MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v5i6.7818

EFEKTIVITAS KITOSAN CANGKANG KEPITING SEBAGAI BIOKOAGULAN MIKROPLASTIK POLISTIRENA (PS) DALAM AIR LIMBAH

Effectiveness of Crab Shell Chitosan as a Biocoagulant for Polystyrene (PS) Microplastics in Wastewater

Afdal Ilahi & Indang Dewata
Universitas Negeri Padang
afdalilahi130701@gmail.com; indangdewata@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Sep 24, 2025	Oct 16, 2025	Oct 28, 2025	Nov 2, 2025

Abstract

This study is motivated by the limited research on the use of natural biocoagulants for microplastic removal, despite the significant environmental and human health impacts of this phenomenon. The aim of this research is to analyze the influence of pH variation, chitosan dosage, and settling time on the coagulation effectiveness of polystyrene (PS) microplastics, and to determine the process's optimum conditions. A quantitative method was employed, using PS microplastic solution samples (30 mg/L) treated under varying pH levels (4–10), chitosan doses (10–50 mg/L), and settling times (10–50 minutes). Data were collected through laboratory experiments and analyzed using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy and stereo microscopy. The results indicate that optimum conditions were achieved at pH 6, with a chitosan dose of 30 mg/L and a settling time of 30 minutes, resulting in microplastic removal efficiency exceeding 90%. These findings support the theory of electrostatic interactions between the amine groups in chitosan and the negatively charged surface of microplastics. The main conclusion is that crab shell-derived chitosan is effective as an environmentally

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

friendly biocoagulant for reducing microplastic content in wastewater. The study contributes to the growing literature on biocoagulation and offers practical recommendations for wastewater treatment managers to adopt sustainable natural coagulants. Moreover, it opens avenues for future research on chitosan-based composites for treating various types of microplastics.

Keywords: Chitosan; Crab Shell; Coagulation; Microplastics; Polystyrene

Abstrak: Penelitian ini dilatarbelakangi oleh masih terbatasnya studi mengenai penggunaan biokoagulan alami untuk penghilangan mikroplastik, meskipun fenomena ini berdampak signifikan terhadap ekosistem perairan dan kesehatan manusia. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi pH, dosis kitosan, dan waktu pengendapan terhadap efektivitas koagulasi mikroplastik polistirena (PS), serta menentukan kondisi optimum prosesnya. Metode yang digunakan bersifat kuantitatif dengan sampel berupa larutan mikroplastik PS (30 mg/L) yang diolah melalui variasi pH (4–10), dosis kitosan (10–50 mg/L), dan waktu pengendapan (10–50 menit). Data diperoleh melalui eksperimen laboratorium dan dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) serta mikroskop stereo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum tercapai pada pH 6, dosis kitosan 30 mg/L, dan waktu pengendapan 30 menit, dengan efisiensi penghilangan mikroplastik mencapai lebih dari 90%. Temuan ini mendukung teori interaksi elektrostatik antara gugus amina pada kitosan dan permukaan mikroplastik bermuatan negatif. Simpulan utama penelitian ini adalah bahwa kitosan dari cangkang kepiting terbukti efektif sebagai biokoagulan ramah lingkungan untuk mengurangi mikroplastik dalam air limbah. Implikasi penelitian mencakup kontribusi terhadap pengembangan literatur biokoagulasi dan memberikan rekomendasi praktis bagi pengelola air limbah untuk mengadopsi koagulan alami yang berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini membuka peluang studi lanjutan mengenai formulasi komposit kitosan untuk pengolahan berbagai jenis mikroplastik lainnya.

Kata Kunci: Kitosan; Cangkang Kepiting; Koagulasi; Mikroplastik; Polistirena

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, pencemaran mikroplastik menjadi isu lingkungan yang banyak dibahas di tingkat global. Mikroplastik adalah potongan plastik berukuran sangat kecil (kurang dari 5 mm) yang terbentuk akibat proses degradasi plastik di alam maupun yang sengaja diproduksi untuk kebutuhan industri. Keberadaannya kini ditemukan hampir di seluruh ekosistem perairan, mulai dari laut, sungai, danau, hingga air minum (Foladori et al., 2024). Kondisi ini menjadi perhatian serius karena partikel mikroplastik mampu menyerap dan membawa senyawa berbahaya seperti logam berat serta zat organik persisten yang dapat masuk ke rantai makanan (Foladori et al., 2024). Di Indonesia sendiri, peningkatan konsumsi plastik dan minimnya pengelolaan limbah memperparah penyebaran mikroplastik di perairan.

Situasi ini menunjukkan bahwa isu mikroplastik bukan hanya masalah kebersihan lingkungan, tetapi juga berpotensi mengancam kesehatan manusia dalam jangka panjang. Oleh sebab itu, dibutuhkan metode yang sederhana, efisien, dan ramah lingkungan untuk mengurangi kandungan mikroplastik dari air limbah.

Upaya penanganan mikroplastik telah dilakukan melalui berbagai pendekatan seperti filtrasi membran, adsorpsi, fotodegradasi, hingga koagulasi-flokulasi. Dari berbagai metode tersebut, koagulasi dianggap paling ekonomis dan mudah diterapkan dalam skala besar. Berdasarkan teori dasar koagulasi (Khan et al., 2023), proses ini bekerja dengan menetralkan muatan partikel tersuspensi agar dapat saling berikatan dan membentuk flok. Namun, penggunaan koagulan kimia seperti aluminium sulfat atau feri klorida sering menimbulkan residu yang dapat mencemari lingkungan. Beberapa peneliti, seperti Bahrodin et al., (2021), menyarankan penggunaan koagulan alami yang lebih aman dan dapat terurai secara hayati. Salah satu bahan yang banyak mendapat perhatian adalah kitosan, turunan kitin yang diperoleh dari cangkang kepiting. Kitosan memiliki gugus amina bermuatan positif yang dapat berinteraksi dengan mikroplastik bermuatan negatif, sehingga berpotensi efektif dalam mengikat dan mengendapkan partikel tersebut (Hong et al., 2024). Dengan mempertimbangkan sifatnya yang ramah lingkungan dan mudah didapat, peneliti memandang kitosan sebagai alternatif menjanjikan bagi pengolahan air limbah yang terkontaminasi mikroplastik.

Beberapa studi sebelumnya telah meneliti penghilangan mikroplastik melalui metode koagulasi oleh Berliana & Nurhayati (2022), melaporkan tingkat pengikatan mikroplastik hingga 70,6% pada air minum sintetis. Namun, penelitian tersebut belum menggunakan sumber koagulan alami dari limbah laut dan belum mengkaji kondisi optimum prosesnya seperti pengaruh pH, dosis koagulan, dan waktu pengendapan. Di sisi lain, Khan et al. (2023), menemukan bahwa alum dapat menghilangkan hingga 85% mikroplastik polistirena, tetapi penggunaan bahan kimia tersebut dapat menimbulkan residu logam berat yang tidak ramah lingkungan. Penelitian berbasis biokoagulan seperti kitosan dari cangkang kepiting (Portunus sanguinolentus) masih jarang dilakukan, khususnya pada air limbah dengan kondisi nyata. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya penelitian yang tidak hanya menilai efektivitas biokoagulan, tetapi juga memahami kondisi optimal agar proses koagulasi dapat diterapkan secara efisien dan berkelanjutan.

Penelitian ini menawarkan pendekatan baru dalam pemanfaatan limbah cangkang kepiting sebagai sumber bahan kitosan untuk biokoagulasi mikroplastik polistirena (PS). Polistirena dipilih karena merupakan salah satu jenis mikroplastik yang paling sering ditemukan di lingkungan akibat penggunaan kemasan makanan dan styrofoam sekali pakai (Khan et al., 2023). Menurut teori interaksi elektrostatik (Esmaeili Nasrabadi et al., 2025), gugus amina pada kitosan yang terprotonasi menjadi $–NH_3^+$ dapat berikatan dengan permukaan PS yang bermuatan negatif. Proses ini diperkuat oleh mekanisme jembatan polimer (bridging) dan gaya hidrofobik, yang bersama-sama menghasilkan flok besar yang mudah mengendap. Dengan demikian, kajian ini berkontribusi dalam memperluas pemahaman tentang potensi biopolimer lokal sebagai koagulan alami.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini difokuskan untuk mengkaji efektivitas kitosan dari cangkang kepiting (Portunus sanguinolentus) sebagai biokoagulan dalam menghilangkan mikroplastik polistirena (PS) dari air limbah. Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh variasi pH, dosis kitosan, dan waktu pengendapan terhadap efektivitas proses koagulasi; serta (2) menentukan kondisi optimum berdasarkan efisiensi penghilangan dan hasil karakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR) dan mikroskop stereo. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam penerapan biokoagulan alami yang berkelanjutan untuk pengolahan air limbah dan perlindungan ekosistem perairan.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang. Jenis penelitian ini dipilih karena bertujuan untuk mengamati hubungan sebab-akibat antara variabel bebas berupa kondisi operasi koagulasi (pH, massa kitosan, dan waktu pengendapan) terhadap variabel terikat yaitu efisiensi penghilangan mikroplastik polistirena (PS) dari media air. Pendekatan eksperimen memungkinkan pengujian hipotesis melalui pengendalian kondisi laboratorium secara sistematis dan terukur.

Kitosan diekstraksi dari limbah cangkang kepiting oleh Naidir et al. (2020), melalui tiga tahap:

1. Demineralisasi: serbuk cangkang direndam dalam HCl 1 M (1:10 b/v) pada 60°C selama 2 jam.

2. Deproteinasi: residu hasil demineralisasi direndam dalam NaOH 3,5% pada 65°C selama 3 jam.
3. Deasetilasi: kitin yang diperoleh direaksikan dengan NaOH 40% pada 100°C selama 2 jam.

Mikroplastik PS disiapkan secara laboratorium dengan menggiling dan mengayak plastik polistirena hingga ukuran <2 mm. Larutan uji dibuat dengan konsentrasi awal 30 mg/L dalam 250 mL akuades. Variabel bebas meliputi:

- pH larutan: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- Dosis kitosan: 10, 20, 30, 40, 50 mg/L
- Waktu pengendapan: 10, 20, 30, 40, 50 menit

Proses koagulasi dilakukan dengan pengadukan cepat (300 rpm, 30 menit), diikuti pengendapan sesuai variasi waktu. Efisiensi penghilangan dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Efisiensi (\%)} = ((C_0 - C_t) / C_0) \times 100\%$$

di mana C_0 adalah konsentrasi awal mikroplastik dan C_t adalah konsentrasi akhir setelah proses koagulasi. Nilai efisiensi rata-rata dari setiap variasi pH, dosis kitosan, dan waktu pengendapan dibandingkan untuk menentukan kondisi optimum. Selain itu, hasil FTIR dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi perubahan intensitas atau pergeseran pita serapan yang menunjukkan adanya interaksi antara kitosan dan mikroplastik PS. Hasil pengamatan mikroskop stereo digunakan untuk mendukung interpretasi visual terhadap pembentukan flok. Analisis dilakukan secara sistematis untuk memperoleh hubungan antara variabel dan memahami mekanisme koagulasi yang terjadi (Ghanem et al., 2025).

HASIL

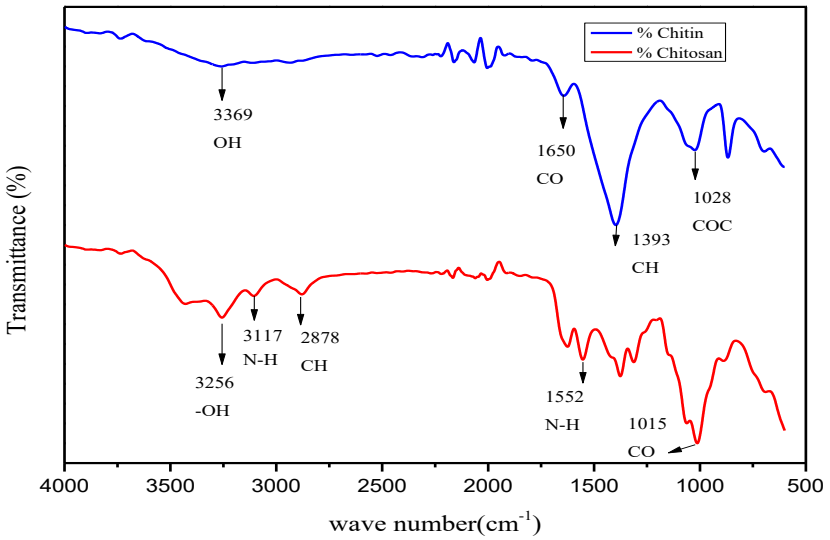
Data penelitian menunjukkan bahwa variasi pH, massa kitosan, dan waktu penge Karakterisasi dilakukan menggunakan dua jenis instrumen, yaitu analisis FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi kimia. Tujuan utama dari tahap ini adalah untuk mengonfirmasi mekanisme penghilangan mikroplastik, apakah terjadi karena proses fisik seperti pengikatan partikel melalui jembatan polimer (bridging) atau karena interaksi kimia melalui pembentukan ikatan elektrostatik antara gugus aktif pada kitosan dengan permukaan polistirena.

Table 1. Efisiensi Penghilangan Mikroplastik Polistirena (PS) pada Berbagai Kondisi Koagulasi

Variabel	Kondisi Uji	Efisiensi Penghilangan (%)
pH	4	33,3
	5	40,0
	6	61,7
	7	76
	8	65,3
	9	55,3
	10	17,3
Dosis Kitosan	10 mg/L	45,3
	20 mg/L	71,0
	30 mg/L	77,0
	40 mg/L	83
	50 mg/L	51,7
Waktu Endap	10 menit	66,0
	20 menit	76,3
	30 menit	82,0
	40 menit	93
	50 menit	79,3

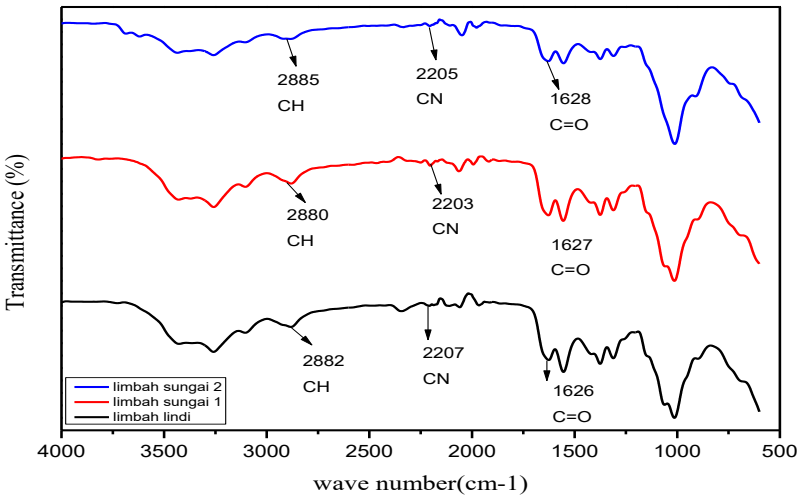
Berdasarkan data tersebut, kondisi optimum proses koagulasi tercapai pada kombinasi pH 7, dosis kitosan 40 mg/L, dan waktu pengendapan 40 menit, dengan efisiensi penghilangan mikroplastik PS mencapai 93,0%. Nilai ini merupakan hasil tertinggi yang diperoleh dalam seluruh rangkaian percobaan laboratorium.

Selain data kuantitatif, karakterisasi visual menggunakan mikroskop stereo menunjukkan pembentukan flok berukuran besar, tidak beraturan, dan bertekstur kasar pada kondisi optimum. Sementara itu, analisis FTIR mengonfirmasi adanya perubahan intensitas pita khas PS yang mengindikasikan terjadinya interaksi antara gugus amina kitosan dan permukaan mikroplastik.



Gambar 1. Spektrum FTIR Kitin dan Kitosan

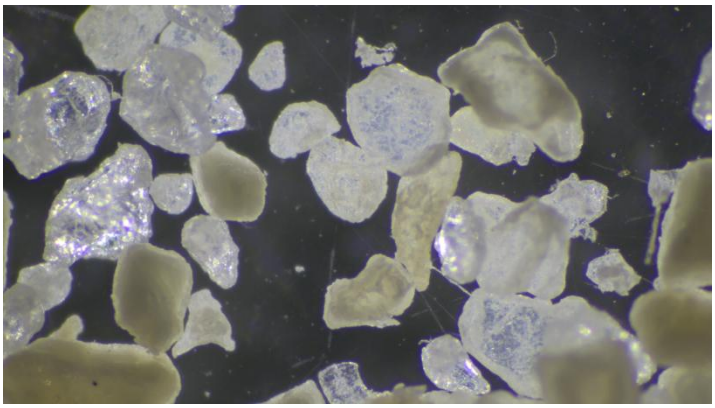
Hasil analisis FTIR menunjukkan perbedaan yang jelas antara spektrum kitin dan kitosan. Pada spektrum kitin (garis biru), tampak pita serapan kuat pada 1650 cm^{-1} dan 1550 cm^{-1} yang masing-masing merepresentasikan regangan C=O (Amida I) dan deformasi N–H (Amida II) dari gugus asetil. Intensitas kedua pita tersebut menurun secara signifikan pada spektrum kitosan (garis merah), menunjukkan bahwa sebagian besar gugus asetil telah terlepas selama proses deasetilasi menggunakan NaOH 40% pada suhu tinggi.



Gambar 2. Spektrum FTIR flok air limbah lindi, limbah sungai 1 dan limbah sungai 2

Berdasarkan hasil analisis FTIR terhadap flok yang terbentuk dari sampel air limbah lindi sampah, teramati adanya puncak serapan pada bilangan gelombang 2882,27 cm^{-1} yang mengindikasikan vibrasi regangan C–H alifatik. Puncak ini adalah puncak yang umum

ditemukan pada berbagai jenis polimer plastik, termasuk polietilena (PE), polipropilena (PP), dan polistirena (PS).



Gambar 3. Hasil pengamatan mikroskop stereo dari flok hasil koagulasi antara mikroplastik polistirena (PS) dengan kitosan.

Gambar 3. menunjukkan hasil pengamatan morfologi flok hasil koagulasi antara mikroplastik polistirena (PS) dan kitosan menggunakan mikroskop stereo. Gambar menunjukkan bahwa partikel mikroplastik yang sebelumnya berbentuk butiran halus dan terpisah kini tampak menggumpal membentuk agregat besar tidak beraturan. Agregat tersebut memiliki permukaan yang relatif kasar dengan lapisan semi-transparan yang menutupi sebagian partikel, mengindikasikan adanya adsorpsi dan pembentukan jembatan (bridging) oleh kitosan pada permukaan PS.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi koagulasi mikroplastik polistirena (PS) sangat dipengaruhi oleh tiga parameter utama: pH larutan, dosis kitosan, dan waktu pengendapan. Kondisi optimum tercapai pada pH 7, dosis kitosan 40 mg/L, dan waktu pengendapan 40 menit, dengan efisiensi penghilangan mencapai 93%. Temuan ini konsisten dengan prinsip dasar koagulasi berbasis interaksi elektrostatik antara koagulan bermuatan positif dan partikel koloid bermuatan negatif.

Pada pH 7, gugus amina ($–NH_2$) pada kitosan mengalami protonasi parsial menjadi $–NH_3^+$, yang cukup untuk menetralkan muatan negatif permukaan PS tanpa menyebabkan kelarutan berlebihan atau repulsi antarmolekul. Hal ini sejalan dengan laporan Djajadi et al. (2024), bahwa pH netral memberikan keseimbangan optimal antara stabilitas flok dan daya

tarik elektrostatik. Sebaliknya, pada pH ekstrem (asam <6 atau basa >8), efisiensi menurun drastis. Pada pH asam, protonasi berlebih menyebabkan kitosan terlalu larut dan kehilangan kemampuan *bridging*, sedangkan pada pH basa, gugus amina terdeprotonasi sehingga muatan positif berkurang—kondisi ini menghambat pembentukan flok, sebagaimana juga dilaporkan oleh Azizi et al. (2023).

Peningkatan dosis kitosan dari 10 hingga 40 mg/L meningkatkan efisiensi secara signifikan karena lebih banyak gugus $–NH_3^+$ tersedia untuk mengikat partikel PS. Namun, pada dosis 50 mg/L, efisiensi justru turun menjadi 51,7%. Fenomena ini mengindikasikan terjadinya *overdosing*, di mana kelebihan muatan positif menyebabkan flok yang telah terbentuk kembali bermuatan positif dan saling tolak-menolak. Kondisi serupa dilaporkan oleh Putranto et al. (2023) dalam penggunaan kitosan terhadap suspensi koloid, di mana dosis berlebih justru menurunkan stabilitas agregat.

Waktu pengendapan juga menentukan keberhasilan proses. Efisiensi meningkat hingga mencapai puncak pada 40 menit, lalu menurun pada 50 menit. Hal ini menunjukkan bahwa waktu 40 menit cukup bagi flok untuk tumbuh stabil dan mengendap, sementara durasi lebih lama memicu gangguan hidrodinamis mikro atau gaya apung partikel PS yang ringan, sehingga sebagian flok kembali terdispersi. Temuan ini selaras dengan observasi Xue et al. (2021), bahwa partikel berdensitas rendah seperti PS memerlukan waktu pengendapan optimal—tidak terlalu singkat, namun juga tidak berlebihan.

Karakterisasi FTIR memberikan bukti kuat adanya interaksi antara kitosan dan PS. Penurunan intensitas pita khas PS pada 752 cm^{-1} dan 691 cm^{-1} (tekukan C–H aromatik) setelah koagulasi menunjukkan bahwa permukaan PS telah tertutupi oleh rantai kitosan. Selain itu, spektrum flok dari air limbah menunjukkan puncak pada 2882 cm^{-1} (C–H alifatik) dan 2207 cm^{-1} (C≡N), yang merupakan ciri khas polimer sintetis seperti PE, PP, dan ABS—mengonfirmasi bahwa kitosan mampu mengikat berbagai jenis mikroplastik dalam air limbah nyata, bukan hanya PS murni (Castro Monsores et al., 2021).

Pengamatan mikroskop stereo memperkuat temuan ini. Flok yang terbentuk pada kondisi optimum tampak besar, tidak beraturan, dan bertekstur kasar—karakteristik khas agregat yang stabil akibat mekanisme *charge neutralization* dan *polymer bridging*. Struktur ini berbeda jauh dari partikel PS awal yang halus, terpisah, dan mengapung, menandakan bahwa kitosan berhasil mengubah sifat fisik partikel melalui adsorpsi permukaan (Yao et al., 2023).

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa kitosan dari cangkang kepiting (*Portunus sanguinolentus*) bukan hanya efektif secara laboratorium, tetapi juga aplikatif pada air limbah kompleks. Efisiensi 93% pada kondisi optimum bahkan melebihi hasil penelitian sebelumnya yang menggunakan kitosan terhadap PS (misalnya Berliana & Nurhayati (2022): 70,6%), menunjukkan bahwa optimasi parameter operasional sangat menentukan kinerja biokoagulan.

Namun, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, pengujian dilakukan pada skala laboratorium dengan volume terbatas (250 mL), sehingga belum merepresentasikan kondisi lapangan. Kedua, analisis FTIR dilakukan pada sampel *bulk*, bukan partikel individual, sehingga identifikasi jenis mikroplastik dalam air limbah masih bersifat indikatif. Ketiga, variabel seperti suhu, kekeruhan, dan keberadaan ion logam dalam air limbah nyata belum dikontrol secara ketat, yang berpotensi memengaruhi efisiensi koagulasi.

Meski demikian, temuan ini membuka jalan bagi penerapan kitosan sebagai koagulan berkelanjutan dalam pengolahan air. Pemanfaatan limbah cangkang kepiting tidak hanya mengurangi volume sampah perikanan, tetapi juga menghasilkan bahan aktif yang efektif, biodegradable, dan bebas residu berbahaya—sebuah solusi ganda untuk isu lingkungan dan pengelolaan sumber daya pesisir.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengkaji efektivitas kitosan dari cangkang kepiting (*Portunus sanguinolentus*) sebagai biokoagulan alami dalam menghilangkan mikroplastik polistirena (PS) dari air limbah. Hasil menunjukkan bahwa kondisi optimum tercapai pada pH 7, dosis kitosan 40 mg/L, dan waktu pengendapan 40 menit, dengan efisiensi penghilangan mencapai 93%. Pada kondisi tersebut, interaksi elektrostatik antara gugus $–NH_3^+$ kitosan dan permukaan PS bermuatan negatif berlangsung optimal, didukung oleh mekanisme *polymer bridging* dan gaya hidrofobik yang memperkuat pembentukan flok. Karakterisasi FTIR mengonfirmasi adanya penurunan intensitas pita khas PS (752 cm^{-1} dan 691 cm^{-1}), mengindikasikan terjadinya interaksi kimia antara kitosan dan mikroplastik. Sementara itu, pengamatan mikroskop stereo menunjukkan flok berukuran besar, tidak beraturan, dan bertekstur kasar—bukti visual keberhasilan agregasi partikel. Temuan ini membuktikan

bahwa limbah cangkang kepiting dapat dimanfaatkan sebagai sumber biokoagulan berkelanjutan yang efektif, aman, dan ramah lingkungan.

Penelitian ini memberikan kontribusi empiris dalam pengembangan teknologi pengolahan air berbasis bahan alami, sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah perikanan. Implikasinya mencakup potensi penerapan skala pilot di instalasi pengolahan air limbah, terutama di wilayah pesisir dengan ketersediaan limbah cangkang kepiting yang melimpah. Sebagai rekomendasi, penelitian lanjutan disarankan untuk menguji performa kitosan terhadap jenis mikroplastik lain seperti PE, PP, dan PET.

DAFTAR PUSTAKA

Azizi, N., Pirsaheb, M., Jaafarzadeh, N., & Nabizadeh Nodehi, R. (2023). Microplastics removal from aquatic environment by coagulation: Selecting the best coagulant based on variables determined from a systematic review. Heliyon, 9(5), e15664. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15664

Bahrodin, M. B., Zaidi, N. S., Hussein, N., Sillanpää, M., Prasetyo, D. D., & Syafiuddin, A. (2021). Recent advances on coagulation-based treatment of wastewater: Transition from chemical to natural coagulant. Current Pollution Reports, 7(3), 379–391.

Berliana, K. S., & Nurhayati, E. (2022). Pengolahan Air Minum Tegal Besar Di Pdam.

Castro Monsores, K. G. de, Silva, A. O. da, Sant' Ana Oliveira, S. de, Weber, R. P., Filho, P. F., & Monteiro, S. N. (2021). Influence of ultraviolet radiation on polystyrene. Journal of Materials Research and Technology, 13, 359–365. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.035

Djajadi, D. T., Müller, S., Fiutowski, J., Rubahn, H. G., Thygesen, L. G., & Posth, N. R. (2024). Interaction of chitosan with nanoplastic in water: The effect of environmental conditions, particle properties, and potential for in situ remediation. Science of the Total Environment, 907(July 2023), 167918. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167918

Esmaeili Nasrabadi, A., Babaei, N., & Bonyadi, Z. (2025). Effect of ozonation on the morphological characteristics and adsorption behavior of polystyrene microplastics in aqueous environments. Applied Water Science, 15(5), 1–8. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02443-z

Fitriyah, A., Syafrudin, S., & Sudarno, S. (2022). Identifikasi Karakteristik Fisik Mikroplastik di Sungai Kalimas, Surabaya, Jawa Timur. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia, 21(3), 350–357. https://doi.org/10.14710/jkli.21.3.350-357

Foladori, P., Lucchini, G., Torboli, A., & Bruni, L. (2024). Flow cytometry as a tool for the rapid enumeration of 1-μm microplastics spiked in wastewater and activated sludge after coagulation-flocculation-sedimentation. Chemosphere, 359(January), 142328. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142328

Ghanem, S. N., Marzouk, M. I., Tawfik, M. E., & Eskander, S. B. (2025). Spectroscopic approaches for structural analysis of extracted chitosan generated from chitin

deacetylated for escalated periods. BMC Chemistry, 19(1). https://doi.org/10.1186/s13065-025-01558-3

Hong, F., Qiu, P., Wang, Y., Ren, P., Liu, J., Zhao, J., & Gou, D. (2024). Chitosan-based hydrogels: From preparation to applications, a review. Food Chemistry: X, 21(8326), 101095. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101095

Julianti, E., Fabiani, V. A., & Asriza, R. O. (2020). The Sintesis dan Karakterisasi Komposit Fe3O4/Kitosan/Kaolin Bangka. Stannum : Jurnal Sains Dan Terapan Kimia, 2(2), 10–15. https://doi.org/10.33019/jstk.v2i2.1897

Khan, M. T., Ahmad, M., Hossain, M. F., Nawab, A., Ahmad, I., Ahmad, K., & Panyametheekul, S. (2023). Microplastic removal by coagulation: a review of optimizing the reaction conditions and mechanisms. Water Emerging Contaminants and Nanoplastics, 2(4). https://doi.org/10.20517/wecn.2023.39

Naidir, F., Lubena, Andrian, B., & Sandi, A. D. (2020). Penurunan Turbidity, pH, Kadar Fe Menggunakan Biokoagulan Kitosan dari Cangkang Rajungan (Portunus pelagicus). Jurnal Konversi, 9(1), 7–16.

Putranto, P. A., Khoironi, A., & Baihaqi, R. A. (2023). Journal of Emerging Science and Engineering Optimisation of chitosan as a natural flocculant for microplastic remediation. J. Emerg. Sci. Eng, 2023(2), 44–50. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Xue, J., Peldszus, S., Van Dyke, M. I., & Huck, P. M. (2021). Removal of polystyrene microplastic spheres by alum-based coagulation-flocculation-sedimentation (CFS) treatment of surface waters. Chemical Engineering Journal, 422(April), 130023. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130023

Yao, J., Peng, Z., Chen, W., Lin, Q., Cheng, M., Li, H., Yang, Y., & Yang, H. Y. (2023). Surface characteristics of polystyrene microplastics mainly determine their coagulation performances. Marine Pollution Bulletin, 186, 114347.