

MIKROPLASTIK PADA KONTINUM AIR TAWAR–LAUT: TRANSPORTASI SUMBER-KE-ENDAPAN, RISIKO PLASTISFER, DAN MITIGASI TERINTEGRASI

MICROPLASTICS IN THE FRESHWATER–MARINE CONTINUUM: SOURCE-TO-SINK TRANSPORT, PLASTISPHERE-ASSOCIATED RISKS, AND INTEGRATED MITIGATION

Ratno Achyani¹⁾

1) Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Program Studi Manajemen Sumber Daya Perairan,
Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Indonesia
Email: ratno_achyani@yahoo.com

ABSTRAK

Tinjauan ini mensintesis bukti terbaru mengenai transportasi dan risiko mikroplastik pada sistem air tawar, estuari, dan pesisir. Literatur dihimpun dari Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed/PMC, serta sumber institusional terpilih dengan kombinasi kata kunci terkait mikroplastik, air tawar, estuari, perairan pesisir, transportasi sumber-ke-endapan, partisi vertikal, plastisfer, limpasan hujan, air limbah, dan mitigasi. Prioritas diberikan pada studi peer-reviewed tahun 2023–2026, sementara studi dasar dan dokumen kebijakan dipertahankan apabila mendukung definisi, metode, atau interpretasi pengelolaan. Sintesis menunjukkan bahwa keberadaan mikroplastik lebih dikendalikan oleh konektivitas hidrologis, kejadian hujan, retensi sedimen, stratifikasi vertikal, pertukaran air tanah, dan struktur habitat dibandingkan gradien hulu–hilir sederhana. Penilaian risiko juga bergeser dari fokus ingesti menuju bahaya yang dimediasi plastisfer, termasuk patogen, gen resistensi antibiotik, elemen genetik bergerak, dan ko-kontaminan. Mitigasi yang efektif memerlukan portofolio terpadu berupa reduksi sumber, intersepsi limpasan, pemolesan air limbah, pengelolaan sedimen dan habitat, pemantauan terstandar, serta kebijakan berbasis siklus hidup.

Kata Kunci: air limbah; air tawar; estuari; mikroplastik; plastisfer; transportasi sumber-ke-endapan, limpasan hujan; air limbah

ABSTRACT

This review synthesizes recent evidence on the transport and risks of microplastics in freshwater, estuarine, and coastal systems. The literature was compiled from Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed/PMC, and selected institutional sources using a combination of keywords related to microplastics, freshwater, estuarine waters, coastal waters, source-to-sink transport, vertical partitioning, plastisphere, stormwater runoff, wastewater, and mitigation. Priority was given to peer-reviewed studies published between 2023 and 2026, while foundational studies and policy documents were retained where they provided support for definitions, methodological approaches, or management interpretations. The synthesis indicates that the occurrence of microplastics is less governed by a simple upstream-to-downstream gradient than by hydrological connectivity, rainfall events, sediment retention, vertical stratification, groundwater exchange, and habitat structure. Recent studies further demonstrate that subsurface waters, bottom waters, sediments, wetlands, vegetated shorelines, and nearshore groundwater may contain microplastic loads comparable to or higher than those found in surface waters. Risk assessment has evolved beyond a primary focus on ingestion toward plastisphere-mediated hazards, including the enrichment of pathogens, antibiotic resistance genes, mobile genetic elements, and interactions with tire-derived contaminants and other co-contaminants. Evidence on mitigation supports an integrated portfolio combining source reduction, stormwater interception, wastewater polishing, sediment and habitat management, standardized monitoring, and policy instruments based on a life-cycle perspective. Future research should

prioritize reproducible multi-compartment monitoring, event-based flux estimation, harmonization of polymer identification and confirmation methods, and management frameworks that connect land-based sources with estuarine and coastal sinks.

Keywords: *Freshwater microplastics; estuarine microplastics; plastisphere; source-to-sink transport; stormwater runoff; wastewater*

PENDAHULUAN

Penelitian mikroplastik telah bergeser dari sekadar mendokumentasikan keberadaan yang luas menuju penjelasan tentang bagaimana partikel bergerak, terakumulasi, dan berinteraksi dengan organisme serta kontaminan di seluruh sistem perairan yang saling terhubung. Ekosistem air tawar, estuari, dan laut pesisir bukanlah kompartemen yang terisolasi; semuanya membentuk suatu kontinum tempat partikel yang berasal dari daratan dapat dimobilisasi oleh limpasan, diangkut melalui sungai, tersimpan dalam sedimen atau biota, dimobilisasi kembali oleh peristiwa hidrodinamika, dan akhirnya masuk ke perairan pesisir (Jin et al., 2025; Zhao et al., 2024; Zhao et al., 2025). Perspektif kontinum ini sangat penting karena survei air permukaan saja dapat melewatkan beban penting di perairan dasar, zona hiporeik, lahan basah, air tanah dekat pantai, sedimen, dan matriks biotik.

Meskipun literatur berkembang pesat, empat masalah yang belum terselesaikan masih membatasi sintesis dan pengelolaan. Pertama, studi keberadaan masih sulit dibandingkan karena volume pengambilan sampel, ambang ukuran, protokol ekstraksi, dan metode konfirmasi polimer sangat beragam. Kedua, banyak inventaris masih menekankan air permukaan, padahal bukti terbaru menunjukkan adanya partisi vertikal dan sedimenter yang kuat. Ketiga, pembagian kontribusi sumber masih tidak pasti karena efluen air limbah, limpasan hujan, keausan ban, serat tekstil, fragmen kemasan, bahan terkait perikanan, serta produk biodegradable atau selulosa mengikuti jalur yang berbeda. Keempat, risiko ekologis tidak lagi dapat dinilai hanya dari jumlah partikel karena mikroplastik juga berfungsi sebagai substrat biofilm dan

pembawa potensial bahaya kimia serta mikroba (Bydalek et al., 2023; Feng et al., 2023; Zhang et al., 2026).

Tinjauan ini mengajukan tiga pertanyaan: (i) bagaimana studi terbaru menggambarkan distribusi mikroplastik dari sumber-ke-endapan di sepanjang kontinum air tawar-laut; (ii) mekanisme apa yang menjelaskan partisi vertikal, retensi sedimen, dan remobilisasi episodik; serta (iii) bagaimana risiko plastisfer dan prioritas mitigasi seharusnya diintegrasikan ke dalam pemantauan dan pengelolaan? Tujuannya adalah memberikan sintesis yang dapat direproduksi dan relevan secara regional bagi ilmuwan perairan dan pengelola lingkungan, dengan penekanan pada mekanisme, kontradiksi, dan implikasi kebijakan, bukan sekadar katalog catatan keberadaan.

METODE PENELITIAN

Tinjauan ini disusun sebagai sintesis naratif terstruktur. Penelusuran dilakukan melalui Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed/PMC, dan Google Scholar, serta dilengkapi sumber institusional dan kebijakan dari OECD, UNEP, Komisi Eropa, U.S. Environmental Protection Agency, WHO, dan NOAA. Istilah pencarian menggabungkan microplastic* OR nanoplastic* dengan freshwater, river*, lake*, wetland*, estuar*, coastal, marine, sediment, groundwater, source-to-sink, vertical distribution, plastisphere, pathogen*, antibiotic resistance, wastewater, stormwater, runoff, tire wear, 6PPD-quinone, mitigation, monitoring, dan policy. Periode pembaruan utama adalah 2023–2026, sedangkan studi terdahulu tetap dipertahankan apabila menetapkan definisi, prinsip metodologis, atau konsep pengelolaan yang banyak dirujuk.

Studi diprioritaskan apabila memenuhi setidaknya satu dari kriteria berikut: pengambilan sampel multi-kompartemen; analisis vertikal atau sumber-ke-endapan; interpretasi hidrologis atau musiman yang eksplisit; identifikasi polimer; penilaian mikroba atau plastisfer; bukti mitigasi kuantitatif; atau relevansi langsung terhadap konektivitas air tawar–estuair–pesisir. Studi dikeluarkan dari sintesis terperinci apabila hanya melaporkan nilai keberadaan yang terpisah tanpa rincian metodologis, tidak memberikan informasi matriks yang jelas, atau tidak relevan secara langsung terhadap transportasi, risiko, atau pengelolaan perairan. Karena naskah ini merupakan tinjauan dan bukan meta-analisis formal, temuan yang diekstraksi disintesis secara komparatif berdasarkan tema: kelas sumber, pola distribusi, transportasi dan partisi vertikal, konsekuensi ekologis dan mikrobiologis, serta prioritas pemantauan dan mitigasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil sumber dan kelas partikel baru

Pembedaan klasik antara mikroplastik primer dan sekunder masih berguna, tetapi bukti terbaru menunjukkan bahwa klasifikasi tersebut belum memadai untuk pengelolaan perairan saat ini. Partikel sekunder yang terbentuk akibat fragmentasi sampah berukuran lebih besar tetap umum ditemukan di sungai dan sistem pesisir, dan serat serta fragmen masih mendominasi banyak inventaris (Akdogan et al., 2023; Amenábar et al., 2024; Graham et al., 2024). Namun, profil sumber modern semakin mencakup partikel dari keausan ban dan jalan, residu cat, campuran karet sintetis, serat selulosa regenerasi, tisu basah, serta partikel terkait plastik lainnya yang tidak selalu sesuai dengan kategori lama (Allison et al., 2026; Barber et al., 2025; Ihenetu et al., 2024).

Di antara polimer konvensional, polietilena, polipropilena, polietilena tereftalat, poliamida, dan polistirena berulang kali ditemukan pada matriks air tawar, estuari,

dan laut. Namun demikian, kelimpahan saja sering kali kurang informatif dibandingkan profil polimer dan morfologi yang ditafsirkan bersama penggunaan lahan dan hidrologi. Sebagai contoh, sungai perkotaan dan daerah aliran industri dapat menunjukkan pergeseran musiman yang kuat dalam ciri polimer, sedangkan muara sungai dan perangkap estuari dapat memekatkan partikel yang berasal dari kemasan, air limbah, pelayaran, limpasan jalan, atau aktivitas perikanan (Arredondo-Navarro et al., 2025; Huang et al., 2023; Pham et al., 2024).

Material yang berasal dari ban perlu mendapat perhatian khusus karena diproduksi secara terus-menerus, terbawa oleh limpasan hujan, dan berkaitan dengan produk transformasi yang bersifat toksik. Studi mengenai partikel keausan ban dan jalan di sistem pesisir menghubungkan limpasan perkotaan dengan pengendapan di laut, sementara tinjauan terbaru tentang 6PPD dan 6PPD-quinone menunjukkan bahwa bahaya kimia yang terkait dengan partikel tidak dapat dinilai hanya berdasarkan jumlahnya (Barber et al., 2025; Bohara et al., 2024; Ihenetu et al., 2024; U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Demikian pula, produk yang disebut biodegradable atau berbasis selulosa masih dapat bertahan dan terfragmentasi di sungai. Oleh karena itu, substitusi produk memerlukan validasi lingkungan dalam kondisi aliran, suhu, dan mikroba yang realistis, bukan hanya berdasarkan label material (Allison et al., 2026; European Commission, 2023b).

3.2 Distribusi pada kontinum air tawar–laut

Bukti keberadaan terbaru memperkuat pandangan bahwa kontinum air tawar–laut bekerja melalui retensi selektif dan perpindahan episodik, bukan melalui pengenceran linear. Sungai dan aliran air membawa partikel, tetapi lahan basah, danau, estuari, teluk, garis pantai bervegetasi, sedimen, dan air tanah dekat pantai dapat berfungsi sebagai wilayah

penyimpanan sementara maupun jangka panjang. Studi yang dihimpun dalam naskah ini menunjukkan bahwa sedimen sering mengandung beban yang serupa atau lebih besar dibandingkan air di atasnya, tetapi keterkaitan air-sedimen tidak selalu langsung karena bergantung pada rezim aliran, densitas partikel, biofouling, resuspensi, dan waktu pengambilan sampel (Graham et al., 2024; Kieu-Le et al., 2023; Samuels et al., 2024).

Sebaran mikroplastik pada sistem estuari menunjukkan variasi spasial yang luas dan mencerminkan pengaruh kombinasi sumber antropogenik, kondisi hidrodinamika, serta karakteristik lingkungan setempat. Gambaran mengenai distribusi mikroplastik yang telah dilaporkan pada berbagai estuari di dunia disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi global representatif pencemaran mikroplastik yang dilaporkan di estuari.
Sumber: Ayaz et al. (2025)

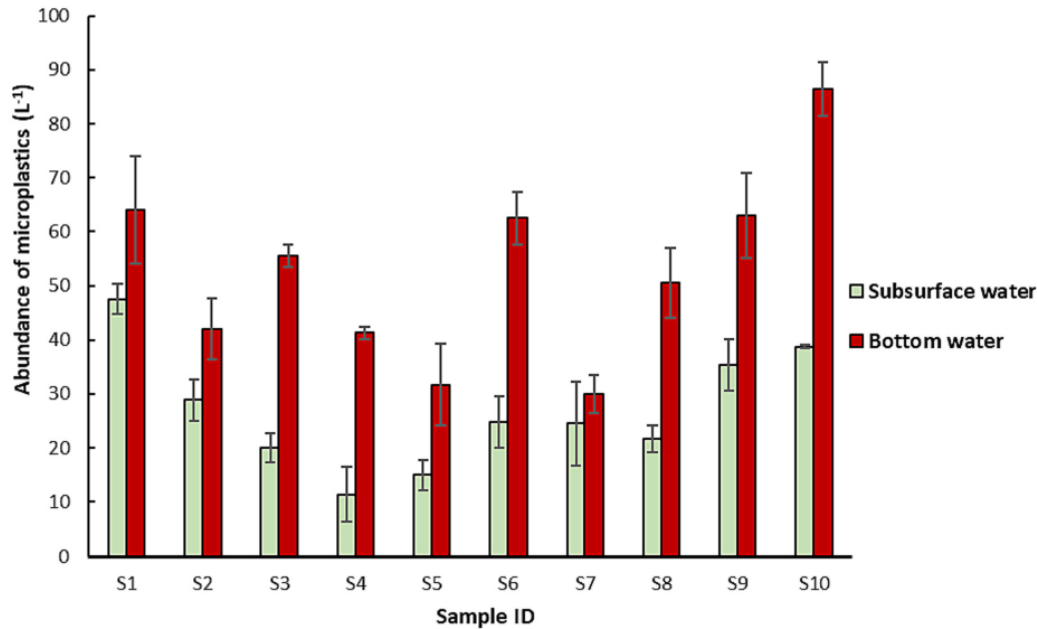
Partisi vertikal merupakan salah satu kemajuan yang sangat penting. Pengayaan di perairan dasar danau dan distribusi mikroplastik bawah permukaan di laut menunjukkan bahwa pengambilan sampel hanya di permukaan dapat meremehkan inventaris total atau salah menggambarkan jalur transportasi yang dominan (Anagha et al., 2023; Zhao et al., 2025). Studi air tanah semakin memperluas konsep kontinum dengan menunjukkan bahwa akuifer dekat pantai dapat mengandung partikel halus dan mungkin memasok danau atau perairan pesisir melalui pelepasan air tanah (Zheng et al., 2026). Temuan ini menunjukkan bahwa program pemantauan yang terbatas pada air permukaan tidak dapat mewakili perilaku sumber-ke-endapan secara memadai. Selain variasi horizontal, distribusi mikroplastik juga menunjukkan pola vertikal yang penting. Perbedaan

kelimpahan antara lapisan bawah permukaan dan air dasar menunjukkan bahwa mikroplastik tidak selalu terkonsentrasi pada permukaan perairan. Contoh pola partisi vertikal tersebut pada Danau Vembanad ditunjukkan pada Gambar 2.

Bukti tersebut juga menunjukkan adanya ketidakselanjaran. Peristiwa kebakaran, pulsa hujan, saluran bercabang, pengaturan sungai, saluran limpasan hujan, front estuari, dan zona pesisir yang berbentuk teluk dapat menghasilkan hotspot berumur pendek atau endapan dengan pelepasan tertunda (Amal and Devipriya, 2024; Belesov et al., 2024; Imbulana et al., 2024). Dengan demikian, pengelolaan regional sebaiknya tidak hanya berfokus pada lokasi ditemukannya partikel, tetapi juga pada kapan dan mengapa partikel tersebut termobilisasi.

Tabel 1. Bukti representatif terbaru pada kontinum air tawar-laut.

Sistem/lokasi	Kompartemen	Temuan kuantitatif utama	Interpretasi utama	Referensi
Sungai Ergene, Türkiye	Air; sedimen	Air 4,65–6,90 item L^{-1} ; sedimen 97,90–277,76 item kg^{-1}	Retensi sedimen dan dominasi serat pada sungai industri	Akdogan et al., 2023
Danau Vembanad, India	Bawah permukaan; perairan dasar	Perairan dasar melebihi perairan bawah permukaan	Partisi vertikal dapat terlewat pada survei yang hanya mengambil sampel permukaan	Anagha et al., 2023
DAS Orange-Senqu	Air; sedimen; ikan	Air 1,00–69,75 item L^{-1} ; sedimen hingga 4000 partikel kg^{-1} bobot kering	Hidrologi mengendalikan keterkaitan antarmatriks	Graham et al., 2024
Teluk Osaka, Jepang	Padatan tertahan; sedimen	Partikel keausan ban dan jalan terkonsentrasi dekat muara sungai	Limpasan jalan perkotaan menghubungkan sumber daratan dengan pengendapan di laut	Barber et al., 2025
Akuifer dekat pantai Danau Taihu	Air tanah	176–1526 partikel L^{-1}	Air tanah dapat menjadi masukan ke danau yang terabaikan	Zheng et al., 2026
Pesisir Da Nang, Vietnam	Air; sedimen; organisme	111–304 MP L^{-1} dalam air laut; 2267–4600 MP kg^{-1} dalam sedimen	Ciri multi-matriks mendukung akumulasi yang terkait dengan habitat	Phan et al., 2024



Gambar 2. Perbedaan vertikal antara kelimpahan mikroplastik di perairan bawah permukaan dan perairan dasar Danau Vembanad. Sumber: Anagha et al. (2023).

3.3 Nasib, partisi vertikal, dan mekanisme transportasi

Kemajuan terbaru yang paling menonjol adalah pergeseran dari pemetaan keberadaan menuju mekanisme transportasi. Waktu terjadinya peristiwa merupakan faktor utama. Pada suatu daerah tangkapan perkotaan di Jepang, emisi mikroplastik tahunan didominasi oleh limpasan permukaan dan emisi tak terkendali lainnya, dan sebagian besar ekspor tahunan terjadi hanya dalam sebagian kecil waktu sepanjang tahun ketika terjadi hujan sedang atau lebat (Imbulana et al., 2024). Temuan ini memperumit anggapan umum bahwa instalasi pengolahan air limbah selalu merupakan jalur dominan. Air limbah tetap penting pada skala lokal, terutama di sekitar saluran pembuangan dan perairan penerima hasil pengolahan, tetapi beban tahunan pada skala DAS dapat dikendalikan oleh limpasan difus, aliran bypass, anak sungai kecil, dan pulsa saat cuaca basah (Bayo et al., 2023; Deng et al., 2025; Ridall et al., 2023).

Konektivitas hidrologis juga sama pentingnya. Pengalihan aliran, pertemuan

sungai, pintu air, kepadatan jaringan, dan ordo sungai dapat mengubah kelimpahan maupun efisiensi transportasi (Kukkola et al., 2023; Li et al., 2023; Luo et al., 2024). Pada ujung laut dari kontinum, stratifikasi, pusaran mesoskal, waktu tinggal di teluk, dan reservoir sedimen memengaruhi apakah partikel tetap berada dekat pantai, tenggelam, atau terangkut ke lepas pantai (Liu et al., 2025; Lu et al., 2026; Zhao et al., 2025).

Penuaan dan biofouling menghubungkan transportasi dengan risiko. Partikel yang mengalami pelapukan membentuk retakan, lubang, alur, kekasaran, perubahan densitas, dan perubahan kapasitas sorpsi. Perubahan-perubahan ini memengaruhi agregasi, penenggelaman, kolonisasi mikroba, dan transportasi ko-kontaminan (Alimi et al., 2018; Belesov et al., 2024; Estherrani et al., 2025). Oleh karena itu, model berbasis proses sebaiknya memperlakukan mikroplastik sebagai partikel dinamis yang perilakunya berubah seiring waktu tinggal dan paparan lingkungan.

3.4 Konsekuensi ekologis dan mikrobiologis

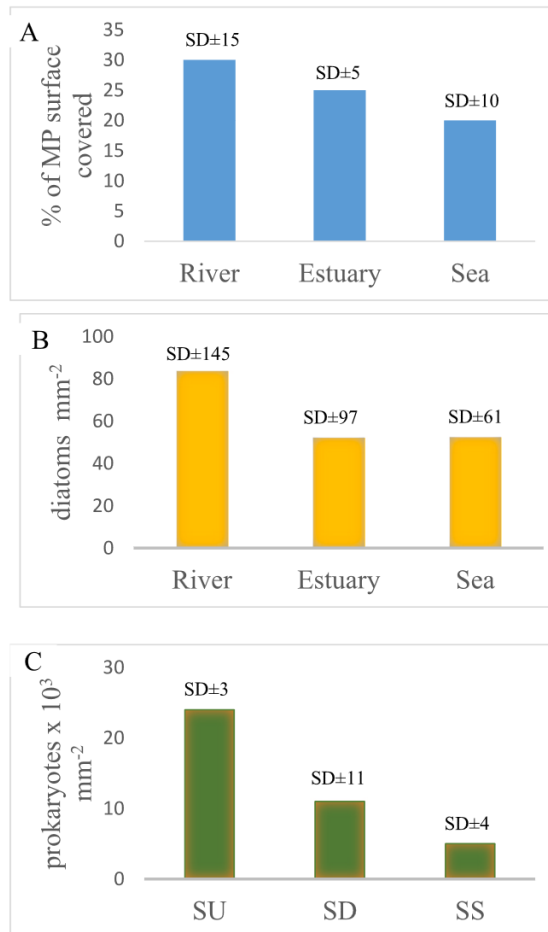
Risiko ekologis semakin dipahami sebagai gabungan masalah partikel, kimia, dan biologis. Ingesti dan paparan jaringan tetap penting, khususnya bagi ikan, larva benthik, bivalvia, dan organisme lain dalam jejaring makanan (Augustus de Araújo et al., 2025; Aydin, 2026; Choudhary et al., 2025). Namun, studi terbaru menunjukkan bahwa risiko sangat bervariasi menurut spesies, habitat, cara makan, dan hidrologi setempat. Variabilitas ini menunjukkan bahwa pernyataan risiko universal yang hanya didasarkan pada nilai keberadaan tidaklah memadai.

Plastisfer merupakan perluasan konseptual yang paling penting. Mikroplastik menyediakan permukaan untuk pembentukan biofilm, suksesi mikroba, dan potensi pengayaan patogen, gen resistensi antibiotik, elemen genetik bergerak, serta fungsi terkait virulensi (Bydalek et al., 2023; Feng et al., 2023; Zhang et al., 2026). Studi lapangan dan air limbah menunjukkan bahwa komunitas mikroba yang terkait dengan plastik dapat berbeda dari komunitas di air sekitar dan substrat alami, serta biofilm dapat mempertahankan sinyal resistensi meskipun pengolahan mengurangi beban secara keseluruhan. Temuan ini menggeser pertanyaan penelitian dari apakah plastik membawa mikroba menjadi di mana dan dalam kondisi hidrologis serta kimia seperti apa risiko plastisfer meningkat. Kemampuan permukaan mikroplastik untuk mendukung pembentukan biofilm menyebabkan terbentuknya komunitas mikroba yang berbeda dari lingkungan perairan di sekitarnya. Intensitas kolonisasi dan

indikator mikrobiologis juga dapat berbeda sepanjang gradien sungai–estuaria–laut, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Ko-kontaminan semakin memperumit penilaian. Antibiotik, logam berat, hidrokarbon, bahan kimia turunan ban, dan polutan lainnya dapat berinteraksi dengan partikel plastik serta komunitas mikroba, yang berpotensi memperkuat tekanan seleksi atau efek toksikologis (Adenaya et al., 2023; Guo et al., 2024; Qiao et al., 2025; Rafa et al., 2024). Oleh sebab itu, pemantauan di masa mendatang sebaiknya mengintegrasikan jumlah partikel, identitas polimer, kontaminan yang tersorpsi, indikator mikroba, dan metadata lingkungan yang relevan.

3.5 Prioritas pemantauan, mitigasi, dan kebijakan

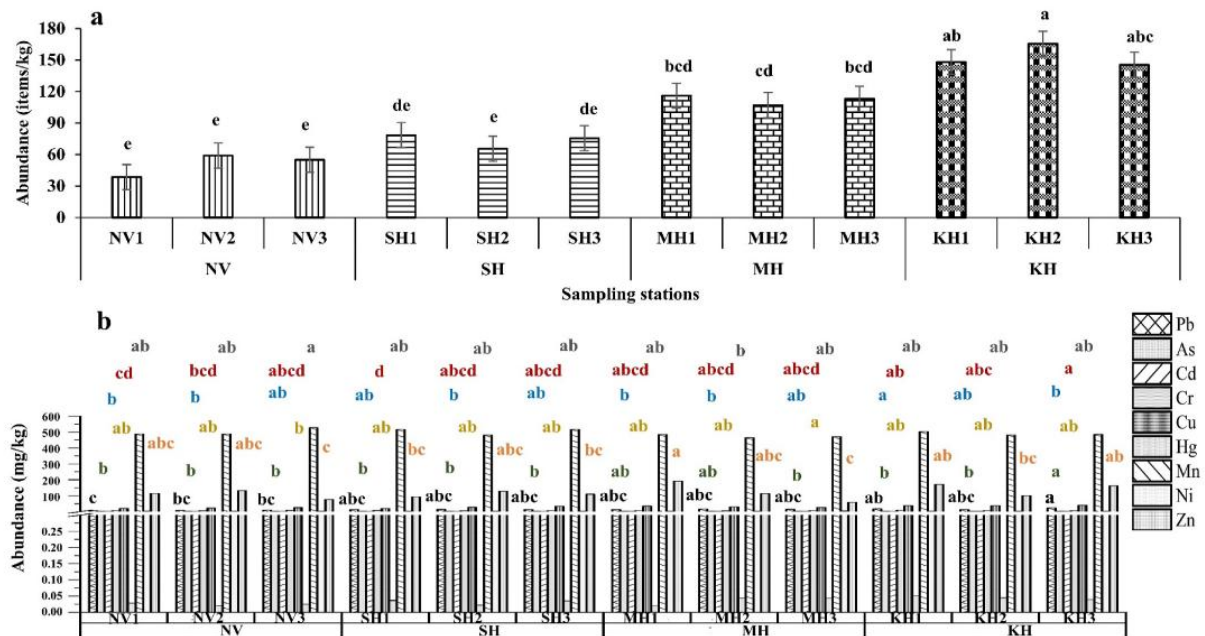
Bukti yang ditinjau mendukung mitigasi terintegrasi, bukan ketergantungan pada satu teknologi. Pengolahan air limbah tetap penting karena instalasi pengolahan merupakan titik kendali yang dapat diakses dan dapat sangat memengaruhi perairan penerima di sekitarnya. Namun, emisi yang didominasi limpasan, pulsa badai, partikel keausan jalan, dan sampah perkotaan yang tidak terkelola memerlukan intervensi di hulu dan pada skala daerah tangkapan (Carr et al., 2016; Imbulana et al., 2024; Kazancı et al., 2025). Intersepsi limpasan hujan, reduksi sumber, pengendalian kebocoran makroplastik, pengelolaan tekstil dan keausan ban, pemolisian air limbah, serta pengelolaan sedimen yang mempertimbangkan habitat perlu direncanakan sebagai tindakan yang saling melengkapi.



Gambar 3. Intensitas kolonisasi plastisfer dan indikator mikroba terkait pada lokasi sungai, estuari, dan pesisir. Sumber: Donnarumma et al. (2024).

Pemantauan juga harus menjadi lebih interoperabel. Berbagai studi berulang kali menunjukkan bahwa estimasi kelimpahan bergantung pada ambang ukuran, cara pengambilan sampel, metode pemisahan, protokol digesti, dan konfirmasi analitis (Jin et al., 2025; Zhang et al., 2024; Zhao et al., 2024). Program rutin sebaiknya mencakup beberapa fraksi ukuran, pengambilan sampel vertikal bila relevan, sedimen dan biota apabila diperlukan untuk interpretasi risiko, serta metadata tentang curah hujan, debit, penggunaan lahan, infrastruktur, dan waktu pengambilan sampel. Sistem data terbuka

seperti basis data mikroplastik laut NOAA menunjukkan nilai dari dataset yang terstandar dan dapat digunakan kembali (Nyadjro et al., 2023). Habitat pesisir bervegetasi juga perlu diperhitungkan dalam strategi pengelolaan karena dapat berfungsi sebagai zona retensi partikel plastik sekaligus kontaminan yang berasosiasi dengannya. Variasi kemampuan habitat mangrove, saltmarsh, dan vegetasi pesisir lainnya dalam menahan mikro- dan mesoplastik serta logam terkait ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Retensi mikroplastik dan mesoplastik serta beban logam terkait pada habitat pesisir bervegetasi. Sumber: Bappy et al. (2025).

Kebijakan bergerak menuju pemikiran berbasis siklus hidup. Resolusi UNEA 5/14 dan proses perjanjian UNEP telah menempatkan pencemaran plastik dalam agenda seluruh siklus hidup, sedangkan pembatasan regional terhadap mikroplastik yang sengaja ditambahkan dan plastik sekali pakai menangani bagian penting tetapi belum menyeluruh dari masalah ini (European Commission, 2023a; European Commission, 2023b; United Nations Environment Assembly, 2022; United Nations Environment Programme, 2026). Prioritas praktisnya adalah menghubungkan desain produk, reduksi sumber, pengendalian limpasan, pengolahan air limbah, standar pemantauan, dan perlindungan ekosistem dalam satu kerangka pengelolaan.

KESIMPULAN

Penelitian mikroplastik pada kontinum air tawar-laut telah melampaui pemetaan keberadaan yang sederhana. Bukti terbaru menunjukkan bahwa nasib partikel dibentuk oleh konektivitas, debit, waktu kejadian hujan, ordo sungai, retensi sedimen, biofouling, stratifikasi vertikal, pertukaran air tanah, dan hidrodinamika pesisir. Pengukuran air permukaan tetap

bermanfaat, tetapi tidak memadai ketika perairan dasar, sedimen, lahan basah, zona hiporeik, dan air tanah dekat pantai dapat berfungsi sebagai wilayah penyimpanan atau pelepasan yang penting.

Sumber dan risiko dominan bergantung pada skala. Saluran pembuangan air limbah, buangan industri, dan muara sungai dapat membentuk hotspot lokal, sedangkan limpasan hujan, limpasan difus, jaringan anak sungai, keausan jalan, dan sampah perkotaan dapat mendominasi ekspor tahunan pada skala daerah tangkapan. Interpretasi ekologis harus mengintegrasikan karakteristik partikel, identitas polimer, ko-kontaminan kimia, komunitas plastisfer, indikator resistensi antibiotik, dan paparan biologis. Prioritas terpenting untuk penelitian mendatang adalah pemantauan multi-kompartemen yang terstandar, estimasi fluks berbasis kejadian, pengambilan sampel vertikal, peningkatan konfirmasi polimer, surveilans plastisfer, serta portofolio intervensi yang menghubungkan reduksi sumber dengan pengelolaan dari daerah tangkapan hingga pesisir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada reviewer atas masukan konstruktif yang meningkatkan kejelasan, reproduisibilitas, dan organisasi naskah ini. Penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan. Penelitian ini bagian dari Hibah penelitian Riset Kompetensi Dasar dari LPPM Universitas Borneo Tarakan. Tidak ada dataset eksperimental baru yang dihasilkan dalam tinjauan ini.

DAFTAR PUSTAKA

Adenaya, A., Berger, M., Brinkhoff, T., Ribas-Ribas, M., & Wurl, O. (2023). Usage of antibiotics in aquaculture and the impact on coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114645>

Adyari, B., Liao, X., Yan, X., Qiu, Y., Grossart, H.-P., Li, L., Yu, T., Mao, G., Liu, K., Su, J., Liu, Y., & Hu, A. (2025). Anthropogenic gene dissemination in Tibetan Plateau rivers: Sewage-driven spread, environmental selection, and microeukaryotic inter-trophic driving factors. *Water Research*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123887>

Akdogan, Z., Guven, B., & Kideys, A. E. (2023). Microplastic distribution in the surface water and sediment of the Ergene River. *Environmental Research*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116500>

Aladekoyi, O., Siddiqui, S., Hania, P., Hamza, R., & Gilbride, K. (2024). Accumulation of antibiotics in the environment: Have appropriate measures been taken to protect Canadian human and ecological health? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116513>

Alimi, O. S., Farner Budarz, J., Hernandez, L. M., & Tufenkji, N. (2018). Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Environmental*

Science & Technology, 52(4), 1704–1724. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05559>

Allison, T., Ward, B. D., Harbottle, M., & Durance, I. (2026). Degradation of cellulose-based wet wipes marketed as 'biodegradable' in their receiving urban rivers. *Environmental Pollution*, 388. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127376>

Amenábar, M., Aguilera, M. A., Gallardo, C., Moore, C., De Vine, R., Lattin, G., Gamba, A., Luna-Acosta, A., & Thiel, M. (2024). Spatial distribution of microplastics in a coastal upwelling region: Offshore dispersal from urban sources in the Humboldt Current System. *Environmental Pollution*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123157>

Anagha, P. L., Viji, N. V., Devika, D., & Ramasamy, E. V. (2023). Distribution and abundance of microplastics in the water column of Vembanad Lake—A Ramsar site in Kerala, India. *Marine Pollution Bulletin*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115433>

Anderson, J. C., Park, B. J., & Palace, V. P. (2016). Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems. *Environmental Pollution*, 218, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.074>

Anderson, P. J., Warrack, S., Langen, V., Challis, J. K., Hanson, M. L., & Rennie, M. D. (2017). Microplastic contamination in Lake Winnipeg, Canada. *Environmental Pollution*, 225, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.072>

Arredondo-Navarro, A., Cunill-Flores, J. M., Forsythe, K., Scott, J., Martínez-Tavera, E., Flores-Cervantes, D. X., & González-Estrella, J. (2025). Spatiotemporal assessment of microplastic incidence in the Atoyac basin—A key watershed in Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14459-8>

- Augustus de Araújo, G., Santana Ramos, M. C., Dias Carvalho, G. L., Camilo-Cotrim, C. F., Braga do Amaral, R., Castro, Í. B., Rocha, T. L., & Damacena-Silva, L. (2025). Microplastic contamination in wild freshwater fish: Global trends, challenges and perspectives. *Environmental Pollution*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126406>
- Ayaz, M., Oon, Y.-S., Oon, Y.-L., Khan, K., Deng, M., Li, L., Song, K., Jiang, X., & Xia, Z. (2025). Microplastics transport and impact on nitrogen cycling and N₂O emissions in estuaries. *Environmental Pollution*, 383, 126869. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126869>
- Aydin, G. B. (2026). Assessing microplastic hazards in freshwater ecosystems using chironomid larvae: Insights from the Ergene River, European part of Türkiye. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14900-y>
- Bappy, M. M. M., Rahman, M. M., Hossain, M. K., Moniruzzaman, M., Yu, J., Arai, T., Paray, B. A., & Hossain, M. B. (2025). Distribution and retention efficiency of micro- and mesoplastics and heavy metals in mangrove, saltmarsh and cordgrass habitats along a subtropical coast. *Environmental Pollution*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125908>
- Barathe, P., Reddy, S., Shriram, V., & Kumar, V. (2026). Co-selection of heavy metal and antibiotic resistance in Enterobacteriaceae members from Mula-Mutha River (Pune, India). *Environmental Monitoring and Assessment*, 198(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15179-3>
- Barber, T. R., Ribeiro, F., Claes, S., Kawamura, Y., Yeung, J., Byrne, H. A., Weyrauch, S., Reemtsma, T., & Unice, K. M. (2025). The identification and quantification of tire and road wear particles in Osaka Bay, Japan, by two analytical methods. *Marine Pollution Bulletin*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117363>
- Bayo, J., López-Castellanos, J., Olmos, S., & Rojo, D. (2023). A holistic approach on the impact of microplastic discharge from WWTPs to the neighboring environment in Southeast Spain. *Water Research*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120516>
- Belesov, A. V., Rezviy, T. V., Pokryshkin, S. A., Chukhchin, D. G., & Kozhevnikov, A. Y. (2024). New insights into the role of sediments in microplastic inputs from the Northern Dvina River (Russia) to the White and Barents Seas. *Marine Pollution Bulletin*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116310>
- Bohara, K., Timilsina, A., Adhikari, K., Kafle, A., Basyal, S., Joshi, P., & Yadav, A. K. (2024). A mini review on 6PPD quinone: A new threat to aquaculture and fisheries. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122828>
- Burns, E. E., & Boxall, A. B. A. (2018). Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37, 2776–2796. <https://doi.org/10.1002/etc.4268>
- Bydalek, F., Webster, G., Barden, R., Weightman, A. J., Kasprzyk-Hordern, B., & Wenk, J. (2023). Microplastic biofilm, associated pathogen and antimicrobial resistance dynamics through a wastewater treatment process incorporating a constructed wetland. *Water Research*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119936>
- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>
- Chanda, M., Bathi, J. R., Khan, E., Katyal, D., & Danquah, M. (2024). Microplastics in ecosystems: Critical review of occurrence, distribution, toxicity, fate, transport, and advances in experimental and

computational studies in surface and subsurface water. *Journal of Environmental Management*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122492>

Chen, Y., Yan, Z., Yuan, Q., Ma, L., Wang, M., Zhang, P., Jiang, R., Lu, G., Yuan, S., & Gin, K. Y.-H. (2026). Deciphering the mechanisms shaping the antibiotic resistance genes in the vertical plastisphere in hyporheic zone under hydrological exchange. *Water Research*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125659>

Chen, Y., Yan, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., Jiang, R., Wang, M., Yuan, S., & Lu, G. (2024). Dynamic evolution of antibiotic resistance genes in plastisphere in the vertical profile of urban rivers. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120946>

Choudhary, A., George, L., Mandal, A., Biswas, A., Ganie, Z. A., & Darbha, G. K. (2025). Assessment of microplastics and associated ecological risk in the longest river (Godavari) of peninsular India: A comprehensive source-to-sink analysis in water, sediment and fish. *Marine Pollution Bulletin*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117560>

Cofano, V., Mele, D., Lacalamita, M., Di Leo, P., Scardino, G., Bravo, B., Cammarota, F., & Capolongo, D. (2023). Microplastics in inland and offshore sediments in the Apulo-Lucanian region (Southern Italy). *Marine Pollution Bulletin*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115775>

Das, B. K., Besra, R., Das, S., Sarkar, D. J., Mohanty, D., Roy, S., Baisakhi, B., & Kumari, M. (2026). Microplastics abundance in major tributaries and distributaries of the river Ganga at lower estuarine stretch. *Marine Pollution Bulletin*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118715>

Das, P., Barik, S. K., & Bal, M. (2025). Microplastic transport dynamics and the path forward with magnetic nanoparticle based solutions. *Journal of Environmental Management*, 384. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125496>

Deng, C., Zhang, Y., Ma, Y., Sun, Y., Zhao, W., Chen, H., Liu, J., Gao, J., Zhang, Q., Quan, J., & Qi, R. (2025). Protecting water sources from animal and fecal pollution for preventing ARGs contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118815>

Deng, L., Yuan, Y., Xi, H., Wan, C., & Wu, C. (2025). Treated wastewater disturb the distributions of microplastics in their receiving watersheds. *Journal of Environmental Management*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124096>

Donnarumma, V., Trano, A. C., D'Agostino, F., Piredda, R., & Casotti, R. (2024). Comparative analysis of the microbial plastisphere at three sites along the Sarno river (Italy). *Environmental Pollution*, 363. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125226>

Dueñas-Moreno, J., Mora, A., Capparelli, M. V., González-Domínguez, J., & Mählknecht, J. (2024). Potential ecological risk assessment of microplastics in environmental compartments in Mexico: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124812>

Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>

Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., & Amato, S. (2013). Microplastic pollution in

the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin*, 77, 177–182.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>

Estherrani, J. R. B. T., Jeyakumar, S. S. L., Merlin, J. P., Christopher, J. J., Rajalakshmi, E., Sivanantham, D., Rodríguez-González, F., Arreola-Mendoza, L., & Ponniah, J. M. (2025). Presence of microplastics during high rainfall events in the Cauvery River (South India): Ecological risk and cultural practices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13421-4>

European Commission. (2023a). Commission Regulation (EU) 2023/2055 – Restriction of microplastics intentionally added to products. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/chemicals/reach/restrictions/commission-regulation-eu-20232055-restriction-microplastics-intentionally-added-products_en

European Commission. (2023b). Single-use plastics. https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics_en

Feizi, F., Akhbarizadeh, R., & Hamidian, A. H. (2024). Microplastics in urban water systems, Tehran Metropolitan, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12815-8>

Feng, Y., Sun, J.-W., Shi, W.-W., Duan, J.-L., Sun, X.-D., Feng, L.-J., Wang, Q., Gan, Y.-D., & Yuan, X.-Z. (2023). Microplastics exhibit accumulation and horizontal transfer of antibiotic resistance genes. *Journal of Environmental Management*, 336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117632>

Gadoin, E., Massot, M., Callens, M., Arnout, P., Bedhomme, S., & Rajkovic, A. (2026). Shotgun metagenomic profiling reveals a high diversity of taxa and genes within biofilms formed on microplastics incubated in urbanised aquatic ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 228.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119569>

Gan, M., Zhang, Y., Shi, P., Cui, L., Zhang, C., & Guo, J. (2024). Occurrence, potential sources, and ecological risk assessment of microplastics in the inland river basins in Northern China. *Marine Pollution Bulletin*, 205.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116656>

Ghiglione, J.-F., Barbe, V., Bruzard, S., et al. (2023). Mission Tara Microplastics: A holistic set of protocols and data resources for the field investigation of plastic pollution along the land-sea continuum in Europe. *Environmental Science and Pollution Research*.

<https://doi.org/10.1007/s11356-023-26883-9>

Graham, P. M., Pattinson, N. B., Bakir, A., McGoran, A. R., & Nel, H. A. (2024). Determination of microplastics in sediment, water, and fish across the Orange-Senqu River basin. *Water Research*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122394>

Guo, J., Jin, X., Zhou, Y., Gao, B., Li, Y., & Zhou, Y. (2024). Microplastic and antibiotics in waters: Interactions and environmental risks. *Journal of Environmental Management*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123125>

Hassan, I., Sethupathi, S., Bashir, M. J. K., Ahmad, A. L., & Parthasarathy, P. (2025). Tracking microplastics at the source: A comparative study of fluorescent and FTIR microscopy at a drinking water intake in the Perak River, Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14127-x>

He, Y., Lu, J., Li, C., Wang, X., Jiang, C., Zhu, L., Bu, X., Jabeen, K., Vo, T. T., & Li, D. (2024). From pollution to solutions: Insights into the sources, transport and management of plastic debris in pristine and urban rivers. *Environmental Research*, 245.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118024>

- Ho, C. M., Feng, W., Li, X., Ngien, S. K., Yu, X., Song, F., Yang, F., & Liao, H. (2025). Microplastic distribution and its implications for human health through marine environments. *Journal of Environmental Management*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125427>
- Hoemann, C., Bauer, C. A., & Fissore, C. (2024). Assessing meso-, micro-, and nanoplastic pollution in Los Angeles County estuaries. *Marine Pollution Bulletin*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116822>
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- Huang, Q., Liu, M., Cao, X., & Liu, Z. (2023). Occurrence of microplastics pollution in the Yangtze River: Distinct characteristics of spatial distribution and basin-wide ecological risk assessment. *Water Research*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119431>
- Ihenetu, S. C., Xu, Q., Khan, Z. H., Kazmi, S. S. U. H., Ding, J., Sun, Q., & Li, G. (2024). Environmental fate of tire-rubber related pollutants 6PPD and 6PPD-Q: A review. *Environmental Research*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119492>
- Imbulana, S., Tanaka, S., & Oluwoye, I. (2024). Quantifying annual microplastic emissions of an urban catchment: Surface runoff vs wastewater sources. *Journal of Environmental Management*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121123>
- Jachimowicz, P., Babkiewicz, E., Gavlova, A., Lang, J., Mądzielewska, W. I., Maszczyk, P., Mierzyńska, K., & Zieliński, P. (2026). Global microplastic contamination in freshwater lakes: Spatial patterns, environmental drivers, and methodological challenges. *Environmental Research*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123585>
- Jain, Y., Govindasamy, H., Kaur, G., Ajith, N., Ramasamy, K., R.S., R., & Ramachandran, P. (2024). Microplastic pollution in high-altitude Nainital lake, Uttarakhand, India. *Environmental Pollution*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123598>
- Jangid, H., Dutta, J., Karnwal, A., & Kumar, G. (2025). Microplastic contamination in fish: A systematic global review of trends, health risks, and implications for consumer safety. *Marine Pollution Bulletin*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118279>
- Jin, X., Li, Z., Peñuelas, J., Sardans, J., Wu, Q., Peng, Y., Hedēnec, P., Li, Z., Yuan, C., Yuan, J., Chen, Z., Zhao, Z., Wu, F., & Yue, K. (2025). Quantitative assessment on the distribution patterns of microplastics in global inland waters. *Communications Earth & Environment*, 6, 331. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02320-2>
- Jolaosho, T. L., Rasaq, M. F., Omotoye, E. V., Araomo, O. V., Adekoya, O. S., Abolaji, O. Y., & Hungbo, J. J. (2025). Microplastics in freshwater and marine ecosystems: Occurrence, characterization, sources, distribution dynamics, fate, transport processes, potential mitigation strategies, and policy interventions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118036>
- Kazancı, Y., Alyürük, N., Alpergün, C., Kara, N., Baycan, N., & Gündüz, O. (2025). Analysis of microplastic flux from the Gediz River to the Aegean Sea: A modeling study for environmental management. *Journal of Environmental Management*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126412>
- Kieu-Le, T.-C., Thuong, Q.-T., Truong, T.-N.-S., Le, T.-M.-T., Tran, Q.-V., & Strady, E. (2023). Baseline concentration of microplastics in surface water and sediment of the northern branches of the

- Mekong River Delta, Vietnam. *Marine Pollution Bulletin*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114605>
- Kothawale, S. S., Kumar, L., & Singh, S. P. (2023). Role of organisms and their enzymes in the biodegradation of microplastics and nanoplastics: A review. *Environmental Research*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116281>
- Kukkola, A., Runkel, R. L., Schneidewind, U., Murphy, S. F., Kelleher, L., Sambrook Smith, G. H., Nel, H. A., Lynch, I., & Krause, S. (2023). Prevailing impacts of river management on microplastic transport in contrasting US streams: Rethinking global microplastic flux estimations. *Water Research*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120112>
- Landebrit, L., Sanchez, R., Soccalingame, L., Palazot, M., Kedzierski, M., Bruzeau, S., Albignac, M., Ludwig, W., Ghiglione, J.-F., & ter Halle, A. (2025). Small microplastics have much higher mass concentrations than large microplastics at the surface of nine major European rivers. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 10050–10065. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34486-1>
- Lata, R., Waqainabete, T., Aru, S., & Rohindra, D. (2025). Measurement and daily consumption of microplastics in drinking water from a Small Island Developing State—Fiji: From freshwater to groundwater sources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13877-y>
- Li, B., Cao, X., Tang, B., Yi, W., Yang, X., Yang, C., He, M., Liao, Q., Du, D., Luo, X., & Zheng, J. (2026). An integrated dual-model framework for microplastic flux estimation and source apportionment in tropical island river systems. *Water Research*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125860>
- Li, C., Shi, Y., Luo, D., Kang, M., Li, Y., Huang, Y., & Bai, X. (2023). Interventions of river network structures on urban aquatic microplastic footprint from a connectivity perspective. *Water Research*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120418>
- Liu, H., Zhang, Y., Wang, Q., Liu, M., Yang, C., Cai, M., Li, Z., Li, X., Fang, Z., Cheng, K., & Zhao, W. (2025). Coastal bays serve as reservoirs for microplastics from East China: Insights from a mass budget model based on sedimentary findings. *Marine Pollution Bulletin*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118284>
- Lu, J., He, Y., Jiao, M., Wei, N., Leng, T., Jabeen, K., Zheng, H., Yao, Z., Li, D., & Liu, B. (2026). Not just a corridor: Hydrodynamic traps and fiber risk in the Kuroshio extension. *Water Research*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124760>
- Luo, W., Fu, H., Lu, Q., Li, B., Cao, X., Chen, S., Liu, R., Tang, B., Yan, X., & Zheng, J. (2024). Microplastic pollution differences in freshwater river according to stream order: Insights from spatial distribution, annual load, and ecological assessment. *Journal of Environmental Management*, 366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121836>
- Mai, H., Nguyen, D. T., Nguyen, T. H., Dao, T. D., & Nguyen, N. T. (2025). Seasonal microplastics and meiofauna distributions in sediments along the Van Uc estuary in Vietnam. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14199-9>
- Muthu, P., Bairoliya, S., Girija, G. K., Tseng, L.-C., Cao, B., Hwang, J.-S., & Ho, Y.-N. (2026). Substrate-driven microbial diversity and functional potential of plastisphere biofilms in a dynamic coastal ecosystem of northeastern Taiwan. *Environmental Pollution*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127382>

- Nyadjro, E. S., Webster, J. A. B., Boyer, T. P., Cebrian, J., Collazo, L., Kaltenberger, G., Larsen, K., Lau, Y. H., Mickle, P., Toft, T., Wang, Z., et al. (2023). The NOAA NCEI marine microplastics database. *Scientific Data*, 10, Article 725. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02632-y>
- OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>
- Pham, D. T., Choi, S.-H., & Kwon, J.-H. (2024). Year-round spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of an urban freshwater system (Jungnang Stream, Korea). *Environmental Pollution*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124362>
- Phan, N.-T., Thanh Thao, L. X., Do, V. M., & Nguyen, D. D. (2024). Assessment of microplastic presence in coastal environments and organisms of Da Nang, Vietnam. *Marine Pollution Bulletin*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116516>
- Pinto, R. B., Bogerd, L., van der Ploeg, M., Duah, K., Uijlenhoet, R., & van Emmerik, T. H. M. (2024). Catchment scale assessment of macroplastic pollution in the Odaw river, Ghana. *Marine Pollution Bulletin*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115813>
- Qiao, Y., Shen, M., Kong, L., Sun, Y., Wang, S., Gao, Y., Xue, J., Jiang, Q., Cheng, D., & Liu, Y. (2025). Better ecosystem resistibility but with severer risk deriving from potential pathogens and antibiotic resistances in marine sediments adjacent to Yellow River estuary under oil contamination. *Environmental Research*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121486>
- Quadroni, S., Cesarini, G., De Santis, V., & Galafassi, S. (2024). Interconnected impacts of water resource management and climate change on microplastic pollution and riverine biocoenosis: A review by freshwater ecologists. *Journal of Environmental Management*, 372. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123363>
- Rafa, N., Ahmed, B., Zohora, F., Bakya, J., Ahmed, S., Ahmed, S. F., Mofijur, M., Chowdhury, A. A., & Almomani, F. (2024). Microplastics as carriers of toxic pollutants: Source, transport, and toxicological effects. *Environmental Pollution*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123190>
- Ridall, A., Farrar, E., Dansby, M., & Ingels, J. (2023). Influence of wastewater treatment plants and water input sources on size, shape, and polymer distributions of microplastics in St. Andrew Bay, Florida, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114552>
- Saikia, K. K., & Handique, S. (2026). Assessing spatial and seasonal dynamics and source apportionment of microplastics in Deeporbeel wetland in Assam-India using the PCA-APCS-MLR receptor model. *Environmental Pollution*, 390. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127474>
- Samuels, W., Awe, A., & Sparks, C. (2024). Microplastic pollution and risk assessment in surface water and sediments of the Zandvlei Catchment and estuary, Cape Town, South Africa. *Environmental Pollution*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122987>
- Sawan, R., Doyen, P., Viudes, F., Amara, R., & Mahfouz, C. (2024). Microplastic inputs to the Mediterranean Sea during wet and dry seasons: The case of two Lebanese coastal outlets. *Marine Pollution Bulletin*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115781>
- Sharma, P., Pal, N., Kumawat, M., Singh, S., Das, D., Tilwari, A., Prakash, A., Tiwari, R. R., & Kumar, M. (2025). Investigating the antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in water systems impacted with anthropogenic pollutants. *Environmental Research*, 269.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120814>

Shekh, M. R., & Kumar, V. (2025). Impact of plastic pollution on ecosystems: A review of adverse effects and sustainable solutions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13723-1>

Shi, J., Sun, C., Su, Y., Wu, Y., Zhan, M., Ji, C., Wang, R., & Lv, B. (2026). Ecosystem-specific composition and drivers of plastisphere resistome in freshwater and marine environments. *Environmental Research*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.123858>

Sullivan, E., Cole, M., Atwood, E. C., Lindeque, P. K., Chin, P. T., & Martinez-Vicente, V. (2023). In situ correlation between microplastic and suspended particulate matter concentrations in river-estuary systems support proxies for satellite-derived estimates of microplastic flux. *Marine Pollution Bulletin*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115529>

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Acute aquatic life screening value for 6PPD-quinone in freshwater. <https://www.epa.gov/wqc/aquatic-life-criteria-and-methods-toxics>

UN Environment Assembly. (2022). Resolution 5/14: End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/40597>

UN Environment Programme. (2023). Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy.

<https://www.unep.org/resources/turning-off-tap-end-plastic-pollution-create-circular-economy>

UN Environment Programme. (2026). Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution. <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>
Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Muñoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., et al.

(2014). Microplastics in freshwater ecosystems: What we know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe*, 26, 12. <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0012-7>

WHO. (2019). Microplastics in drinking-water. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516198>

Woodford, L., Messer, L. F., Ormsby, M. J., White, H. L., Fellows, R., & Quilliam, R. (2025). Exploiting microplastics and the plastisphere for the surveillance of human pathogenic bacteria discharged into surface waters in wastewater effluent. *Water Research*, 281, 123563. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123563>

Zhang, X., Dong, Z., Zhang, S., Ma, J., & Liu, S. (2026). Microplastic biofilm as hotspots of antibiotic resistance genes and potential pathogens. *npj Biofilms and Microbiomes*, 12, 24. <https://doi.org/10.1038/s41522-025-00890-9>

Zhang, Y., Shi, P., & Cui, L. (2024). Microplastics in riverine systems: Recommendations for standardized sampling, separation, digestion and characterization. *Marine Pollution Bulletin*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116950>

Zhao, B., Richardson, R. E., & You, F. (2024). Microplastics monitoring in freshwater systems: A review of global efforts, knowledge gaps, and research priorities. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135329. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135329>

Zhao, S., Kvale, K. F., Zhu, L., Zettler, E. R., Egger, M., Mincer, T. J., Amaral-Zettler, L. A., Lebreton, L., Niemann, H., Nakajima, R., Thiel, M., Bos, R. P., Galgani, L., & Stubbins, A. (2025). The distribution of subsurface microplastics in the ocean. *Nature*, 641, 51–61. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08818-1>

Zheng, J., Chen, K., Wu, J., & Wu, J. (2026). Microplastics in nearshore groundwater of Taihu Lake: Occurrence and potential fluxes to the lake via groundwater discharge. *Water Research*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125821>