

MANFAAT SINTESIS NANOPARTIKEL ALGINAT–KITOSAN DALAM ADSORPSI SENYAWA OBAT

Nurmala

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Raden Intan Lampung
Email: nurmala@radenintan.ac.id

Abstract (English)

Pharmaceutical compounds such as analgesics, antibiotics, and non-steroidal anti-inflammatory drugs are increasingly detected in wastewater and natural water bodies due to their widespread consumption and the limited ability of conventional treatment units to remove persistent and bioactive contaminants. Adsorption is an attractive approach because it is simple, flexible, and can be integrated with other processes. In this context, alginate–chitosan nanoparticles offer advantages as biopolymer-based materials: they are derived from renewable resources, biodegradable, rich in functional groups, and possess surface charges that can be tuned by pH and polymer ratio. This review summarizes the principles of polyelectrolyte complex formation between alginate (anionic) and chitosan (cationic), nanoparticle synthesis strategies (polyelectrolyte complexation, ionotropic gelation, and crosslinking), key parameters controlling particle size and zeta potential, and adsorption mechanisms for pharmaceutical compounds (electrostatic interactions, hydrogen bonding, pore filling, and chemisorption contributions in crosslinked systems). Relevant studies demonstrate effective performance for selected drugs, including paracetamol removal using glutaraldehyde-crosslinked alginate–chitosan nanoparticles (average size ~8 nm) as well as alginate–chitosan hydrogels/beads for paracetamol adsorption. Moreover, alginate–carboxymethyl chitosan (CMCS) microgels and biopolymer composites reinforced with functional additives (e.g., magnetic MOFs) broaden the range of target antibiotics such as ciprofloxacin. This review highlights the main benefits of alginate–chitosan nanoparticles as nanosorbents, implementation limitations (stability under extreme pH, nanoparticle separation, ionic competition, and toxicity concerns of certain crosslinkers), and future research directions to improve performance in real water matrices (amphoteric design, magnetic/porous reinforcement, and repeated regeneration).

Article History

Submitted: 26 November 2025

Accepted: 25 Desember 2025

Published: 26 Desember 2025

Key Words

alginate; chitosan; nanoparticles; adsorption; pharmaceutical compounds; wastewater
Top of Form
Bottom of Form

Abstrak (Indonesia)

Senyawa obat (pharmaceuticals) seperti analgesik, antibiotik, dan antiinflamasi non-steroid semakin sering terdeteksi di air limbah dan badan air karena konsumsi luas serta keterbatasan unit pengolahan konvensional dalam menghilangkan kontaminan yang bersifat persisten dan berbioaktivitas. Adsorpsi menjadi pendekatan yang menarik karena sederhana, fleksibel, dan dapat dipadukan dengan proses lain. Dalam konteks ini, nanopartikel alginat–kitosan menawarkan keuntungan material berbasis biopolimer: sumber terbarukan, biodegradabel, berlimpah gugus fungsional, serta muatan permukaan yang dapat disetel melalui pH dan rasio polimer. Tinjauan ini merangkum prinsip pembentukan kompleks polielektrolit alginat (anionik) dan kitosan (kationik), strategi sintesis nanopartikel (kompleksasi polielektrolit, gelasi ionotropik, dan pengikatan silang), parameter yang mengontrol ukuran/zetapotensial, serta mekanisme adsorpsi senyawa obat (interaksi elektrostatis, ikatan hidrogen, pengisian pori, dan kontribusi chemisorption pada sistem terikat silang). Studi yang relevan menunjukkan kinerja efektif pada obat terpilih, termasuk parasetamol dengan nanopartikel alginat–kitosan terikat silang glutaraldehid (ukuran rata-rata ~8 nm) dan juga hidrogel/beads alginat–kitosan untuk penghilangan parasetamol; di sisi lain, mikrogel alginat–karboksimetil kitosan (CMCS) serta komposit biopolimer dengan penguat (misalnya MOF magnetik) memperluas rentang target antibiotik seperti

Sejarah Artikel

Submitted: 26 November 2025

Accepted: 25 Desember 2025

Published: 26 Desember 2025

Kata Kunci

alginat; kitosan; nanopartikel; adsorpsi; senyawa obat; air limbah

ciprofloxacin. Tinjauan ini menekankan manfaat utama nanopartikel alginat–kitosan sebagai nanosorben, keterbatasan implementasi (stabilitas pada pH ekstrem, separasi partikel nano, kompetisi ion, serta isu toksisitas pengikat silang tertentu), dan arah riset untuk meningkatkan kinerja di matriks air nyata (desain amphoteric, penguatan magnetik/berpori, dan regenerasi berulang).

Pendahuluan

Pencemaran air oleh sisa-sisa senyawa obat sekarang jadi isu *kontaminan emergen* karena banyak obat tidak mudah terurai, tetap “aktif” walau kadarnya sangat kecil, dan bisa menimbulkan dampak lingkungan. Zat-zat ini dapat mengganggu organisme air (misalnya ikan dan mikroorganisme) serta berkontribusi pada munculnya resistansi antimikroba. Sumbernya beragam, mulai dari obat yang keluar lewat urin atau feses manusia dan hewan, kebiasaan membuang obat kedaluwarsa sembarangan, sampai limbah cair dari rumah sakit dan industri farmasi yang belum terolah sempurna.

Masalahnya, banyak instalasi pengolahan air limbah yang umum digunakan—seperti proses biologis, koagulasi–flokulasi, dan filtrasi biasa—sering belum mampu menghilangkan senyawa obat secara tuntas. Sebagian molekul obat bisa “lolos” karena struktur kimianya cukup stabil atau karena konsentrasinya sangat kecil sehingga tidak tertangkap dengan baik oleh proses konvensional. Karena itu, diperlukan teknologi tambahan yang lebih spesifik untuk menargetkan polutan jenis ini. Salah satu metode yang banyak dipilih adalah adsorpsi, yaitu proses “menempelkan” zat pencemar ke permukaan material penyerap (adsorben). Metode ini disukai karena cara operasinya relatif sederhana, dapat dibuat lebih hemat biaya jika adsorbennya tepat, dan pada beberapa kasus adsorben bisa dipakai ulang setelah diregenerasi.

Di antara berbagai adsorben, alginat dan kitosan menonjol karena berasal dari bahan alami dan relatif ramah lingkungan. Alginat adalah polisakarida yang umumnya bermuatan negatif dan kaya gugus karboksilat, sedangkan kitosan adalah polisakarida bermuatan positif yang memiliki gugus amina. Ketika digabungkan, keduanya dapat saling berikatan membentuk kompleks polielektrolit (PEC) yang cukup stabil. Menariknya, sifat PEC ini bisa “diatur” mengikuti kondisi pH, sehingga mudah direkayasa menjadi bentuk material yang berbeda—mulai dari butiran/mikrogele sampai nanopartikel—sesuai kebutuhan proses adsorpsi.

Sintesis dalam ukuran nano penting karena ukuran yang sangat kecil membuat luas permukaan material menjadi jauh lebih besar. Akibatnya, lebih banyak titik aktif yang tersedia untuk menangkap senyawa obat, dan jarak perpindahan molekul menuju permukaan adsorben menjadi lebih pendek. Ini biasanya membuat proses adsorpsi berlangsung lebih cepat dan efisien. Walaupun begitu, material nano juga punya tantangan, terutama pada tahap pemisahan setelah digunakan (karena partikelnya sangat halus) dan pada kestabilan struktur dalam berbagai kondisi air. Jadi, saat merancang nanopartikel alginat–kitosan, tidak cukup hanya mengejar daya adsorpsi tinggi, tetapi juga perlu mempertimbangkan aspek operasional seperti kemudahan pemisahan, ketahanan di variasi pH, dan kemungkinan penggunaan ulang.

Metodologi

Tinjauan ini dibuat dengan cara menelusuri dan mengumpulkan berbagai artikel ilmiah dari beberapa basis data yang umum dipakai dalam penelitian, seperti Scopus, Web of Science, PubMed, dan Google Scholar. Pencarian dilakukan memakai kombinasi kata kunci yang berhubungan dengan topik, yaitu “chitosan”, “alginate”, “nanoparticles”, “polyelectrolyte complex”, “adsorption”, “pharmaceuticals”, “antibiotics”, dan “wastewater”. Kata kunci tersebut dipilih supaya hasil pencarian tetap fokus pada material alginat–kitosan dan penggunaannya untuk menyerap senyawa obat dari air limbah.

Dari hasil penelusuran tersebut, artikel yang paling diprioritaskan adalah: (1) penelitian yang membahas cara pembuatan nanopartikel atau hidrogele alginat–kitosan beserta uji

karakterisasinya (misalnya ukuran partikel, zeta potential, FTIR, dan morfologi), karena bagian ini penting untuk memahami kualitas dan sifat material yang dibuat; (2) penelitian yang menguji kemampuan adsorpsi senyawa obat oleh material berbasis alginat/kitosan, termasuk kondisi percobaan seperti pH, waktu kontak, konsentrasi awal, dan kapasitas adsorpsi; serta (3) artikel tinjauan (review) yang merangkum perkembangan kompleks polielektrolit (PEC) alginat–kitosan khususnya untuk aplikasi lingkungan, sehingga dapat membantu melihat tren riset, kelebihan, dan kekurangannya secara lebih menyeluruh.

Secara waktu, literatur yang dipertimbangkan berada pada rentang tahun 2000 sampai 2025. Rentang ini dipilih agar tinjauan bisa menangkap perkembangan dari penelitian awal (yang biasanya masih sederhana pada metode dan material) hingga penelitian terbaru yang sudah mengarah pada komposit modern, seperti penggabungan alginat–kitosan dengan material lain (misalnya material berpori atau magnetik) untuk meningkatkan kinerja adsorpsi dan mempermudah pemisahan adsorben dari air.

Dasar Material: Alginat, Kitosan, dan Kompleks Polielektrolit

a. Alginat

Alginat (biasanya digunakan dalam bentuk *sodium alginate*) adalah biopolimer alami yang tersusun dari dua jenis “blok” utama, yaitu asam guluronat dan asam manuronat. Di dalam strukturnya terdapat banyak gugus karboksilat ($-\text{COOH}$). Saat berada pada kondisi pH netral sampai basa, gugus karboksilat ini cenderung melepas H^+ (terdeprotonasi) sehingga berubah menjadi $-\text{COO}^-$, membuat alginat bermuatan negatif. Sifat bermuatan ini penting karena menentukan kemampuan alginat berinteraksi dengan bahan lain. Selain itu, alginat terkenal mudah membentuk gel ketika bertemu ion bermuatan ganda (kation multivalen) seperti Ca^{2+} . Proses pengikatan ion Ca^{2+} dengan gugus karboksilat membentuk struktur khas yang sering disebut mekanisme “egg-box”, sehingga jaringan gel menjadi lebih kuat. Mekanisme ini sangat berguna untuk membentuk “inti” partikel serta meningkatkan kekuatan mekanik material agar tidak mudah rusak saat digunakan dalam proses adsorpsi.

b. Kitosan

Kitosan adalah biopolimer yang berasal dari kitin (misalnya dari cangkang udang/kepiting) yang telah mengalami proses deasetilasi. Ciri utama kitosan adalah memiliki banyak gugus amina primer ($-\text{NH}_2$). Pada kondisi asam, gugus $-\text{NH}_2$ ini mudah menerima H^+ (terprotonasi) menjadi $-\text{NH}_3^+$, sehingga kitosan menjadi bermuatan positif (kationik). Sifat kationik ini membuat kitosan mudah berikatan dengan polimer bermuatan negatif seperti alginat, sehingga dapat membentuk kompleks polielektrolit (PEC). Dalam konteks adsorpsi, gugus amina dan hidroksil pada kitosan menyediakan banyak “titik aktif” yang dapat mengikat molekul obat melalui gaya tarik elektrostatis dan ikatan hidrogen. Selain itu, derajat deasetilasi (seberapa banyak gugus amina yang terbentuk) dan massa molekul sangat memengaruhi sifat kitosan, seperti kelarutan dalam larutan asam, kekentalan (viskositas), serta kuat-lemahnya interaksi dengan polimer lain dan senyawa target.

c. Kompleks Polielektrolit (PEC) Alginat–Kitosan

Kompleks polielektrolit (PEC) alginat–kitosan terbentuk ketika muatan negatif dari alginat ($-\text{COO}^-$) bertemu dengan muatan positif dari kitosan ($-\text{NH}_3^+$), lalu keduanya saling menarik dan “mengunci” menjadi satu jaringan. Sifat PEC ini sangat dipengaruhi oleh pH, karena pH menentukan apakah gugus karboksilat pada alginat tetap bermuatan negatif dan apakah gugus amina pada kitosan tetap bermuatan positif. Artinya, pada pH tertentu PEC bisa menjadi lebih stabil, sementara pada pH lain bisa melemah atau berubah karakter. Menurut tinjauan sistematik terbaru, desain PEC dipandang sebagai strategi penting dalam pengolahan air limbah karena mampu menyeimbangkan tiga hal utama: (1) stabilitas struktur agar material tidak mudah rusak, (2) keterjangkauan gugus aktif supaya situs adsorpsi tetap mudah diakses, dan (3) kinerja sorpsi agar penyerapan senyawa obat tetap efektif pada berbagai kondisi air nyata yang kompleks (Yadav & Dutta, 2024).

Sintesis Nanopartikel Alginat–Kitosan**a. Kompleksasi Polielektrolit Langsung**

Cara paling sederhana untuk membuat nanopartikel alginat–kitosan adalah dengan mencampurkan larutan alginat dan kitosan pada pH tertentu. Ketika dicampur, muatan negatif dari alginat dan muatan positif dari kitosan akan saling tarik-menarik, sehingga partikel PEC (polyelectrolyte complex) bisa terbentuk secara spontan tanpa perlakuan yang rumit. Namun, hasil nanopartikel yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor proses, seperti urutan pencampuran (kitosan dimasukkan ke alginat atau sebaliknya), perbandingan jumlah (rasio massa), konsentrasi larutan, kekuatan ion (jumlah garam/ion di dalam larutan), serta kecepatan pengadukan. Faktor-faktor ini menentukan apakah partikel yang terbentuk akan kecil atau besar, seragam atau tidak seragam (polidispersitas), dan bagaimana muatan permukaannya. Beberapa studi perbandingan menunjukkan bahwa metode ini bisa menghasilkan nanopartikel berukuran kecil dengan kondisi yang relatif ringan, tetapi partikel lebih mudah menggumpal (agregasi) jika larutan mengandung ion terlalu tinggi atau rasio muatan alginat-kitosan tidak seimbang.

b. Gelasi Ionotropik dan Pra-Gelasi (*Ionotropic Pre-Gelation*)

Metode gelasi ionotropik memanfaatkan ion bermuatan ganda untuk membantu membentuk struktur partikel. Pada alginat, ion seperti Ca^{2+} dapat mengikat gugus karboksilat sehingga membentuk jaringan gel yang lebih kuat. Pada kitosan, pengikatan dapat terjadi dengan polianion tertentu, misalnya TPP (tripolifosfat). Salah satu variasi yang sering digunakan adalah pra-gelasi, yaitu ketika inti calcium-alginate dibentuk terlebih dahulu, kemudian inti tersebut dilapisi oleh kitosan sehingga terbentuk struktur inti–selubung (core–shell). Model seperti ini banyak dibahas karena umumnya membuat partikel menjadi lebih stabil, tidak mudah rusak dalam air, dan memiliki muatan permukaan yang lebih terkontrol. Pengaturan ini bisa dilakukan dengan mengubah ketebalan lapisan kitosan, sehingga sifat adsorpsinya dapat disesuaikan dengan target senyawa obat.

c. Pengikatan Silang (*Crosslinking*) untuk Stabilitas dan Kinerja Adsorpsi

Pada beberapa kondisi, nanopartikel alginat–kitosan bisa mengalami pelarutan atau melemah strukturnya, terutama jika pH dan kekuatan ion berubah. Karena itu, sering dilakukan pengikatan silang (crosslinking) untuk memperkuat jaringan polimer, sehingga partikel menjadi lebih “kokoh” dan tidak mudah hancur saat digunakan. Pengikatan silang kimia bekerja dengan membentuk “jembatan” antar rantai polimer, sehingga struktur partikel lebih stabil dan biasanya lebih tahan pada proses adsorpsi berulang.

Sebagai ilustrasi, Nurmala dkk. (2023) melaporkan sintesis nanopartikel alginat–kitosan yang diikat silang menggunakan glutaraldehid melalui metode gelasi ionotropik. Partikel yang dihasilkan memiliki ukuran rata-rata sekitar 8,22 nm dan mampu menunjukkan kinerja adsorpsi parasetamol yang terukur. Walaupun glutaraldehid efektif untuk memperkuat jaringan, pemilihannya tetap perlu mempertimbangkan keamanan, karena ada potensi residu yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pada desain adsorben berbasis biopolimer, alternatif yang lebih ramah lingkungan sering disarankan, misalnya genipin atau pengikatan silang fisik (tanpa reagen kimia berbahaya), agar material lebih aman untuk aplikasi lingkungan.

Karakterisasi yang Relevan untuk Nanopartikel Alginat–Kitosan

Agar nanopartikel alginat–kitosan bisa digunakan efektif sebagai adsorben, materialnya perlu dikaji sifat fisik dan kimianya melalui beberapa teknik karakterisasi. Tujuannya adalah memastikan partikel benar-benar terbentuk, stabil dalam air, dan punya “situs aktif” yang cukup untuk mengikat senyawa obat.

- **Ukuran partikel dan sebaran ukuran (DLS/TEM)**

Pengukuran ukuran partikel penting karena ukuran yang lebih kecil biasanya memberikan luas permukaan lebih besar, sehingga peluang kontak antara adsorben dan senyawa obat menjadi meningkat. DLS (Dynamic Light Scattering) umumnya dipakai

untuk melihat ukuran dalam larutan, sedangkan TEM (Transmission Electron Microscopy) membantu melihat ukuran dan bentuk partikel secara lebih detail. Dari data ini juga bisa diperkirakan apakah partikel cenderung seragam atau justru memiliki ukuran yang bervariasi, yang dapat memengaruhi konsistensi proses adsorpsi.

- **Zeta potential**

Zeta potential menjelaskan muatan listrik pada permukaan partikel dan menjadi indikator penting untuk menilai apakah nanopartikel stabil atau mudah menggumpal. Jika nilai zeta potential cukup besar (positif atau negatif), partikel biasanya lebih stabil karena saling tolak-menolak. Parameter ini juga membantu memahami apakah permukaan partikel lebih dominan bermuatan positif atau negatif pada pH tertentu, yang berkaitan langsung dengan selektivitas terhadap obat bermuatan tertentu.

- **FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)**

FTIR digunakan untuk memastikan adanya interaksi kimia/ionik antara alginat dan kitosan, misalnya interaksi antara gugus -COO^- (alginat) dan -NH_3^+ (kitosan). FTIR juga dapat menunjukkan apakah proses pengikatan silang (crosslinking) atau fungsionalisasi berhasil, karena biasanya muncul perubahan atau pergeseran puncak serapan tertentu.

- **SEM/TEM untuk morfologi**

SEM (Scanning Electron Microscopy) dan TEM tidak hanya menunjukkan ukuran, tetapi juga membantu melihat bentuk permukaan, tekstur, dan struktur partikel. Setelah proses adsorpsi, perubahan pada permukaan—misalnya menjadi lebih “tertutup” atau lebih padat—dapat menjadi tanda bahwa molekul obat memang sudah menempel atau mengisi bagian tertentu dari material.

- **pH titik muatan nol (pHpzc)**

pHpzc adalah pH ketika permukaan adsorben berada pada kondisi netral (tidak dominan positif maupun negatif). Jika pH larutan berada di bawah pHpzc, permukaan cenderung lebih positif, sedangkan jika pH di atas pHpzc, permukaan cenderung lebih negatif. Informasi ini membantu peneliti memprediksi pada pH berapa nanopartikel akan lebih efektif mengadsorpsi obat tertentu.

- **Luas permukaan dan porositas (BET)**

Parameter BET lebih sering dibutuhkan pada material yang memang dirancang berpori, terutama ketika alginat–kitosan dibuat sebagai komposit dengan bahan seperti biochar, zeolit, MOF, atau karbon aktif. BET membantu melihat seberapa besar luas permukaan yang tersedia dan seberapa banyak pori yang bisa menjadi “tempat” molekul obat masuk dan terjebak.

Mekanisme Adsorpsi Senyawa Obat oleh Nanopartikel Alginat–Kitosan

a. Interaksi Elektrostatik dan Peran pH

Cara kerja utama adsorpsi pada sistem alginat–kitosan sering ditentukan oleh interaksi muatan listrik antara permukaan nanopartikel dan senyawa obat. Hal ini sangat dipengaruhi oleh pH larutan, karena pH mengubah muatan alginat dan kitosan.

- Pada pH asam, gugus amina pada kitosan cenderung terprotonasi menjadi -NH_3^+ , sehingga permukaan nanopartikel lebih bermuatan positif. Kondisi ini biasanya lebih cocok untuk menarik dan mengadsorpsi obat yang bermuatan negatif.
- Pada pH yang lebih tinggi, gugus karboksilat pada alginat lebih dominan dalam bentuk -COO^- , sehingga permukaan nanopartikel dapat menjadi lebih bermuatan negatif. Kondisi ini lebih menguntungkan untuk mengadsorpsi obat yang bermuatan positif.

Sebagai gambaran, pada nanopartikel alginat–kitosan yang diikat silang glutaraldehid, kapasitas adsorpsi parasetamol dilaporkan meningkat pada pH 2–4 lalu menurun pada pH 5–8. Penurunan ini biasanya dijelaskan karena perubahan muatan permukaan adsorben dan

perubahan tingkat ionisasi paracetamol, sehingga gaya tarik antara keduanya menjadi lebih lemah pada pH tertentu.

b. Ikatan Hidrogen, Pengisian Pori, dan Chemisorption

Selain gaya elektrostatis, adsorpsi juga dapat terjadi melalui mekanisme lain, terutama ketika senyawa obat memiliki banyak gugus yang bisa berinteraksi dengan adsorben.

- **Ikatan hidrogen**
Gugus $-OH$, $-NH$, dan $-COO^-$ pada alginat-kitosan bisa berperan sebagai donor atau akseptor ikatan hidrogen, lalu berikatan dengan gugus pada senyawa obat seperti gugus fenolik, amida, atau atom hetero (misalnya O dan N). Mekanisme ini memperkuat penyerapan, terutama pada obat yang tidak dominan bermuatan.
- **Pengisian pori dan interaksi hidrofobik**
Jika material berbentuk komposit berpori, senyawa obat dapat masuk ke pori-pori dan terperangkap. Pada beberapa kasus, interaksi hidrofobik juga berperan, terutama jika senyawa obat memiliki bagian struktur yang cenderung nonpolar.
- **Chemisorption**
Pada material yang mengalami pengikatan silang sehingga jaringannya menjadi lebih rapat dan stabil, sebagian proses adsorpsi bisa bersifat lebih “kuat” (mendekati chemisorption). Hal ini sering terlihat dari hasil pemodelan, misalnya ketika data cocok dengan kinetika pseudo-second-order atau isotherm tertentu seperti Dubinin-Radushkevich, yang biasanya mengindikasikan adanya interaksi yang lebih spesifik dibanding sekadar penempelan fisik.

Bukti Kinerja Adsorpsi Senyawa Obat pada Sistem Alginat-Kitosan

Bagian ini merangkum studi-studi terpilih yang menilai kemampuan material berbasis alginat-kitosan dalam mengadsorpsi senyawa obat. Ringkasan biasanya mencakup jenis material (nanopartikel, hidrogel, mikrogel, atau komposit), kondisi operasi penting (pH, waktu kontak, dosis adsorben, konsentrasi awal), kapasitas adsorpsi, serta model kinetika dan isotherm yang digunakan untuk menjelaskan perilaku adsorpsinya. Dengan ringkasan ini, pembaca dapat melihat gambaran umum: material mana yang lebih efektif untuk obat tertentu, pada kondisi seperti apa adsorpsi paling optimal, dan mekanisme apa yang paling mungkin terjadi.

No	Target obat	Bentuk material	Metode sintesis (ringkas)	Kondisi kunci	Kinerja adsorpsi	Model kinetika/isotherm	Sumber
1	Paracetamol	Nanopartikel alginat-kitosan terikat silang glutaraldehid	Gelasi ionotropik ($CaCl_2$ pada alginat) + penambahan kitosan + glutaraldehid; sentrifugasi	Optimum pH 4; massa adsorben 0,030 g; waktu kontak 45 min; konsentrasi awal 16 ppm	q_{opt} 14,34 mg/g; ukuran rata-rata 8,22 nm	Kinetika pseudo-second-order ($k = 0,0324 \text{ g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$); isotherm D-R (R^2 tertinggi)	Nurmala et al., 2023 (Indones. J. Chem.; DOI: 10.22146/ijc.82431)
2	Paracetamol	Hidrogel adsorben kitosan-alginat (beads/hidrogel)	Pencampuran alginat:kitosan 4:1; pembentukan hidrogel (metode berbasis	Optimum pH 6; waktu kontak 45 min; konsentrasi awal 80 mg/L	q_{max} 67,58 mg/g	Kinetika pseudo-second-order; isotherm Freundlich	Budi et al., 2025 (Trends in Sciences; DOI: 10.48048/tis.2025.10767)

			interaksi ionik)				
3	Ciprofloxacin	Beads hidrogel biopolimer (kitosan/alginate) dengan Se-MOF magnetik terinkorporasi	Inkorporasi MSE-MOF ke matriks hidrogel kitosan/alginate; desain optimasi Box–Behnken	Batch adsorpsi; kondisi optimum ditetapkan melalui optimasi statistik	Kapasitas maksimum dilaporkan 440 mg/g (komposit); pemisahan dipermudah sifat magnetik	Dilaporkan melibatkan interaksi elektrostatik dan ikatan hidrogen (berbasis analisis mekanistik)	Guesmi et al., 2025 (Int. J. Biol. Macromol.; DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.144274)
4	Ciprofloxacin & Tetracycline	Mikrobeads hidrogel sodium alginate/CMCS (turunan kitosan)	Electrostatic spraying; pembentukan mikrogel	Optimum pH 7 dan 25°C; sistem tunggal dan biner	Efisiensi penghilangan pada pH 7: CIP ~95% dan TC ~51% (sistem tunggal); pada sistem biner terjadi kompetisi	Kinetika pseudo-second-order; isoterm Freundlich/Temkin	Qian et al., 2025 (Gels; DOI: 10.3390/gels11080646)
5	Amoxicillin	Beads alginat dan beads kitosan (pembanding material tunggal)	Teknik dripping untuk membentuk beads; evaluasi pH dan difusi	Optimum pH 4	Kapasitas maksimum: 74,2 mg/g (alginat) dan 80,4 mg/g (kitosan)	Kontrol difusi eksternal (alginat) vs difusi internal (kitosan)	Pinheiro et al., 2024 (preprint/versi jurnal; DOI: 10.21203/rs.3.rs-4331760/v1)

Catatan: q_{max} = kapasitas adsorpsi maksimum; q_{opt} = kapasitas pada kondisi optimum yang dilaporkan.

Manfaat Utama Sintesis Nanopartikel Alginat–Kitosan untuk Adsorpsi Senyawa Obat

1. Luas permukaan besar, sehingga penyerapan lebih cepat

Nanopartikel ukurannya sangat kecil, sehingga permukaannya menjadi jauh lebih luas dibanding material berukuran besar. Permukaan yang luas ini membuat lebih banyak “titik aktif” tersedia untuk menangkap molekul obat. Selain itu, jarak yang harus ditempuh molekul obat untuk mencapai permukaan adsorben menjadi lebih pendek, sehingga proses adsorpsi biasanya berjalan lebih cepat dan efisien.

2. Muatan permukaan bisa “diatur” sesuai kebutuhan

Kombinasi alginat (cenderung bermuatan negatif) dan kitosan (cenderung bermuatan positif) membuat nanopartikel ini fleksibel. Dengan mengatur pH larutan dan rasio alginat–kitosan, peneliti bisa membuat permukaan partikel lebih dominan positif atau negatif. Ini penting karena senyawa obat memiliki sifat muatan yang berbeda-beda, sehingga adsorben dapat “disetel” agar lebih selektif untuk obat bermuatan negatif atau obat bermuatan positif.

3. Proses sintesis relatif sederhana dan lebih ramah lingkungan

Banyak metode pembuatan nanopartikel alginat–kitosan dilakukan di media air dan biasanya tidak membutuhkan pelarut organik berbahaya. Prosesnya pun dapat

dilakukan pada suhu sedang, sehingga lebih sesuai dengan konsep kimia hijau. Hal ini menjadi keunggulan karena adsorben yang diproduksi tidak hanya efektif, tetapi juga lebih aman dari sisi lingkungan.

4. Mudah dimodifikasi menjadi komposit yang lebih kuat dan praktis

Alginat dan kitosan memiliki banyak gugus fungsional seperti amina, hidroksil, dan karboksilat, yang dapat menjadi tempat menempel atau berikatan dengan bahan lain. Karena itu, nanopartikel ini mudah dikembangkan menjadi komposit, misalnya ditambahkan bahan berpori (karbon aktif, zeolit, MOF) untuk meningkatkan kapasitas, atau ditambahkan komponen magnetik agar adsorben lebih mudah dipisahkan dari air setelah digunakan.

5. Berpotensi dipakai ulang melalui regenerasi

Beberapa penelitian menunjukkan adsorben berbasis biopolimer dapat dilepaskan kembali (desorpsi) dan digunakan ulang. Ini penting untuk efisiensi biaya dan pengurangan limbah. Walau demikian, kemampuan regenerasi sangat bergantung pada kestabilan struktur adsorben. Karena itu, desain nanopartikel biasanya perlu dilengkapi dengan strategi penguatan (misalnya pengikatan silang yang aman) agar tidak mudah rusak saat dipakai berulang.

Keterbatasan dan Tantangan Implementasi

- **Stabilitas pada pH ekstrem masih menjadi masalah**

Kitosan cenderung mudah larut pada kondisi sangat asam, sementara jaringan alginat dapat melemah pada kondisi pH tertentu atau ketika larutan memiliki kandungan ion tinggi. Akibatnya, adsorben bisa kehilangan bentuknya atau menurun kinerjanya, terutama saat diaplikasikan pada air limbah yang sifatnya tidak stabil.

- **Sulit dipisahkan karena ukurannya sangat kecil**

Nanopartikel cenderung “melayang” dalam air dan tidak mudah mengendap. Tanpa bantuan teknologi tambahan seperti koagulasi, filtrasi membran, atau desain adsorben magnetik, pemisahan partikel dari air bisa menjadi tidak praktis pada skala besar.

- **Kinerja bisa menurun pada air limbah nyata**

Pada air nyata, banyak ion lain (misalnya Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) dan bahan organik alami (*dissolved organic matter*). Komponen-komponen ini dapat bersaing menempati situs adsorpsi, sehingga kapasitas adsorpsi terhadap senyawa obat menjadi lebih rendah dibanding uji di air murni.

- **Isu keamanan pada beberapa bahan pengikat silang**

Pengikat silang seperti glutaraldehid efektif memperkuat struktur, tetapi berpotensi meninggalkan residu yang perlu dikontrol. Jika adsorben digunakan untuk aplikasi lingkungan, aspek keamanan dan evaluasi toksikologi perlu diperhatikan agar tidak menimbulkan risiko baru.

- **Konsistensi produksi pada skala besar tidak selalu mudah**

Membuat nanopartikel dengan ukuran yang stabil dan seragam (PDI rendah) pada skala besar memerlukan kontrol proses yang ketat, termasuk pengaturan pH, kecepatan pengadukan, viskositas larutan, dan standar mutu produksi. Tanpa kontrol yang baik, ukuran partikel bisa bervariasi dan memengaruhi hasil adsorpsi.

Arah Riset dan Rekomendasi

Ke depan, pengembangan material ini perlu diarahkan pada beberapa hal penting. Pertama, diperlukan desain nanopartikel amphoteric yang stabil pada rentang pH yang lebih luas, sehingga tidak mudah rusak ketika kondisi air berubah. Kedua, nanopartikel alginat-kitosan dapat ditingkatkan kinerjanya melalui penggabungan dengan bahan berpori (untuk meningkatkan kapasitas) atau komponen magnetik (untuk memudahkan pemisahan). Ketiga, uji performa sebaiknya lebih banyak dilakukan pada air limbah nyata dan pada kondisi multi-kontaminan, karena kondisi ini lebih mendekati aplikasi lapangan. Keempat, perlu dilakukan

pengujian regenerasi berulang serta evaluasi apakah ada pelepasan material/polimer selama penggunaan. Terakhir, pemakaian pengikat silang yang lebih aman serta rute sintesis yang hemat energi perlu diprioritaskan agar teknologi ini lebih layak menuju skala pilot dan industri.

Kesimpulan

Secara umum, nanopartikel alginat–kitosan merupakan adsorben berbasis biopolimer yang menjanjikan untuk mengurangi residu senyawa obat di air, karena memiliki luas permukaan tinggi, dapat disetel muatan permukaannya, dan dapat disintesis dengan proses berair yang relatif ramah lingkungan. Bukti dari studi adsorpsi pada parasetamol dan berbagai antibiotik menunjukkan bahwa pilihan desain jaringan—baik melalui pembentukan PEC, gelasi ionotropik, maupun pengikatan silang—sangat memengaruhi pH optimum, kecepatan adsorpsi, dan kapasitas penyerapan. Walau demikian, penerapan pada kondisi nyata masih menghadapi tantangan, terutama terkait stabilitas material di air limbah yang kompleks dan kesulitan pemisahan nanopartikel. Dengan pengembangan komposit yang tepat, strategi regenerasi yang baik, dan pemilihan pengikat silang yang lebih aman, alginat–kitosan berpotensi menjadi teknologi tambahan yang efektif untuk pengolahan air limbah yang mengandung residu obat.

Daftar Pustaka

1. Benettayeb, A., Boukhalfa, N., Chala, A., Demey, H., Daouda, K., & Makhoukhi, N. (2022). Adsorption of heavy metals and organic pollutants by alginate and chitosan-based adsorbents: A review. *Water*, 14(18), 2943. <https://doi.org/10.3390/w14182943>
2. Budi, H., Suratman, A., & Suherman, S. (2025). Synthesis and characterization of chitosan-alginate hydrogel adsorbent for paracetamol removal from wastewater. *Trends in Sciences*, 22(12), 10767. <https://doi.org/10.48048/tis.2025.10767>
3. Guesmi, A., Ben Hamadi, N., Abd El-Fattah, W., Subaihi, A., Alluhaybi, A. A., El-Desouky, M. G., & El-Bindary, A. A. (2025). Efficient removal of ciprofloxacin in aqueous solutions by magnetic Se-MOF embedded within a biopolymer (chitosan/alginate): Adsorptive behavior, mechanism study, and optimization using Box-Behnken design. *International Journal of Biological Macromolecules*, 314, 144274. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144274>
4. Henao, L. E. B., et al. (2018). Polyelectrolyte complexation versus ionotropic gelation for the preparation of chitosan-alginate nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2018, 3137167. <https://doi.org/10.1155/2018/3137167>
5. Niculescu, A.-G., & Grumezescu, A. M. (2022). Applications of chitosan-alginate-based nanoparticles—An up-to-date review. *Nanomaterials*, 12(2), 186. <https://doi.org/10.3390/nano12020186>
6. Nurmala, N., Suratman, A., & Suherman, S. (2023). Glutaraldehyde crosslinked alginate-chitosan nanoparticles as paracetamol adsorbent. *Indonesian Journal of Chemistry*, 23(6), 1542–1554. <https://doi.org/10.22146/ijc.82431>
7. Pinheiro, M. C., et al. (2024). Adsorption of amoxicillin by chitosan and alginate beads. *Research Square* (preprint). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4331760/v1>
8. Qian, Z., et al. (2025). Sodium alginate/carboxymethyl chitosan hydrogel microbeads for antibiotic adsorption in single and binary systems. *Gels*, 11(8), 646. <https://doi.org/10.3390/gels11080646>
9. Yadav, D., & Dutta, J. (2024). A systematic review on recent development of chitosan/alginate-based polyelectrolyte complexes for wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(3), 3381–(article number/pages as published). <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05244-6>