dan konsentrasi warna juga merupakan faktor yang memengaruhi proses adsorpsi zat warna MB. Lebih jauh, waktu kontak merupakan aspek penting dari proses adsorpsi, karena mengacu pada waktu yang dibutuhkan untuk mengaduk antara manik komposit dan larutan zat warna MB. Gambar 4 menunjukkan kurva ketergantungan efisiensi

adsorpsi terhadap pH, dosis manik komposit, konsentrasi zat warna MB, dan durasi kontak.



Gambar 4. Pengaruh (a) pH, (b) dosis adsorben, (c) konsentrasi zat warna, dan (d) waktu kontak terhadap penyerapan zat warna MB pada manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan

Seperti yang terlihat pada Gambar 4(a), efisiensi adsorpsi menurun seiring dengan meningkatnya pH larutan. Dalam penelitian ini, efisiensi adsorpsi ideal dari manik komposit yang terbuat dari karbon aktif, CMC, dan kitosan berada pada pH 7. Pada tingkat pH rendah, di mana permukaan adsorben bermuatan positif, ada kecenderungan untuk menurunkan adsorpsi molekul pewarna karena adanya tolakan elektrostatis antara permukaan adsorben dan molekul pewarna kationik (Attallah & Mamdouh, 2020). Kitosan menjadi terprotonasi pada tingkat pH rendah karena adanya H^+ , dengan bentuk dominan adalah $-NH_3^+$. Dalam hal ini, senyawa pewarna kationik MB yang juga bermuatan positif berinteraksi secara elektrostatis dengan adsorben sulit untuk dilakukan, ini menurunkan nilai penghilangan pewarna. Adsorben tidak cocok untuk menyerap pewarna pada kondisi ini. Sementara itu, pada tingkat pH tinggi, penambahan NaOH berlebih menyebabkan penurunan penyerapan zat warna. Pada pH netral, kitosan memiliki bentuk dominan $-NH_2$, ini meningkatkan efisiensi penyerapan zat warna. Secara keseluruhan peningkatan interaksi antara manik komposit dan pewarna kationik disebabkan oleh adanya gugus $-NH_2$, $-OH$ dan $-COO^-$ pada permukaan serbuk manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan. Dengan demikian, nilai penghilangan zat warna efektif dan efisien pada pH mendekati netral (Purnaningtyas et al., 2020; Rahmah et al., 2023).

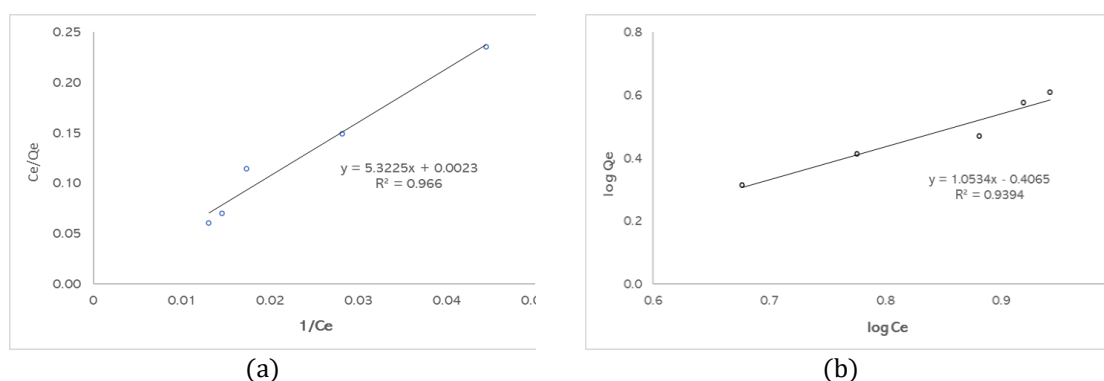
Efisiensi adsorpsi versus dosis adsorben ditunjukkan pada Gambar 4(b). Ketika dosis adsorben dinaikkan, menyebabkan persentase adsorpsi juga meningkat. Peningkatan situs aktif pada permukaan adsorben disebabkan oleh peningkatan dosis adsorben. Oleh karena itu, lebih banyak molekul zat warna yang dapat diadsorpsi ke

permukaan adsorben. Namun, dosis adsorben yang lebih tinggi mengakibatkan adsorben teragregasi, yang mengurangi luas permukaan dan, akhirnya, efisiensi adsorpsi menurun. Dalam penelitian ini, dosis ideal manik komposit untuk adsorpsi MB adalah 0,06 g, dan memiliki tingkat adsorpsi lebih dari 70% untuk pewarna MB (Hermanto et al., 2024; Rahmah et al., 2023).

Menurut Gambar 4(c), larutan pewarna MB pada konsentrasi 100 mg/L menghasilkan efisiensi adsorpsi sekitar 72.2%. Laju adsorpsi adsorben menurun dengan menurunnya konsentrasi larutan pewarna MB. Kejenuhan adsorben manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan terhadap adsorbat molekul pewarna dalam larutan terlihat ketika konsentrasi dinaikkan 125 mg/L. Menurut konsep tumbukan molekuler, lebih banyak molekul yang menabrak dan bereaksi dengan adsorben seiring dengan peningkatan konsentrasi pewarna MB, sehingga meningkatkan efisiensi adsorpsi (Hermanto et al., 2024; Khuluk et al., 2019).

Dampak durasi waktu kontak terhadap kemampuan manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan untuk menyerap zat warna digambarkan pada Gambar 4(d). Karena situs aktif adsorben masih kosong pada awal waktu kontak, molekul zat warna dapat dengan mudah menempel pada permukaan adsorben, sehingga menghasilkan efisiensi adsorpsi yang tinggi. Ketika waktu kontak ditingkatkan, kapasitas adsorpsi adsorben untuk zat warna MB tumbuh secara progresif; namun, setelah 80 menit, efisiensi adsorpsi untuk zat warna MB menurun. Kejenuhan di situs aktif pada adsorben merupakan penyebab penurunan efisiensi adsorpsi (Hermanto et al., 2024; Purnaningtyas et al., 2020).

Mekanisme terbentuk, dan prosesnya dijelaskan menggunakan isoterm adsorpsi. Ketika proses adsorpsi mencapai keadaan kesetimbangan, isoterm adsorpsi menampilkan keadaan molekul adsorpsi yang terdispersi antara fase cair dan padat. Analisis isoterm adsorpsi berkaitan dengan model dua isoterm yang dikenal luas (Langmuir dan Freundlich) yang dilakukan pada berbagai suhu. Pengujian persamaan regresi linier isoterm adsorpsi Freundlich dan Langmuir akan mengungkap jenis adsorpsi. Isoterm Langmuir diperoleh menggunakan persamaan 1 dan 2, dan kurva diperoleh dengan membuat grafik C_e (ppm) dan C_e/Q_e (Gambar 5(a)). Isoterm Freundlich diperoleh menggunakan persamaan 3 dan 4 dengan memplot $\log Q_e$ vs. $\log C_e$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(b).



Gambar 5. Model isotermal untuk adsorpsi larutan pewarna MB; a) Langmuir dan b) Freundlich

Model isoterm adsorpsi Langmuir bermanfaat untuk adsorpsi satu lapis dan mendukung adsorpsi pada permukaan adsorben yang homogen. Sedangkan, model isoterm Freundlich mendukung adsorpsi pada heterogenitas permukaan dan lokasi

dengan tingkat energi adsorpsi yang berbeda (Geçgel et al., 2013). Koefisien korelasi, R^2 , membandingkan bagaimana persamaan isoterm diterapkan. Menurut Gambar 5(a), model isoterm Langmuir menunjukkan koefisien linearitas (R^2) sebesar 0,9660, sedangkan grafik model Freundlich pada Gambar 5(b) menunjukkan nilai derajat (R^2) sebesar 0,9394. Ringkasan dari perhitungan kedua model isoterm ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan parameter isoterm Freundlich dan Langmuir pewarna MB

Model Isotherm	Regression	R^2	Q_m	K_L	K_f	n
Langmuir	$y = 5.3225x + 0.0023$	0.9660	0.19	5.32	-	-
Freundlich	$y = 1.0534x - 0.4065$	0.9394	-	-	2.55	0.95

Nilai derajat linearitas (R^2) mendekati nilai 1 untuk menentukan model kesetimbangan. Dengan demikian, isoterm adsorpsi yang digunakan dalam penelitian ini diharapkan mengikuti isoterm Langmuir. Hal ini didukung oleh data FTIR bahwa beberapa situs aktif komposit berperan dalam adsorpsi (situs aktif homogen), sehingga menghasilkan adsorpsi satu lapis (monolayer). Nilai K_f dan n pada model Freundlich menunjukkan bahwa adsorben dan adsorbat telah mencapai kesetimbangan. Nilai muatan positif menunjukkan adanya kesetimbangan, sedangkan nilai negatif berarti tidak terjadi kesetimbangan. Berdasarkan data Q_m pada Tabel 1 diketahui nilai kapasitas adsorpsi maksimum manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan dalam menyerap MB sebesar 5,32 mg/g. Terjadi kesetimbangan karena hasilnya positif. Oleh karena itu, manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan merupakan adsorben yang efektif untuk menyisihkan zat warna MB. Manik komposit ini berpotensi untuk mengatasi masalah pencemaran air oleh zat warna yang dihasilkan, salah satunya dari industri tekstil. Agar lebih menguntungkan secara ekonomi, diperlukan upaya peningkatan efisiensi adsorpsi dengan memodifikasi struktur komposit, seperti desain lapis demi lapis.

4. KESIMPULAN

Manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan berbentuk bulat dengan sifat bahan granular hitam, keras, dan padat dengan ukuran dan bentuk yang seragam berhasil disintesis secara efektif. Manik komposit tersebut memiliki lebih banyak tonjolan, alur, dan pori asimetris daripada karbon aktif. Analisis FTIR mengonfirmasi pengayaan gugus fungsi dalam komposit karbon aktif/CMC/kitosan, termasuk $-NH_2$, $-OH$, dan karboksilat dari polimer penyusunnya. Gugus-gugus ini juga berfungsi sebagai situs aktif untuk adsorben. Adsorpsi zat warna komposit paling efektif pada pH 7, dengan dosis adsorben 0,06 g, konsentrasi larutan 100 mg/L zat warna MB, dan periode kontak 80 menit. Model isoterm Langmuir cocok untuk manik komposit, yang menunjukkan situs aktif yang homogen atau beberapa yang berkontribusi terhadap penyerapan dan menghasilkan penyerapan satu lapis (monolayer). Dengan demikian, berdasarkan sumber daya alam yang berkelanjutan, manik komposit karbon aktif/CMC/kitosan menawarkan jalur baru untuk penghilangan warna yang efisien.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Mataram yang telah memberi dukungan financial terhadap pengabdian ini melalui DIPa BLU Universitas Mataram skema penelitian peningkatan kapasitas TA. 2024 dengan no. kontrak 1441/UN18.L1/PP/2024.

6. DAFTAR REFERENSI

1. Al-Harby, N. F., Albahly, E. F., & Mohamed, N. A. (2021). Kinetics, Isotherm and Thermodynamic Studies for Efficient Adsorption of Congo Red Dye from Aqueous Solution onto. *Polymers*, 13, 4446.
2. Ania, C. O., Cabal, B., Pevida, C., Arenillas, A., Parra, J. B., Rubiera, F., & Pis, J. J. (2007). Effects of activated carbon properties on the adsorption of naphthalene from aqueous solutions. *Applied Surface Science*, 253, 5741–5746. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.12.036>
3. Ardila-Leal, L. D., Poutou-Piñales, R. A., Pedroza-Rodríguez, A. M., & Quevedo-Hidalgo, B. E. (2021). A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases. *Molecules*, 26(13). <https://doi.org/10.3390/molecules26133813>
4. Attallah, O. A., & Mamdouh, W. (2020). Development and optimization of pectin/chitosan magnetic sponge for efficient cationic dyes removal using Box–Behnken design. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02828-4>
5. Daniar, P. S., Hermanto, D., Darmayanti, M. G., & Ismillayli, N. (2021). Effect of ascorbic acid concentration on the properties of biodegradable plastic based on yellow kepok banana (*Musa saba*) weevil starch. *AIP Conference Proceedings*, 2360(September). <https://doi.org/10.1063/5.0059605>
6. Değerli, E., Yangin, S., & Cansaran-Duman, D. (2019). Determination of the effect of RBBR on laccase activity and gene expression level of fungi in lichen structure. *3 Biotech*, 9(8), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1832-3>
7. Ganjoo, R., Sharma, S., Kumar, A., & Daouda, M. M. A. (2023). Activated Carbon: Fundamentals, Classification, and Properties. *Activated Carbon*, May, 1–22. <https://doi.org/10.1039/bk9781839169861-00001>
8. Gao, Y., Yue, Q., Xu, S., & Gao, B. (2015). Activated carbons with well-developed mesoporosity prepared by activation with different alkali salts. *Materials Letters*, 146, 34–36. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.161>
9. Geçgel, Ü., Özcan, G., & Gürpınar, G. Ç. (2013). Removal of methylene blue from aqueous solution by activated carbon prepared from pea shells (*Pisum sativum*). *Journal of Chemistry*, 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/614083>
10. Hebeish, A., & Sharaf, S. (2015). Novel nanocomposite hydrogel for wound dressing and other medical applications. *RSC Advances*, 5(125), 103036–103046. <https://doi.org/10.1039/c5ra07076g>
11. Hermanto, D., Mudasir, M., Siswanta, D., Kuswandi, B., & Ismillayli, N. (2022). Optical fiber mercury biosensor based on immobilized urease and bromothymol blue onto the alginate-chitosan membrane in the flow-system. *Kuwait Journal of Science*, 49(1), 1–13. <https://doi.org/10.48129/kjs.v49i1.9400>
12. Hermanto, D., Prihatini, P. J., Apriani, N. Y., Kurniawati, L., Murniati, M., Hamdiani, S., Ismillayli, N., & Kamali, S. R. (2024). Facile Synthesis of Activated Carbon/Alginate/Chitosan Composite Beads as Rhemazole Brilliant Blue R Adsorbent. *Indonesian Physical Review*, 7(3), 480–495.
13. Ismillayli, N., Andayani, I. G. A. S., Honiar, R., Mariana, B., Sanjaya, R. K., & Hermanto, D. (2020). Polyelectrolyte Complex (PEC) film based on chitosan as potential edible films and their antibacterial activity test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 959(012009), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/959/1/012009>
14. Khuluk, R. H., Rahmat, A., Buhani, & Suharso. (2019). Removal of Methylene blue by adsorption onto activated carbon from coconut shell (*Cocous Nucifera* L.). *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(2), 229–240. <https://doi.org/10.17509/ijostv4i2.18179>
15. Lee, K. J., Miyawaki, J., Shiratori, N., Yoon, S. H., & Jang, J. (2013). Toward an effective adsorbent for polar pollutants: Formaldehyde adsorption by activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.049>
16. Munene, J. M., Onyatta, J. O., & Yusuf, A. O. (2020). Characterization of Water Hyacinth Powder Using FTIR Spectroscopy and the Adsorption Behaviour of Pb²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺ and Cr²⁺ in Aqueous Solution. *Asian Journal of Applied Chemistry Research*, 6(1), 47–55. <https://doi.org/10.9734/ajacr/2020/v6i130151>
17. Parimelazhagan, V., Yashwath, P., Arukkani Pushparajan, D., & Carpenter, J. (2022). Rapid Removal of Toxic Remazol Brilliant Blue-R Dye from Aqueous Solutions Using Juglans nigra Shell Biomass Activated Carbon as Potential Adsorbent: Optimization, Isotherm, Kinetic, and Thermodynamic Investigation. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 1–33. <https://doi.org/10.3390/ijms232012484>
18. Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from *Ficus carica* bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445–S1451. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>
19. 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>
20. Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>
21. Rahmah, N. L., Ismillayli, N., Darmayanti, M. G., & Hermanto, D. (2023). Synthesis Activated Carbon / Chitosan / Pectin Composite as. *AIP Conference Proceedings*, 2720(040005), 1–7. <https://doi.org/10.1063/5.0136932>

22. Salazar-Rabago, J. J., Leyva-Ramos, R., Rivera-Utrilla, J., Ocampo-Perez, R., & Cerino-Cordova, F. J. (2017). Biosorption mechanism of Methylene Blue from aqueous solution onto White Pine (*Pinus durangensis*) sawdust: Effect of operating conditions. *Sustainable Environment Research*, 27(1), 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.11.009>
23. Saleem, J., Shahid, U. Bin, Hijab, M., Mackey, H., & McKay, G. (2019). Production and applications of activated carbons as adsorbents from olive stones. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(4), 775–802. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00473-7>
24. Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1–3), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.019>
25. Slama, H. Ben, Bouket, A. C., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts, and treatment methods. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app11146255>