



UJI PERFORMA KOMBINASI ZEOLIT TERAKTIVASI DAN ARANG AKTIF PADA PROSES ADSORPSI METILEN BIRU : PENDEKATAN EKSPERIMEN DAN PEMODELAN

Moh. Azhar Afandy^{a,*}, Fikrah Dian Indrawati Sawali^a

^aProgram Studi Teknik Kimia Mineral – Politeknik Industri Logam Morowali
Jl. Trans Sulawesi Labota, Bahodopi, Morowali, Sulawesi Tengah, 94974

*E-mail: azhar@pilm.ac.id

Masuk Tanggal: 26 Mei, revisi tanggal: 2 Juni, diterima untuk diterbitkan tanggal: 30 Juni 2025

Abstrak

Pencemaran air oleh pewarna tekstil seperti metilen biru (MB) merupakan permasalahan lingkungan yang serius dan membutuhkan teknologi pengolahan limbah yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif dengan perbandingan 1:1 dalam mengadsorpsi MB dari larutan air limbah. Pengaruh parameter operasional seperti waktu kontak dan konsentrasi awal MB terhadap kapasitas adsorpsi dianalisis secara eksperimental dengan massa adsorben total 1 g serta pH dan suhu yang menyesuaikan dengan kondisi lingkungan. Data hasil adsorpsi kemudian dimodelkan menggunakan kinetika *pseudo-first order* (PFO), *pseudo-second-order* (PSO), *intraparticle diffusion* (IPD) dan model isoterm Langmuir, Freundlich, serta Temkin dengan pendekatan non-linear. Hasil menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat signifikan pada 10 menit pertama dan mencapai kesetimbangan pada 120 menit. Kapasitas adsorpsi juga meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi MB ($q_{E_{max}} = 13,9183$ mg/g). Evaluasi model kinetika mengungkapkan bahwa model PSO paling sesuai ($R^2 = 0,9998$ dan $SSE = 0,0045$), menunjukkan mekanisme adsorpsi yang didominasi oleh interaksi kimia. Sedangkan model isotherm Freundlich paling cocok ($R^2 = 0,9639$, dan $SSE = 5,5166$) untuk menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif merupakan adsorben yang efektif dan ekonomis untuk pengolahan limbah tekstil, sekaligus memberikan alternatif pemanfaatan sumber daya lokal yang berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci: Adsorpsi, Zeolit, Arang aktif, Metilen biru

Abstract

The contamination of water by textile dyes, including methylene blue (MB), presents a considerable environmental issue and requires efficient, eco-friendly wastewater treatment solutions. This study examines the ability of a combination of activated zeolite and activated carbon (1:1) for the removal of methylene blue (MB) from wastewater. The influence of variables such as contact time and initial MB concentration on absorption capacity was evaluated in procedures utilizing 1 g of adsorption material with pH and temperature adjusted to reflect the immediate environment. The adsorption data were analyzed utilizing pseudo-first-order (PFO), pseudo-second-order (PSO), and intraparticle diffusion (IPD) kinetics, alongside Langmuir, Freundlich, and Temkin isotherm models via a non-linear methodology. The results demonstrated a substantial increase in adsorption capacity during the initial 10 minutes, achieving equilibrium at 120 minutes. Moreover, the adsorption capacity was seen to increase with elevated MB concentration ($q_{E_{max}} = 13,9183$ mg/g). The assessment of kinetic models indicated that the PSO model most accurately represented the process ($R^2 = 0,9998$ dan $SSE = 0,0045$), implying that the adsorption mechanism is predominantly governed by chemical interactions. Simultaneously, the Freundlich isotherm model accurately ($R^2 = 0,9639$, dan $SSE = 5,5166$) depicted adsorption on heterogeneous surfaces. This study indicates that the combination of activated zeolite and activated carbon acts as an effective and economical adsorbent for treating textile wastewater, offering a sustainable alternative for utilizing local resources in Indonesia.

Keywords: Adsorption, Zeolite, Activated carbon, Methylene blue

1. PENDAHULUAN

Masalah pencemaran lingkungan akibat aktivitas industri telah menjadi isu global yang terus meningkat, terutama pencemaran badan air oleh limbah cair industri tekstil [1]. Limbah tersebut mengandung berbagai zat kimia berbahaya, salah satunya adalah zat pewarna sintetik. Pewarna tekstil tidak hanya mencemari lingkungan secara visual, tetapi juga membawa dampak ekotoksikologis yang signifikan terhadap organisme akuatik dan kesehatan manusia [2], [3]. Di antara berbagai jenis pewarna, metilen biru (MB) merupakan salah satu zat warna kationik yang paling banyak digunakan dalam industri tekstil, kertas, plastik, dan laboratorium biologi sebagai indikator reaksi redoks [1], [4]. MB memiliki struktur kimia yang kompleks dan sangat stabil, sehingga sulit terurai secara biologis dalam lingkungan perairan. Konsentrasi rendah MB dalam air dapat menyebabkan perubahan warna air, menurunkan penetrasi cahaya matahari, dan menghambat proses fotosintesis pada fitoplankton [5], [6]. Lebih lanjut, MB bersifat toksik terhadap mikroorganisme akuatik, dan dalam jangka panjang dapat menyebabkan iritasi kulit, gangguan pernapasan, bahkan gangguan fungsi sistem saraf pada manusia jika terakumulasi [3], [4]. Berdasarkan data yang diperoleh Dwiasi *dkk*, pencemaran MB mencapai 0,179 ppm yang berasal dari industri tekstil dan telah melebihi ambang batas PP no 82 Tahun 2001 yakni 0,1 ppm [7]. Oleh karena itu, keberadaan MB dalam air limbah harus dikendalikan secara efektif sebelum dibuang ke lingkungan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan pewarna dari air limbah, seperti koagulasi-flokulasi, filtrasi membran, degradasi fotokatalitik, dan proses elektrokoagulasi [8]–[10]. Namun, banyak dari metode ini memiliki kelemahan seperti biaya operasional tinggi, produksi lumpur sekunder, dan kebutuhan peralatan khusus. Di antara berbagai teknologi yang tersedia, proses adsorpsi muncul sebagai solusi yang sangat menjanjikan. Adsorpsi dikenal karena keefektifannya dalam menghilangkan kontaminan organik, biaya yang relatif rendah, kesederhanaan proses, dan kemampuannya untuk diaplikasikan dalam berbagai skala, baik laboratorium maupun industri kecil [11]–[13]. Adsorben merupakan komponen utama dalam proses adsorpsi. Berbagai material telah digunakan sebagai adsorben, mulai dari material sintesis hingga bahan alami yang dimodifikasi. Beberapa penelitian sebelumnya menggunakan berbagai material sebagai adsorben seperti abu layang [14], karbon aktif [15], serabut kelapa

[16], dan arang tempurung kelapa [17]. Selain itu, material anorganik seperti zeolit juga digunakan dalam proses adsorpsi zat warna MB [18]–[20]. Berdasarkan studi terhadap berbagai referensi, zeolit dan arang aktif merupakan dua jenis adsorben yang paling banyak digunakan dalam pengolahan air limbah karena ketersediaannya yang melimpah, kestabilan kimia, serta sifat fisik dan kimia permukaan yang mendukung proses penyerapan molekul pencemar.

Zeolit adalah mineral aluminosilikat dengan struktur kristal tiga dimensi yang membentuk rongga dan saluran mikropori [21]–[23]. Sifat pertukaran ion dan afinitas terhadap molekul kationik seperti MB menjadikan zeolit sebagai salah satu adsorben yang potensial. Namun, zeolit alami perlu melalui proses aktivasi, baik secara kimia (misalnya dengan HCl atau NaOH) maupun termal, untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan memperbaiki sifat adsorptifnya [24], [25]. Di sisi lain, arang aktif dikenal memiliki luas permukaan dan volume pori yang sangat tinggi, yang menjadikannya sangat efektif untuk menyerap molekul-molekul organik seperti zat warna [11], [26]. Arang aktif dapat diproduksi dari berbagai sumber biomassa, termasuk tempurung kelapa, tongkol jagung, dan limbah pertanian lainnya, sehingga menawarkan keunggulan dari segi ekonomi dan keberlanjutan lingkungan [27], [28].

Penggunaan kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif sebagai campuran adsorben menawarkan pendekatan yang inovatif untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi. Kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif membentuk adsorben dengan karakteristik sinergis yang unggul, terutama dalam hal porositas, luas permukaan, dan keberadaan gugus fungsional. Zeolit menyediakan struktur mikropori yang teratur dan situs pertukaran ion, sedangkan arang aktif menawarkan luas permukaan tinggi dan distribusi pori yang lebih luas, dari mikro hingga makropori [21], [22], [27], [29]. Menurut Studi yang dilakukan oleh Bulbul *dkk*, 2025 dan Dimbo *dkk* 2024, kehadiran gugus fungsional seperti –OH, –COOH, dan C=O pada arang aktif memperkuat interaksi dengan molekul MB melalui ikatan hidrogen atau gaya elektrostatik [30], [31]. Selain itu, keberadaan gugus fungsi –Si-O-Si-, –OH dan –CH₂CH yang ada pada zeolit dapat memperkuat kemampuan adsorpsi terhadap senyawa bermuatan seperti MB [7]. Karakteristik tersebut mendukung efektivitas kombinasi ini dalam aplikasi pengolahan air limbah secara ekonomis dan berkelanjutan. Namun, hingga saat ini masih terbatas kajian sistematis yang

mengeksplorasi secara mendalam performa kombinasi zeolit dan arang aktif dalam menyerap MB, terutama dari sisi efisiensi, kinetika, dan *isotherm* adsorpsi. Sehingga penelitian ini diharapkan mampu untuk membuktikan hipotesis awal yang menyatakan bahwa kombinasi dari zeolit teraktivasi dan arang aktif dalam rasio 1:1 akan menghasilkan efek sinergis yang signifikan dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi MB dibandingkan dengan penggunaan masing-masing material secara tunggal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif dalam proses adsorpsi MB dari larutan air limbah. Selain itu, penelitian ini juga menghadirkan pendekatan inovatif dengan memadukan zeolit teraktivasi dan arang aktif dalam rasio 1:1 tanpa aktivasi kimia, serta memanfaatkan sumber daya lokal secara ramah lingkungan. Studi ini akan menganalisis pengaruh parameter operasional seperti waktu kontak dan konsentrasi awal MB terhadap efisiensi penghilangan dan kapasitas adsorpsi. Analisis dilakukan untuk menentukan waktu kesetimbangan optimal serta kapasitas maksimum adsorpsi pada berbagai konsentrasi awal. Data eksperimental yang diperoleh selanjutnya akan dianalisis menggunakan model kinetika adsorpsi seperti *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order* dan *intra particle diffusion* untuk memahami mekanisme perpindahan massa. Selain itu, model *isotherm* Langmuir, Freundlich dan Temkin akan digunakan untuk menilai kapasitas maksimum adsorpsi dan sifat heterogenitas permukaan adsorben. Pendekatan *non-linear fitting* dipilih dalam menyajikan data model karena mampu meminimalkan kesalahan sistematis akibat linearisasi model, sehingga interpretasi hasil menjadi lebih representatif terhadap perilaku adsorpsi aktual. Melalui kombinasi pendekatan eksperimental dan model matematis non-linear ini, hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi pengembangan teknologi pengolahan limbah tekstil yang efisien, murah, dan ramah lingkungan.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

2.1 Preparasi zeolit teraktivasi

Tahapan preparasi zeolit yang dilakukan pada penelitian ini merujuk pada prosedur penelitian yang telah kami lakukan sebelumnya [32], [33]. Zeolit diperoleh dari *marketplace* dengan lokasi penjualan di Bandung, Indonesia. Preparasi zeolit teraktivasi diawali dengan pengecilan ukuran (± 60 mesh) dan kemudian dilakukan proses pengeringan pada suhu 110°C dalam

waktu 4 jam untuk mengurangi kandungan air. Selanjutnya dilakukan proses kalsinasi pada suhu 550°C selama 2 jam di dalam tanur. Proses aktivasi hanya dilakukan secara fisika dengan pertimbangan keamanan, efisiensi biaya, kemudahan operasional, serta ramah lingkungan sehingga sesuai dengan prinsip *Green Chemistry*

2.2 Preparasi arang aktif

Arang yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari daerah Bahodopi, Morowali, Indonesia dalam bentuk arang siap pakai. Tahapan aktivasi secara fisika diawali dengan melakukan proses pengecilan ukuran (± 60 mesh) dan selanjutnya dilakukan proses pengeringan selama 2 jam (110°C). Kemudian, dilakukan proses karbonisasi pada suhu 600°C di dalam tanur selama 1 Jam dan siap untuk digunakan. Salah satu keterbatasan dalam penelitian ini adalah belum dilakukannya karakterisasi fisik dan kimia adsorben, seperti analisis BET, SEM, XRD, dan FTIR. Ketiadaan data ini membatasi pemahaman mendalam terhadap struktur pori, morfologi, dan gugus fungsi permukaan yang berperan dalam proses adsorpsi. Untuk itu, diperlukan studi lanjutan guna mendukung interpretasi mekanisme adsorpsi secara lebih komprehensif.

2.3 Prosedur adsorpsi secara batch

1 g campuran zeolit teraktivasi dan arang aktif digunakan dengan perbandingan 1:1 dimasukkan ke dalam masing-masing erlenmeyer dan kemudian ditambahkan dengan 100 mL sampel yang mengandung zat warna MB. Komposisi 1:1 dipilih untuk menggabungkan sifat-sifat unggul dari kedua adsorben, kemudahan replikasi, kontrol variabel, serta kestabilan campuran sehingga dapat mengoptimalkan performa adsorpsi. Untuk menentukan pengaruh waktu terhadap kapasitas adsorpsi, percobaan dilakukan pada rentang waktu 10-120 menit dengan konsentrasi awal MB 50 mg/L. Sedangkan untuk menentukan pengaruh konsentrasi awal terhadap kapasitas adsorpsi, percobaan dilakukan dengan konsentrasi awal MB (10-200 mg/L) dalam waktu pengamatan selama 3 jam. Suhu dan pH yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan dengan kondisi yang ada di lingkungan. Hasil yang diperoleh kemudian di saring dan filtrat yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan Spektrofotometer UV-Vis (*BARCOV BRQ-UV10VLE*) pada panjang gelombang maksimal untuk MB (664 nm). Kapasitas adsorpsi campuran adsorben zeolit teraktivasi dan arang aktif dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

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

Dimana nilai q_e merupakan kapasitas adsorpsi maksimum dari MB (mg/g), nilai C_o dan C_e adalah konsentrasi awal dan konsentrasi akhir MB (mg/L), V adalah volume sampel (L) dan nilai m adalah massa adsorben.

2.4 Studi isotherm

Beberapa model *isotherm* yang digunakan pada penelitian ini antara lain model *isotherm* Langmuir, Freundlich dan Temkin yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Model isotherm

Model isotherm	Persamaan
Langmuir	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$
Temkin	$q_e = \frac{RT}{B_T} \ln(A_T C_e)$

2.5 Studi kinetika

Beberapa model kinetika adsorpsi yang digunakan pada penelitian ini yakni *pseudo-first-order* (PFO), *pseudo-second-order* (PSO), dan *intra particle diffusion* (IPD) yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Model kinetika

Model kinetika	Persamaan
PFO	$q_t = q_e (1 - \exp(-k_1 t))$
PSO	$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$
IPD	$q_t = K_{IPD} t^{1/2} + C$

Untuk mengevaluasi kecocokan model adsorpsi non-linear, digunakan nilai koefisien korelasi (R^2) dan *sum square error* (SSE). Metode non-linear dalam pemodelan adsorpsi memiliki sejumlah keunggulan signifikan dibandingkan metode linear, terutama dalam hal akurasi dan kesesuaian dengan kondisi eksperimental yang sesungguhnya. Berbeda dengan pendekatan linear yang memerlukan transformasi matematis terhadap data, metode non-linear memungkinkan pemodelan langsung terhadap bentuk asli dari persamaan kinetika dan *isotherm*. Adapun persamaan untuk koefisien korelasi (R^2) dan *sum square error* (SSE) dapat dilihat pada persamaan 2 dan 3.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{e_{pred.}} - \overline{q_{e_{exp.}}})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{e_{pred.}} - \overline{q_{e_{exp.}}})^2 + \sum_{i=1}^n (\overline{q_{e_{pred.}}} - q_{e_{exp.}})^2} \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (q_{e_{exp.}} - q_{e_{pred.}})^2 \quad (3)$$

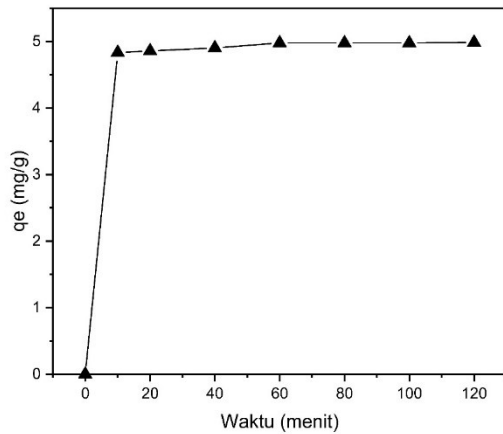
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh waktu terhadap kapasitas adsorpsi

Waktu kontak merupakan salah satu parameter kinetik utama yang mempengaruhi efisiensi dan dinamika proses adsorpsi. Berdasarkan hasil eksperimental, kapasitas adsorpsi MB (MB) oleh kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif dengan perbandingan massa 1:1 menunjukkan peningkatan yang sangat cepat dalam 10 menit pertama yang dapat dilihat pada Gambar 1. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada tahap awal, proses adsorpsi terjadi secara intensif akibat ketersediaan situs aktif yang melimpah dan gradien konsentrasi yang tinggi antara larutan dan permukaan adsorben.

Interaksi awal ini kemungkinan besar didominasi oleh difusi molekul MB ke permukaan eksternal adsorben, yang relatif tidak terhambat oleh resistansi difusi internal maupun kejenuhan permukaan. Setelah waktu kontak melebihi 10 menit, peningkatan kapasitas adsorpsi cenderung melambat, dan pada waktu 120 menit sistem mulai mencapai kondisi mendekati kesetimbangan. Penurunan laju adsorpsi ini mencerminkan terjadinya transisi dari fase adsorpsi cepat menuju fase adsorpsi lambat, yang sering dikaitkan dengan terbatasnya jumlah situs aktif tersisa serta meningkatnya resistansi difusi intra-partikel. Pada fase ini, adsorpsi terjadi lebih dominan di dalam pori-pori halus adsorben, yang memerlukan waktu lebih lama untuk dicapai oleh molekul MB.

Hasil ini juga mengindikasikan bahwa waktu kontak 120 menit dapat dianggap sebagai waktu optimum untuk mencapai efisiensi adsorpsi maksimum tanpa pemborosan energi dan waktu operasional. Oleh karena itu, pemilihan waktu kontak yang tepat sangat penting dalam desain sistem pengolahan limbah cair berbasis adsorpsi, terutama dalam skala industri, di mana efisiensi waktu dan energi sangat menentukan keberlanjutan proses.



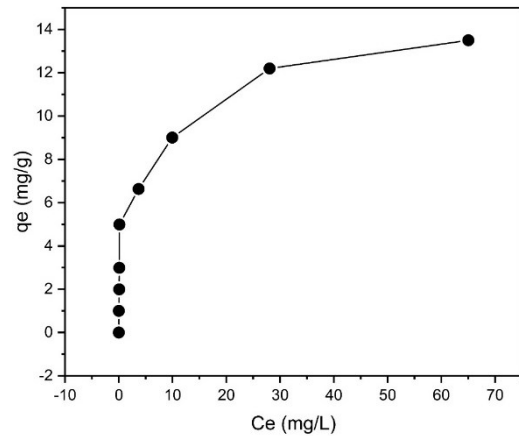
Gambar 1 Pengaruh waktu terhadap kapasitas adsorpsi MB

3.2 Pengaruh konsentrasi terhadap kapasitas adsorpsi

Konsentrasi awal adsorbat merupakan parameter penting yang tidak hanya menentukan jumlah total molekul yang tersedia untuk diadsorpsi, tetapi juga memengaruhi gaya pendorong (*driving force*) dalam proses perpindahan massa dari larutan ke permukaan adsorben. Dalam studi ini, kapasitas adsorpsi MB meningkat secara progresif dengan kenaikan konsentrasi awal dari 10 hingga 200 mg/L dan dapat dilihat pada Gambar 2. Pada konsentrasi rendah (10–30 mg/L), kapasitas adsorpsi relatif kecil karena keterbatasan jumlah molekul MB dalam larutan menyebabkan banyak situs aktif pada permukaan adsorben tidak terisi secara optimal. Peningkatan kapasitas adsorpsi menjadi lebih signifikan pada kisaran konsentrasi 50–100 mg/L, di mana gradien konsentrasi yang tinggi antara fase cair dan fase padat mempercepat laju transfer massa dan memperbesar kemungkinan interaksi antara MB dan situs aktif pada permukaan adsorben. Pada konsentrasi yang lebih tinggi (150–200 mg/L), meskipun kapasitas adsorpsi terus meningkat, laju kenaikannya mulai melambat, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar situs aktif telah terisi dan adsorben mulai mendekati kondisi jenuh. Fenomena ini menunjukkan bahwa terdapat batas maksimum kapasitas adsorpsi, yang dalam studi ini diatur oleh karakteristik permukaan kombinasi zeolit dan arang aktif, termasuk jumlah situs aktif, luas permukaan spesifik, serta distribusi ukuran pori.

Kombinasi dua material adsorben tersebut memberikan efek sinergistik yang signifikan. Zeolit teraktivasi berkontribusi melalui mekanisme pertukaran ion dan adsorpsi selektif terhadap kation seperti MB, sedangkan arang aktif menyediakan permukaan luas dan pori-pori mikro yang memungkinkan adsorpsi secara fisik

(*physisorption*). Sinergi ini memungkinkan peningkatan kapasitas adsorpsi secara keseluruhan, terutama pada konsentrasi MB yang tinggi.



Gambar 2 Pengaruh konsentrasi terhadap kapasitas adsorpsi MB

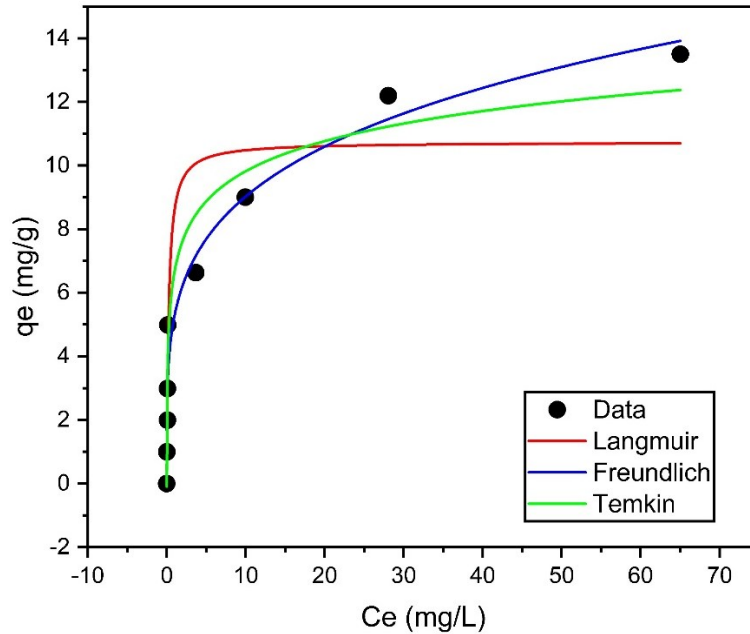
Secara keseluruhan, hubungan antara konsentrasi awal dan kapasitas adsorpsi penting dalam merancang sistem adsorpsi yang efisien dan ekonomis. Informasi ini juga menjadi dasar bagi pemodelan *isotherm* adsorpsi menggunakan pendekatan non-linear Langmuir, Freundlich dan Temkin, yang dapat menjelaskan karakteristik adsorpsi *monolayer* maupun *multilayer* serta heterogenitas permukaan adsorben.

3.3 Studi Isotherm

Studi isotherm adsorpsi bertujuan untuk memahami karakteristik interaksi antara metilen biru (MB) dengan permukaan kombinasi adsorben zeolit teraktivasi dan arang aktif. Tiga model isotherm yang umum digunakan dalam kajian adsorpsi, yakni Langmuir, Freundlich, dan Temkin, diaplikasikan untuk mendeskripsikan distribusi MB pada permukaan adsorben pada kondisi kesetimbangan. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan non-linear guna meningkatkan akurasi estimasi parameter dan menghindari distorsi akibat transformasi matematis dan dapat dilihat pada Gambar 3.

Model Langmuir mengasumsikan adsorpsi berlangsung secara monolayer pada permukaan homogen, dengan energi adsorpsi yang seragam dan tidak adanya interaksi antar molekul adsorbat [34]. Model Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen dan memungkinkan terjadinya adsorpsi dalam lebih dari satu lapisan (*multilayer*) [35], [36]. Sedangkan model Temkin mempertimbangkan efek interaksi antara adsorbat dan adsorben serta mengasumsikan bahwa panas adsorpsi berkurang secara linear

terhadap peningkatan jumlah adsorbat yang teradsorpsi[37].



Gambar 3 Model isotherm non-linear

Hasil analisis menunjukkan bahwa model Freundlich memberikan nilai $R^2 = 0.9639$ dan nilai $SSE=5,5166$ yang paling rendah dibandingkan model Langmuir dan Temkin yang disajikan pada Tabel 3. Hal ini menunjukkan bahwa model Freundlich paling sesuai dalam merepresentasikan data eksperimen. Kecocokan ini mengindikasikan bahwa permukaan kombinasi adsorben bersifat heterogen dan interaksi antara MB dan adsorben tidak seragam, yang mungkin disebabkan oleh variasi mikropori, makropori, dan keberadaan gugus fungsional aktif yang beragam dari zeolit dan arang aktif.

Selain itu, parameter model *isotherm* Freundlich menunjukkan nilai K_F dan $1/n$. Konstanta K_F merepresentasikan kapasitas adsorpsi dari suatu adsorben terhadap adsorbat. Semakin besar nilai K_F , maka kemampuan adsorben dalam menjerap zat terlarut dari larutan juga semakin besar. Nilai K_F dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia adsorben seperti luas permukaan, polaritas, dan ketersediaan situs aktif. Dalam konteks kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif, nilai K_F mencerminkan sinergi dua material dalam menyediakan situs adsorpsi yang lebih banyak dan efektif dibandingkan jika digunakan secara tunggal. Parameter $1/n$ mengindikasikan intensitas dan heterogenitas permukaan adsorben. Nilai ini memberikan gambaran tentang sejauh mana adsorpsi berlangsung secara menguntungkan (*favorable*) atau tidak menguntungkan (*unfavorable*). Berdasarkan parameter yang diperoleh pada Tabel 3, proses adsorpsi terjadi secara *favorable*

($0 < 1/n < 1$) yang menunjukkan bahwa menunjukkan bahwa pada peningkatan konsentrasi larutan, jumlah adsorbat yang teradsorpsi meningkat secara signifikan namun tidak linier.

Tabel 3 Parameter model isotherm non-linear

Model isotherm	Nilai parameter
Langmuir:	
q _{max} (mg/g)	10,7375
K _L (L/mg)	4,0551
R _L	0,0038-0,9724
R ²	0,8563
SSE	27,4320
Freundlich:	
K _F (L/g)	5,2982
1/n	0,2314
n	4,3215
R ²	0,9639
SSE	5,5166
Temkin:	
A (L/g)	133,4822
B (KJ/mol)	1,3645
R ²	0,9437
SSE	10,7466

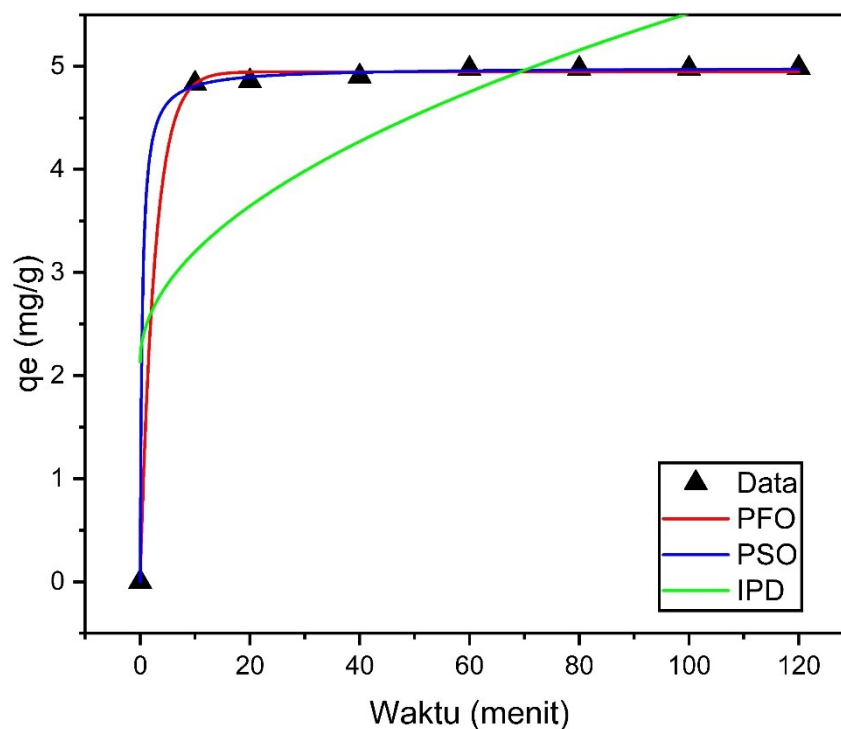
Keberhasilan model Freundlich juga memperkuat dugaan bahwa adsorpsi MB oleh kombinasi adsorben terjadi secara bertahap pada permukaan dengan energi adsorpsi yang bervariasi. Sementara model Langmuir dan Temkin masih memberikan interpretasi tambahan terhadap proses adsorpsi, temuan ini menegaskan bahwa heterogenitas permukaan memainkan peran dominan dalam sistem adsorpsi ini. Dengan demikian, pendekatan non-linear yang digunakan dalam studi ini tidak hanya memberikan estimasi parameter yang lebih

representatif, tetapi juga menghasilkan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme adsorpsi MB oleh kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif. Temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan sistem adsorben komposit yang efisien dan aplikatif dalam pengolahan air limbah tekstil.

3.4 Studi Kinetika

Studi kinetika adsorpsi dilakukan untuk memahami mekanisme laju penyerapan metilen biru (MB) oleh kombinasi adsorben zeolit teraktivasi dan arang aktif. Tiga model kinetika digunakan dalam analisis ini, yaitu *Pseudo-First-Order* (PFO), *Pseudo-Second Order* (PSO), dan *Intraparticle Diffusion* (IPD). Pendekatan non-linear digunakan untuk memperoleh estimasi

parameter yang lebih akurat dan representatif tanpa memerlukan transformasi logaritmik yang dapat menyebabkan distorsi data. Model PFO, yang dikembangkan oleh Lagergren, mengasumsikan bahwa laju adsorpsi berbanding lurus dengan jumlah situs aktif yang masih tersedia dan Model PSO, yang sering dikaitkan dengan proses adsorpsi berbasis kimia (*chemisorption*), menyatakan bahwa laju adsorpsi sebanding dengan kuadrat jumlah situs yang masih tersedia [38]–[40]. Sementara itu, model IPD yang dikembangkan oleh Weber dan Morris, digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh difusi internal sebagai tahap pengendali dalam proses adsorpsi [41], [42]. Hasil fitting dari model kinetika adsorpsi MB oleh kombinasi



Gambar 4 Model kinetika non-linear

adsorben zeolit teraktivasi dan arang aktif dapat dilihat pada Gambar 4.

Hasil fitting yang diperoleh menunjukkan bahwa model PSO memiliki nilai R^2 paling tinggi (0,9998), dan kurva prediksi yang paling sesuai dengan data eksperimental yang dikonfirmasi oleh nilai $SSE=0,0045$ sesuai data yang ditampilkan pada Tabel 4. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi MB oleh kombinasi zeolit-arang aktif mengikuti mekanisme *chemisorption*, di mana ikatan kimia seperti pertukaran elektron atau pembentukan ikatan kompleks mungkin terlibat secara dominan. Sebaliknya, model PFO menunjukkan kesesuaian yang lebih rendah, mengindikasikan bahwa adsorpsi MB tidak sepenuhnya dikendalikan oleh laju penyerapan

fisik (*physisorption*). Model IPD juga tidak menghasilkan nilai estimasi yang cukup baik ($R^2=0,5221$ dan $SSE=5,6302$) sehingga secara statistik menunjukkan bahwa difusi intrapartikel bukan merupakan satu-satunya mekanisme pengendali laju, melainkan hanya salah satu tahap dalam proses adsorpsi yang lebih kompleks yang melibatkan beberapa mekanisme lain seperti difusi film eksternal dan interaksi kimia yang terjadi pada permukaan aktif adsorben.

Selain difusi intrapartikel, difusi *boundary layer* (difusi lapisan batas) juga dapat berperan sebagai tahap pembatas laju dalam proses adsorpsi. Difusi *boundary layer* terjadi saat molekul MB harus melewati lapisan tipis cairan yang mengelilingi permukaan adsorben sebelum

memasuki pori-pori adsorben. Jika resistensi difusi di lapisan ini cukup besar, maka transfer massa dari larutan ke permukaan adsorben menjadi lambat dan menghambat keseluruhan laju adsorpsi. Hal ini sering terjadi pada sistem adsorpsi dengan agitasi atau turbulensi yang kurang optimal. Oleh karena itu, meskipun IPD berkontribusi terhadap mekanisme adsorpsi, peran difusi *boundary layer* juga penting dan dapat menjadi faktor pembatas laju utama, terutama pada tahap awal kontak antara adsorben dan adsorbat. Optimasi kondisi proses, seperti kecepatan pengadukan, dapat membantu mengurangi hambatan difusi ini.

Dengan demikian, pemodelan kinetika menggunakan pendekatan non-linear memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai dinamika interaksi antara MB dan permukaan adsorben. Temuan ini menegaskan bahwa desain sistem adsorpsi berbasis zeolit teraktivasi dan arang aktif harus mempertimbangkan aspek-aspek kimia permukaan yang memengaruhi kecepatan dan kapasitas penyerapan pewarna dari air limbah.

Tabel 4 Parameter model kinetika non-linear

Model kinetika	Nilai parameter
PFO:	
q _e (mg/g)	4,9468
k ₁ (min ⁻¹)	0,3734
R ²	0,9994
SSE	0,0137
PSO:	
q _e (mg/g)	4,9867
k ₂ (g/mg.min)	0,5442
R ²	0,9998
SSE	0,0045
IPD:	
K _{int} (mg/g min ^{1/2})	0,3383
C (mg/g)	2,1313
R ²	0,5221
SSE	5,6302

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi zeolit teraktivasi dan arang aktif efektif dalam mengadsorpsi metilen biru dari larutan air. Efisiensi adsorpsi meningkat signifikan pada menit-menit awal dan mencapai kesetimbangan dalam waktu 120 menit. Kapasitas adsorpsi meningkat seiring konsentrasi awal MB (q_e_{maks}=13,9183 mg/g), menunjukkan kecenderungan adsorpsi secara *multilayer*. Model kinetika *pseudo-second-order* (PSO) paling sesuai menggambarkan mekanisme adsorpsi (R²= 0,9998 dan SSE= 0,0045), sedangkan *isotherm* Freundlich menunjukkan kesesuaian terbaik dalam menggambarkan karakteristik permukaan adsorben yang heterogeny (R²=0,9639, dan SSE= 5,5166). Hasil ini

menegaskan bahwa kombinasi dua adsorben ini memiliki potensi tinggi sebagai solusi pengolahan limbah tekstil yang efisien, murah, dan ramah lingkungan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Dutta, S. Adhikary, S. Bhattacharya, D. Roy, S. Chatterjee, A. Chakraborty, D. Banerjee, A. Ganguly, S. Nanda, and P. Rajak, "Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation," *J. Environ. Manage.*, vol. 353, p. 120103, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120103>.
- [2] S. Sudarshan, S. Harikrishnan, G. RathiBhuvaneshwari, V. Alamelu, S. Aanand, A. Rajasekar, and M. Govarthanan, "Impact of textile dyes on human health and bioremediation of textile industry effluent using microorganisms: current status and future prospects," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 134, no. 2, pp. 1–23, 2023, doi: [10.1093/jambio/lxac064](https://doi.org/10.1093/jambio/lxac064).
- [3] B. Lellis, C. Z. Fávoro-Polonio, J. A. Pamphile, and J. C. Polonio, "Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms," *Biotechnol. Res. Innov.*, vol. 3, no. 2, pp. 275–290, 2019, doi: [10.1016/j.biori.2019.09.001](https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001).
- [4] P. O. Oladoye, T. O. Ajiboye, E. O. Omotola, and O. J. Oyewola, "Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater," *Results Eng.*, vol. 16, no. August, p. 100678, 2022, doi: [10.1016/j.rineng.2022.100678](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678).
- [5] I. Khan, K. Saeed, I. Zekker, B. Zhang, A. H. Hendi, A. Ahmad, S. Ahmad, N. Zada, H. Ahmad, L. A. Shah, T. Shah, and I. Khan, "Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation," *Water*, vol. 14, no. 242, 2022, doi: [10.5040/9781501365072.12105](https://doi.org/10.5040/9781501365072.12105).
- [6] R. Sivakumar and N. Y. Lee, "Adsorptive removal of organic pollutant methylene blue using polysaccharide-based composite hydrogels," *Chemosphere*, vol. 286, p. 131890, 2022, doi: [10.1016/j.chemosphere.2022.131890](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.131890).

- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131890>.
- [7] T. P. Le, H. V. T. Luong, H. N. Nguyen, T. K. T. Pham, T. L. Trinh Le, T. B. Q. Tran, and T. N. M. Ngo, "Insight into adsorption-desorption of methylene blue in water using zeolite NaY: Kinetic, isotherm and thermodynamic approaches," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 16, no. September, p. 100281, 2024, doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100281.
- [8] C. D. Raman and S. Kanmani, "Textile dye degradation using nano zero valent iron: A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 177, pp. 341–355, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.034>.
- [9] N. R. J. Hynes, J. S. Kumar, H. Kamyab, J. A. J. Sujana, O. A. Al-Khashman, Y. Kuslu, A. Ene, and B. Suresh Kumar, "Modern enabling techniques and adsorbents based dye removal with sustainability concerns in textile industrial sector -A comprehensive review," *J. Clean. Prod.*, vol. 272, p. 122636, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122636.
- [10] T. N. Lotha, V. Sorhie, P. Bharali, and L. Jamir, "Advancement in Sustainable Wastewater Treatment: A Multifaceted Approach to Textile Dye Removal through Physical, Biological and Chemical Techniques," *ChemistrySelect*, vol. 9, no. 11, p. e202304093, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/slct.202304093>.
- [11] B. Wang, J. Lan, C. Bo, B. Gong, and J. Ou, "Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review," *RSC Adv.*, vol. 13, no. 7, pp. 4275–4302, 2023, doi: 10.1039/d2ra07911a.
- [12] P. Kumkum and S. Kumar, "A Review on Biochar as an Adsorbent for Pb(II) Removal from Water," *Biomass (Switzerland)*, vol. 4, no. 2, pp. 243–272, 2024, doi: 10.3390/biomass4020012.
- [13] S. S. Kerur, S. Bandekar, M. S. Hanagadakar, S. S. Nandi, G. M. Ratnamala, and P. G. Hegde, "Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 1112–1121, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.492>.
- [14] U. Dwijayanti, D. S. Widodo, A. Haris, L. Suyati, and R. A. Lusiana, "Adsorpsi Methylene Blue (Mb) Menggunakan Abu Layang Batubara Teraktivasi Larutan Naoh," *Anal. Environ. Chem.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, 2020, doi: 10.23960/aec.v5.i1.2020.1-14.
- [15] E. M. Mistar, C. Amni, I. Zein, M. Maulinda, T. M. Zulfikar, and I. Hasmita, "Adsorpsi Zat Pewarna Metilen Biru Menggunakan Karbon Berpori Teraktivasi NaOH," *J. Serambi Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 6468–6472, 2023, doi: 10.32672/jse.v8i3.6352.
- [16] A. B. Baunsele and H. Missa, "Kajian Kinetika Adsorpsi Metilen Biru Menggunakan Adsorben Sabut Kelapa," *Akta Kim. Indones.*, vol. 5, no. 2, p. 76, 2020, doi: 10.12962/j25493736.v5i2.7791.
- [17] M. Nitsae, H. R. L. Solle, S. M. Martinus, and I. J. Emola, "Studi adsorpsi metilen biru menggunakan arang aktif tempurung lontar (*Borassus flabellifer* L.) asal Nusa Tenggara Timur," *J. Kim. Ris.*, vol. 6, no. 1, pp. 46–57, 2021.
- [18] S. M. Turp, G. A. Turp, N. Ekinici, and S. Özdemir, "Enhanced adsorption of methylene blue from textile wastewater by using natural and artificial zeolite," *Water Sci. Technol.*, vol. 82, no. 3, pp. 513–523, 2020, doi: 10.2166/wst.2020.358.
- [19] S. Amelia and M. Maryudi, "Application of Natural Zeolite in Methylene Blue Wastewater Treatment Process by Adsorption Method," *J. Bahan Alam Terbarukan*, vol. 8, no. 2, pp. 144–147, 2019, doi: 10.15294/jbat.v8i2.22480.
- [20] N. S. Gilani, S. E. Tilami, and S. N. Azizi, "Adsorption Properties of Low-Cost Synthesized Nanozeolite L for Efficient Removal of Toxic Methylene Blue Dye from Aqueous Solution," *Acta Chim. Slov.*, vol. 69, no. 2, pp. 458–465, 2022, doi: 10.17344/acsi.2022.7350.
- [21] N. Grifasi, B. Ziantoni, D. Fino, and M. Piumetti, *Fundamental properties and sustainable applications of the natural zeolite clinoptilolite*, no. 0123456789. Springer Berlin Heidelberg, 2024. doi: 10.1007/s11356-024-33656-5.

- [22] N. Kordala and M. Wyszowski, "Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications," *Molecules*, vol. 29, no. 5, 2024, doi: 10.3390/molecules29051069.
- [23] T. M. Mokgehle and N. T. Tavengwa, "Recent developments in materials used for the removal of metal ions from acid mine drainage," *Appl. Water Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1007/s13201-020-01350-9.
- [24] F. Bahmanzadegan and A. Ghaemi, "A comprehensive review on novel zeolite-based adsorbents for environmental pollutant," *J. Hazard. Mater. Adv.*, vol. 17, no. December 2024, p. 100617, 2025, doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100617.
- [25] M. Mambetova, K. Dossuomov, M. Baikhamurova, and G. Yergaziyeva, "Sorbents Based on Natural Zeolites for Carbon Dioxide Capture and Removal of Heavy Metals from Wastewater: Current Progress and Future Opportunities," *Processes*, vol. 12, no. 10, 2024, doi: 10.3390/pr12102071.
- [26] Z. Heidarinejad, M. H. Dehghani, M. Heidari, G. Javedan, and I. Ali, "Methods for preparation and activation of activated carbon : a review," *Environ. Chem. Lett.*, no. 0123456789, 2020, doi: 10.1007/s10311-019-00955-0.
- [27] E. R. Raut, A. B. Thakur, and A. R. Chaudhari, "Review on toxic metal ions removal by using activated carbon prepared from natural biomaterials," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1913, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1913/1/012091.
- [28] A. M. Elewa, A. A. Amer, M. F. Attallah, H. A. Gad, Z. A. M. Al-Ahmed, and I. A. Ahmed, "Chemically Activated Carbon Based on Biomass for Adsorption of Fe(III) and Mn(II) Ions from Aqueous Solution," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 3, 2023, doi: 10.3390/ma16031251.
- [29] R. Ahmad Aftab, S. Zaidi, A. Aslam Parwaz Khan, M. Arish Usman, A. Y. Khan, M. Tariq Saeed Chani, and A. M. Asiri, "Removal of congo red from water by adsorption onto activated carbon derived from waste black cardamom peels and machine learning modeling," *Alexandria Eng. J.*, vol. 71, pp. 355–369, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.03.055.
- [30] A. Bülbül, A. Delibaş, and R. Coşkun, "Development and characterization of activated charcoal adsorbent derived from oak for efficient removal of methylene blue: functionality vs surface area," *Biomass Convers. Biorefinery*, no. 0123456789, 2025, doi: 10.1007/s13399-025-06752-w.
- [31] D. Dimbo, M. Abewaa, E. Adino, A. Mengistu, T. Takele, A. Oro, and M. Rangaraju, "Methylene blue adsorption from aqueous solution using activated carbon of *spathodea campanulata*," *Results Eng.*, vol. 21, no. February, p. 101910, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101910.
- [32] M. A. Afandy and F. D. I. Sawali, "Studi Isotherm Adsorpsi Cu (II) Dalam Larutan Menggunakan Zeolit Teraktivasi," *J. Teknol. Kim. Miner.*, vol. 3, no. 1, pp. 25–32, 2024.
- [33] M. A. Afandy and F. D. I. Sawali, "Effect Of Concentration On Kinetics And Thermodynamics Parameter In The Cu (II) Removal By Activated Zeolite," *J. Integr. Proses*, vol. 13, no. 2, pp. 174–183, 2024.
- [34] I. F. Costea, A.-M. Ceoromila, A. Tabacaru, and G. Carac, "Investigation of Chitosan Flakes in the Adsorption of Fe(III) Ions from Acidic Solution," *Rev. Chim.*, vol. 75, no. 2, pp. 1–10, 2024, doi: 10.37358/rc.24.2.8583.
- [35] H. Es-Sahbany, M. Berradi, S. Nkhili, R. Hsissou, M. Allaoui, M. Loutfi, D. Bassir, M. Belfaquir, and M. S. El Youbi, "Removal of heavy metals (nickel) contained in wastewater-models by the adsorption technique on natural clay," *Mater. Today Proc.*, vol. 13, pp. 866–875, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.04.050.
- [36] P. E. Ohale, C. E. Onu, N. J. Ohale, and S. N. Oba, "Adsorptive kinetics, isotherm and thermodynamic analysis of fishpond effluent coagulation using chitin derived coagulant from waste *Brachyura* shell," *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 4, no. July, p. 100036, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.100036.
- [37] A. Khandelwal, N. Narayanan, E. Varghese, and S. Gupta, "Linear and Nonlinear Isotherm Models and Error Analysis for the Sorption of Kresoxim-Methyl in Agricultural Soils of India,"

- Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 104, no. 4, pp. 503–510, 2020, doi: 10.1007/s00128-020-02803-2.
- [38] T. Thinojah and B. Ketheesan, “Iron removal from groundwater using granular activated carbon filters by oxidation coupled with the adsorption process,” *J. Water Clim. Chang.*, vol. 13, no. 5, pp. 1985–1994, Apr. 2022, doi: 10.2166/wcc.2022.126.
- [39] M. A. Zayed, S. A. Abdel-Gawad, H. M. Abdel-Aziz, and Z. A. Abo-Ayad, “Green Synthesis of Nano-Zero-Valent Copper for the D-Blue 60 Textile Dye Removal from Aqueous Medium,” *Int. J. Environ. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1007/s41742-022-00499-2.
- [40] N. S. Ali, H. S. Majdi, T. M. Albayati, and D. J. Jasim, “Adsorption of aniline from aqueous solutions onto a nanoporous material adsorbent: isotherms, kinetics, and mass transfer mechanisms,” *Water Pract. Technol.*, vol. 00, no. 0, pp. 1–15, 2023, doi: 10.2166/wpt.2023.132.
- [41] J. Simonin and J. Boute, “Intraparticle diffusion-adsorption model to describe liquid / solid adsorption kinetics To cite this version : CONTENIDO MODEL TO DESCRIBE,” *Rev. Mex. Ing. Quim.*, vol. 15, no. 1, pp. 161–173, 2016, [Online]. Available: <http://hal.upmc.fr/hal-01312850>
- [42] C. Yao and T. Chen, “A film-diffusion-based adsorption kinetic equation and its application,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 119, no. 2, pp. 87–92, 2017, doi: 10.1016/j.cherd.2017.01.004.