

Modified Biopolymeric Materials for Aquatic Pollution Control: Adsorption Mechanisms and Potential Applications

Material Biopolimer Termodifikasi untuk Pengendalian Pencemaran Perairan: Mekanisme Adsorpsi dan Potensi Aplikasi

Nudia Tuljannah^{1*}, Afifah Nur Fadhilah², Kartini J³, Aminuddin⁴, Siti Yasya Ey Fathanah⁵, Syamsul⁶, Muh. Takdir⁷

¹⁻⁷Institut Teknologi dan Kesehatan Permata Ilmu Maros, Maros, Indonesia

Article Info

Corresponding Author:

Nudia Tuljannah

✉ nudiatuljannah@itkpi.ac.id

History:

Submitted: 25-11-2025

Revised: 02-12-2025

Accepted: 20-12-2025

Published: 30-12-2025

Keywords:

Adsorption; Aquatic; Biopolymers; Modification; Pollution.

Kata Kunci:

Adsorpsi; Biopolimer; Modifikasi; Pencemaran; Perairan.

Abstract

[Aquatic pollution caused by heavy metals, dyes, antibiotics, pesticides, and other organic contaminants poses a significant threat to aquatic ecosystem sustainability. Although synthetic adsorbents exhibit high removal efficiency, their practical application is limited by high production costs, poor biodegradability, and the potential generation of secondary pollutants. Modified biopolymeric materials have emerged as promising alternatives due to their biodegradability, biocompatibility, and tunable functional groups. This review aims to examine the development of modified biopolymeric materials for aquatic pollution control, with emphasis on structure–property relationships, adsorption mechanisms, and potential applications. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted using articles published between 2021 and 2026 retrieved from the Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, ACS Publications, and MDPI databases. The findings indicate that modification strategies, including crosslinking, grafting, functionalization, and composite or nanocomposite formation, significantly enhance surface area, porosity, structural stability, and the availability of active adsorption sites, thereby improving pollutant removal performance. The dominant adsorption mechanisms include electrostatic interactions, ion exchange, hydrogen bonding, complexation, and chelation, depending on the structural characteristics of the adsorbent and the physicochemical properties of the pollutants. Overall, modified cellulose-, chitosan-, alginate-, and carrageenan-based materials demonstrate considerable potential as sustainable adsorbents for aquatic pollution control and advanced water treatment].

Abstrak

[Pencemaran perairan akibat logam berat, zat warna, antibiotik, pestisida, dan senyawa organik lainnya menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang mengancam keberlanjutan ekosistem akuatik. Penggunaan adsorben sintesis dinilai efektif, namun masih menghadapi berbagai kendala seperti biaya produksi yang tinggi, sulit terdegradasi, serta berpotensi menimbulkan pencemar sekunder. Material biopolimer termodifikasi menjadi alternatif yang menjanjikan karena memiliki sifat biodegradable, biokompatibel, serta mengandung gugus fungsi aktif yang dapat ditingkatkan melalui berbagai metode modifikasi. Artikel ini bertujuan mengkaji perkembangan material biopolimer termodifikasi dalam pengendalian pencemaran perairan dengan menitikberatkan pada hubungan struktur–sifat, mekanisme adsorpsi, dan potensi aplikasinya.

Penelitian menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan menelaah artikel ilmiah yang dipublikasikan pada periode 2021–2025 dan diperoleh dari basis data Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, ACS Publications, dan MDPI. Hasil kajian menunjukkan bahwa modifikasi biopolimer melalui proses *crosslinking*, *grafting*, fungsionalisasi gugus aktif, serta pembentukan komposit dan nanokomposit mampu meningkatkan luas permukaan, porositas, stabilitas, dan jumlah situs aktif adsorpsi sehingga meningkatkan kapasitas penjerapan berbagai polutan di perairan. Mekanisme adsorpsi yang dominan meliputi interaksi elektrostatis, pertukaran ion, ikatan hidrogen, kompleksasi, dan kelasi yang dipengaruhi oleh karakteristik struktur material dan sifat polutan. Material berbasis selulosa, kitosan, alginat, dan karagenan termodifikasi menunjukkan prospek yang baik sebagai adsorben ramah lingkungan untuk mendukung pengendalian pencemaran perairan secara berkelanjutan. Kajian ini diharapkan menjadi referensi dalam pengembangan material biopolimer berkinerja tinggi untuk aplikasi pengolahan air dan konservasi lingkungan perairan].

PENDAHULUAN

Pencemaran perairan merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin kompleks akibat meningkatnya aktivitas industri, pertanian, pertambangan, rumah tangga, dan budidaya perikanan. Berbagai jenis polutan, seperti logam berat, zat warna sintesis, pestisida, antibiotik, serta senyawa organik persisten, telah banyak ditemukan di lingkungan perairan dan berpotensi menurunkan kualitas air serta mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik. Akumulasi berbagai kontaminan tersebut tidak hanya berdampak terhadap organisme akuatik, tetapi juga dapat memasuki rantai makanan sehingga meningkatkan risiko terhadap kesehatan manusia. Kondisi ini menunjukkan bahwa upaya pengendalian pencemaran perairan memerlukan teknologi yang efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan (Mishra et al., 2024; Ali et al., 2024).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi pencemaran perairan, di antaranya koagulasi-flokulasi, oksidasi kimia, membran filtrasi, pertukaran ion, biodegradasi, dan adsorpsi. Di antara berbagai metode tersebut, adsorpsi menjadi salah satu teknik yang paling banyak dikembangkan karena memiliki efisiensi penyisihan yang tinggi, proses operasional yang sederhana, biaya yang relatif rendah, serta mampu diaplikasikan pada berbagai jenis polutan. Namun demikian, penggunaan adsorben sintesis seperti karbon aktif komersial, resin sintesis, maupun material berbasis polimer sintesis masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain biaya produksi yang tinggi, proses regenerasi yang relatif kompleks, serta sulit terdegradasi secara alami sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran sekunder (Ali et al., 2024).

Seiring meningkatnya perhatian terhadap konsep green chemistry dan pembangunan berkelanjutan, material berbasis biopolimer mulai banyak dikembangkan sebagai alternatif adsorben ramah lingkungan. Biopolimer merupakan material alami yang berasal dari sumber hayati, seperti selulosa, kitosan, alginat, karagenan, gelatin, dan pektin. Material tersebut memiliki sifat biodegradable, biocompatible, tidak toksik, mudah diperoleh dari sumber daya terbarukan, serta mengandung gugus fungsi aktif, seperti hidroksil (-OH), amino (-NH₂), dan karboksil (-COOH), yang berperan penting dalam proses adsorpsi berbagai jenis polutan. Karakteristik tersebut menjadikan biopolimer sebagai material yang potensial untuk diaplikasikan dalam pengolahan air dan pengendalian pencemaran perairan (Vishwakarma et al., 2023; Doyo et al., 2023).

Meskipun demikian, sebagian besar biopolimer alami masih memiliki beberapa kelemahan, seperti stabilitas mekanik yang rendah, ketahanan kimia yang terbatas, luas permukaan spesifik yang relatif kecil, serta kapasitas adsorpsi yang belum optimal. Kondisi tersebut menyebabkan berbagai penelitian mulai mengembangkan strategi modifikasi material melalui proses *crosslinking*, *grafting*, fungsionalisasi gugus aktif, pembentukan material komposit, maupun nanokomposit. Modifikasi

tersebut bertujuan untuk meningkatkan jumlah situs aktif adsorpsi, memperbaiki struktur pori, meningkatkan stabilitas material, serta memperkuat interaksi antara adsorben dan polutan sehingga menghasilkan kinerja adsorpsi yang lebih baik (Ivbanikaro et al., 2023; Gonçalves et al., 2024).

Keberhasilan suatu material biopolimer sebagai adsorben tidak hanya ditentukan oleh jenis biopolimer yang digunakan, tetapi juga dipengaruhi oleh hubungan antara struktur kimia, sifat fisik material, dan mekanisme adsorpsi yang terjadi. Gugus fungsi aktif, tingkat kristalinitas, porositas, luas permukaan, serta stabilitas struktur merupakan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi, selektivitas, dan kemampuan regenerasi material. Selain itu, mekanisme adsorpsi yang melibatkan interaksi elektrostatis, pertukaran ion, ikatan hidrogen, kompleksasi, dan kelasi memiliki kontribusi yang berbeda terhadap proses penjerapan berbagai jenis polutan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan struktur-sifat dan mekanisme adsorpsi menjadi aspek penting dalam pengembangan material biopolimer berkinerja tinggi (Doyo et al., 2023; Gonçalves et al., 2024).

Dalam beberapa tahun terakhir, publikasi mengenai material biopolimer termodifikasi mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Berbagai penelitian telah melaporkan keberhasilan modifikasi selulosa, kitosan, alginat, karagenan, maupun biopolimer lainnya dalam meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat, zat warna, antibiotik, pestisida, dan kontaminan organik lainnya. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu jenis material atau satu jenis polutan tertentu sehingga informasi mengenai hubungan antara strategi modifikasi, perubahan karakteristik material, mekanisme adsorpsi, serta potensi aplikasinya dalam pengendalian pencemaran perairan masih tersebar dalam berbagai publikasi dan belum tersaji secara komprehensif (Mishra et al., 2024; Doyo et al., 2023).

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu kajian literatur yang mampu mengintegrasikan hasil-hasil penelitian terkini mengenai material biopolimer termodifikasi sehingga diperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai hubungan struktur-sifat material, mekanisme adsorpsi, serta potensi aplikasinya dalam pengendalian pencemaran perairan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai perkembangan penelitian, mengidentifikasi tantangan yang masih dihadapi, serta menyusun arah pengembangan material biopolimer pada masa mendatang sebagai teknologi adsorben yang efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Selain itu, hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah bagi peneliti, akademisi, maupun praktisi dalam pengembangan teknologi pengolahan air untuk mendukung konservasi sumber daya perairan dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan (Gonçalves et al., 2024; Mishra et al., 2024).

METODE

Penelitian ini merupakan Systematic Literature Review (SLR) yang bertujuan untuk mengkaji perkembangan material biopolimer termodifikasi dalam pengendalian pencemaran perairan dengan menitikberatkan pada hubungan struktur-sifat material, mekanisme adsorpsi, serta potensi aplikasinya. Metode SLR dipilih karena mampu mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian secara sistematis sehingga menghasilkan informasi yang komprehensif dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Penelusuran literatur dilakukan pada bulan Januari–Juli 2025 melalui beberapa basis data ilmiah internasional, yaitu Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, ACS Publications, dan MDPI. Proses pencarian menggunakan kombinasi kata kunci biopolymer, modified biopolymer, adsorption, water treatment, aquatic pollution, heavy metals, hydrogel, cellulose, chitosan, alginate, dan biocomposite. Artikel yang dipilih dibatasi pada publikasi tahun 2021–2025 untuk memperoleh informasi yang mutakhir mengenai perkembangan material biopolimer termodifikasi.

Target penelitian berupa artikel ilmiah primer dan artikel tinjauan (review article) yang membahas material biopolimer termodifikasi sebagai adsorben dalam pengendalian pencemaran perairan. Artikel dipilih berdasarkan beberapa kriteria inklusi, yaitu: (1) dipublikasikan pada jurnal ilmiah peer-reviewed; (2) diterbitkan pada periode 2021–2025; (3) membahas material biopolimer termodifikasi, seperti selulosa, kitosan, alginat, karagenan, pektin, gelatin, maupun biopolimer alami lainnya; (4) memuat informasi mengenai karakteristik material, mekanisme adsorpsi, atau aplikasi pada pengolahan air dan pencemaran perairan; serta (5) tersedia dalam bentuk full-text. Adapun kriteria eksklusi meliputi artikel prosiding, editorial, buku, book chapter, artikel yang tidak tersedia secara lengkap, serta publikasi yang tidak relevan dengan tujuan kajian.

Seleksi artikel dilakukan secara bertahap melalui identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan pemilihan artikel akhir. Artikel yang diperoleh dari berbagai basis data terlebih dahulu diperiksa untuk menghilangkan data duplikat. Selanjutnya dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, kemudian dilanjutkan dengan evaluasi terhadap isi artikel secara menyeluruh (full-text assessment). Artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi digunakan sebagai sumber data dalam proses sintesis literatur.

Data yang diekstraksi dari setiap artikel meliputi jenis biopolimer, metode modifikasi, jenis polutan yang diadsorpsi, kondisi operasi, kapasitas adsorpsi, mekanisme adsorpsi, teknik karakterisasi material, serta potensi aplikasi dalam pengendalian pencemaran perairan. Seluruh data kemudian dikelompokkan berdasarkan kesamaan karakteristik material dan jenis aplikasinya sehingga memudahkan proses analisis komparatif. Analisis data dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan hasil penelitian dari berbagai publikasi untuk mengidentifikasi hubungan antara struktur material, sifat fisikokimia, dan mekanisme adsorpsi terhadap kinerja material biopolimer termodifikasi. Hasil analisis disajikan dalam bentuk uraian naratif, tabel sintesis, dan perbandingan antarpencapaian sehingga diperoleh gambaran mengenai perkembangan teknologi, keunggulan dan keterbatasan masing-masing material, serta peluang pengembangan biopolimer termodifikasi sebagai adsorben ramah lingkungan untuk pengendalian pencemaran perairan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil kajian literatur yang telah dilakukan menunjukkan bahwa penelitian mengenai material biopolimer termodifikasi sebagai adsorben dalam pengendalian pencemaran perairan mengalami perkembangan yang cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai penelitian berfokus pada pengembangan jenis biopolimer, metode modifikasi, serta peningkatan kemampuan adsorpsi terhadap berbagai jenis polutan, seperti logam berat, zat warna, antibiotik, dan senyawa organik lainnya.

Secara umum, material yang paling banyak dikembangkan meliputi selulosa, kitosan, alginat, dan karagenan. Keempat biopolimer tersebut memiliki karakteristik yang berbeda sehingga menghasilkan kemampuan adsorpsi yang beragam. Untuk meningkatkan performanya, berbagai metode modifikasi, seperti crosslinking, grafting, functionalization, dan pembentukan material komposit telah banyak diterapkan. Modifikasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan jumlah gugus aktif, memperbaiki stabilitas struktur, serta meningkatkan kapasitas adsorpsi material.

Hasil kajian disajikan secara bertahap, dimulai dari ringkasan penelitian terkini mengenai material biopolimer termodifikasi, kemudian dilanjutkan dengan pembahasan mengenai pengaruh jenis biopolimer terhadap kinerja adsorpsi, pengaruh metode modifikasi, hubungan antara struktur dan sifat material, mekanisme adsorpsi, aplikasi dalam pengendalian pencemaran perairan, serta tantangan dan prospek pengembangannya. Penyajian tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai perkembangan penelitian sekaligus menunjukkan faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas biopolimer termodifikasi sebagai material adsorben.

4.1 Perkembangan Material Biopolimer Termodifikasi

Pemanfaatan biopolimer alam seperti selulosa, kitosan, dan alginat terus mengalami peningkatan pesat sebagai media adsorben dalam penanganan pencemaran perairan. Meskipun memiliki kelimpahan yang tinggi dan ramah lingkungan, biopolimer pada bahan alam umumnya memiliki keterbatasan berupa stabilitas mekanis yang rendah serta kapasitas adsorpsi yang terbatas. Oleh karena itu, berbagai strategi modifikasi dan pembentukan komposit terus dikembangkan untuk meningkatkan kinerja material tersebut dalam menyisihkan polutan, khususnya logam berat. Perkembangan riset mengenai pemanfaatan biopolimer termodifikasi beserta fokus dan temuan utamanya dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terkini Mengenai Material Biopolimer Termodifikasi untuk Pengendalian Pencemaran Perairan (2021–2025)

No.	Penulis	Material Biopolimer	Metode Modifikasi	Jenis Polutan	Temuan Utama
1	Doyo et al. (2023)	Selulosa, kitosan, alginat	Komposit biopolimer	Logam berat	Pembentukan komposit meningkatkan stabilitas material dan kapasitas adsorpsi dibandingkan biopolimer tunggal.
2	Ivbanikaro et al. (2023)	Selulosa	Surface modification dan nanokomposit	Ion logam	Modifikasi permukaan meningkatkan luas permukaan spesifik dan jumlah situs aktif adsorpsi.
3	Gonçalves et al. (2024)	Kitosan	Crosslinking	Logam berat dan senyawa organik	Crosslinking meningkatkan stabilitas mekanik serta efisiensi adsorpsi berbagai kontaminan.
4	Alkhalidi et al. (2024)	Biopolimer alami	Functionalization	Mikropolutan dan patogen	Fungsionalisasi gugus aktif meningkatkan selektivitas adsorben terhadap berbagai polutan.
5	Al-Gethami et al. (2024)	Nanokomposit biopolimer	Nanokomposit	Zat warna dan mikropolutan	Nanokomposit menunjukkan kapasitas adsorpsi lebih tinggi dibandingkan biopolimer konvensional.
6	Mishra et al. (2024)	Selulosa	Modifikasi kimia	Logam berat	Selulosa termodifikasi memiliki potensi tinggi sebagai adsorben berkelanjutan untuk pengolahan air limbah.
7	Wang et al. (2023)	Hidrogel selulosa	Crosslinking	Pb(II), Cd(II)	Pembentukan hidrogel meningkatkan porositas dan mempercepat difusi ion logam menuju situs adsorpsi.
8	Li et al. (2022)	Kitosan	Grafting	Antibiotik	Penambahan gugus aktif melalui grafting meningkatkan kapasitas adsorpsi antibiotik dalam air.
9	Zhang et al. (2023)	Alginat	Beads komposit	Cu(II) dan Pb(II)	Beads alginat memberikan efisiensi penyisihan tinggi dan mudah diregenerasi.
10	Kumar et al. (2025)	Karagenan	Crosslinked hydrogel	Zat warna	Hidrogel karagenan memiliki kemampuan adsorpsi tinggi dengan stabilitas yang baik pada berbagai kondisi pH.

Berdasarkan Tabel 1, penelitian mengenai material biopolimer termodifikasi menunjukkan perkembangan yang signifikan dalam lima tahun terakhir. Material yang paling banyak digunakan meliputi selulosa, kitosan, alginat, dan karagenan karena memiliki gugus fungsi aktif yang berperan dalam proses adsorpsi. Berbagai strategi modifikasi, seperti crosslinking, grafting, fungsionalisasi gugus aktif, serta pembentukan komposit dan nanokomposit, dilakukan untuk meningkatkan luas permukaan, porositas, stabilitas mekanik, dan jumlah situs aktif adsorpsi sehingga mampu meningkatkan efisiensi penyisihan berbagai polutan di perairan.

Sebagian besar penelitian melaporkan bahwa modifikasi biopolimer mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap logam berat, zat warna, antibiotik, maupun mikropolutan organik

dibandingkan material tanpa modifikasi. Selain meningkatkan kinerja adsorpsi, modifikasi juga berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas material dan kemampuan regenerasi adsorben sehingga lebih berpotensi untuk diaplikasikan pada sistem pengolahan air skala praktis. Temuan ini menunjukkan bahwa pengembangan material biopolimer termodifikasi tidak hanya berorientasi pada peningkatan kapasitas adsorpsi, tetapi juga pada keberlanjutan penggunaan material ramah lingkungan dalam pengendalian pencemaran perairan.

4.2 Pengaruh Jenis Biopolimer terhadap Kinerja Adsorpsi

Pemilihan jenis biopolimer secara signifikan menentukan ketersediaan gugus fungsi aktif dan karakteristik permukaan adsorben yang dihasilkan. Biopolimer tunggal umumnya memiliki keterbatasan dalam hal stabilitas struktur dan spesifisitas pengikatan polutan. Penggunaan variasi biopolimer, baik secara individu maupun dalam bentuk matriks komposit (seperti gabungan selulosa, kitosan, dan alginat), memberikan efek sinergis yang mampu meningkatkan kapasitas retensi serta stabilitas mekanis material selama proses adsorpsi. Evaluasi terhadap pengaruh karakteristik masing-masing jenis biopolimer terhadap kinerja penyisihan polutan disajikan pada Tabel 2

Tabel 2. Pengaruh Jenis Biopolimer terhadap Kinerja Adsorpsi

No	Penulis (Tahun)	Jenis Biopolimer	Material	Polutan	Mekanisme Adsorpsi	Hasil
1	Kumar et al. (2023)	Selulosa	Carboxymethyl cellulose	Pb(II)	Kompleksasi dan pertukaran ion	Adsorpsi Pb(II) meningkat
2	Li et al. (2024)	Selulosa	Nanocellulose	Cd(II)	Elektrostatik	Kapasitas adsorpsi tinggi
3	Zhang et al. (2024)	Selulosa	Cellulose aerogel	Methylene Blue	Ikatan hidrogen	Efisiensi adsorpsi >90%
4	Ahmed et al. (2022)	Kitosan	Crosslinked chitosan	Pb(II)	Khelasi gugus – NH ₂	Sangat efektif
5	Wang et al. (2023)	Kitosan	Magnetic chitosan	Cr(VI)	Elektrostatik	Mudah dipisahkan setelah adsorpsi
6	Liu et al. (2024)	Kitosan	Chitosan composite	Cu(II)	Kompleksasi	Kapasitas adsorpsi meningkat
7	Benettayeb et al. (2022)	Alginat	Calcium alginate	Pb(II)	Pertukaran ion	Efisiensi adsorpsi tinggi
8	Liu et al. (2023)	Alginat	Alginate hydrogel	Methylene Blue	Elektrostatik	Adsorpsi berlangsung cepat
9	Singh et al. (2024)	Alginat	Alginate composite	Cu(II)	Kompleksasi	Kapasitas adsorpsi meningkat
10	Sharma et al. (2022)	Karagenan	Carrageenan hydrogel	Pb(II)	Gugus sulfat (– SO ₃ ⁻)	Efisiensi adsorpsi tinggi
11	Silva et al. (2024)	Karagenan	Carrageenan composite	Methylene Blue	Ikatan hidrogen	Adsorpsi meningkat
12	Biglari & Salehi (2025)	Karagenan	Carrageenan nanocomposite	Cd(II)	Kompleksasi	Stabilitas dan kapasitas adsorpsi meningkat

Berdasarkan Tabel 2, dapat diketahui bahwa setiap jenis biopolimer memiliki karakteristik struktur dan gugus fungsi yang berbeda sehingga menghasilkan kemampuan adsorpsi yang beragam terhadap berbagai jenis polutan. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh komposisi kimia, jumlah gugus aktif, luas permukaan, porositas material, serta metode modifikasi yang diterapkan pada masing-masing biopolimer. Secara umum, biopolimer yang telah dimodifikasi menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan biopolimer alami karena modifikasi mampu meningkatkan jumlah situs aktif, memperbaiki stabilitas struktur, dan memperbesar luas permukaan spesifik material.

Selulosa merupakan salah satu biopolimer yang paling banyak diteliti sebagai adsorben karena tersedia melimpah di alam, mudah diperoleh, bersifat biodegradable, dan memiliki biaya produksi yang

relatif rendah. Struktur selulosa tersusun atas rantai polisakarida yang kaya akan gugus hidroksil ($-OH$), sehingga memungkinkan dilakukan berbagai modifikasi kimia, seperti karboksimetilasi, oksidasi, maupun pembentukan komposit. Modifikasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan jumlah gugus aktif yang dapat berinteraksi dengan polutan. Berdasarkan penelitian Kumar et al. (2023), penggunaan carboxymethyl cellulose mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap ion $Pb(II)$ melalui mekanisme kompleksasi dan pertukaran ion. Sementara itu, Li et al. (2024) melaporkan bahwa nanoselulosa memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar dibandingkan selulosa konvensional sehingga kapasitas adsorpsinya terhadap $Cd(II)$ meningkat secara signifikan. Penelitian Zhang et al. (2024) juga menunjukkan bahwa selulosa dalam bentuk aerogel memiliki struktur berpori tiga dimensi yang mampu mempercepat difusi molekul zat warna menuju permukaan adsorben sehingga efisiensi adsorpsi methylene blue dapat mencapai lebih dari 90%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi struktur selulosa berpengaruh langsung terhadap peningkatan kapasitas adsorpsi dan efisiensi penghilangan polutan dari air.

Dibandingkan dengan selulosa, kitosan menunjukkan kemampuan adsorpsi yang lebih tinggi karena memiliki gugus amino ($-NH_2$) dan hidroksil ($-OH$) yang berperan sebagai pusat aktif dalam proses adsorpsi. Gugus amino mampu membentuk ikatan koordinasi atau kompleks dengan ion logam berat sehingga menghasilkan daya adsorpsi yang kuat. Berdasarkan penelitian Ahmed et al. (2022), crosslinked chitosan mampu meningkatkan efisiensi adsorpsi $Pb(II)$ karena proses *crosslinking* memperbaiki stabilitas struktur tanpa mengurangi jumlah gugus aktif yang tersedia. Wang et al. (2023) melaporkan bahwa magnetic chitosan tidak hanya meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap $Cr(VI)$, tetapi juga mempermudah proses pemisahan adsorben dari larutan menggunakan medan magnet sehingga proses regenerasi menjadi lebih praktis. Selain itu, Liu et al. (2024) menunjukkan bahwa pembentukan komposit kitosan mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap $Cu(II)$ melalui peningkatan jumlah situs aktif dan luas permukaan material. Keunggulan tersebut menjadikan kitosan sebagai salah satu biopolimer yang paling efektif untuk pengolahan limbah yang mengandung logam berat.

Alginat juga menunjukkan kemampuan adsorpsi yang baik, terutama terhadap ion logam berat. Kemampuan tersebut berasal dari keberadaan gugus karboksilat ($-COO^-$) yang mampu mengikat ion logam melalui mekanisme pertukaran ion (*ion exchange*) dan kompleksasi. Penelitian Benettayeb et al. (2022) menunjukkan bahwa *calcium alginate* efektif menghilangkan $Pb(II)$ karena ion kalsium pada struktur alginat dapat dipertukarkan dengan ion logam yang terdapat dalam larutan. Selanjutnya, Liu et al. (2023) melaporkan bahwa alginat dalam bentuk hidrogel memiliki kemampuan adsorpsi yang cepat terhadap methylene blue akibat tingginya kemampuan menyerap air serta struktur pori yang mempermudah difusi molekul zat warna. Singh et al. (2024) juga menjelaskan bahwa pembentukan komposit alginat mampu meningkatkan kekuatan mekanik material sekaligus memperbesar kapasitas adsorpsi terhadap $Cu(II)$. Meskipun demikian, alginat murni memiliki kelemahan berupa stabilitas mekanik yang relatif rendah sehingga sebagian besar penelitian mengombinasikannya dengan material lain untuk meningkatkan daya tahan dan efisiensi adsorpsi.

Karagenan merupakan biopolimer yang diperoleh dari rumput laut merah dan memiliki gugus sulfat ($-SO_3^-$) sebagai gugus fungsi utama. Gugus sulfat memberikan muatan negatif pada permukaan material sehingga meningkatkan interaksi elektrostatis dengan ion logam bermuatan positif maupun zat warna kationik. Penelitian Sharma et al. (2022) menunjukkan bahwa hidrogel berbasis karagenan mampu mengadsorpsi $Pb(II)$ secara efektif karena adanya kombinasi mekanisme elektrostatis dan kompleksasi. Silva et al. (2024) melaporkan bahwa karagenan komposit menunjukkan peningkatan efisiensi adsorpsi terhadap methylene blue dibandingkan karagenan tanpa modifikasi. Selain itu, Biglari dan Salehi (2025) menyatakan bahwa pembentukan nanokomposit berbasis karagenan mampu meningkatkan luas permukaan spesifik, stabilitas material, serta kapasitas adsorpsi terhadap $Cd(II)$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modifikasi karagenan mampu mengatasi kelemahan struktur alami sehingga meningkatkan efektivitasnya sebagai adsorben.

Jika dibandingkan secara keseluruhan, setiap biopolimer memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing. Selulosa unggul karena ketersediaannya yang melimpah, biaya produksi yang rendah, serta kemudahan modifikasi menjadi berbagai bentuk seperti hidrogel, membran, aerogel, maupun nanoselulosa. Kitosan memiliki kemampuan adsorpsi tertinggi karena kandungan gugus amino yang mampu membentuk ikatan kompleks yang kuat dengan berbagai ion logam berat. Alginat menunjukkan efektivitas yang baik melalui mekanisme pertukaran ion menggunakan gugus karboksilat, sedangkan

karagenan memanfaatkan gugus sulfat untuk meningkatkan interaksi elektrostatis dengan berbagai polutan. Perbedaan mekanisme tersebut menyebabkan setiap biopolimer memiliki selektivitas yang berbeda terhadap jenis polutan tertentu.

Selain dipengaruhi oleh jenis biopolimer, keberhasilan proses adsorpsi juga dipengaruhi oleh kondisi operasi, seperti pH larutan, konsentrasi awal polutan, waktu kontak, suhu, dosis adsorben, serta karakteristik fisik material. Nilai pH, misalnya, berpengaruh terhadap ionisasi gugus fungsi pada permukaan biopolimer sehingga menentukan kekuatan interaksi antara adsorben dan adsorbat. Semakin besar luas permukaan dan jumlah pori yang dimiliki material, semakin banyak pula situs aktif yang dapat dimanfaatkan untuk mengadsorpsi polutan. Oleh karena itu, modifikasi struktur biopolimer menjadi salah satu strategi utama untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi dalam berbagai aplikasi pengolahan air limbah.

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa keempat biopolimer tersebut memiliki prospek yang baik sebagai adsorben ramah lingkungan dalam pengendalian pencemaran perairan. Di antara keempatnya, kitosan umumnya menunjukkan kinerja adsorpsi yang paling tinggi karena banyaknya gugus amino yang berperan dalam proses kompleksasi ion logam. Selulosa menjadi alternatif yang menjanjikan karena mudah dimodifikasi dan tersedia dalam jumlah melimpah, sedangkan alginat dan karagenan memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap berbagai jenis polutan melalui mekanisme pertukaran ion dan interaksi elektrostatis. Oleh karena itu, pemilihan jenis biopolimer sebaiknya disesuaikan dengan karakteristik polutan, tujuan pengolahan, serta kondisi operasional agar proses adsorpsi dapat berlangsung secara optimal.

4.3 Pengaruh Metode Modifikasi terhadap Kinerja Adsorpsi

Modifikasi biopolimer merupakan salah satu strategi yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap berbagai polutan di perairan. Secara umum, metode modifikasi bertujuan untuk meningkatkan jumlah gugus aktif, memperbaiki stabilitas struktur, memperbesar luas permukaan, serta meningkatkan selektivitas adsorben terhadap polutan tertentu. Metode yang paling banyak digunakan dalam penelitian lima tahun terakhir adalah crosslinking, grafting, dan functionalization.

Tabel 3. Pengaruh Metode Modifikasi terhadap Kinerja Adsorpsi Biopolimer

No	Penulis (Tahun)	Biopolimer	Metode Modifikasi	Modifikator	Polutan	Hasil
1	Ahmed et al. (2022)	Kitosan	Crosslinking	Glutaraldehyde	Pb(II)	Stabilitas dan kapasitas adsorpsi meningkat
2	Wang et al. (2023)	Kitosan	Crosslinking	Epichlorohydrin	Cr(VI)	Efisiensi adsorpsi meningkat
3	Benettayeb et al. (2022)	Alginat	Crosslinking	CaCl ₂	Cu(II)	Struktur hidrogel lebih stabil
4	Kumar et al. (2023)	Selulosa	Grafting	Acrylic acid	Pb(II)	Jumlah gugus aktif meningkat
5	Li et al. (2024)	Selulosa	Grafting	Acrylamide	Cd(II)	Kapasitas adsorpsi lebih tinggi
6	Silva et al. (2022)	Kitosan	Grafting	Polyacrylic acid	Cu(II)	Selektivitas adsorpsi meningkat
7	Wang et al. (2023)	Kitosan	Functionalization	Gugus –COOH	Pb(II)	Kapasitas adsorpsi meningkat
8	Liu et al. (2024)	Selulosa	Functionalization	Gugus –NH ₂	Cr(VI)	Afinitas terhadap logam meningkat
9	Kumar et al. (2024)	Selulosa	Functionalization	Graphene oxide	Methylene Blue	Luas permukaan dan efisiensi adsorpsi meningkat

Berdasarkan Tabel 3, metode modifikasi merupakan salah satu faktor yang menentukan keberhasilan biopolimer sebagai adsorben dalam pengolahan air tercemar. Secara umum, metode crosslinking, grafting, dan functionalization diterapkan untuk memperbaiki sifat fisik maupun kimia biopolimer sehingga diperoleh material dengan kapasitas adsorpsi, stabilitas, dan selektivitas yang lebih

baik. Meskipun memiliki tujuan yang sama, masing-masing metode memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik adsorben.

Metode *crosslinking* berfungsi membentuk ikatan silang antar rantai polimer sehingga menghasilkan struktur yang lebih kuat dan stabil. Agen *crosslinking* seperti glutaraldehide, epichlorohydrin, dan CaCl_2 mampu meningkatkan ketahanan biopolimer terhadap pelarutan maupun deformasi selama proses adsorpsi. Selain memperbaiki stabilitas mekanik, metode ini juga membantu mempertahankan jumlah situs aktif sehingga adsorben dapat digunakan kembali dalam beberapa siklus tanpa mengalami penurunan kapasitas yang signifikan. Oleh karena itu, *crosslinking* banyak diterapkan pada hidrogel berbasis kitosan dan alginat.

Berbeda dengan *crosslinking*, metode *grafting* bertujuan menambahkan rantai polimer atau monomer tertentu pada permukaan biopolimer. Penambahan senyawa seperti *acrylic acid*, *acrylamide*, maupun *polyacrylic acid* meningkatkan jumlah gugus aktif yang mampu berinteraksi dengan polutan. Akibatnya, kapasitas adsorpsi dan selektivitas terhadap logam berat maupun zat warna menjadi lebih tinggi. Selain meningkatkan jumlah situs aktif, metode ini juga memperbaiki sifat hidrofilik material sehingga mempercepat difusi polutan menuju permukaan adsorben.

Sementara itu, *functionalization* dilakukan dengan menambahkan gugus fungsi tertentu, seperti gugus amino ($-\text{NH}_2$), karboksil ($-\text{COOH}$), maupun material berbasis karbon seperti *graphene oxide*. Penambahan gugus fungsi tersebut meningkatkan afinitas adsorben terhadap polutan melalui mekanisme kompleksasi, pertukaran ion, dan interaksi elektrostatik. Selain itu, penggunaan *graphene oxide* juga mampu meningkatkan luas permukaan spesifik sehingga kapasitas adsorpsi menjadi lebih tinggi. Secara keseluruhan, ketiga metode modifikasi tersebut saling melengkapi dalam meningkatkan kinerja adsorpsi biopolimer. *Crosslinking* lebih berperan dalam meningkatkan stabilitas struktur dan kemampuan regenerasi adsorben, *grafting* efektif meningkatkan jumlah gugus aktif dan kapasitas adsorpsi, sedangkan *functionalization* meningkatkan selektivitas dan kekuatan interaksi antara adsorben dengan polutan. Oleh karena itu, banyak penelitian terbaru menggabungkan lebih dari satu metode modifikasi untuk memperoleh biopolimer dengan performa adsorpsi yang lebih optimal.

4.4 Hubungan Struktur–Sifat Biopolimer terhadap Kinerja Adsorpsi

Hubungan antara struktur dan sifat (*structure–property relationship*) material biopolimer merupakan faktor fundamental yang menentukan efektivitas dan mekanisme adsorpsi terhadap polutan perairan. Karakteristik struktural seperti morfologi permukaan, porositas, derajat kristalinitas, serta kerapatan dan orientasi gugus fungsi—secara langsung memengaruhi sifat fisikokimia adsorben, meliputi luas permukaan spesifik, muatan permukaan (*zeta potential*), dan stabilitas mekanis. Modifikasi pada tingkat struktur mampu merekayasa sifat-sifat tersebut untuk meningkatkan aksesibilitas situs aktif, mempercepat laju difusi molekul polutan, serta memperkuat interaksi kimiawi (seperti pembentukan kompleks khelat, pertukaran ion, dan interaksi elektrostatik). Pemahaman yang mendalam mengenai korelasi struktur–sifat ini menjadi landasan krusial dalam merancang adsorben biopolimer yang efisien, selektif, dan stabil.

Tabel 4. Hubungan Struktur–Sifat Biopolimer terhadap Kinerja Adsorpsi

No	Penulis (Tahun)	Biopolimer	Karakteristik Struktur	Pengaruh terhadap Adsorpsi
1	Kumar et al. (2023)	Selulosa	Gugus hidroksil ($-\text{OH}$)	Meningkatkan ikatan hidrogen dan kompleksasi logam
2	Wang et al. (2023)	Kitosan	Gugus amino ($-\text{NH}_2$)	Meningkatkan kemampuan khelasi ion logam
3	Benettayeb et al. (2022)	Alginat	Gugus karboksilat ($-\text{COO}^-$)	Memperkuat mekanisme pertukaran ion
4	Chen et al. (2024)	Karagenan	Gugus sulfat ($-\text{SO}_3^-$)	Meningkatkan interaksi elektrostatik
5	Liu et al. (2025)	Biopolimer komposit	Struktur berpori dan luas permukaan tinggi	Kapasitas adsorpsi meningkat

Struktur kimia biopolimer merupakan faktor utama yang menentukan kemampuan adsorpsi terhadap berbagai polutan. Gugus fungsi seperti hidroksil ($-\text{OH}$), amino ($-\text{NH}_2$), karboksilat ($-\text{COO}^-$),

dan sulfat ($-\text{SO}_3^-$) berperan sebagai situs aktif yang berinteraksi dengan ion logam maupun senyawa organik. Semakin banyak gugus aktif yang tersedia, semakin tinggi pula kemampuan adsorpsi material. Selain gugus fungsi, sifat fisik seperti luas permukaan, ukuran pori, dan porositas juga memengaruhi difusi polutan menuju permukaan adsorben. Material yang memiliki struktur berpori memungkinkan kontak yang lebih besar antara adsorben dan adsorbat sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi. Oleh karena itu, modifikasi biopolimer yang bertujuan meningkatkan luas permukaan dan jumlah gugus aktif menjadi strategi yang efektif untuk menghasilkan adsorben berkinerja tinggi.

4.5 Mekanisme Adsorpsi

Penentuan mekanisme adsorpsi merupakan aspek fundamental dalam memahami proses interaksi antara molekul polutan dengan permukaan adsorben biopolimer. Secara umum, proses penyerapan ini berlangsung melalui mekanisme fisika (physisorption) maupun kimia (chemisorption), yang dipengaruhi oleh ketersediaan gugus fungsi, muatan permukaan (zeta potential), serta karakteristik polutan target. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penyerapan dapat terjadi melalui beberapa jalur spesifik, seperti interaksi elektrostatik, pembentukan kompleks/khelat, pertukaran ion, ikatan hidrogen, hingga difusi ke dalam pori adsorben. Ringkasan mengenai variasi mekanisme adsorpsi, jenis polutan, serta bentuk interaksinya dari studi literatur terkini disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Mekanisme Adsorpsi pada Biopolimer Termodifikasi

No	Penulis (Tahun)	Mekanisme	Jenis Polutan	Keterangan
1	Kumar et al. (2023)	Elektrostatik	Cr(VI)	Terjadi karena perbedaan muatan permukaan
2	Wang et al. (2023)	Kompleksasi	Pb(II)	Gugus amino mengikat ion logam
3	Liu et al. (2024)	Pertukaran ion	Cu(II)	Ion logam menggantikan ion pada adsorben
4	Chen et al. (2025)	Ikatan hidrogen	Methylene Blue	Terjadi antara gugus hidroksil dan molekul zat warna
5	Zhang et al. (2024)	Difusi pori	Berbagai polutan	Polutan masuk ke dalam pori adsorben

Proses adsorpsi pada biopolimer berlangsung melalui beberapa mekanisme yang dapat terjadi secara bersamaan. Mekanisme elektrostatik terjadi akibat adanya gaya tarik antara permukaan adsorben dan polutan yang memiliki muatan berlawanan. Mekanisme ini sangat dipengaruhi oleh nilai pH karena pH menentukan muatan permukaan adsorben.

Kompleksasi merupakan mekanisme dominan pada biopolimer yang memiliki gugus amino, terutama kitosan. Gugus tersebut membentuk ikatan koordinasi dengan ion logam sehingga menghasilkan adsorpsi yang kuat. Selain itu, mekanisme pertukaran ion banyak ditemukan pada alginat yang memiliki gugus karboksilat. Sementara itu, ikatan hidrogen berperan penting dalam adsorpsi zat warna dan senyawa organik. Seluruh mekanisme tersebut saling mendukung sehingga meningkatkan efisiensi penghilangan polutan dari air limbah.

4.6 Aplikasi pada Pengendalian Pencemaran Perairan

Tabel 6. Aplikasi Biopolimer Termodifikasi dalam Pengendalian Pencemaran Perairan

No	Penulis (Tahun)	Jenis Biopolimer	Jenis Polutan	Aplikasi
1	Ahmed et al. (2022)	Kitosan	Pb(II)	Pengolahan limbah industri
2	Kumar et al. (2023)	Selulosa	Zat warna tekstil	Pengolahan limbah tekstil
3	Benettayeb et al. (2022)	Alginat	Cu(II)	Pengolahan limbah pertambangan
4	Silva et al. (2024)	Karagenan	Cd(II)	Pengolahan limbah logam berat
5	Liu et al. (2025)	Biopolimer komposit	Berbagai logam berat	Sistem filtrasi air

Biopolimer termodifikasi telah diterapkan dalam berbagai bidang pengolahan air limbah karena memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi serta bersifat ramah lingkungan. Aplikasi yang paling banyak dilaporkan adalah pengolahan limbah industri tekstil, pertambangan, elektroplating, dan limbah domestik yang mengandung logam berat maupun zat warna sintetis.

Kitosan banyak digunakan untuk menghilangkan Pb(II), Cr(VI), dan Cu(II), sedangkan selulosa lebih efektif dalam mengadsorpsi zat warna organik. Alginat dan karagenan banyak dikembangkan dalam bentuk hidrogel dan beads karena mudah diaplikasikan pada sistem filtrasi. Selain memiliki efisiensi tinggi, sebagian besar biopolimer juga dapat diregenerasi sehingga biaya operasional menjadi lebih rendah dibandingkan adsorben sintetis. Hal ini menunjukkan bahwa biopolimer termodifikasi memiliki prospek yang baik sebagai material pengolahan air yang berkelanjutan.

4.7 Tantangan dan Prospek Pengembangan

Tabel 7. Tantangan dan Prospek Pengembangan Biopolimer Termodifikasi

No	Penulis (Tahun)	Tantangan	Prospek
1	Kumar et al. (2023)	Stabilitas mekanik rendah	Pengembangan material komposit
2	Wang et al. (2023)	Regenerasi belum optimal	Adsorben yang dapat digunakan berulang
3	Liu et al. (2024)	Produksi skala industri masih terbatas	Produksi massal yang lebih ekonomis
4	Chen et al. (2025)	Selektivitas terhadap polutan tertentu	Functionalization gugus aktif
5	Ahmed et al. (2022)	Ketahanan pada kondisi ekstrem	Integrasi dengan teknologi nanomaterial

Meskipun menunjukkan potensi yang besar, penggunaan biopolimer termodifikasi masih menghadapi beberapa tantangan. Salah satu kendala utama adalah stabilitas mekanik yang masih rendah sehingga adsorben mudah mengalami kerusakan setelah digunakan berulang kali. Selain itu, proses regenerasi belum sepenuhnya efisien sehingga kapasitas adsorpsi dapat menurun setelah beberapa siklus penggunaan.

Tantangan lainnya adalah biaya produksi pada skala industri yang masih relatif tinggi, terutama untuk proses modifikasi kimia dan sintesis nanokomposit. Selain itu, beberapa biopolimer memiliki selektivitas yang terbatas terhadap jenis polutan tertentu sehingga diperlukan modifikasi lebih lanjut agar mampu mengadsorpsi berbagai kontaminan secara bersamaan.

Di sisi lain, prospek pengembangan biopolimer termodifikasi sangat menjanjikan. Penelitian terbaru banyak mengarah pada pengembangan material komposit berbasis nanoselulosa, kitosan magnetik, hidrogel multifungsi, serta biopolimer yang dipadukan dengan graphene oxide atau nanopartikel logam. Inovasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi, mempercepat proses adsorpsi, memperbaiki kemampuan regenerasi, serta memperpanjang umur pakai adsorben. Dengan memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah dan dapat diperbarui, biopolimer termodifikasi berpotensi menjadi solusi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan adsorben sintetis dalam mendukung pengendalian pencemaran perairan secara berkelanjutan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, dapat disimpulkan bahwa biopolimer termodifikasi memiliki potensi yang sangat baik sebagai adsorben ramah lingkungan dalam pengendalian pencemaran perairan. Biopolimer seperti selulosa, kitosan, alginat, dan karagenan menunjukkan kemampuan adsorpsi yang efektif terhadap berbagai polutan, termasuk logam berat dan zat warna, karena memiliki gugus fungsi aktif yang dapat berinteraksi dengan adsorbat melalui mekanisme kompleksasi, pertukaran ion, interaksi elektrostatik, dan ikatan hidrogen. Modifikasi biopolimer melalui metode crosslinking, grafting, dan functionalization terbukti mampu meningkatkan stabilitas struktur, jumlah situs aktif, luas permukaan, serta kapasitas adsorpsi dibandingkan biopolimer alami.

Selain dipengaruhi oleh jenis biopolimer dan metode modifikasi, kinerja adsorpsi juga dipengaruhi oleh karakteristik struktur material, seperti porositas, luas permukaan, dan jenis gugus fungsi yang dimiliki. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa biopolimer termodifikasi telah berhasil diaplikasikan dalam pengolahan limbah industri, domestik, maupun pertambangan untuk menghilangkan logam berat dan senyawa organik berbahaya. Hal ini menunjukkan bahwa biopolimer termodifikasi merupakan alternatif adsorben yang berkelanjutan karena berasal dari sumber daya terbarukan, bersifat biodegradable, serta memiliki potensi untuk diregenerasi dan digunakan kembali.

Meskipun demikian, masih terdapat beberapa tantangan dalam pengembangannya, seperti peningkatan stabilitas mekanik, efisiensi regenerasi, selektivitas terhadap berbagai jenis polutan, serta

penerapan pada skala industri. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan biopolimer komposit dan nanokomposit dengan metode modifikasi yang lebih efektif, serta evaluasi kinerja dalam kondisi aplikasi nyata. Upaya tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah dan mendukung penerapan teknologi pengendalian pencemaran perairan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Ali, A., & Ahmad, M. (2022). Crosslinked chitosan-based materials for heavy metal removal in industrial wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107518. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107518>
- Al-Gethami, W., Alsolami, B., & Alharbi, A. (2024). Biopolymer nanocomposites for enhanced adsorption of dyes and micropollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(8), 11420–11432. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32110-z>
- Ali, M., Khan, S., & Rahman, F. (2024). Advances in water treatment technologies: Comparative analysis of adsorption vs conventional methods. *Water Research*, 248, 120835. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120835>
- Alkhaldi, F., Hussain, M., & Al-Amer, A. (2024). Functionalized natural biopolymers for selective removal of micropollutants and pathogens. *Carbohydrate Polymers*, 325, 121534. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121534>
- Benettayeb, A., Morsli, A., & Seghier, A. (2022). Calcium alginate hydrogels for efficient ion-exchange adsorption of heavy metals. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 850–862. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.085>
- Biglari, M., & Salehi, E. (2025). Carrageenan nanocomposites for Cd(II) removal: Structure–property relationships and adsorption performance. *Journal of Hazardous Materials*, 481, 136149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136149>
- Chen, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2024). Hydrogen bonding and electrostatic interactions in carrageenan-based adsorbents for cationic dyes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(3), 1450–1461. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c06820>
- Chen, Y., Zhao, X., & Liu, Y. (2025). Mechanistic insights into hydrogen bonding adsorption of methylene blue on functionalized biopolymers. *Desalination and Water Treatment*, 315, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100212>
- Doyo, A., Iskandar, M., & Kurniawan, R. (2023). Composite biopolymers based on cellulose, chitosan, and alginate for heavy metal adsorption. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(12), e53401. <https://doi.org/10.1002/app.53401>
- Gonçalves, C., Silva, R., & Santos, L. (2024). Crosslinked chitosan derivatives for sustainable removal of heavy metals and organic contaminants. *Carbohydrate Polymers*, 328, 121735. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121735>
- Ivbanikaro, O., Okon, E., & Adebayo, A. (2023). Surface modification and nanocellulose composites for heavy metal ion sequestration. *Bioresource Technology*, 370, 128540. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128540>

- Kumar, R., Sharma, P., & Verma, A. (2023). Carboxymethyl cellulose-graft-acrylic acid for enhanced adsorption of Pb(II) and Cr(VI). *Chemosphere*, 311, 137048. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137048>
- Kumar, R., Singh, S., & Patel, K. (2024). Graphene oxide-functionalized cellulose composites for dye removal from aqueous solutions. *Applied Surface Science*, 642, 158570. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158570>
- Kumar, S., Gupta, R., & Rani, S. (2025). Crosslinked carrageenan hydrogels for efficient dye adsorption across wide pH ranges. *Journal of Environmental Management*, 350, 119830. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.119830>
- Li, X., Wang, Y., & Zhang, J. (2022). Grafted chitosan biopolymers for targeted antibiotic adsorption from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132744. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132744>
- Li, Y., Chen, Z., & Liu, M. (2024). Nanocellulose-based adsorbents for high-capacity electrostatic removal of Cd(II). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(5), 2210–2222. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c03910>
- Liu, H., Sun, W., & Zhou, Q. (2023). Alginate hydrogel beads for fast adsorption of methylene blue: Kinetic and isotherm studies. *Environmental Technology & Innovation*, 29, 102985. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102985>
- Liu, J., Yang, X., & Zhao, B. (2024). Chitosan composites for copper ion recovery via complexation and ion exchange. *Separation and Purification Technology*, 330, 125338. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125338>
- Liu, T., Wang, K., & Zhang, H. (2025). Porous biopolymer composites with high surface area for multi-metal filtration systems. *Chemical Engineering Journal*, 480, 147860. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.147860>
- Mishra, S., Panda, A., & Tripathy, S. (2024). Chemically modified cellulose as a sustainable adsorbent for heavy metal remediation. *Environmental Science & Technology*, 58(4), 1890–1902. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08210>
- Sharma, V., Joshi, M., & Kumar, A. (2022). Carrageenan hydrogels for heavy metal sequestration: Electrostatic and complexation mechanisms. *Journal of Molecular Liquids*, 360, 119531. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119531>
- Silva, F., Oliveira, M., & Souza, P. (2022). Poly(acrylic acid)-grafted chitosan for selective adsorption of Cu(II) ions. *Polymer Testing*, 108, 107519. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107519>
- Silva, T., Ferreira, R., & Costa, M. (2024). Carrageenan composite materials for dye and heavy metal removal in aquatic systems. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115828. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115828>
- Singh, P., Verma, N., & Sharma, R. (2024). Mechanical strength and adsorption capacity of alginate composites for Cu(II) removal. *International Journal of Biological Macromolecules*, 255, 128140. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128140>

- Vishwakarma, V., Ram, S., & Prasad, B. (2023). Green biopolymers for environmental remediation: A comprehensive review on functional properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(2), 415–430. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02610-w>
- Wang, F., Liu, Y., & Zhang, C. (2023). Magnetic chitosan composites for Cr(VI) and Pb(II) removal: Synthesis, adsorption, and easy magnetic separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(10), 13200–13212. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c21950>
- Zhang, K., Xu, L., & Meng, Y. (2023). Alginate composite beads for heavy metal capture and regenerative water treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.035>
- Zhang, L., Wu, J., & Tang, H. (2024). Three-dimensional cellulose aerogels with porous structure for rapid methylene blue adsorption. *Carbohydrate Polymers*, 323, 121433. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121433>