PENGEMBANGAN KOAGULAN KITOSAN MAGNETIK DALAM PENGOLAHAN LIMBAH PEWARNA CONGO RED SECARA EFEKTIF DAN BERKELANJUTAN

Novi Eka Mayangsari[1,3)], Tarikh Azis Ramadani[2,3)], dan Roihana Fajrin[1,3)]

[1]Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111
[2]Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111
[3]Laboratorium Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111

E-mail: noviekam@ppns.ac.id

Abstract

Water pollution caused by synthetic dyes, particularly Congo Red (CR) from textile industries, poses a severe threat to aquatic ecosystems due to its carcinogenic nature and resistance to natural degradation. This study aims to develop a magnetic coagulant based on chitosan (Fe_3O_4/CS) synthesized via the co-precipitation method. The produced chitosan exhibited a degree of deacetylation (DD) of 74%, ensuring the availability of active amine groups for pollutant destabilization. FTIR characterization confirmed composite formation through Fe–O vibrations at 548.89 cm^{-1}. XRD analysis revealed a hybrid structure with characteristic magnetite peaks at $2\theta=35^{\circ}$ and 63°. VSM testing classified the material as a soft magnet with a saturation magnetization (Ms) of 32.35 emu/g, enabling rapid phase separation via an external magnetic field. Coagulation tests at pH 3 demonstrated that Fe_3O_4/CS effectively removed 100 ppm CR with an efficiency of >99% at an optimum dosage of 25 mg/L. The removal mechanism was driven by electrostatic interactions between $-NH_3^+$ and $-SO_3^-$ groups, charge neutralization, and interparticle bridging, as evidenced by FTIR band shifts ($-NH_2$ at 1625 cm^{-1}→1620 cm^{-1} and C–O–C at 1020 cm^{-1}→1007 cm^{-1}) and increased amorphous background in XRD patterns. These results highlight the high potential of Fe_3O_4/CS as an efficient, stable, and sustainable alternative coagulant.

Keywords: *Coagulation-Flocculation, Congo Red, Magnetic Chitosan, Removal Mechanism, Waste Valorization.*

Abstrak

Pencemaran air akibat pewarna sintetis, khususnya Congo Red (CR) dari industri tekstil, merupakan ancaman serius bagi ekosistem perairan karena sifat karsinogenik dan ketahanannya terhadap degradasi alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan koagulan magnetik berbasis kitosan (Fe_3O_4/CS) yang disintesis melalui metode kopresipitasi. Kitosan yang dihasilkan memiliki derajat deasetilasi (DD) sebesar 74%, yang menjamin ketersediaan gugus amina aktif untuk destabilisasi polutan. Karakterisasi FTIR mengonfirmasi pembentukan komposit melalui vibrasi Fe–O pada bilangan gelombang 548,89 cm−1. Analisis XRD menunjukkan struktur hibrida dengan puncak karakteristik magnetit pada 2θ=35° dan 63°. Pengujian VSM mengklasifikasikan material ini sebagai magnet lunak dengan magnetisasi saturasi (Ms) sebesar 32,35 emu/g, yang memungkinkan pemisahan fase secara cepat menggunakan medan magnet eksternal. Uji koagulasi pada pH 3 menunjukkan bahwa Fe_3O_4/CS secara efektif menyisihkan CR konsentrasi 100 ppm dengan efisiensi >99% pada dosis optimum 25 mg/L. Mekanisme penyisihan didorong oleh interaksi elektrostatik antara gugus $-NH_3^+$ dan ––SO_3^-, netralisasi muatan, dan pembentukan jembatan antarpartikel; hal ini dibuktikan oleh pergeseran pita FTIR ($-NH_2$ pada 1625 cm^{-1}→1620 cm^{-1} dan C–O–C pada 1020 cm^{-1}→1007 cm^{-1}) serta peningkatan latar belakang

amorf pada pola XRD. Hasil-hasil ini menyoroti potensi besar Fe_3O_4/CS sebagai koagulan alternatif yang efisien, stabil, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Congo Red, Koagulasi-Flokulasi, Magnetic Chitosan, Mekanisme Penyisihan, Valorisasi Limbah.*

PENDAHULUAN

Pencemaran air merupakan permasalahan global yang serius, yang sebagaian besar disebabkan oleh aktivitas industri yang membuang limbah tanpa pengolahan atau dengan pengolahan yang kurang memadai ke lingkungan perairan. Berbagai industri menghasilkan polutan beracun selama proses produksinya, seperti industri tekstil, makanan, kosmetik, percetakan, dan pelapisan (Agha & Jawad, 2025; Pramanik et al., 2024). Industri tekstil merupakan kontributor utama emisi pewarna beracun ke lingkungan. Sekitar 85% campuran pewarna yang terdiri atas molekul pewarna dan bahan kimia lainnya tidak berhasil terikat pada kain selama proses pewarnaan, sehingga akhirnya terbuang sebagai limbah pewarna (Agha & Jawad, 2025). Zat warna *congo red* (CR) merupakan salah satu pewarna sintetis yang memiliki gugus azo dan sering digunakan dalam pembuatan tekstil. Pewarna ini bersifat karsinogenik, sulit terdegradasi secara alami, serta dapat memberikan efek negative terhadap mahluk hidup (Harja et al., 2022). Oleh karena itu, pengolahan air yang terkontaminasi pewarna congo red sangat diperlukan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan pewarna CR dari lingkungan berair, seperti koagulasi-flokulasi, adsorpsi, ion exchange, fotokatalis, dan lain-lain (Harja et al., 2022). Salah satu proses kimia yang paling umum dikembangkan untuk menghilangkan polutan zat warna dalam lingkungan perairan adalah koagulasi-flokulasi karena efektivitasnya dalam menghilangkan zat warna dan berbiaya rendah (Pramanik et al., 2024). Dalam proses koagulasi-flokulasi, jenis koagulan yang sering digunakan adalah koagulan kimia, seperti tawas *Aluminium sulfate* dan *Polyaluminium chloride* (Marín-Morales et al., 2026). Namun, penggunaan koagulan sintetis dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan karena sulit terbiodegradasi secara alami. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif koagulan yang lebih ramah lingkungan, salah satunya memanfaatkan kitosan yang berasal dari limbah cangkang kepiting.

Kitosan (CS) merupakan salah satu biopolymer alami yang paling melimpah, yang diperoleh melalui proses deasetilasi dari kitin, serta memiliki sifat biodegradable dan

tidak beracun (Alharthi et al., 2022; Reghioua et al., 2021). Banyak penelitian telah melaporkan aplikasi kitosan dan turunannya untuk menghilangkan polutan dari air/air limbah seperti *congo red* dan *methyl orange*, *tetrasiklin*, *Tartrazine Yellow* dan *Reactive Black 5*, dan fenol (Reghioua et al., 2021). Namun, penggunaan kitosan murni sebagai koagulan kurang diminati dalam pengolahan air limbah karena memiliki beberapa kelemahan, seperti mudah membentuk koloid di dalam air, rentan terdegradasi oleh reaksi kimia, memiliki kekuatan mekanik rendah, serta mudah terdisosiasi pada kondisi asam (Midya et al., 2019). Oleh karena itu, perlu dilakukan modifikasi dengan penambahan material magnetik Fe_3O_4 untuk meningkatkan stabilitas dan kekuatan kitosan sekaligus memberikan sifat magnetik. Dengan adanya Fe_3O_4, proses pemisahan koagulan setelah pengolahan menjadi lebih mudah, cepat dan efisien melalui bantuan medan magnet (Wu et al., 2023). Penelitian koagulan magnetik mampu menghilangkan zat warna DB56 hingga 97% pada dosis koagulan 150 mg/L pada pH 6 (Sun et al., 2021).

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk menyiapkan koagulan kitosan magnetik (Fe_3O_4/CS) untuk menghilangkan zat warna congo red. Kitosan diperoleh dari limbah cangkang kerang melalui pendekatan valorisasi berkelanjutan, sedangkan Fe_3O_4 disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Selanjutnya, dilakukan karakterisasi material koagulan magnetic menggunakan FT-IR, XRD, SEM-EDX, dan VSM.

METODE PENELITIAN

Bahan

Penelitian ini menggunakan limbah cangkang kerang sebagai bahan dasar untuk menghasilkan kitosan. Proses pembuatan kitosan dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu deproteinasi, demineraliusasi, dan deasetilasi (Kumar et al., 2020). Bahan baku lain yang digunakan adalah besi(III) klorida heksahidrat ($FeCl_3.6H_2O$), besi(II) klorida tetrahidrat ($FeCl_2.4H_2O$), sodium hidroksida (NaOH), asam asetat glasial (CH_3CO_2H), asam klorida (HCl), aseton, ammonium hidroksida (NH_4OH) 25%, dan akuades.

Sintesis nanopartikel magnetik (Fe_3O_4)

Nanopartikel magnetik (Fe_3O_4) disintesis menggunakan metode kopresipitasi. $FeCl_3.6H_2O$ dan $FeCl_2.4H_2O$ dengan perbandingan molar 2:1 dilarutkan dengan 100 mL akuades. Larutan diaduk selama 10 menit dengan suhu 80 °C. Selama pengadukan,

ditambahkan bahan presipitan (NH_4OH 25%) setetes demi setetes hinggan pH 10. Saat pH mencapai 10, residu dan filtrat dipisahkan menggunakan medan magnet eksternal. Endapatn dicuci menggunakan akuades dan dikeringkan pada suhu 100 °C (Wu et al., 2023).

Sintesis koagulan kitosan magnetik (Fe_3O_4/CS)

Sebanyak 2 g kitosan dilarutkan ke dalam 100 mL CH_3COOH 2% dan 2,67 g Fe_3O_4 dilarutkan ke dalam 10 mL akuades. Larutan kitosan diaduk selama 30 menit, kemudian 10 mL larutan Fe_3O_4 ditambahkan ke dalam larutan kitosan dan diatuk selama 60 menit. Proses tersebut menghasilkan endapan yang kemudian dapat dipisahkan dengan medan magnet eksternal. Endapan dicuci hinggan pH netral, yang selanjutnya dikeringkan pada suhu 80 °C sehingga menghasilkan koagulan kitosan magnetik.

Karakterisasi

Proses karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat dan karakter dari bahan-bahan yang digunakan maupun material hasil sintesis. Karakterisasi yang akan dilakukan adalah analisa FT-IR, analisa XRD, analisa SEM-EDX, dan analisa VSM.

Proses Koagulasi-Flokulasi

Proses koagulasi-flokulasi dievaluasi menggunakan metode jar test pada kondisi pH terkontrol (pH 3) dengan konsentrasi awal Congo Red sebesar 100 mg/L. Eksperimen dirancang secara sistematis dengan memvariasikan dosis koagulan Fe3 O4 /CS (5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100, dan 150 mg/L) untuk menentukan titik optimum penyisihan polutan. Seluruh perlakuan dijalankan pada kecepatan pengadukan cepat 150 rpm selama 2 menit (tahap koagulasi/destabilisasi), dilanjutkan pengadukan lambat 30 rpm selama 15 menit (tahap flokulasi), serta pengendapan selama 30 menit sebelum pengukuran interaksi dan efisiensi (Persamaan 1).

$$\eta = \frac{C_0 - C_a}{C_0} \quad (1)$$

Dimana C_0 dan C_a adalah konsentrasi awal dan akhir dari CR.

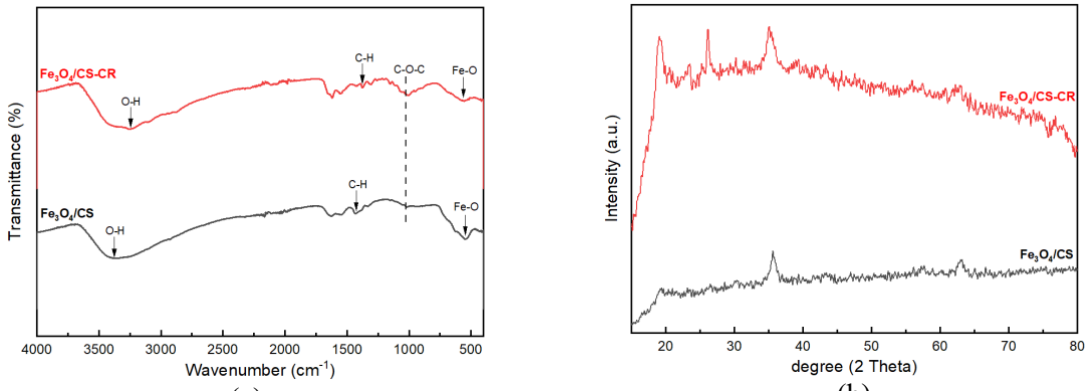
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi material

Berdasarkan hasil Analisa FTIR, kitosan yang dihasilkan memiliki nilai derajat deasetilasi (DD) sebesar 74%, yang menunjukkan bahwa kitosan telah terdeasetilasi dengan baik dan masih memiliki gugus amina aktif yang berperan dalam pembentukan

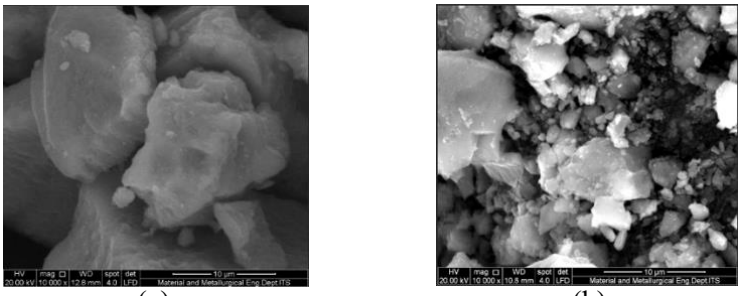
komposit. Pada Gambar 1.a, spektrum FTIR Fe_3O_4/CS dan Fe_3O_4/CS-CR menunjukkan pita serapan pada 3363,02 cm^{-1} dan 3252,56 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi ulur gugus O–H. Pita pada 1625,17 cm^{-1} dan 1620,72 cm^{-1} menunjukkan vibrasi tekuk gugus NH_2 (Yeamsuksawat et al., 2021), sedangkan pita pada 1432,77 cm^{-1} dan 1375,33 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi gugus C–H (Luthfiyana et al., 2022). Pita serapan pada 1020,53 cm^{-1} dan 1007,14 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus C–O–C dari struktur polisakarida kitosan (Ewais et al., 2023). Selain itu, munculnya pita pada 548,89 cm^{-1} dan 557,10 cm^{-1} yang merupakan vibrasi Fe–O mengonfirmasi keberhasilan pengikatan Fe_3O_4 pada matriks kitosan (Rahmi et al., 2019). Pergeseran beberapa pita serapan setelah modifikasi menjadi Fe_3O_4/CS mengindikasikan adanya interaksi antara kitosan, Fe_3O_4, dan CR.

Gambar 1.b, sampel Fe_3O_4/CS menunjukkan puncak difraksi pada 2θ = 19,30°; 35,62°; dan 63,02°, sedangkan Fe_3O_4/CS-CR menunjukkan puncak pada 2θ = 19,23°; 35,29°; dan 62,76°. Puncak pada sekitar 19° mengindikasikan keberadaan kitosan, sesuai dengan rentang karakteristik kitosan pada 2θ = 19–20° (Kumari et al., 2017). Sementara itu, puncak pada sekitar 35° dan 63° merupakan puncak khas magnetit (Fe_3O_4) yang sesuai dengan standar JCPDS No. 19-0629 (Musa Rampengan & Milian Tompunu Tengker, 2021; Tang & Fu, 2020). Tidak adanya pergeseran puncak yang signifikan setelah proses koagulasi-flokulasi menunjukkan bahwa struktur kristal utama komposit tetap terjaga. Puncak tertinggi teramati pada 2θ ≈ 35°, yang menunjukkan dominasi fase kristalin Fe_3O_4 dalam material kitosan magnetik.



Gambar 1. Spektra FT-IR (a) dan pola XRD (b)

Gambar 2 menunjukkan perbedaan morfologi antara Fe_3O_4/CS sebelum dan setelah koagulasi-flokulasi (Fe_3O_4/CS-CR). Fe_3O_4/CS awalnya berupa aglomerat dengan permukaan tidak seragam dan relatif kasar. Setelah proses, terbentuk partikel lebih kecil dengan distribusi ukuran lebih beragam. Perubahan ini diduga akibat interaksi antara koagulan dan zat warna Congo Red yang membentuk flok, melalui gaya tarik elektrostatik antara muatan positif koagulan dan muatan negatif zat warna.



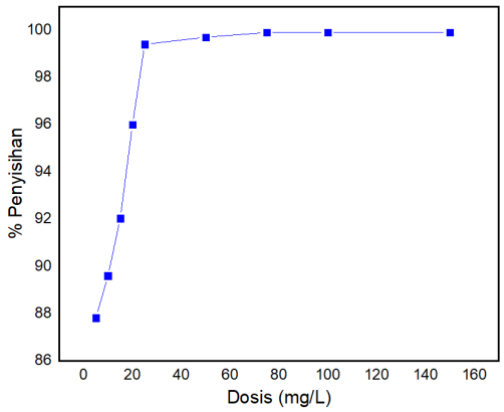
(a) (b)

Gambar 2. Analisa SEM sebelum (a) dan setelah (b) koagulasi dengan perbesaran 10000x

Pengujian VSM menunjukkan bahwa Fe_3O_4/CS memiliki sifat magnetik dengan Ms 32,3527 emu/g, Mr 7,9488 emu/g, dan Hc 0,0165 T. Gambar 4 merupakan kurva histeresis berbentuk S dan sempit mengindikasikan bahwa material ini termasuk magnet lunak dengan kebutuhan energi magnetisasi yang rendah. Nilai remanen yang rendah juga berkaitan dengan ukuran partikel yang kecil, sehingga sisa magnetisasi saat tanpa medan luar menjadi kecil (Musa Rampengan & Milian Tompunu Tengker, 2021).

Proses koagulasi

Gambar 3 menunjukkan pengaruh dosis koagulan kitosan magnetik (Fe_3O_4/CS) terhadap efisiensi penyisihan *Congo Red* (CR). Peningkatan dosis dari 5 hingga 25 mg/L memicu kenaikan efisiensi penyisihan secara signifikan hingga mencapai >99%. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya jumlah situs aktif (gugus amina terprotonasi) yang memfasilitasi mekanisme netralisasi muatan dan penjembatanan partikel (Sun et al., 2021).



Gambar 3. Pengaruh dosis koagulan terhadap efisiensi penyisihan

Dosis 25 mg/L diidentifikasi sebagai dosis optimum, di mana efisiensi penyisihan mencapai titik jenuh (*plateau*) dengan konsentrasi awal CR 100 ppm. Penambahan dosis melebihi titik optimum (hingga 150 mg/L) tidak memberikan peningkatan efisiensi yang berarti, mengindikasikan bahwa seluruh molekul polutan telah terikat secara maksimal oleh koagulan (You et al., 2018). Kinerja ini membuktikan bahwa kitosan magnetik sangat efektif dalam menyisihkan polutan organik pada konsentrasi tinggi dengan dosis koagulan yang relatif rendah.

Pada kondisi pH 3, gugus amina ($-NH_2$) pada matriks kitosan mengalami protonasi kuat menjadi gugus bermuatan positif ($-NH_3^+$). Sebaliknya, molekul Congo Red memilik gugus sulfonat ($-SO_3^-$) bermuatan negatif. Kondisi ini memicu daya tarik elektrostatik yang kuat antara Fe_3O_4/CS dan molekul CR, diikuti oleh mekanisme netralisasi muatan serta penjembatanan antar-partikel (*interparticle bridging*). Pembuktian interaksi ini diperkuat oleh spektra FTIR (Gambar 1a), di mana terjadi pergeseran puncak vibrasi tekuk $-NH_2$ dari 1625,17 cm^{-1} menjadi 1620,72 cm^{-1} dan pergeseran puncak C−O−C dari 1020,53 cm^{-1} menjadi 1007,14 cm^{-1} setelah proses koagulasi (Fe_3O_4/CS-CR). Selain itu, perubahan pola XRD pada Gambar 1b yang menunjukkan peningkatan *background* amorf mengonfirmasi terikatnya molekul amorf CR pada permukaan kristalin Fe_3O_4/CS.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan koagulan magnetik kitosan (Fe_3O_4/CS) dengan sifat magnet lunak (Ms =32,35 emu/g) yang efektif menyisihkan zat warna Congo Red hingga >99% pada pH 3 dengan dosis optimum 25 mg/L. Mekanisme penyisihan didorong oleh interaksi elektrostatik antara gugus $-NH_3^+$ kitosan dan $-SO_3^-$ zat warna,

serta netralisasi muatan. Terikatnya molekul polutan dibuktikan oleh pergeseran pita vibrasi $-NH_2$ (1625 cm^{-1}→1620 cm^{-1}) dan C–O–C (1020 cm^{-1}→1007 cm^{-1}) pada FTIR, serta peningkatan fase amorf pada XRD. Hasil ini mengonfirmasi bahwa Fe_3O_4/CS merupakan koagulan yang efisien, stabil, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah tekstil.

DAFTAR PUSTAKA

Agha, H. M., & Jawad, A. H. (2025). A review on the influence of crosslinking and grafting processes on the adsorptive performance of chitosan biopolymer for dyes removal. *Next Bioengineering*, *1*, 100007. https://doi.org/10.1016/j.nxbio.2025.100007

Alharthi, S. S., Gomathi, T., Joseph, J. J., Rakshavi, J., Florence, J. A. K., Sudha, P. N., Rajakumar, G., & Thiruvengadam, M. (2022). Biological activities of chitosan-salicylaldehyde schiff base assisted silver nanoparticles. *Journal of King Saud University - Science*, *34*(6), 102177. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102177

Ewais, A., Saber, R. A., Abdel Ghany, A., Sharaf, A., & Sitohy, M. (2023). High quality, low molecular weight shrimp and crab chitosans obtained by short-time holistic high-power microwave technology. *SN Applied Sciences*, *5*(12), 365. https://doi.org/10.1007/s42452-023-05602-6

Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*, *12*(1), 6087. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10093-3

Kumar, D., Gihar, S., Shrivash, M. K., Kumar, P., & Kundu, P. P. (2020). A review on the synthesis of graft copolymers of chitosan and their potential applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *163*, 2097–2112. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.060

Kumari, S., Kumar Annamareddy, S. H., Abanti, S., & Kumar Rath, P. (2017). Physicochemical properties and characterization of chitosan synthesized from fish scales, crab and shrimp shells. *International Journal of Biological Macromolecules*, *104*, 1697–1705. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.119

Luthfiyana, N., Ratrinia, P. W., Rukisah, R., Asniar, A., & Hidayat, T. (2022). Optimasi Tahap Demineralisasi pada Ekstraksi Kitosan dari Cangkang Kepiting Bakau (Scylla sp.). *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, *25*(2). https://doi.org/10.17844/jphpi.v25i2.41853

Marín-Morales, M. S., Ibarra-Herrera, C. C., & Cervantes-Avilés, P. (2026). Coagulation-based wastewater treatment using chitosan extracted from exuviae of *Tenebrio molitor* and *Sphenarium purpurascens*. *Water Science & Technology*, *93*(5), 719–732. https://doi.org/10.2166/wst.2026.227

Midya, L., Das, R., Bhaumik, M., Sarkar, T., Maity, A., & Pal, S. (2019). Removal of toxic pollutants from aqueous media using poly (vinyl imidazole) crosslinked

chitosan synthesised through microwave assisted technique. *Journal of Colloid and Interface Science*, *542*, 187–197. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.01.121

Musa Rampengan, A., & Milian Tompunu Tengker, S. (2021). Analisa Sifat Kemagnetan Polimer Poliethylen Glycol (PEG-4000)-coated Nanopartikel Magnetite Fe3O4 Menggunakan Vibrating Sample Magnetometer (VSM). *Fullerene Journ. Of Chem*, *6*(2), 161–164. https://doi.org/10.37033/fjc.v6i2.376

Pramanik, D. Das, Garg, P., Ganesan, D., & Pramanik, A. (2024). Removal of malachite green from an aqueous environment using chitosan-xanthan gum coagulation system: A response surface methodology approach. *Journal of Water Process Engineering*, *65*, 105896. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105896

Rahmi, Fathurrahmi, Lelifajri, Purnamawati, F., & Sembiring, R. (2019). Preparation of Magnetic Chitosan Beads for Heavy Metal Ions Removal from Water. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *276*(1), 012004. https://doi.org/10.1088/1755-1315/276/1/012004

Reghioua, A., Barkat, D., Jawad, A. H., Abdulhameed, A. S., & Khan, M. R. (2021). Synthesis of Schiff's base magnetic crosslinked chitosan-glyoxal/ZnO/Fe3O4 nanoparticles for enhanced adsorption of organic dye: Modeling and mechanism study. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *20*, 100379. https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100379

Sun, Y., Yu, Y., Zheng, X., Chen, A., & Zheng, H. (2021). Magnetic flocculation of Cu(II) wastewater by chitosan-based magnetic composite flocculants with recyclable properties. *Carbohydrate Polymers*, *261*, 117891. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117891

Tang, T., & Fu, Y. (2020). Formation of Chitosan/Sodium Phytate/Nano-Fe3O4 Magnetic Coatings on Wood Surfaces via Layer-by-Layer Self-Assembly. *Coatings*, *10*(1), 51. https://doi.org/10.3390/coatings10010051

Wu, Z., Zhang, H., Ali, E., Shahab, A., Huang, H., Ullah, H., & Zeng, H. (2023). Synthesis of novel magnetic activated carbon for effective Cr(VI) removal via synergistic adsorption and chemical reduction. *Environmental Technology & Innovation*, *30*, 103092. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103092

Yeamsuksawat, T., Zhao, H., & Liang, J. (2021). Characterization and antimicrobial performance of magnetic Fe3O4@Chitosan@Ag nanoparticles synthesized via suspension technique. *Materials Today Communications*, *28*, 102481. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102481

You, L., Huang, C., Lu, F., Wang, A., Liu, X., & Zhang, Q. (2018). Facile synthesis of high performance porous magnetic chitosan - polyethylenimine polymer composite for Congo red removal. *International Journal of Biological Macromolecules*, *107*, 1620–1628. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.025