

MIKROPLASTIK PADA KONTINUM AIR TAWAR–ESTUARI–PESISIR: PENYIMPANAN TERSEMBUNYI, REMOBILISASI, DAN RISIKO EKOLOGIS

MICROPLASTICS IN THE FRESHWATER–ESTUARINE–COASTAL CONTINUUM: HIDDEN STORAGE, REMOBILIZATION, AND ECOLOGICAL RISKS

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

Mikroplastik umumnya dipandang sebagai partikel yang terangkut dari daratan melalui sungai dan estuari menuju laut, tetapi pandangan seperti sabuk konveyor ini meremehkan pentingnya penyimpanan di dalam sedimen, dataran banjir, waduk, zona hiporeik, lahan basah pasang surut, maksimum kekeruhan estuari, habitat bervegetasi, dan endapan pesisir dangkal. Tinjauan naratif ini mensintesis bukti terbaru mengenai “penyerap tersembunyi” tersebut dan berargumen bahwa sebagian besar bukan merupakan tempat penyimpanan terminal, melainkan kompartemen penyimpanan dinamis yang signifikansi ekologisnya bergantung pada waktu retensi, transformasi partikel, probabilitas remobilisasi, dan tumpang tindih dengan aktivitas biologis. Di sistem air tawar, hidromorfologi, bendungan, sedimen halus, vegetasi, dan pertukaran hiporeik menciptakan retensi selektif, sedangkan banjir dan operasi pengelolaan sedimen dapat membalik perilaku penyerap. Estuari berfungsi sebagai penyaring semipermeabel tempat pasang surut, gradien salinitas, bahan partikulat tersuspensi, agregasi, dan biofouling berulang kali memindahkan partikel antara air dan sedimen dasar. Teluk pesisir, mangrove, rawa asin, padang lamun, dan sedimen dekat pantai selanjutnya mendistribusikan ulang, bukan sekadar mengakhiri, perjalanan mikroplastik yang dibawa sungai. Pengukuran terbaru menunjukkan bahwa penyimpanan dapat sangat besar, tetapi juga mengungkap bias metodologis akibat ukuran mata jaring, kedalaman pengambilan sampel, batas ukuran partikel, identifikasi polimer, dan konversi antara jumlah partikel dan massa. Karena itu, risiko ekologis terlepas dari kelimpahan sesaat di kolom air: paparan bentik, penuaan partikel, interaksi kokontaminan, perkembangan plastisfer, bioturbasi, dan transfer trofik dapat meningkatkan risiko di zona deposisional berfluks rendah. Kami mengusulkan kerangka penyimpanan–reaktivasi–paparan yang membedakan hotspot transportasi dari hotspot paparan dan memperlakukan penyerap tersembunyi sebagai reservoir yang bergantung pada keadaan. Pemantauan masa depan perlu menggabungkan inventaris teresolusi kedalaman, pengambilan sampel berbasis kejadian, kronologi sedimen, pengukuran hidrodinamika, analisis teresolusi polimer, dan ambang efek yang relevan secara biologis untuk meningkatkan neraca sumber-ke-laut dan penilaian risiko.

Kata Kunci: penyerap tersembunyi mikroplastik; kontinum sungai–estuaria–pesisir; remobilisasi sedimen; paparan bentik; risiko ekologis

ABSTRACT

Microplastics are commonly framed as particles transported from land through rivers and estuaries to the sea, yet this conveyor-belt view underestimates the importance of storage within sediments, floodplains, reservoirs, hyporheic zones, tidal wetlands, estuarine turbidity maxima, vegetated habitats, and shallow coastal deposits. This narrative review synthesizes recent evidence on these “hidden sinks” and argues that most are not terminal repositories but dynamic storage compartments whose ecological significance depends on retention time, particle transformation, remobilization probability, and overlap with biological activity. Across freshwater systems, hydromorphology, dams, fine sediment, vegetation, and hyporheic

exchange create selective retention, while floods and sediment-management operations can reverse sink behavior. Estuaries function as semipermeable filters in which tides, salinity gradients, suspended particulate matter, aggregation, and biofouling repeatedly shift particles between water and bed sediments. Coastal bays, mangroves, salt marshes, seagrass meadows, and nearshore sediments further redistribute rather than simply terminate river-borne microplastics. Recent measurements demonstrate that storage can be substantial, but also reveal large methodological biases arising from mesh size, vertical sampling, particle-size cutoffs, polymer identification, and conversion between particle number and mass. Ecological risk is consequently decoupled from instantaneous water-column abundance: benthic exposure, particle aging, co-contaminant interactions, plastisphere development, bioturbation, and trophic transfer can intensify risk within low-flux depositional zones. We propose a storage–reactivation–exposure framework that distinguishes transport hotspots from exposure hotspots and treats hidden sinks as state-dependent reservoirs. Future monitoring should couple depth-resolved inventories, event-based sampling, sediment chronology, hydrodynamic measurements, polymer-resolved analytics, and biologically relevant effect thresholds to improve source-to-sea budgets and risk assessment.

Keywords: *hidden microplastic sinks; river–estuary–coastal continuum; sediment remobilization; benthic exposure; ecological risk*

PENDAHULUAN

Model konseptual yang dominan mengenai pencemaran mikroplastik akuatik masih berupa transportasi dari sumber ke laut: plastik dilepaskan dari sumber perkotaan, industri, pertanian, dan atmosfer, memasuki sungai, melewati estuari, lalu akhirnya mencapai lingkungan pesisir dan laut terbuka. Kerangka ini berguna untuk mengidentifikasi masukan, tetapi dapat menutupi kenyataan bahwa transportasi partikel sangat intermiten dan sebagian besar partikel dapat berada di luar kolom air yang bergerak selama periode yang panjang. Sungai dapat sekaligus berfungsi sebagai jalur pengangkut dan tempat akumulasi; waduk memperlambat aliran dan meningkatkan sedimentasi; estuari memerangkap bahan tersuspensi serta menghasilkan siklus deposisi–resuspensi berulang; sedangkan lahan basah pesisir atau teluk dangkal dapat menahan partikel dalam sedimen dan endapan yang berasosiasi dengan vegetasi (Windsor et al., 2019; Owowenu et al., 2023; Yang et al., 2025). Makna ekologis dari proses penyimpanan ini tidak sederhana. Partikel yang tidak lagi terlihat dalam sampel air permukaan belum tentu telah meninggalkan ekosistem, dan penurunan konsentrasi ke arah hilir tidak dengan sendirinya membuktikan hilangnya risiko.

Tinjauan ini menggunakan istilah penyerap tersembunyi untuk suatu kompartemen tempat mikroplastik menjadi kurang terwakili dalam pengamatan kolom air konvensional karena mengalami deposisi, penguburan, infiltrasi, terdampar, terinkorporasi dalam agregat, tertahan oleh vegetasi, atau disimpan dengan cara lain selama skala waktu yang lebih panjang daripada interval pengambilan sampel rutin. Dengan demikian, “tersembunyi” merujuk pada ketakterlihatan secara observasional dan konseptual, bukan pada isolasi fisik yang sempurna. Dasar sungai, zona hiporeik, cekungan dataran banjir, impoundment, sedimen estuari, zona maksimum kekeruhan, rawa pasang surut, mangrove, sedimen yang berasosiasi dengan lamun, laguna, pantai, dan endapan landas kontinen dangkal semuanya dapat memenuhi definisi ini pada kondisi hidrodinamika tertentu (Malli et al., 2022; Jiang et al., 2024; Yuan et al., 2025). Banyak lingkungan ini juga aktif secara biologis, sehingga proses yang menurunkan transportasi hilir justru dapat meningkatkan waktu tinggal lokal dan kontak organisme.

Perspektif penyerap tersembunyi juga membingkai ulang persoalan neraca massa yang telah lama ada dalam penelitian mikroplastik. Ketidaksesuaian yang

tampak antara perkiraan masukan sungai dan stok laut yang terukur sering diinterpretasikan sebagai bukti adanya penyerap yang belum teramati. Namun, pendekatan berbasis residu berisiko karena estimasi sumber itu sendiri dapat bias. Yang et al. (2025) merangkum estimasi fluks sungai-ke-pesisir yang membentang beberapa orde besaran dan menyoroti sensitivitas tinggi terhadap asumsi pengambilan sampel dan konversi. Analisis ulang menunjukkan bahwa beberapa estimasi fluks mikroplastik sungai global mungkin dilebihestimasi dua hingga tiga orde besaran, sehingga kebutuhan untuk mengasumsikan satu “penyerap yang hilang” berukuran sangat besar dapat berkurang (Weiss et al., 2021; Yang et al., 2025). Sebaliknya, pengamatan lapangan langsung dari waduk, dataran banjir, estuari, dan sedimen pesisir menunjukkan bahwa penyimpanan yang nyata memang terjadi. Karena itu, kesimpulan yang dapat dipertanggungjawabkan bukan bahwa penyerap tersembunyi menjelaskan setiap ketidakseimbangan anggaran, melainkan bahwa penyimpanan dan galat pengukuran harus diselesaikan secara terpisah.

Studi terbaru mempertajam perbedaan ini. Waduk Tiga Ngarai menahan sebagian besar beban mikroplastik yang dibawa Yangtze dan secara selektif mengubur partikel kecil, sedangkan pemantauan tahunan di Estuari Yangtze menunjukkan bahwa distribusi vertikal dan lateral yang heterogen dapat membuat estimasi fluks berbasis permukaan saja sangat menyesatkan (Gao et al., 2023; Chen et al., 2026). Di estuari, pengukuran polimer dengan sensitivitas tinggi menunjukkan kecepatan pengendapan mulai dari perilaku mengapung hingga lebih dari 38 m hari⁻¹ dan memperlihatkan bahwa retensi dapat diikuti oleh ekspor yang dimodulasi pasang surut (Yan et al., 2026). Pada sedimen kontinum sungai-estuari-pesisir subtropis, analisis inframerah beresolusi tinggi mendokumentasikan pengayaan sedimen yang kuat dan evolusi risiko di sepanjang zona transisi (Zhang et al., 2026). Temuan-temuan ini menunjukkan

bahwa “penyerap” dan “sumber” adalah keadaan, bukan label permanen.

Tesis utama tinjauan ini adalah bahwa penyerap tersembunyi perlu dipahami sebagai reservoir paparan yang reversibel. Signifikansinya bergantung pada empat dimensi yang saling terkait: besarnya stok yang tertahan, lama dan kedalaman penyimpanan, probabilitas serta waktu reaktivasi, dan konsekuensi biologis dari waktu tinggal yang berkepanjangan. Pendekatan ini melampaui pertanyaan mengenai tempat mikroplastik terakumulasi dengan menanyakan kapan penyimpanan menurunkan transportasi, kapan penyimpanan menciptakan hotspot paparan, dan kapan gangguan mengubah material tersimpan menjadi pulsa sekunder. Dengan mengintegrasikan hidromorfologi air tawar, penyaringan estuari, dinamika sedimen pesisir, penuaan partikel, dan paparan ekologis, tinjauan ini mengembangkan kerangka penyimpanan-reaktivasi-paparan untuk penilaian sumber-ke-laut. Kerangka ini dimaksudkan untuk membedakan hotspot fluks dari hotspot risiko dan mengidentifikasi pengukuran yang diperlukan sebelum fungsi penyerap dapat diperlakukan sebagai manfaat lingkungan.

2. Cakupan dan pendekatan tinjauan naratif

Artikel ini merupakan tinjauan naratif kritis, bukan tinjauan sistematis atau meta-analisis. Basis bukti disusun berdasarkan sintesis terbaru tentang transportasi sungai, hidrologi air tawar dan waduk, nasib di estuari, transportasi pesisir, serta dinamika zona pesisir, kemudian diperbarui dengan pencarian terarah terhadap penelitian primer dan catatan penerbit yang tersedia hingga Agustus 2026 (Malli et al., 2022; Owowenu et al., 2023; Jiang et al., 2024; Quadroni et al., 2024; Yang et al., 2025). Istilah pencarian menggabungkan “microplastic” atau “micro/nanoplastic” dengan “riverbed”, “hyporheic”, “floodplain”, “reservoir”, “dam”, “estuary”, “turbidity maximum”, “sediment”, “mangrove”, “salt

marsh", "seagrass", "coastal bay", "resuspension", "bioturbation", "biofouling", dan "ecological risk". Prioritas diberikan pada observasi lapangan, eksperimen proses, pemodelan hidrodinamika, serta studi yang melaporkan informasi kuantitatif terkait penyimpanan, reaktivasi, atau paparan.

Tinjauan ini secara sengaja berfokus pada kontinum air tawar–estuaria–pesisir karena pembalikan penyerap–sumber yang paling kuat terjadi di lokasi tempat rezim hidrodinamika berubah secara tiba-tiba. Akumulasi di laut terbuka hanya dibahas ketika diperlukan untuk memperjelas nasib material yang diekspor dari sistem pesisir. Makroplastik dipertimbangkan bila membantu menjelaskan mobilisasi akibat kejadian atau fragmentasi, tetapi penekanan utama tetap pada partikel yang secara konvensional diklasifikasikan sebagai mikroplastik (<5 mm) dan, bila secara eksplisit diukur, fraksi yang lebih kecil mendekati domain nanoplastik. Studi yang hanya berbasis identifikasi visual diperlakukan secara hati-hati karena tingkat positif palsu dan batas deteksi ukuran berbeda secara substansial dari metode spektroskopi atau termoanalitik (Jiang et al., 2024; Yang et al., 2025). Demikian pula, indeks bahaya polimer ditafsirkan sebagai indikator penyaringan awal, bukan bukti langsung kerusakan ekologis pada tingkat populasi.

Sintesis disusun berdasarkan proses, bukan semata-mata menurut kompartemen lingkungan. Bukti dievaluasi untuk: (i) mekanisme retensi, termasuk pengendapan, filtrasi, infiltrasi, terdampar, agregasi, dan penguburan; (ii) pemicu reaktivasi, termasuk banjir, transisi kekeringan–pembasahan kembali, gaya geser pasang surut, badai, operasi bendungan, pengerukan, dan bioturbasi; (iii) transformasi selama waktu tinggal, termasuk biofouling, pelapukan, fragmentasi, dan pertukaran kontaminan; serta (iv) konsekuensi terhadap paparan. Perhatian khusus diberikan pada studi yang melaporkan hasil kontradiktif karena lingkungan yang sama dapat menahan

atau mengeksport mikroplastik bergantung pada debit, sifat partikel, ketersediaan sedimen, dan waktu pengambilan sampel (Campanale et al., 2020; Malli et al., 2022; Quadroni et al., 2024). Karena itu, narasi yang dihasilkan menekankan kondisi batas, bukan efisiensi penyerap yang dianggap universal.

Keterbandingan merupakan keterbatasan utama literatur yang tersedia. Kelimpahan yang dilaporkan dapat berbeda beberapa orde besaran akibat ukuran mata jaring, batas bawah ukuran partikel, kedalaman pengambilan sampel, pelaporan berbasis massa versus jumlah, dan metode analitik. Jaring 80 μm dapat menghasilkan kelimpahan partikel hingga 100.000 kali lebih tinggi dibanding jaring 450 μm pada kondisi yang sebanding, yang menunjukkan mengapa konsentrasi yang dipublikasikan tidak dapat diperlakukan sebagai nilai yang langsung dapat dipertukarkan (Yang et al., 2025). Penelitian yang lebih baru juga menunjukkan bahwa pengambilan sampel satu lapisan dapat mendistorsi estimasi fluks ketika gradien vertikal dan lateral kuat (Chen et al., 2026). Karena itu, nilai kuantitatif dalam tinjauan ini digunakan untuk menggambarkan mekanisme dan skala, bukan untuk membangun peringkat konsentrasi universal.

3. Mengapa penyerap tersembunyi terbentuk: penyortiran hidrodinamika, transformasi partikel, dan keterkaitan dengan sedimen

Mikroplastik tidak berperilaku sebagai butiran pasif yang semata-mata ditentukan oleh densitas. Trajektorinya mencerminkan keseimbangan yang terus berubah antara densitas, ukuran, bentuk, gaya hambat, turbulensi, pertumbuhan biofilm, agregasi, dan interaksi dengan bahan tersuspensi alami. Eksperimen laboratorium dan pemodelan menunjukkan bahwa densitas berpengaruh tetapi tidak cukup untuk memprediksi posisi vertikal, khususnya pada serat dan fragmen tidak beraturan (Khatmullina & Isachenko, 2017; Bagaev et al., 2017; Waldschläger & Schüttrumpf,

2019). Polietilena atau polipropilena berdensitas rendah dapat ditemukan dalam sedimen dasar, sedangkan polimer yang secara nominal padat dapat berada dekat permukaan ketika turbulensi atau pencampuran vertikal kuat. Implikasi utamanya adalah bahwa penyerap tersembunyi dibentuk oleh kombinasi proses, bukan sekadar oleh "plastik berat yang tenggelam". Pengamatan ini konsisten dengan sintesis pesisir yang menunjukkan bahwa turbulensi dan morfologi partikel dapat mengalahkan ekspektasi sederhana berbasis densitas (Jiang et al., 2024).

Biofouling menyediakan salah satu jalur untuk melampaui batas daya apung. Kolonisasi mengubah massa partikel, ukuran efektif, kekasaran permukaan, dan interaksinya dengan partikel organik atau mineral. Eksperimen dan model menunjukkan bahwa biofilm dapat mengubah perilaku tenggelam serta bahwa partikel yang terbiofouling dapat mengalami siklus tenggelam-naik berulang ketika kolonisasi, grazing, degradasi, atau perubahan sifat air mengubah densitas efektif (Kaiser et al., 2017; Kooi et al., 2017). Agregasi menyediakan jalur lain. Mikroplastik dapat mengalami homoagregasi atau, yang lebih penting di perairan keruh, heteroagregasi dengan lempung, detritus organik, fitoplankton, atau bahan partikulat tersuspensi lainnya sehingga membentuk partikel komposit yang mengendap berbeda dari plastik asalnya (Alimi et al., 2018; Li et al., 2019; Malli et al., 2022).

Keterkaitan dengan sedimen alami sangat penting karena sebagian besar jalur sumber-ke-laut merupakan sistem sedimenter. Saluran sungai menyortir butir berdasarkan tegangan geser dan kapasitas angkut; estuari memerangkap material tersuspensi halus melalui sirkulasi gravitasi dan asimetri pasang surut; lahan basah pesisir meredam aliran dan meningkatkan deposisi; sedangkan gelombang atau badai secara periodik meresuspensi dasar dekat pantai. Mikroplastik memasuki jalur sedimen yang telah ada ini, tetapi dengan

perilaku tambahan yang bergantung pada bentuk, densitas, dan kondisi permukaan (Owowenu et al., 2023; Jiang et al., 2024). Eksperimen pengendapan terbaru pada air keruh mengonfirmasi bahwa sedimen tersuspensi ambien dan struktur aliran yang dipengaruhi sedimen dapat mengubah laju deposisi mikroplastik, sehingga memperkuat perlunya mempelajari partikel plastik dan mineral secara bersama-sama, bukan terpisah (Parrella et al., 2025).

Ambang hidrodinamika menentukan apakah partikel tersimpan tetap tersembunyi. Pada daya aliran, tegangan geser dasar, atau energi kinetik turbulen yang rendah, pengendapan dan retensi mendominasi; ketika ambang entrainment terlampaui, material yang sebelumnya tersimpan dapat kembali tersuspensi. Karena itu, pool sungai, daerah arus balik, tepian saluran, bar saluran, dan petak deposisional berbutir halus memiliki potensi penyimpanan lebih tinggi dibanding biotop hidraulik berarus cepat, tetapi juga menjadi sumber yang siap teraktivasi saat aliran tinggi (Owowenu et al., 2023). Cekungan dataran banjir menunjukkan prinsip yang sama pada skala spasial yang lebih besar: topografi rendah dan frekuensi genangan memengaruhi deposisi, sedangkan banjir berikutnya dapat mendistribusikan ulang partikel yang telah terakumulasi (Rolf et al., 2024). Di estuari, ambang yang ekuivalen dimodulasi oleh fase pasang surut, siklus purnama-perbani, stratifikasi salinitas, angin, dan debit air tawar (Malli et al., 2022).

Penyimpanan juga mengubah partikel itu sendiri. Pelapukan dapat mengoksidasi permukaan, meningkatkan kekasaran, mengubah kapasitas sorpsi, membuat fragmen yang lebih besar menjadi rapuh, dan memfasilitasi fragmentasi lanjutan. Biofilm membentuk habitat mikroba yang khas, sedangkan paparan air pori dapat menukar aditif dan kontaminan tersorpsi dengan sedimen di sekitarnya. Transformasi ini berarti bahwa sifat ekologis partikel saat dilepaskan dapat

berbeda dari sifatnya setelah berbulan-bulan atau bertahun-tahun terkubur (Alimi et al., 2022; Su et al., 2025). Karena itu, penyerap tersembunyi berfungsi sebagai reaktor sekaligus tempat penyimpanan: retensi fisik memperpanjang waktu untuk penuaan kimia dan biologis, yang berpotensi mengubah perilaku remobilisasi maupun toksisitas.

Konsekuensi praktisnya adalah bahwa kapasitas penyerap sebaiknya digambarkan sebagai keseimbangan laju yang dinamis. Suatu lokasi merupakan penyerap bersih ketika deposisi ditambah penguburan melebihi erosi, resuspensi, dan ekspor hilir selama interval pengamatan. Lokasi tersebut menjadi sumber ketika keseimbangan berbalik. Definisi ini mencegah penggolongan seluruh tipe ekosistem—seperti waduk, mangrove, atau estuari—sebagai penyerap permanen. Definisi ini juga mengakui bahwa suatu lokasi dapat menjadi penyerap bersih tahunan sambil tetap menghasilkan pulsa singkat yang penting secara ekologis selama banjir, badai, pengerukan, atau operasi pengelolaan (Quadroni et al., 2024; Qiao & Wang, 2024; Li et al., 2026).

4. Penyerap tersembunyi di air tawar: dasar sungai, zona hiporeik, dataran banjir, dan waduk

Jaringan sungai merupakan mosaik spasial transportasi dan retensi. Pada skala ruas, kecepatan aliran, kedalaman, kekasaran dasar, morfologi saluran, dan biotop hidraulik menentukan apakah mikroplastik tetap tersuspensi, mengendap, terdampar di tepian, atau terperangkap di antara partikel dasar dan vegetasi (Baldwin et al., 2016; Barrows et al., 2018; Owowenu et al., 2023). Studi lapangan menunjukkan bahwa kelimpahan tidak merespons debit secara seragam. Di Sungai Ofanto, konsentrasi pada periode basah berhubungan positif dengan tinggi muka air dan kecepatan aliran, konsisten dengan masukan berbasis daratan dan remobilisasi, sedangkan Garonne menunjukkan konsentrasi lebih tinggi pada

kondisi debit rendah, yang menggambarkan persaingan antara aktivasi sumber, pengenceran, dan penyimpanan (Campanale et al., 2020; de Carvalho et al., 2021). Kontras semacam ini memang diharapkan bila setiap sungai mengandung zona penyimpanan tersebar yang teraktivasi pada ambang hidraulik yang berbeda.

Dasar sungai termasuk penyerap tersembunyi yang paling penting karena berada di bawah domain pengambilan sampel sebagian besar survei air permukaan. Selama aliran normal, partikel dapat tertahan oleh kekasaran dasar kasar, terdeposit bersama sedimen halus, atau terinkorporasi ke dalam matriks bentik kaya biofilm. Saat banjir, stok tersebut dapat terangkat dengan cepat. Hurley et al. (2018) melaporkan penurunan sekitar 70% kontaminasi mikroplastik pada sedimen dasar sungai di berbagai daerah tangkapan Inggris setelah banjir besar, yang menunjukkan pembilasan pada skala daerah tangkapan. Hasil ini tidak berarti seluruh material diekspor ke laut; partikel yang termobilisasi dapat terdeposit kembali di hilir, tersimpan di dataran banjir, tertahan oleh waduk, atau terperangkap dalam sedimen estuari. Karena itu, berkurangnya stok dasar sungai selama banjir paling tepat ditafsirkan sebagai redistribusi stok, bukan hilangnya material.

Zona hiporeik memperluas inventaris tersembunyi ke bawah dasar sungai yang terlihat. Pertukaran antara air permukaan dan air pori dapat mendorong mikro- dan nanoplastik masuk ke sedimen dangkal, tempat retensi bergantung pada pengendapan, filtrasi, interaksi partikel-butir, serta upwelling atau downwelling lokal. Eksperimen gabungan dan pemodelan numerik terbaru menemukan bahwa sebagian besar partikel tertahan di lapisan dasar sungai yang dangkal, sementara ukuran partikel, densitas, hidrodinamika, kecepatan pengendapan, dan koefisien retensi mengendalikan infiltrasi yang lebih dalam (Yuan et al., 2025). Kompartemen ini penting karena

sedimen hiporeik merupakan lokasi pemrosesan mikroba yang intensif dan aktivitas invertebrata. Namun, kompartemen ini jarang dimasukkan ke dalam neraca plastik sungai sehingga menghasilkan bias sistematis menuju fraksi bergerak.

Dataran banjir merupakan tempat penyimpanan lain yang terhubung secara episodik. Signifikansinya bergantung pada frekuensi genangan, topografi lokal, vegetasi, dan beban sedimen yang dibawa banjir. Penelitian multi-metode di sepanjang Rhine menunjukkan bahwa mikroplastik terakumulasi dalam cekungan dataran banjir dan bahwa pola spasial berkaitan dengan frekuensi banjir serta topografi (Rolf et al., 2024). Endapan semacam ini dapat bertahan selama periode kering dan sebagian terolah kembali saat genangan berikutnya. Karena itu, penyimpanan di dataran banjir menciptakan jeda waktu antara emisi daerah tangkapan dan pengantaran ke hilir. Karena partikel warisan dapat termobilisasi kembali bertahun-tahun setelah deposisi awal, fluks mikroplastik yang diamati di muara sungai dapat mencerminkan emisi saat ini sekaligus penyimpanan historis dalam DAS.

Bendungan dan waduk memperbesar retensi ini dengan mengubah waktu tinggal, kecepatan, stratifikasi kolom air, dan sedimentasi. Pengukuran di sekitar enam bendungan di New York menemukan konsentrasi mikroplastik lebih rendah pada air permukaan waduk dibanding ruas hulu, tetapi konsentrasi lebih tinggi pada sedimen waduk, yang menunjukkan intersepsi oleh sedimen impoundment (Watkins et al., 2019). Waduk Villerest di Prancis juga menunjukkan retensi kuat pada endapan berbutir halus, dengan tingkat dan keragaman mikroplastik jauh lebih tinggi di zona deposisional transisional dan menyerupai danau dibanding sedimen lotik yang lebih kasar (Dhivert et al., 2022). Temuan ini mendukung pandangan bahwa sedimen waduk bukan kompartemen perifer;

sedimen tersebut merupakan komponen utama inventaris plastik sungai.

Waduk Tiga Ngarai memberikan contoh kuantitatif yang paling jelas. Sedimen di hulu bendungan mengandung mikroplastik lebih dari satu orde besaran dibanding sedimen di hilir, dan partikel kecil ($<300 \mu\text{m}$) tertahan secara selektif. Retensi mikroplastik diperkirakan sebesar $8.048 \pm 7.494 \text{ t tahun}^{-1}$, setara dengan $47 \pm 44\%$ fluks mikroplastik Yangtze ke laut dalam kerangka neraca massa penelitian tersebut (Gao et al., 2023). Konsentrasi pada sedimen waduk meningkat dari $3.785 \pm 3.558 \text{ item kg}^{-1}$ pada 2008 menjadi $23.018 \pm 14.268 \text{ item kg}^{-1}$ pada 2020. Penelitian selanjutnya juga menunjukkan bahwa operasi bendungan mengubah distribusi spasial dan fluks, sehingga semakin memperkuat interpretasi bahwa waduk besar merupakan sistem penyortiran aktif dan bukan sekadar cekungan pengendapan inert.

Yang penting, retensi waduk bersifat reversibel. Sabuk hidrofluktuasi dapat menyimpan partikel saat muka air rendah dan berubah menjadi sumber ketika tergenang; banjir dapat menata ulang mikroplastik sedimenter; sedangkan pembilasan sedimen atau penghilangan bendungan dapat melepaskan partikel tersimpan ke hilir (Chen et al., 2022; Quadroni et al., 2024). Banjir Yangtze tahun 2020 tidak sekadar mengosongkan Waduk Tiga Ngarai; sebaliknya, kelimpahan mikroplastik sedimenter meningkat menjadi sekitar 1,7 kali tingkat 2019, yang menunjukkan bahwa kejadian berenergi tinggi dapat membawa masuk, mendistribusikan ulang, dan mengubur partikel di dalam impoundment meskipun sebagian material tetap diekspor (Gao et al., 2023; Quadroni et al., 2024). Perilaku ini merupakan alasan mengapa label penyerap harus selalu dikaitkan dengan keadaan hidrologis.

Akibatnya, penyerap tersembunyi di air tawar mengubah neraca massa sekaligus paparan. Organisme bentik menghadapi konsentrasi yang mungkin tidak tergambarkan dengan baik oleh air di

atasnya, dan campuran realistis dapat mengendap cukup cepat sehingga paparan bergeser menuju sedimen. Dalam mikrokosmos air tawar, 53% campuran yang relevan secara lingkungan telah tenggelam setelah 28 hari; efek terkait reproduksi terjadi pada konsentrasi sedimen rendah pada cacing hitam *Lumbriculus variegatus*, sedangkan siput *Lymnaea stagnalis* merespons pada tingkat yang lebih tinggi (Martínez-Pérez et al., 2024). Eksperimen semacam ini tidak menetapkan ambang risiko yang berlaku secara luas di lapangan, tetapi menunjukkan hubungan mekanistik antara sedimentasi dan paparan benthik kronis.

5. Estuari sebagai penyaring semipermeabel dan penyerap tersembunyi sementara

Estuari bukan sekadar zona pencampuran antara sungai dan laut. Estuari merupakan penyaring reaktif-partikel tempat debit air tawar, asimetri pasang surut, gradien salinitas, bahan partikulat tersuspensi, maksimum kekeruhan estuari, angin, dan batimetri menciptakan peluang berulang untuk deposisi dan remobilisasi (Defontaine et al., 2020; Bermúdez et al., 2021; Malli et al., 2022). Konsep klasik maksimum kekeruhan estuari sangat relevan karena mikroplastik dapat berinteraksi dengan partikel mineral halus dan organik yang sama-sama terperangkap oleh sirkulasi residual. Heteroagregasi dan biofouling dapat meningkatkan pengendapan, sedangkan baji salinitas dan stratifikasi densitas mendistribusikan kembali partikel secara vertikal. Akibatnya, konsentrasi mikroplastik pada satu stasiun permukaan mungkin memberikan sedikit informasi mengenai total inventaris estuari. Pandangan berbasis proses ini konsisten dengan sintesis pesisir yang lebih luas oleh Yang et al. (2025).

Fase pasang surut mengubah arah dan besarnya transportasi dalam hitungan jam. Di Estuari Itchen, penurunan dua pertiga konsentrasi mikroplastik antara kondisi pasang dan surut ditafsirkan sebagai

perangkap intertidal (Stead et al., 2020). Pemodelan di Ría de Vigo menunjukkan bahwa selama pasang purnama sekitar 45% partikel model dikeluarkan saat surut dibanding 25% saat pasang, sedangkan ekspor pada kondisi perbani turun menjadi sekitar 5% dan 3,7% secara berurutan (Sousa et al., 2021; Malli et al., 2022). Pola ini menggambarkan satu peralihan dasar estuari: pembilasan lemah mendukung retensi dan sedimentasi, sedangkan arus pasang surut yang lebih kuat meningkatkan pertukaran dan ekspor.

Pasang surut harian berinteraksi dengan siklus purnama-perbani. Sedimen permukaan dapat mengakumulasi partikel selama kondisi perbani berenergi rendah, sedangkan pasang purnama yang lebih kuat meningkatkan suspensi dan pembilasan. Namun, arah perubahan sangat spesifik lokasi karena vegetasi, geometri saluran, aliran air tawar, dan lokasi sumber titik dapat membalik pola yang diharapkan (Sadri & Thompson, 2014; Díez-Minguito et al., 2020; Malli et al., 2022). Ketergantungan lokasi ini bukan sekadar noise; hal tersebut menunjukkan bahwa fungsi retensi muncul dari kopling lokal antara hidrodinamika, sifat partikel, dan waktu sumber. Karena itu, efisiensi penyerap estuari sebaiknya diukur selama satu siklus pasang surut penuh dan, idealnya, melintasi periode purnama-perbani, bukan disimpulkan dari satu kondisi pasang.

Debit sungai musiman menambahkan lapisan intermitensi lainnya. Estuari Santos mencatat peningkatan sekitar 20 kali kelimpahan pelet mikroplastik antara musim kering dan basah, konsisten dengan peningkatan limpasan dan suplai dari sungai (Balthazar-Silva et al., 2020). Sistem lain justru menunjukkan konsentrasi lebih rendah selama periode basah karena pengenceran atau pembilasan yang lebih kuat melampaui tambahan masukan. Badai dapat menghasilkan pulsa yang lebih tajam lagi: di Estuari Cooks River, kejadian badai-banjir meningkatkan kelimpahan mikroplastik dari sekitar 400 menjadi

17.383 partikel m^{-3} (Hitchcock, 2020). Perubahan skala kejadian sebesar ini dapat mendominasi transportasi tahunan tetapi terlewat oleh pemantauan bulanan tetap. Sedimentasi membuat dasar estuari menjadi penyerap tersembunyi, tetapi resuspensi mencegahnya diperlakukan sebagai lokasi penguburan permanen. Estuari Río de la Plata, misalnya, menunjukkan konsentrasi sedimen yang jauh lebih tinggi daripada air di atasnya, mendukung akumulasi benthik (Pazos et al., 2021). Aliran rendah, sedimen halus, dan geomorfologi terlindung mendorong penguburan; turbulensi, gaya geser pasang surut, gelombang angin, pengerukan, dan bioturbasi membalik proses tersebut (Alves & Figueiredo, 2019; Simon-Sánchez et al., 2019; Malli et al., 2022). Perubahan terkait salinitas pada agregasi partikel dan densitas air dapat lebih lanjut menggeser ambang pengendapan. Perilaku yang dihasilkan menyerupai membran semipermeabel: kelas partikel tertentu tertahan lebih lama daripada yang lain, tetapi stok yang tertahan tetap terhubung dengan transportasi ke hilir. Secara konseptual, perilaku sumber-penyerap reversibel ini telah diantisipasi oleh model debris estuari yang menghubungkan mekanisme perangkap fisik, kimia, dan biologis (Vermeiren et al., 2016).

Pengamatan terbaru yang teresolusi polimer memperkuat interpretasi ini. Di sejumlah estuari subtropis Teluk, konsentrasi massa tertinggi ditemukan di Galveston Bay, mencapai $0,82\text{--}19,8 \mu\text{g L}^{-1}$, dibanding $0,09\text{--}3,7 \mu\text{g L}^{-1}$ di Matagorda Bay. Perilaku pengendapan terukur berkisar dari mengapung hingga lebih dari 38 m hari $^{-1}$ dan sering menyimpang dari ekspektasi yang hanya berbasis densitas karena agregasi, biofouling, dan resuspensi mengubah transportasi. Data deret waktu di mulut estuari menunjukkan ekspor yang dominan saat surut setelah retensi sementara (Yan et al., 2026). Hasil ini memberikan bukti proses langsung untuk konsep penyaring semipermeabel dan menunjukkan

mengapa pengukuran massa spesifik-polimer dapat melengkapi perhitungan jumlah partikel.

Studi paralel sumber-ke-pesisir di wilayah Laut Kuning menemukan konsentrasi air $0,89 \pm 0,15$ hingga $11,47 \pm 1,80$ item L^{-1} dan konsentrasi sedimen $93,33 \pm 23,09$ hingga $653,33 \pm 50,33$ item kg^{-1} berat kering, dengan risiko yang berubah di sepanjang transisi sungai pedalaman-estuari-dekat pantai (Chen et al., 2025). Pengukuran LDIR yang lebih baru pada kontinum sungai-estuari-pesisir subtropis menunjukkan pengayaan sedimen yang kuat, penguburan vertikal, penyortiran ukuran partikel, dan peningkatan bahaya polimer di zona estuari (Zhang et al., 2026). Bersama-sama, studi ini menunjukkan bahwa estuari dapat sekaligus menurunkan fluks langsung ke laut, mengonsentrasikan polimer tertentu dalam sedimen, dan menciptakan hotspot paparan lokal.

Karena itu, interpretasi pengelolaan yang paling berguna bukanlah “estuari melindungi laut” ataupun “estuari adalah sumber.” Perannya bersifat kondisional. Suatu estuari dapat menahan sebagian besar partikel masuk saat debit rendah dan pasang perbani, lalu melepaskan pulsa saat pasang purnama, banjir, badai, pengerukan, atau pergeseran musim. Karena kawasan asuhan, dataran lumpur, hamparan kerang, dan rawa asin berada pada lingkungan deposisional yang sama, waktu tinggal yang panjang dapat meningkatkan kontak ekologis meskipun ekspor tahunan menurun (Malli et al., 2022; Yan et al., 2026). Kerangka risiko berbasis penyimpanan karena itu harus mengevaluasi waktu retensi dan tumpang tindih habitat selain fluks bersih.

6. Penyerap tersembunyi di pesisir: teluk, laguna, lahan basah, lamun, mangrove, dan sedimen dekat pantai

Setelah diekspor dari estuari, mikroplastik memasuki lingkungan pesisir yang didominasi gelombang, pasang surut, arus sejajar pantai, sirkulasi yang digerakkan angin, stratifikasi, dan resuspensi yang

sering. Karena itu, zona pesisir merupakan wilayah redistribusi, bukan tujuan terminal. Kedalaman yang dangkal memungkinkan energi gelombang mencapai dasar; pantai bergantian antara akresi dan erosi; laguna bertukar air secara intermiten melalui inlet yang terbatas; dan teluk semi-tertutup dapat menahan atau dengan cepat membilas partikel bergantung pada waktu tinggal dan gaya angin (Feng et al., 2023; Jiang et al., 2024; Yang et al., 2025). Variabilitas hidrodinamika yang sama yang membentuk petak deposisional juga dapat mendestabilkannya, menghasilkan penyerap tersembunyi dengan umur dari hitungan jam hingga dekade.

Teluk pesisir menggambarkan ketegangan tersebut. Perangkap sedimen diharapkan terbentuk di tempat partikel halus terakumulasi, tetapi sistem dangkal yang energik dapat lebih banyak mengeksport daripada mengubur mikroplastik. Di Matagorda dan San Antonio Bays, konsentrasi sedimen hanya puluhan hingga ratusan partikel kg^{-1} dan menunjukkan hubungan lemah dengan ukuran butir, kandungan organik, kedalaman air, atau jarak dari pantai. Pencampuran yang terus-menerus akibat angin dan keterbukaan terhadap Teluk Meksiko ditafsirkan sebagai faktor yang mempertahankan mobilitas tinggi dan membatasi akumulasi sedimen jangka panjang (Bailey et al., 2025). Temuan ini penting karena memperingatkan agar tidak menganggap keterkurungan geomorfik otomatis menghasilkan penyerap yang kuat. Suatu teluk dapat memiliki sumber melimpah tetapi stok sedimen yang kecil bila frekuensi gangguan tinggi.

Laguna pesisir dapat menunjukkan perilaku sebaliknya ketika pertukaran yang terbatas meningkatkan waktu tinggal. Kekuatan penyerapnya dikendalikan oleh kondisi inlet, salinitas, evaporasi, masukan air tawar, dan sedimentasi. Yang et al. (2025) menekankan bahwa dinamika laguna sangat berbeda antar-sistem dan topografi dapat menghasilkan retensi lokal yang tinggi. Dalam kondisi demikian,

tepiannya berenergi rendah dan sedimen halus dapat menyimpan mikroplastik, sementara pembukaan inlet secara episodik atau badai menghasilkan pulsa ekspor. Karena jaringan makanan laguna sering produktif dan terkompresi secara spasial, berimpitnya retensi dengan habitat asuhan dan area makan dapat meningkatkan paparan meskipun beban partikel sedang. Pengamatan debris terdahulu di Río de la Plata juga menunjukkan bahwa front konvergen dapat menciptakan akumulasi lokal yang tidak semata-mata ditentukan oleh jarak dari sumber (Acha et al., 2003). Ekosistem pesisir bervegetasi menambahkan mekanisme perangkap biologis. Akar dan pneumatofor mangrove mengurangi aliran, meningkatkan deposisi sedimen, dan mengintersepsi debris sehingga sedimen mangrove menjadi kandidat kuat penyerap tersembunyi. Namun, efeknya tidak selalu menguntungkan. Dalam lingkungan Estuari Pearl River yang mengalami urbanisasi cepat, konsentrasi air berkisar 245,8–1.562,4 partikel m^{-3} dan konsentrasi sedimen 374,3–7.475,3 partikel kg^{-1} . Pada hidrodinamika lemah, sedimen mangrove mengakumulasi partikel, sedangkan kondisi aliran tinggi meningkatkan konsentrasi kolom air melalui limpasan, masukan dari hulu, dan resuspensi, yang menunjukkan transisi dari penyerap menjadi sumber (Qiao & Wang, 2024). Penggunaan lahan perkotaan mengubah laju deposisi yang diperkirakan secara nyata, dan karet sintetis yang terkait dengan sumber transportasi melebihi 50% pada beberapa sampel.

Sedimen mangrove juga menghubungkan penyimpanan tersembunyi dengan keamanan pangan. Di Tumbes, Peru, sedimen rata-rata mengandung 726 ± 396 mikroplastik kg^{-1} , sedangkan jaringan kerang black ark dan kepiting mangrove yang dieksploitasi secara komersial juga terkontaminasi; estimasi asupan melalui spesies pangan laut tersebut adalah 431 item per kapita per tahun bagi populasi setempat (Aguirre-Sanchez et al., 2024).

Estimasi ini tidak boleh disamakan dengan ambang efek kesehatan, tetapi menunjukkan bahwa zona retensi dapat menghubungkan kontaminasi sedimen dengan biota yang dipanen. Penelitian sebelumnya juga mendeteksi mikroplastik dan mikroorganisme yang melekat pada sedimen estuari terkait mangrove, yang semakin menegaskan pentingnya jalur paparan bentik dan mikroba (Baptista Neto et al., 2019).

Padang lamun sering digambarkan sebagai penyaring partikel karena drag kanopi mengurangi aliran dan mendorong deposisi, tetapi bukti terbaru menunjukkan ketergantungan konteks yang besar. Ledet et al. (2024) mendeteksi partikel antropogenik di seluruh sedimen, vegetasi, dan fauna sepanjang gradienutupan lamun, tetapi tidak menemukan perbedaan signifikan antara petak bervegetasi rapat dan petak bervegetasi jarang. Studi tropis di Brasil juga menemukan partikel pada 80% sampel sedimen, rata-rata 142 ± 140 partikel kg^{-1} berat kering, tanpa perbedaan signifikan antara area lamun dan area tanpa vegetasi; sifat sedimen lebih informatif daripada keberadaan vegetasi saja (Souza et al., 2024). Hasil ini memperingatkan agar habitat karbon biru tidak dianggap secara universal sebagai penyerap mikroplastik yang lebih kuat. Penelitian pada mikrolapis permukaan di lingkungan estuari juga menunjukkan bahwa konsentrasi dapat berbeda tajam antar-kompartemen yang berdekatan secara vertikal (Anderson et al., 2018).

Bahkan ketika vegetasi meningkatkan deposisi, interpretasi ekologis tetap memerlukan kehati-hatian. Penyerap yang lebih kuat dapat menurunkan transportasi lepas pantai sambil meningkatkan paparan kronis bagi epifauna, infauna, perumput, pemakan penyaring, dan organisme yang menggunakan habitat sebagai kawasan asuhan. Sebaliknya, gangguan sedimen bervegetasi oleh badai, gelombang kapal, bioturbasi, atau degradasi habitat dapat meremobilisasi material yang sebelumnya terperangkap. Karena itu, restorasi pesisir memiliki hubungan ganda dengan

pencemaran mikroplastik: vegetasi yang direstorasi dapat mengintersepsi partikel, tetapi sedimen yang tercemar dapat menjadi bagian dari rezim paparan habitat hasil restorasi. Kinerja penyerap bervegetasi karena itu sebaiknya dinilai berdasarkan kestabilan retensi dan risiko biologis, bukan hanya kemampuan menangkap partikel (Jiang et al., 2024; Qiao & Wang, 2024).

Rawa asin dan rawa pasang surut air tawar dapat menyimpan rekaman sedimenter yang lebih panjang. Penelitian terbaru di rawa pasang surut air tawar menemukan bahwa sedimen yang lebih muda mengandung konsentrasi mikroplastik lebih tinggi daripada endapan yang lebih tua dan memperkirakan fluks penguburan sedimen estuari global sekitar 0,2 Mt tahun⁻¹, sementara perhitungan bahaya berbasis polimer menunjukkan kekhawatiran ekologis yang tidak dapat diabaikan (Bussarakum et al., 2025). Inti sedimen semacam ini menunjukkan bagaimana kronologi sedimen dapat mengubah pengukuran konsentrasi statis menjadi riwayat akumulasi. Namun, inti tersebut juga memperlihatkan mengapa penguburan tidak identik dengan sekuestrasi permanen: erosi rawa, migrasi saluran, kenaikan muka laut, pengerukan, dan bioturbasi dapat mengekspos lapisan yang lebih tua.

Di luar lahan basah, sedimen dekat pantai dan landas kontinen merupakan domain penyimpanan volumetrik terbesar, tetapi tingkat keterpaparannya terhadap pengolahan ulang berbeda-beda. Zona deposisional berbutir halus dapat mengakumulasi partikel, sedangkan dasar yang didominasi gelombang atau tersapu arus tetap bergerak. Pemodelan pesisir dari Chesapeake Bay hingga Mid-Atlantic Bight menunjukkan bahwa karakteristik partikel, biofouling, dan sirkulasi sangat mengubah waktu tinggal dan dispersi setelah ekspor dari estuari, dengan partikel kecil yang terbiofouling mampu mengalami redistribusi bawah permukaan yang lebih luas (Teixeira et al., 2026). Dengan demikian, istilah “penyerap pesisir”

mencakup beberapa keadaan: penyimpanan pantai sementara, sedimen teluk yang tercampur episodik, endapan lahan basah yang terperangkap secara biologis, dan penguburan landas kontinen yang lebih dalam. Setiap keadaan memiliki probabilitas reaktivasi dan profil paparan

yang berbeda. Kelas utama penyerap tersembunyi, mekanisme retensi, pemicu reaktivasi, dan jalur paparan yang diidentifikasi sepanjang kontinum dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Penyerap tersembunyi mikroplastik di sepanjang kontinum air tawar–estuair–pesisir serta karakteristik dominan penyimpanan, reaktivasi, dan paparannya.

Penyerap tersembunyi / kompartemen penyimpanan	Mekanisme retensi dominan	Keadaan penyimpanan tipikal	Pemicu reaktivasi utama	Jalur utama risiko ekologis	Referensi (Nama, Tahun)
Pool dasar sungai, daerah arus balik, dan petak dasar berbutir halus	Kecepatan rendah, kekasaran dasar, pengendapan, agregasi yang dimediasi biofilm	Dasar aktif hingga penguburan dangkal; hari hingga tahun	Banjir, gaya geser tinggi, pengolahan ulang saluran	Paparan invertebrata bentik; ingesti–egesti berulang	Hurley et al., 2018; Owowenu et al., 2023
Zona hiporeik	Pertukaran permukaan–bawah permukaan, filtrasi, pengendapan, retensi antarbutir	Terutama lapisan dasar sungai dangkal; berpotensi persisten	Pertukaran saat aliran tinggi, gangguan dasar, pembalikan air tanah–air permukaan	Kontak mikroba dan fauna hiporeik; kemungkinan relevansi terhadap filtrasi tebing	Yuan et al., 2025
Cekungan dataran banjir dan tepian saluran	Deposisi overbank, konvergensi topografis, perangkap vegetasi	Endapan episodik di antara kejadian banjir	Genangan ulang, erosi, rekoneksi dataran banjir	Paparan pada tanah dataran banjir dan biota lahan basah	Rolf et al., 2024
Sedimen waduk dan bendungan	Waktu tinggal panjang, penurunan kecepatan, perangkap sedimen halus, biofouling	Tahun hingga dekade; stratigrafi dangkal hingga lebih dalam	Banjir, penurunan muka air, pembilasan sedimen, penghilangan bendungan	Paparan bentik; pulsa sekunder besar selama pengelolaan	Watkins et al., 2019; Dhivert et al., 2022; Gao et al., 2023
Maksimum kekeruhan estuari dan sedimen dasar	Asimetri pasang surut, gradien salinitas, perangkap SPM, heteroagregasi	Jam hingga musim pada dasar aktif; lebih lama bila terkubur	Pasang pumama, banjir, gelombang angin, pengerukan	Paparan pada habitat asuhan, dataran lumpur, kerang, dan organisme demersal	Malli et al., 2022; Yang et al., 2025; Yan et al., 2026
Sedimen rawa asin dan rawa pasang surut air tawar	Peredaman oleh vegetasi, deposisi kohesif, akresi vertikal	Tahun hingga dekade dalam inti sedimen	Erosi, migrasi anak sungai, kenaikan muka laut, bioturbasi	Paparan bentik jangka panjang dan bahaya spesifik-polimer	Stead et al., 2020; Bussarakum et al., 2025
Sedimen mangrove	Peredaman oleh akar/pneumatofor, deposisi sedimen halus, hidrodinamika lemah	Musiman hingga multi-tahun; sedimen permukaan aktif	Aliran tinggi, limpasan, gerusan saluran, badai	Paparan bivalvia/kepiting; kontaminasi habitat asuhan	Aguirre-Sanchez et al., 2024; Qiao & Wang, 2024

Penyerap tersembunyi / kompartemen penyimpanan	Mekanisme retensi dominan	Keadaan penyimpanan tipikal	Pemicu reaktivasi utama	Jalur utama risiko ekologis	Referensi (Nama, Tahun)
Sedimen terkait lamun	Drag kanopi dan deposisi ketika hidrodinamika serta sedimen mendukung perangkap	Bergantung konteks; sedimen dangkal aktif	Badai, gelombang kapal, bioturbasi, degradasi habitat	Paparan epifauna/infauna dan perumput	Ledet et al., 2024; Souza et al., 2024
Teluk dan laguna semi-tertutup	Pertukaran terbatas, sirkulasi lemah, deposisi sedimen halus	Jam hingga tahun bergantung pada waktu tinggal	Pencampuran angin, pembukaan inlet, badai, pertukaran pasang surut	Waktu tinggal lokal tinggi pada habitat asuhan/makan yang produktif	Bailey et al., 2025; Yang et al., 2025
Pantai dan sedimen dekat pantai/landas kontinen	Infiltrasi swash, penyortiran gelombang, pengendapan, biofouling, dan penguburan	Penyimpanan pantai sementara hingga penguburan landas kontinen yang lebih lama	Kejadian gelombang, erosi, nourishment, pengerukan, resuspensi	Paparan intertidal dan bentik; redistribusi setelah gangguan	Feng et al., 2023; de Paula et al., 2025; Teixeira et al., 2026

7. Reaktivasi: ketika penyerap tersembunyi menjadi sumber sekunder

Pentingnya suatu penyerap tersembunyi bagi lingkungan ditentukan sama kuatnya oleh mekanisme pelepasannya seperti oleh kapasitas penyimpanannya. Banjir merupakan contoh paling jelas di air tawar. Banjir dapat memobilisasi partikel yang tersimpan di dasar sungai, mengerosi tebing dan dataran banjir, mengaktifkan sumber perkotaan serta pertanian, dan sekaligus membentuk zona deposisional baru di hilir. Banjir skala daerah tangkapan menurunkan kontaminasi mikroplastik dasar sungai sekitar 70% dalam satu penelitian di Inggris, sedangkan pemodelan global menunjukkan bahwa bahkan banjir dengan tingkat keparahan relatif rendah dapat meningkatkan potensi mobilisasi plastik secara substansial (Hurley et al., 2018; Roebroek et al., 2021). Pulsa yang dihasilkan dapat terdistribusi ulang di dalam daerah tangkapan, bukan langsung diekspor ke laut, terutama bila waduk atau ruas bergradien rendah mengintersepsi sedimen.

Rangkaian kejadian ekstrem sangat penting. Kekeringan mendorong partikel terdampar, terkonsentrasi di refugia beraliran rendah, dan terinkorporasi ke sedimen yang terekspos; hujan berikutnya dapat membilas endapan tersebut secara tiba-tiba. Quadroni et al. (2024) berpendapat bahwa perubahan iklim dan pengelolaan sumber daya air semakin mengubah siklus penyimpanan-pelepasan ini melalui perubahan rezim hidrologis. Dorongan monsun dapat melipatgandakan tiga kali pengantaran plastik harian pada sungai besar, sedangkan konsentrasi mikroplastik terkait banjir di perairan pesisir penerima dapat meningkat lebih dari satu orde besaran (Cheung et al., 2016; Gündogdu et al., 2018; Napper et al., 2021). Intermitensi ini berarti rata-rata tahunan dapat meremehkan paparan ekologis selama jendela waktu pendek dengan konsentrasi tinggi. Operasi waduk menciptakan reaktivasi antropogenik. Pembilasan sedimen, penurunan muka air, penggelontoran, pengerukan, dan penghilangan bendungan dirancang untuk memulihkan kontinuitas sedimen atau kapasitas tampung, tetapi juga dapat memobilisasi kontaminan yang

terakumulasi di belakang bendungan. Risiko ini sangat relevan bagi sedimen halus karena sedimen tersebut merupakan tempat penyimpanan mikroplastik yang efisien dan dapat diangkut jauh setelah tersuspensi kembali (Dhivert et al., 2022; Quadroni et al., 2024). Karena itu, pengelolaan mengubah bukan hanya jumlah plastik yang tertahan, tetapi juga waktu paparan di hilir. Waduk yang tampak menurunkan konsentrasi rata-rata hilir dapat menghasilkan pelepasan yang jarang tetapi pekat selama operasi pemeliharaan. Reaktivasi estuari dan pesisir terutama didominasi oleh pasang surut, gelombang, dan angin. Pasang purnama dapat memobilisasi partikel yang tersimpan pada kondisi perbani, sedangkan gelombang badai meresuspensi sedimen dangkal dan dapat mengalahkan sirkulasi estuari normal (Malli et al., 2022; Jiang et al., 2024). Arah angin juga mengendalikan pergerakan plastik mengapung dan dapat mengubah turbulensi dekat dasar di teluk dangkal. Pada sistem yang sangat dinamis, siklus deposisi dan resuspensi berulang dapat mencegah penguburan dalam sama sekali, yang menjelaskan stok sedimen rendah meskipun sumber lokal kuat (Bailey et al., 2025). Pada lingkungan yang lebih terlindung, proses yang sama dapat secara periodik mengekspos material yang telah terakumulasi selama beberapa dekade. Pengamatan lapangan dari anak sungai Chesapeake juga menunjukkan kendali kuat kejadian dan hidrologi terhadap mikroplastik tersuspensi (Yonkos et al., 2014).

Bioturbasi beroperasi pada skala yang lebih kecil tetapi dalam jangka waktu panjang. Organisme benthik memindahkan partikel secara vertikal dan lateral melalui makan, menggali, membangun tabung, dan irigasi sedimen. Analisis skala global terbaru menemukan bahwa bioturbasi dapat mendorong perpindahan mikroplastik yang lebih dalam sekaligus meningkatkan paparan biologis, dengan taksa pemakan penyaring mengakumulasi lebih banyak partikel dibanding pencari makan bergerak pada dataset yang dikompilasi (Liu et al.,

2025). Peran ganda ini memperumit gagasan bahwa penguburan dalam merupakan sekuestrasi yang aman. Aktivitas biologis dapat mencampurkan partikel dari permukaan ke bawah, tetapi juga dapat mengembalikan partikel terkubur ke antarmuka sedimen-air dan mengantarkannya langsung kepada konsumen.

Gangguan manusia menambahkan jalur lainnya. Pengerukan, navigasi, rekayasa garis pantai, beach nourishment, dan restorasi habitat dapat mengganggu sedimen yang tercemar. Sebuah studi tahun 2025 melaporkan peningkatan 171% mikroplastik yang dianalisis setelah beach nourishment dan mendeteksi partikel pada sedimen intertidal serta bivalvia, yang menunjukkan bagaimana tindakan pengelolaan sedimen dapat mendistribusikan kembali kontaminan (de Paula et al., 2025). Intervensi semacam ini jarang dimasukkan dalam model sumber-ke-laut, padahal dapat mendominasi paparan lokal. Karena itu, penilaian kualitas sedimen sebaiknya memasukkan mikroplastik bila material hasil pengerukan atau nourishment diketahui mengandung beban plastik yang substansial.

Contoh-contoh ini mendukung aturan umum: probabilitas reaktivasi meningkat ketika partikel tersimpan tetap berada dalam lapisan sedimen aktif. Partikel yang terkubur dalam pada endapan kohesif stabil memiliki mobilitas jangka pendek lebih rendah dibanding partikel yang terdampar di tebing, tertahan dalam vegetasi, atau tersimpan di beberapa sentimeter teratas sedimen pasang surut. Karena itu, penilaian penyerap perlu melaporkan kedalaman penyimpanan dan frekuensi gangguan, bukan hanya konsentrasi. Perbedaan antara penyimpanan aktif dan arsip geologis merupakan inti untuk memprediksi apakah retensi yang tampak hari ini akan menjadi sumber sekunder di masa depan.

8. Risiko ekologis yang muncul di dalam penyerap tersembunyi

Risiko ekologis mikroplastik sering dinilai berdasarkan konsentrasi di kolom air, padahal penyerap tersembunyi menggeser paparan menuju organisme bentik dan organisme yang berasosiasi dengan sedimen. Bivalvia, pemakan deposit, larva serangga, cacing, ikan demersal, dan meiofauna hidup pada atau di dalam antarmuka yang sama tempat mikroplastik terakumulasi. Tinjauan ekologi air tawar menekankan bahwa spesies bentik dapat mengalami paparan lebih tinggi daripada organisme pelagik ketika sedimen mengonsentrasikan partikel (Quadroni et al., 2024). Dalam mikrokosmos yang menggunakan campuran polimer realistik, pengendapan yang substansial dalam beberapa minggu disertai efek reproduksi subletal pada invertebrata bentik, yang menunjukkan bagaimana proses transportasi menentukan dosis yang tersedia secara biologis (Martínez-Pérez et al., 2024).

Paparan dibentuk oleh ukuran partikel sekaligus kelimpahan. Partikel yang lebih kecil jumlahnya lebih banyak, lebih tidak konsisten tersampel, dan dapat tertelan oleh rentang organisme yang lebih luas. Studi sungai-waduk sering melaporkan dominasi partikel berukuran di bawah 1 mm, dan penelitian Tiga Ngarai menemukan retensi selektif partikel di bawah 300 μm (Gao et al., 2023; Quadroni et al., 2024). Di Estuari Yangtze, 74,6% estimasi fluks partikel tahunan terdiri atas partikel kecil, yang menegaskan pentingnya fraksi tersebut secara numerik (Chen et al., 2026). Karena banyak program pemantauan mengecualikan kelas ukuran terkecil, stok tersembunyi dan paparan yang relevan secara biologis dapat secara bersamaan diremehkan.

Penuaan partikel menambahkan dimensi risiko lainnya. Permukaan yang telah lapuk memperoleh gugus mengandung oksigen, retakan, biofilm, dan bahan organik alami tersorpsi, sehingga mengubah interaksi kontaminan dan kolonisasi mikroba (Alimi et al., 2022). Dalam mikrokosmos sedimen

lahan basah, mikroplastik tua menunjukkan adsorpsi γ -HCH lebih tinggi daripada partikel asli (666,7 dibanding 500,0 mg kg⁻¹), tetapi menekan disipasi kontaminan dan mengubah produksi metana serta gen fungsional mikroba (Su et al., 2025). Hasil ini menunjukkan mengapa penyerap tersembunyi tidak boleh dipandang sebagai kompartemen yang inert secara kimia. Waktu tinggal yang panjang dapat meningkatkan usia lingkungan partikel dan dengan demikian mengubah transportasi maupun efek biologisnya.

Plastisfer memperluas kekhawatiran ini dari kimia ke mikrobiologi. Permukaan mikroplastik mendukung komunitas mikroba yang berbeda dari air atau sedimen di sekitarnya, dan komunitas yang melekat dapat mencakup patogen atau determinan resistensi antibiotik. Studi sedimen estuari telah mendokumentasikan mikroorganisme yang melekat pada partikel plastik, sedangkan studi air limbah-lahan basah menunjukkan bahwa biofilm mikroplastik dapat mempertahankan patogen potensial dan penanda resistensi antimikroba bahkan ketika beban pada air curah menurun (Baptista Neto et al., 2019; Bydalek et al., 2023). Risikonya bergantung pada konteks dan tidak boleh digeneralisasi untuk setiap partikel, tetapi zona retensi dengan waktu tinggal panjang memberikan lebih banyak kesempatan bagi biofilm matang dan pertukaran gen horizontal.

Interaksi kokontaminan juga bersifat kondisional. Senyawa organik hidrofobik, logam, aditif plastik, dan kontaminan baru dapat tersorpsi pada permukaan mikroplastik, tetapi apakah plastik meningkatkan paparan organisme bergantung pada fase sedimen dan terlarut yang bersaing, kinetika desorpsi, serta laju ingesti (Alimi et al., 2018). Di lingkungan deposisional, mikroplastik mungkin hanya menyumbang sebagian kecil kapasitas sorpsi total dibanding sedimen kaya bahan organik, tetapi permukaan tua atau hotspot polimer yang terkonsentrasi dapat menciptakan efek lokal. Karena itu,

penilaian risiko perlu meninggalkan pernyataan generik bahwa mikroplastik adalah “vektor” dan menggantinya dengan kuantifikasi kapan transportasi yang dimediasi partikel benar-benar mengubah paparan relatif terhadap media lingkungan lain.

Transfer trofik paling mungkin terjadi ketika retensi partikel berimpit dengan aktivitas makan. Filter feeder memproses volume air dan material tersuspensi yang besar; pemakan deposit menelan sedimen secara langsung; predator mengonsumsi mangsa yang terkontaminasi. Di Estuari Douro, pada waktu tertentu mikroplastik dilaporkan lebih banyak daripada larva ikan, sehingga menciptakan peluang langsung untuk tertelan di habitat asuhan (Malli et al., 2022). Studi mangrove terbaru mendeteksi partikel pada bivalvia dan kepiting yang dikonsumsi secara komersial, sementara dataset bentik global menunjukkan perbedaan akumulasi antar-kelompok fungsional (Aguirre-Sanchez et al., 2024; Liu et al., 2025). Pengamatan ini membuktikan adanya jalur paparan, meskipun bukti biomagnifikasi berdasarkan jumlah atau massa partikel di seluruh jaring makanan masih kurang konsisten dibanding bukti ingesti dan transfer trofik.

Karena itu, risiko baru yang paling penting mungkin berupa paparan kronis terhadap partikel yang berulang kali terolah kembali dan telah menua di lingkungan, bukan paparan akut terhadap material yang baru dilepaskan. Partikel yang tertahan selama berbulan-bulan dalam sedimen kaya biofilm dapat tertelan, diekskresikan, terkubur kembali, terfragmentasi, tersuspensi kembali, lalu tertelan lagi. Siklus ini meningkatkan peluang pertemuan tanpa harus meningkatkan konsentrasi stok sesaat yang terukur. Metrik risiko yang hanya berbasis kelimpahan sesaat karena itu dapat melewati kontak kumulatif yang dihasilkan oleh waktu tinggal panjang. Penilaian yang peka terhadap penyimpanan perlu memasukkan waktu tinggal, kedalaman sedimen aktif secara

biologis, cara makan, dan frekuensi reaktivasi.

Perspektif ini juga menjelaskan mengapa zona berfluks rendah dapat menjadi zona berisiko tinggi. Mudflat yang terlindung, daerah arus balik waduk, anak sungai mangrove, atau tepian rawa dapat mengeksport sedikit plastik ke laut tetapi mendukung komunitas bentik yang padat dan menahan partikel pada lapisan yang aktif secara biologis. Sebaliknya, saluran dengan pembilasan cepat dapat membawa fluks tahunan tinggi tetapi memberikan waktu kontak lokal yang terbatas. Perbedaan hotspot fluks dari hotspot paparan karena itu sangat penting bagi pengelolaan. Mengurangi ekspor ke laut tidak otomatis sama dengan menurunkan risiko ekologis bila intervensi justru mengonsentrasikan partikel di habitat sensitif.

9. Masalah pengukuran: penyerap tersembunyi sebagian terbentuk dari apa yang gagal kita sampel

Neraca mikroplastik sangat sensitif terhadap definisi analitik. Studi yang berbeda mengukur rentang ukuran, bentuk, polimer, matriks, dan satuan yang berbeda, tetapi hasilnya sering dibandingkan seolah mewakili populasi yang sama. Yang et al. (2025) menekankan bahwa jaring 80 µm dapat memulihkan kelimpahan hingga 100.000 kali lebih tinggi dibanding jaring 450 µm. Perbedaan ini bukan koreksi metodologis kecil; hal tersebut mengubah besarnya inventaris lingkungan yang tampak. Jaring kasar secara sistematis mengecualikan fraksi kecil yang justru sering paling melimpah di waduk, sedimen estuari, dan jalur paparan organisme (Gao et al., 2023; Chen et al., 2026).

Kedalaman pengambilan sampel menciptakan titik buta kedua. Pemantauan air permukaan memang praktis tetapi dapat salah menggambarkan sistem yang terstruktur secara vertikal. Pemantauan sepanjang tahun di Estuari Yangtze mengukur heterogenitas vertikal dan lateral yang kuat dan memperkirakan fluks

tahunan sebesar $5,20 \times 10^{15}$ partikel, 74,6% di antaranya berupa partikel kecil. Secara kritis, mengandalkan lapisan permukaan saja akan melebihi estimasi fluks partikel 43 kali dan fluks massa delapan kali dalam studi tersebut (Chen et al., 2026). Arah bias tidak selalu ke atas; pada sistem lain, partikel padat atau teragregasi yang terkonsentrasi dekat dasar dapat terlewat oleh pengambilan sampel permukaan dan menghasilkan underestimasi. Intinya, sampel satu dimensi tidak dapat menopang estimasi fluks tiga dimensi tanpa validasi.

Pengambilan sampel sedimen memiliki masalah serupa. Grab permukaan menangkap material yang baru terdeposit atau terolah kembali, tetapi tidak penguburan yang lebih dalam, sedangkan inti sedimen dapat mengungkap inventaris historis tetapi sensitif terhadap bioturbasi, kompaksi, laju sedimentasi, dan kontaminasi selama pemrosesan. Dasar sungai, sedimen hiporeik, dataran banjir, delta waduk, rawa, dan endapan pesisir semuanya memerlukan geometri pengambilan sampel yang berbeda (Owowenu et al., 2023; Rolf et al., 2024; Bussarakum et al., 2025). Konsentrasi yang dinyatakan per kilogram sedimen kering tidak dapat dikonversi menjadi stok sistem tanpa informasi massa sedimen, luas, ketebalan, dan porositas. Karena itu, banyak studi “penyerap” menunjukkan pengayaan tetapi belum mampu mengkuantifikasi total penyimpanan.

Pengukuran jumlah partikel dan massa menjawab pertanyaan yang berbeda. Jumlah didominasi partikel terkecil, sedangkan massa didominasi fragmen yang lebih besar; konversi antara keduanya memerlukan asumsi mengenai ukuran, bentuk, dan densitas polimer. Yang et al. (2025) menyoroti bagaimana penggunaan satu massa partikel rata-rata dapat menyebarkan galat besar ke dalam perhitungan fluks. Delta Sungai Pearl memberikan contoh mencolok: estimasi berbasis massa terukur sekitar 2.400–3.800 t tahun⁻¹ sangat berbeda dari estimasi model 91.000–170.000 t tahun⁻¹

yang didasarkan pada asumsi limbah yang salah kelola (Mai et al., 2019; Yang et al., 2025). Ketidaksesuaian semacam ini tidak seharusnya “ditutup” dengan menempatkan residunya ke penyerap tersembunyi. Sejumlah kontras kuantitatif yang dihasilkan dirangkum dalam Tabel 2, dengan ketidakpastian metodologis diperlakukan sebagai bagian dari interpretasi, bukan sebagai catatan tambahan.

Identifikasi analitik lebih lanjut memengaruhi interpretasi. Penyortiran visual rentan terhadap positif palsu dan tidak dapat secara andal mengidentifikasi partikel terkecil; spektroskopi FTIR dan Raman memberikan identitas polimer tetapi berbeda dalam kapasitas analisis dan batas ukuran; pyrolysis-GC/MS memberikan massa polimer tetapi kehilangan informasi morfologi partikel; LDIR dapat meningkatkan kapasitas analisis untuk partikel kecil tetapi memiliki keterbatasan deteksi dan preparasi tersendiri (Jiang et al., 2024; Zhang et al., 2026). Tidak ada satu metode yang memberikan seluruh dimensi kelimpahan, massa, bentuk, kimia, dan ketersediaan biologis. Karena itu, sintesis lintas-studi perlu mempertahankan informasi metode sebagai bagian dari bukti, bukan memperlakukannya sekadar sebagai metadata. Studi pemodelan juga menunjukkan bahwa nasib yang disimpulkan dapat berubah sesuai representasi proses yang digunakan untuk pengendapan, agregasi, dan pertukaran sedimen (Besseling et al., 2017).

Pengambilan sampel temporal sama pentingnya. Lokasi yang diukur saat aliran dasar, pasang perbani, atau cuaca tenang dapat tampak sebagai penyerap kuat, sedangkan lokasi yang sama saat banjir atau badai dapat berubah menjadi sumber. Konsentrasi akibat kejadian dapat melebihi nilai dasar satu orde besaran atau lebih, dan perubahan musim dapat membalik partisi air-sedimen (Hitchcock, 2020; Quadroni et al., 2024). Karena itu, desain pemantauan perlu menggabungkan observasi berfrekuensi tetap dengan

pengambilan sampel yang dipicu secara hidrologis. Tanpa data kejadian, fluks tahunan dan probabilitas reaktivasi sama-sama dibatasi oleh ketidakpastian tinggi. Masalah metodologis ini mendorong perlunya hierarki klaim. Bukti bahwa suatu kompartemen diperkaya relatif terhadap air di sekitarnya mendukung adanya retensi; inti sedimen bertanggal mendukung akumulasi historis; data sebelum-sesudah gangguan mendukung

reaktivasi; dan neraca stok-plus-fluks diperlukan untuk mengkuantifikasi efisiensi penyerap. Klaim sekuestrasi permanen membutuhkan bukti yang lebih kuat lagi, termasuk penguburan di bawah kedalaman pencampuran aktif dan probabilitas erosi masa depan yang rendah. Mengadopsi hierarki ini akan mencegah istilah “penyerap” digunakan terlalu longgar dan membuat studi lebih mudah dibandingkan.

Tabel 2. Bukti kuantitatif terpilih yang mengubah interpretasi penyimpanan, reaktivasi, dan transportasi mikroplastik dari sumber ke laut.

Sistem / lokasi	Kompartemen / proses	Observasi kuantitatif	Interpretasi bagi penyerap tersembunyi	Ketidakpastian / keterbatasan utama	Referensi (Nama, Tahun)
Daerah tangkapan sungai di Inggris	Pembilasan dasar sungai saat banjir	~70% penurunan kontaminasi MP dasar sungai setelah banjir besar	Partikel yang tersimpan di dasar dapat teraktivasi kembali dengan cepat pada skala daerah tangkapan	Redistribusi diukur lebih langsung daripada ekspor akhir ke laut	Hurley et al., 2018
Waduk Tiga Ngarai, Tiongkok	Penguburan dan retensi waduk	$8.048 \pm 7.494 \text{ t tahun}^{-1}$ tertahan; $47 \pm 44\%$ dari fluks MP Yangtze hasil pemodelan; $23.018 \pm 14.268 \text{ item kg}^{-1}$ pada sedimen 2020	Impoundment besar dapat menyimpan stok berumur panjang dalam jumlah besar sambil menyortir partikel kecil	Ketidakpastian besar pada konversi massa dan penutupan fluks	Gao et al., 2023
Estuari Cooks River, Australia	Remobilisasi akibat badai	Kelimpahan kolom air naik dari ~400 menjadi 17.383 partikel m^{-3} selama kejadian badai-banjir	Kejadian singkat dapat melampaui inventaris aliran dasar dan mengekspos material tersimpan	Satu kejadian ekstrem; hidrologi spesifik lokasi	Hitchcock, 2020
Ría de Vigo, Spanyol	Ekspor pasang surut dari estuari	Pasang purnama: ~45% ekspor saat surut dan ~25% saat pasang; perbani: ~5% dan 3,7%	Efisiensi retensi berubah tajam sepanjang siklus purnama-perbani	Trajektori partikel hasil model bergantung pada asumsi sumber dan kondisi pemaksa	Sousa et al., 2021
Estuari Itchen, Inggris	Perangkap intertidal	~penurunan dua pertiga konsentrasi dari kondisi pasang ke surut	Tepian bervegetasi/intertidal dapat menahan MP sementara dalam satu siklus pasang surut	Pengambilan sampel mikrolapis permukaan merepresentasikan kompartemen tertentu	Stead et al., 2020
Estuari Santos, Brasil	Masukan darat-ke-estuari musiman	~20 kali peningkatan kelimpahan pelet dari musim kering ke musim basah	Hujan dapat mengaktifkan sumber daratan dan melampaui kapasitas penyimpanan lokal	Pelet hanya merepresentasikan sebagian spektrum ukuran/bentuk MP	Balthazar-Silva et al., 2020

Sistem / lokasi	Kompartemen / proses	Observasi kuantitatif	Interpretasi bagi penyerap tersembunyi	Ketidakpastian / keterbatasan utama	Referensi (Nama, Tahun)
Estuari Sungai Yangtze, Tiongkok	Ekspor sungai teresolusi kedalaman	$5,20 \times 10^{15}$ partikel tahun ⁻¹ ; 74,6% partikel kecil; sampel hanya permukaan akan melebihi estimasi fluks partikel $\sim 43 \times$ dan fluks massa $\sim 8 \times$	Heterogenitas vertikal dapat tampak sebagai penyimpanan yang hilang atau menggelembungkan ekspor	Fluks tetap sensitif terhadap cakupan temporal dan rentang ukuran analitik	Chen et al., 2026
Galveston dan Matagorda Bays, AS	Pengendapan dan ekspor teresolusi polimer	0,82–19,8 dibanding 0,09–3,7 $\mu\text{g L}^{-1}$; kecepatan pengendapan dari mengapung hingga $>38 \text{ m hari}^{-1}$	Agregasi/biofouling menciptakan retensi sementara yang diikuti ekspor dominan saat surut	Pendekatan massa polimer tidak langsung setara dengan hitungan jumlah partikel	Yan et al., 2026
Delta Sungai Pearl, Tiongkok	Estimasi fluks sungai-ke-pesisir	Estimasi terukur 2.400–3.800 t tahun ⁻¹ dibanding estimasi model 91.000–170.000 t tahun ⁻¹	Pilihan metode dapat menghasilkan perbedaan yang melebihi besarnya penyimpanan lingkungan yang disimpulkan	Asumsi, domain pengambilan sampel, dan konversi massa berbeda	Mai et al., 2019; Yang et al., 2025
Wilayah Bohai–Laut Kuning, Tiongkok	Deposisi sedimen	Deposisi sedimen mewakili $\sim 94\%$ keluaran MP hasil pemodelan	Sedimen pesisir dapat mendominasi neraca massa regional	Hasil box model bergantung pada masukan literatur dan asumsi konversi	Yang et al., 2025
Sistem mangrove perkotaan, Estuari Pearl River	Peralihan penyerap–sumber mangrove	Air: 245,8–1.562,4 partikel m ⁻³ ; sedimen: 374,3–7.475,3 partikel kg ⁻¹ ; karet sintetis mencapai 79% pada satu sampel	Mangrove beraliran lemah menahan partikel, tetapi kondisi aliran tinggi dapat meremobilisasinya	Campuran sumber perkotaan dan hidrodinamika lokasi membatasi generalisasi	Qiao & Wang, 2024
Mangrove Tumbes, Peru	Paparan sedimen-ke-pangan laut	Sedimen $726 \pm 396 \text{ MP kg}^{-1}$; estimasi asupan melalui pangan laut yang disampel 431 item orang ⁻¹ tahun ⁻¹	Penyimpanan sedimen tersembunyi dapat langsung berimpit dengan biota yang dipanen	Estimasi asupan menunjukkan paparan, bukan ambang efek kesehatan	Aguirre-Sanchez et al., 2024
Rawa pasang surut air tawar, AS	Penguburan sedimen historis	Penguburan sedimen estuari global diperkirakan $\sim 0,2 \text{ Mt tahun}^{-1}$ dari perbandingan kompilasi	Kronologi mengubah konsentrasi statis menjadi laju akumulasi dan penguburan	Ekstrapolasi global dari studi heterogen memiliki ketidakpastian tinggi	Bussarakum et al., 2025
Mikrokosmos air tawar	Transfer air-ke-sedimen	53% campuran MP yang relevan secara lingkungan tenggelam dalam 28 hari; laju tenggelam rata-rata 1,88% hari ⁻¹	Bahkan polimer mengapung dapat dengan cepat menggeser paparan ke bentos	Mikrokosmos terkontrol tidak mereplikasi seluruh hidrodinamika lapangan	Martínez-Pérez et al., 2024
Mikrokosmos sedimen lahan basah	Penuaan dan interaksi kokontaminan	MP tua mengadsorpsi γ -HCH sebesar 666,7 dibanding 500,0 mg kg ⁻¹ pada MP asli; produksi CH ₄ $1,64 \pm 0,10$ dibanding $1,25 \pm 0,15 \text{ mg kg}^{-1} \text{ hari}^{-1}$	Penyimpanan dapat mentransformasi partikel dan mengubah risiko kimia/mikroba	Kondisi penuaan dan dosis laboratorium mungkin berbeda dari paparan lapangan	Su et al., 2025

Sistem / lokasi	Kompartemen / proses	Observasi kuantitatif	Interpretasi bagi penyerap tersembunyi	Ketidakpastian / keterbatasan utama	Referensi (Nama, Tahun)
Teluk Texas Tengah, AS	Penyimpanan sedimen teluk dangkal	Sedimen mengandung puluhan hingga ratusan partikel kg^{-1} dengan korelasi lemah terhadap ukuran butir, karbon organik, kedalaman, atau jarak dari pantai	Teluk berenergi tinggi dapat menolak akumulasi jangka panjang meskipun dekat dengan sumber	Snapshot spasial tidak dapat menangkap seluruh pertukaran musiman	Bailey et al., 2025

10. Kerangka penyimpanan–reaktivasi–paparan untuk risiko mikroplastik dari sumber ke laut

Sintesis ini mendukung kerangka tiga sumbu yang memperlakukan setiap kompartemen sebagai suatu keadaan dalam ruang penyimpanan–reaktivasi–paparan. Sumbu penyimpanan menggambarkan besarnya stok tertahan, waktu tinggal, dan kedalaman penguburan. Sumbu reaktivasi menggambarkan frekuensi serta besarnya proses yang dapat mengembalikan partikel ke transportasi. Sumbu paparan menggambarkan tumpang tindih dengan organisme, termasuk penggunaan habitat, strategi makan, ukuran partikel yang tersedia secara biologis, dan transformasi kimia atau mikroba. Penyerap tersembunyi memiliki penyimpanan tinggi relatif terhadap pengamatan rutin, tetapi nilai lingkungannya bergantung pada posisinya pada dua sumbu lainnya. Penguburan dalam yang stabil dengan sedikit interaksi biologis berbeda secara mendasar dari retensi dangkal pada dataran lumpur yang produktif. Tabel 1 menunjukkan bahwa atribut fisik yang mendukung retensi sering berimpit dengan mekanisme paparan biologis dan reaktivasi berikutnya.

Kerangka ini memisahkan empat keadaan operasional. Transportasi bergerak mendominasi ketika waktu tinggal singkat dan fluks hilir tinggi. Retensi sementara terjadi ketika partikel berulang kali terdeposit dan tersuspensi kembali di dalam lapisan aktif. Penyimpanan laten terjadi ketika partikel tetap terkubur dalam waktu lama tetapi dapat teraktivasi kembali oleh gangguan yang jarang. Penguburan terarsip terjadi ketika partikel

bergerak ke bawah kedalaman yang masih dapat dipengaruhi pengolahan ulang fisik atau biologis yang masuk akal. Lokasi yang sama dapat berpindah di antara keadaan ini ketika debit, muka laut, suplai sedimen, atau pengelolaan manusia berubah. Waduk dan mangrove merupakan contoh yang sangat jelas dari transisi keadaan semacam ini (Gao et al., 2023; Qiao & Wang, 2024).

Karena itu, metrik risiko praktis harus menggabungkan lebih dari sekadar konsentrasi. Setidaknya, pemantauan perlu mengestimasi densitas stok dalam lapisan sedimen aktif, waktu tinggal karakteristik, probabilitas gangguan, distribusi ukuran partikel, komposisi polimer, dan tumpang tindih habitat. Bila data memungkinkan, indeks paparan berbobot reaktivasi dapat dihitung sebagai stok tertahan dikalikan fraksi yang berada di lapisan aktif secara biologis, probabilitas gangguan empiris, dan faktor bioavailabilitas. Indeks semacam ini tidak menggantikan uji toksisitas; fungsinya adalah mengidentifikasi lokasi tempat inventaris sedimenter paling mungkin menghasilkan kontak ekologis berulang. Konsep ini sejalan dengan kerangka risiko kontaminan–sedimen yang memisahkan konsentrasi total dari mobilitas dan paparan.

Kerangka ini juga memperjelas perbedaan antara mitigasi transportasi dan mitigasi risiko. Bendungan yang menurunkan fluks plastik ke hilir tetap dapat mengakumulasi stok sedimen tercemar dalam jumlah besar yang memerlukan pengelolaan. Mangrove yang memerangkap mikroplastik perkotaan dapat melindungi perairan lepas pantai tetapi meningkatkan paparan di

habitat asuhan. Sebaliknya, teluk yang terbilas dengan baik dan memiliki akumulasi sedimen rendah dapat mempunyai stok lokal kecil tetapi ekspor tinggi ke ekosistem landas kontinen di sekitarnya (Watkins et al., 2019; Bailey et al., 2025). Tujuan pengelolaan harus menyatakan secara eksplisit apakah prioritasnya adalah mengurangi ekspor ke laut, melindungi biota lokal, mencegah paparan manusia melalui pangan laut, atau meminimalkan remobilisasi di masa depan. Karena itu, neraca sumber-ke-laut sebaiknya ditulis sebagai jaringan tempat penyimpanan sementara, bukan satu fluks hilir tunggal. Emisi daerah tangkapan memasok transportasi sungai; sebagian memasuki penyimpanan saluran dan dataran banjir; waduk mengintersepsi dan mentransformasi sebagian beban; estuari menahan dan melepaskan partikel pada skala waktu pasang surut hingga musiman; habitat pesisir mendistribusikan ulang dan mengubur material; dan gangguan menghubungkan kembali penyimpanan tersebut. Jaringan semacam ini menjelaskan mengapa penurunan emisi di hulu memerlukan waktu sebelum terlihat di pesisir: partikel warisan terus bocor dari penyimpanan yang ada. Jaringan ini juga memprediksi histeresis, dengan hubungan konsentrasi-debit yang berbeda pada bagian naik dan turun hidrograf ketika partikel yang sebelumnya tersimpan termobilisasi. Besarnya sejumlah observasi retensi, ekspor, dan reaktivasi pada Tabel 2 menunjukkan mengapa tidak ada satu metrik konsentrasi atau fluks yang dapat mewakili seluruh jaringan.

Dari perspektif ekologis, jaringan ini menyoroti simpul tempat retensi fisik dan aktivitas biologis berimpit. Contohnya meliputi tepian waduk berbutir halus, ruas sungai bervegetasi, maksimum kekeruhan estuari, dataran pasang surut, hamparan kerang, anak sungai mangrove, rawa asin, dan sedimen yang berasosiasi dengan lamun. Lokasi ini layak diprioritaskan bukan karena selalu mengandung massa total tertinggi, tetapi karena retensi dapat memperpanjang kontak. Karena itu,

saluran dengan fluks tertinggi dan habitat dengan risiko tertinggi dapat terpisah secara spasial. Program pemantauan yang hanya mengambil sampel di muara sungai atau perairan pesisir terbuka akan melewatkan perbedaan ini.

Kerangka ini juga kompatibel dengan analisis perubahan iklim. Ekstrem hidrologis yang lebih sering, perubahan musim, kenaikan muka laut, erosi garis pantai, dan perubahan suplai sedimen semuanya dapat memindahkan suatu kompartemen sepanjang sumbu penyimpanan dan reaktivasi (Quadroni et al., 2024). Waduk dapat memerangkap lebih banyak partikel saat banjir kaya sedimen tetapi melepaskan lebih banyak saat penurunan muka air; rawa dapat mengakumulasi partikel pada kondisi akresi stabil tetapi berubah menjadi sumber ketika mengalami erosi; teluk dangkal dapat mengalami resuspensi lebih persisten akibat badai yang lebih kuat. Karena itu, penilaian risiko masa depan perlu memperlakukan stabilitas penyerap sebagai variabel yang sensitif terhadap iklim, bukan keadaan stasioner.

11. Prioritas penelitian dan implikasi pengelolaan

Prioritas penelitian pertama adalah mengkuantifikasi stok, bukan hanya konsentrasi. Untuk suatu penyerap tersembunyi, pertanyaan yang relevan adalah berapa banyak plastik yang tersimpan per satuan luas atau volume sistem dan pada kedalaman berapa. Hal ini memerlukan inti sedimen, pengukuran densitas curah, pemetaan spasial, dan, bila memungkinkan, kronologi. Delta waduk, dataran banjir, rawa, dan zona deposisional estuari sangat sesuai untuk pendekatan ini karena arsitektur sedimenternya dapat mempertahankan sejarah akumulasi (Gao et al., 2023; Rolf et al., 2024; Bussarakum et al., 2025). Estimasi stok harus secara eksplisit melaporkan batas bawah ukuran partikel dan perolehan kembali analitik agar ketidakpastian dapat dipropagasikan.

Kedua, pemantauan harus mampu menguraikan transisi, bukan hanya keadaan rata-rata. Observasi berpasangan sebelum, selama, dan setelah banjir, badai, ekstrem pasang surut, penurunan muka air, pengerukan, atau pembilasan sedimen diperlukan untuk mengestimasi reaktivasi. Variabel hidrodinamika seperti debit, tegangan geser, konsentrasi sedimen tersuspensi, muka air, salinitas, energi gelombang, dan turbulensi harus diukur bersama mikroplastik (Owowenu et al., 2023; Malli et al., 2022). Desain berbasis proses ini akan memungkinkan studi mengidentifikasi ambang ketika penyerap berubah menjadi sumber serta meningkatkan kualitas model pelacakan partikel.

Ketiga, penelitian perlu mengintegrasikan jumlah partikel dan massa polimer. Metode berbasis jumlah menangkap dominasi partikel kecil dan relevan bagi ingesti, sedangkan metode berbasis massa memperbaiki perhitungan neraca dan apportionment sumber. Menggabungkan spektroskopi atau LDIR dengan pengukuran termooanalitik pada sampel yang berpasangan akan membantu menjembatani kedua domain tersebut. Studi Yangtze dan estuari Teluk tahun 2026 masing-masing menunjukkan nilai pendekatan teresolusi kedalaman dan teresolusi polimer (Chen et al., 2026; Yan et al., 2026). Harmonisasi metode perlu memprioritaskan kelas ukuran yang terdefinisi jelas, blanko, uji perolehan kembali, serta pelaporan volume sampel atau massa sedimen.

Keempat, studi ekologis memerlukan desain paparan yang mencerminkan kondisi penyerap tersembunyi. Uji laboratorium sebaiknya menggunakan campuran yang telah menua secara lingkungan, konsentrasi sedimen realistis, bentuk partikel campuran, dan durasi paparan yang cukup panjang untuk menangkap endpoint kronis. Biomonitoring lapangan perlu menargetkan spesies dengan cara makan dan posisi habitat yang kontras, bukan memperlakukan "biota" sebagai satu kategori reseptor tunggal

(Owowenu et al., 2023; Martínez-Pérez et al., 2024). Pengukuran pada organisme harus dipasangkan dengan karakterisasi sedimen dan air pori agar serapan dapat dikaitkan dengan ketersediaan lingkungan yang sebenarnya.

Kelima, konsekuensi ekologis dari penuaan partikel, perkembangan plastisfer, dan kokontaminan perlu diuji di dalam sedimen, bukan disimpulkan dari eksperimen partikel murni. Mikrokosmos lahan basah menunjukkan bahwa plastik tua dapat mengubah disipasi polutan dan proses mikroba penghasil metana, sementara studi estuari dan air limbah menunjukkan bahwa biofilm dapat mendukung komunitas mikroba yang khas (Su et al., 2025; Baptista Neto et al., 2019). Penelitian mendatang perlu menentukan kapan perubahan ini secara material memengaruhi fungsi ekosistem, paparan patogen, atau transfer kontaminan pada konsentrasi lapangan.

Keenam, operasi pengelolaan perlu memperlakukan sedimen tercemar sebagai sumber sekunder potensial. Rencana pembilasan waduk, izin pengerukan, beach nourishment, restorasi lahan basah, dan proyek penghilangan bendungan perlu mempertimbangkan inventaris mikroplastik bila bukti menunjukkan akumulasi yang substansial. Hal ini tidak berarti intervensi tersebut harus dihindari; sebaliknya, kontaminasi plastik perlu dimasukkan dalam karakterisasi sedimen dan keputusan pembuangan. Pemantauan hilir berbasis kejadian dapat menentukan apakah operasi menghasilkan pulsa paparan singkat tetapi penting (Quadroni et al., 2024; de Paula et al., 2025).

Ketujuh, mitigasi harus memprioritaskan pengendalian sumber sambil mengakui adanya penyimpanan warisan. Pengendalian air limbah dan air hujan, penahanan pelet industri, pengurangan keausan ban, peningkatan pengelolaan limbah padat, dan pengelolaan plastik pertanian akan mengurangi masukan baru, tetapi stok yang sudah ada di dasar sungai dan sedimen akan terus berkontribusi selama bertahun-tahun. Jeda waktu ini

berarti evaluasi kebijakan tidak boleh hanya mengandalkan perubahan segera di muara sungai. Penurunan masukan mungkin pertama kali terlihat sebagai berkurangnya pengisian kembali tempat penyimpanan lokal sebelum ekspor pesisir benar-benar turun secara nyata. Karena itu, pemantauan jangka panjang perlu membedakan emisi baru dari partikel warisan yang termobilisasi kembali.

Terakhir, model perlu merepresentasikan penyimpanan secara eksplisit. Banyak model global merutekan plastik ke hilir berdasarkan limpasan, populasi, dan timbunan limbah tetapi menyederhanakan atau mengabaikan pertukaran sedimen, impoundment, retensi pasang surut, dan transformasi partikel. Generasi berikutnya dari model sumber-ke-laut perlu memasukkan variabel keadaan untuk penyimpanan dasar aktif, penguburan dalam, retensi vegetasi, dan remobilisasi akibat kejadian, dengan ketidakpastian parameter dilaporkan secara eksplisit dan bukan diserap ke dalam kalibrasi (Yang et al., 2025). Kinerja model perlu dievaluasi terhadap stok dan profil vertikal selain fluks air permukaan. Hanya dengan demikian neraca global dapat membedakan penyerap lingkungan yang sebenarnya dari artefak metodologis.

12. Kesimpulan

Transportasi mikroplastik dari air tawar ke pesisir bukanlah konveyor satu arah. Kontinum ini mengandung banyak penyerap tersembunyi tempat partikel tertahan di luar kolom air yang rutin disampel: dasar sungai, sedimen hiporeik, dataran banjir, waduk, dasar estuari, lahan basah pasang surut, mangrove, endapan terkait lamun, teluk, laguna, pantai, dan sedimen dekat pantai. Keberadaannya didukung oleh pengukuran lapangan, eksperimen, dan pemodelan, termasuk penguburan substansial di waduk, akumulasi dataran banjir, retensi estuari, serta pengayaan sedimen di sepanjang transisi sungai-pesisir (Gao et al., 2023; Rolf et al., 2024; Zhang et al., 2026).

Penyerap tersebut penting bagi lingkungan justru karena banyak di antaranya reversibel. Banjir, pasang surut, badai, operasi waduk, pengerukan, erosi garis pantai, dan bioturbasi dapat mengembalikan partikel tersimpan ke dalam transportasi. Pulsa sekunder yang dihasilkan dapat terjadi lama setelah peristiwa emisi awal dan mungkin membawa partikel yang telah menua, terfragmentasi, tertutup biofilm, atau bertukar kontaminan dengan sedimen. Dengan demikian, retensi dapat sekaligus menurunkan fluks hilir langsung dan meningkatkan paparan lokal atau masa depan (Quadroni et al., 2024; Su et al., 2025; Liu et al., 2025).

Tantangan analitik utama adalah memisahkan penyimpanan nyata dari penyimpanan semu yang muncul akibat pengambilan sampel tidak lengkap. Batas ukuran partikel, ukuran mata jaring, pengambilan sampel vertikal, metode analitik, dan konversi jumlah-ke-massa dapat mengubah fluks yang disimpulkan beberapa orde besaran. Pemantauan Yangtze teresolusi kedalaman dan sensitivitas ekstrem jumlah partikel terhadap ukuran mata jaring menunjukkan bahwa penutupan neraca massa tidak dapat dicapai dengan menempatkan setiap residu pada "penyerap yang hilang" (Yang et al., 2025; Chen et al., 2026). Sebaliknya, estimasi sumber, fluks bergerak, stok sedimen, penguburan, dan remobilisasi harus diukur sebagai komponen yang berbeda.

Kerangka penyimpanan-reaktivasi-paparan memberikan dasar yang lebih berguna bagi penelitian dan pengelolaan. Kerangka ini membedakan hotspot transportasi dari hotspot paparan serta memisahkan retensi sementara, penyimpanan laten, dan penguburan terarsip. Lokasi yang paling penting mungkin bukan yang memiliki fluks hilir tertinggi, tetapi yang memiliki waktu tinggal panjang yang berimpit dengan produktivitas benthik, habitat asuhan, pemanenan kerang, atau gangguan yang sering. Karena itu, penilaian sumber-ke-

laut masa depan sebaiknya menggabungkan inventaris sedimen, hidrodinamika, pengambilan sampel berbasis kejadian, analisis teresolusi polimer, dan pengukuran paparan yang bermakna secara biologis. Penyerap tersembunyi bukan sekadar tempat mikroplastik menghilang dari pandangan; penyerap tersebut adalah reservoir dinamis yang menentukan kapan, di mana, dan berapa lama pencemaran mikroplastik tetap aktif secara ekologis.

Daftar Pustaka

Acha, E. M., Mianzan, H. W., Iribarne, O., Gagliardini, D. A., Lasta, C., & Daleo, P. (2003). The role of the Río de la Plata bottom salinity front in accumulating debris. *Marine Pollution Bulletin*, 46, 197–202. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00356-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00356-9)

Aguirre-Sanchez, A., Purca, S., Cole, M., Indacochea, A. G., & Lindeque, P. K. (2024). Prevalence of microplastics in Peruvian mangrove sediments and edible mangrove species. *Marine Pollution Bulletin*, 200, 116075. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116075>

Alimi, O. S., Claveau-Mallet, D., Kurusu, R. S., Lapointe, M., Bayen, S., & Tufenkji, N. (2022). Weathering pathways and protocols for environmentally relevant microplastics and nanoplastics: What are we missing? *Journal of Hazardous Materials*, 423, 126955.

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.

Alves, V. E. N., & Figueiredo, G. M. (2019). Microplastic in the sediments of a highly eutrophic tropical estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.042>

Anderson, Z. T., Cundy, A. B., Croudace, I. W., Warwick, P. E., Celis-Hernandez, O., & Stead, J. L. (2018). A rapid method for

assessing the accumulation of microplastics in the sea surface microlayer (SML) of estuarine systems. *Scientific Reports*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27612-w>

Bagaev, A., Mizyuk, A., Khatmullina, L., Isachenko, I., & Chubarenko, I. (2017). Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion. *Science of the Total Environment*, 599–600, 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.185>

Bailey, W. S., Olariu, C., & Mohrig, D. (2025). Microplastics in bays along the Central Texas coast. *Environmental Science & Technology*, 59(10), 5249–5260. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c12622>

Baldwin, A. K., Corsi, S. R., & Mason, S. A. (2016). Plastic debris in 29 Great Lakes tributaries: Relations to watershed attributes and hydrology. *Environmental Science & Technology*, 50, 10377–10385. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02917>

Balthazar-Silva, D., Turra, A., Moreira, F. T., Camargo, R. M., Oliveira, A. L., Barbosa, L., & Gorman, D. (2020). Rainfall and tidal cycle regulate seasonal inputs of microplastic pellets to sandy beaches. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 123. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00123>

Baptista Neto, J. A. B., Gaylarde, C., Beech, I., Bastos, A. C., da Silva Quaresma, V., & de Carvalho, D. G. (2019). Microplastics and attached microorganisms in sediments of the Vitória Bay estuarine system in SE Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 169, 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.030>

Barrows, A. P. W., Christiansen, K. S., Bode, E. T., & Hoellein, T. J. (2018). A watershed-scale, citizen science approach to quantifying microplastic concentration in a mixed land-use river. *Water Research*, 147, 382–392. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.013>

- Bermúdez, M., Vilas, C., Quintana, R., González-Fernández, D., Cózar, A., & Díez-Minguito, M. (2021). Unravelling spatio-temporal patterns of suspended microplastic concentration in the Natura 2000 Guadalquivir estuary (SW Spain): Observations and model simulations. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112622. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112622>
- Besseling, E., Quik, J. T. K., Sun, M., & Koelmans, A. A. (2017). Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study. *Environmental Pollution*, 220, 540–548. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.001>
- Bussarakum, J., Drohan, P. J., Najjar, R. G., Arriola, J. M., Emili, L. A., & Warner, N. R. (2025). Microplastic polymer accumulation, distribution, and toxicity in sediment of a freshwater tidal marsh, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 221, 118566. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118566>
- 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, 119936. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119936>
- Campanale, C., Stock, F., Massarelli, C., Kochleus, C., Bagnuolo, G., Reifferscheid, G., & Uricchio, V. F. (2020). Microplastics and their possible sources: The example of Ofanto River in southeast Italy. *Environmental Pollution*, 258, 113284. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113284>
- Chen, L., Fu, S., & Zheng, X. (2025). Distribution and risks of microplastics and phthalate esters in the transition from inland river systems to estuarine and nearshore regions of the Yellow Sea, China. *Marine Environmental Research*, 205, 107029. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107029>
- Chen, Y., Gao, B., Xu, D., Sun, K., & Li, Y. (2022). Catchment-wide flooding significantly altered microplastics organization in the hydro-fluctuation belt of the reservoir. *iScience*, 25, 104401. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104401>
- Chen, Y., Wei, Y., Xu, D., Sun, K., & Gao, B. (2026). Riverine emission of small plastic particles from Yangtze River into the ocean. *Communications Earth & Environment*, 7, 82. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-03106-2>
- Cheung, P. K., Cheung, L. T. O., & Fok, L. (2016). Seasonal variation in the abundance of marine plastic debris in the estuary of a subtropical macro-scale drainage basin in South China. *Science of the Total Environment*, 562, 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.048>
- de Carvalho, A. R., Garcia, F., Riem-Galliano, L., Tudesque, L., Albignac, M., ter Halle, A., & Cucherousset, J. (2021). Urbanization and hydrological conditions drive the spatial and temporal variability of microplastic pollution in the Garonne River. *Science of the Total Environment*, 769, 144479. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144479>
- de Paula, M. S., Schuab, J. M., Pelletier, É., Soubaneh, Y. D., Langlois, V., & da Costa, M. B. (2025). Can microplastic pollution be affected by beach nourishment? Assessment in intertidal sediment and bivalves. *Science of the Total Environment*, 960, 178374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178374>
- Defontaine, S., Sous, D., Tesan, J., Monperrus, M., Lenoble, V., & Lancelleur, L. (2020). Microplastics in a salt-wedge estuary: Vertical structure and tidal dynamics. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111688. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111688>

- Dhivert, E., Phuong, N. N., Mourier, B., Grosbois, C., & Gasperi, J. (2022). Microplastic trapping in dam reservoirs driven by complex hydrosedimentary processes (Villerest Reservoir, Loire River, France). *Water Research*, 225, 119187. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119187>
- Díez-Minguito, M., Bermúdez, M., Gago, J., Carretero, O., & Viñas, L. (2020). Observations and idealized modelling of microplastic transport in estuaries: The exemplary case of an upwelling system (Ría de Vigo, NW Spain). *Marine Chemistry*, 222, 103780. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2020.103780>
- Feng, Q., Chen, Z., An, C., Yang, X., & Wang, Z. (2023). Tide-induced infiltration and resuspension of microplastics in shorelines: Insights from tidal tank experiments. *Water Research*, 236, 119970.
- Gao, B., Chen, Y., Xu, D., Sun, K., & Xing, B. (2023). Substantial burial of terrestrial microplastics in the Three Gorges Reservoir, China. *Communications Earth & Environment*, 4, 32. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00701-z>
- Gündogdu, S., Çevik, C., Ayat, B., Aydoğan, B., & Karaca, S. (2018). How microplastics quantities increase with flood events? An example from Mersin Bay, NE Levantine coast of Turkey. *Environmental Pollution*, 239, 342–350.
- Hitchcock, J. N. (2020). Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 734, 139436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139436>
- Hurley, R., Woodward, J., & Rothwell, J. J. (2018). Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding. *Nature Geoscience*, 11, 251–257. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0080-1>
- Jiang, J., He, L., Zheng, S., Liu, J., & Gong, L. (2024). A review of microplastic transport in coastal zones. *Marine Environmental Research*, 196, 106397. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106397>
- Kaiser, D., Kowalski, N., & Waniek, J. J. (2017). Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics. *Environmental Research Letters*, 12, 124003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8e8b>
- Khatmullina, L., & Isachenko, I. (2017). Settling velocity of microplastic particles of regular shapes. *Marine Pollution Bulletin*, 114, 871–880. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.024>
- Kooi, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., & Koelmans, A. A. (2017). Ups and downs in the ocean: Effects of biofouling on vertical transport of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 51, 7963–7971. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04702>
- Ledet, J., Tan, C., Guan, X. H., Yong, C. L. X., Ying, L., & Todd, P. (2024). Trapping of microplastics and other anthropogenic particles in seagrass beds: Ubiquity across a vertical and horizontal sampling gradient. *Marine Environmental Research*, 197, 106487.
- Li, X., Wang, H., Luo, H., Zhang, Y., Xing, C., & Liu, Y. (2026). Microplastic transport regulated by land use, point source and tidal forces in a coastal river-estuary system. *Journal of Hazardous Materials*, 514, 142918. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.142918>
- Li, Y., Wang, X., Fu, W., Xia, X., Liu, C., Min, J., Zhang, W., & Crittenden, J. C. (2019). Interactions between nano/micro plastics and suspended sediment in water: Implications on aggregation and settling. *Water Research*, 161, 486–495.
- Liu, C., Waseem, M., Ma, R., Waseem Boota, M., Hu, X., Wang, R., Deng, P., & Mu, L. (2025). Marine bioturbation drives global microplastic cycling and biological exposure risks. *Environmental Science & Technology*, 59(49), 26593–26603. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c11517>

- Mai, L., You, S.-N., He, H., Bao, L.-J., Liu, L.-Y., & Zeng, E. Y. (2019). Riverine microplastic pollution in the Pearl River Delta, China: Are modeled estimates accurate? *Environmental Science & Technology*, 53(20), 11810–11817.
- Malli, A., Corella-Puertas, E., Hajjar, C., & Boulay, A.-M. (2022). Transport mechanisms and fate of microplastics in estuarine compartments: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113553. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113553>
- Martínez-Pérez, S., Schell, T., Franco, D., Rosal, R., Redondo-Hasselerharm, P. E., Martínez-Hernández, V., & Rico, A. (2024). Fate and effects of an environmentally relevant mixture of microplastics in simple freshwater microcosms. *Aquatic Toxicology*, 276, 107104. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107104>
- Napper, I. E., Baroth, A., Barrett, A. C., Bhola, S., Chowdhury, G. W., Davies, B. F. R., Duncan, E. M., Kumar, S., Nelms, S. E., Hasan Niloy, M. N., Nishat, B., Maddalene, T., Thompson, R. C., & Koldewey, H. (2021). The abundance and characteristics of microplastics in surface water in the transboundary Ganges River. *Environmental Pollution*, 274, 116348. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116348>
- Owowenu, E. K., Nnadozie, C. F., Akamagwuna, F., Noundou, X. S., Uku, J. E., & Odume, O. N. (2023). A critical review of environmental factors influencing the transport dynamics of microplastics in riverine systems: Implications for ecological studies. *Aquatic Ecology*, 57, 557–570. <https://doi.org/10.1007/s10452-023-10029-7>
- Parrella, F., Brizzolara, S., Holzner, M., & Mitrano, D. M. (2025). Microplastics settling in turbid water: Impacts of sediments-induced flow patterns on particle deposition rates. *Environmental Science & Technology*, 59(4), 2257–2265. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c10551>
- Pazos, R. S., Amalvy, J., Cocherro, J., Pecile, A., & Gómez, N. (2021). Temporal patterns in the abundance, type and composition of microplastics on the coast of the Río de la Plata estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112382. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112382>
- Qiao, K., & Wang, W.-X. (2024). The dual role of coastal mangroves: Sinks and sources of microplastics in rapidly urbanizing areas. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136408>
- 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, 123363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123363>
- Roebroek, C. T. J., Harrigan, S., Van Emmerik, T. H. M., Baugh, C., Eilander, D., Prudhomme, C., & Pappenberger, F. (2021). Plastic in global rivers: Are floods making it worse? *Environmental Research Letters*, 16, 025003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd5df>
- Rolf, M., Laermanns, H., Horn, J., Kienzler, L., Pohl, C., Dierkes, G., Kernchen, S., Laforsch, C., Löder, M. G. J., & Bogner, C. (2024). Multi-method analysis of microplastic distribution by flood frequency and local topography in Rhine floodplains. *Science of the Total Environment*, 927, 171927.
- Sadri, S. S., & Thompson, R. C. (2014). On the quantity and composition of floating plastic debris entering and leaving the Tamar Estuary, Southwest England. *Marine Pollution Bulletin*, 81, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.02.020>
- Simon-Sánchez, L., Grelaud, M., Garcia-Orellana, J., & Ziveri, P. (2019). River deltas as hotspots of microplastic accumulation: The case study of the Ebro

River (NW Mediterranean). *Science of the Total Environment*, 687, 1186–1196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.168>

Sousa, M. C., DeCastro, M., Gago, J., Ribeiro, A. S., Des, M., Gómez-Gesteira, J. L., Dias, J. M., & Gomez-Gesteira, M. (2021). Modelling the distribution of microplastics released by wastewater treatment plants in Ria de Vigo (NW Iberian Peninsula). *Marine Pollution Bulletin*, 166, 112227. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112227>

Souza, A. M. C., Ferreira, G. V. B., de los Santos, C. B., Frédou, F. L., & Magalhães, K. M. (2024). Anthropogenic microparticles accumulation in small-bodied seagrass meadows: The case of tropical estuarine species in Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116799. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116799>

Stead, J. L., Cundy, A. B., Hudson, M. D., Thompson, C. E. L., Williams, I. D., Russell, A. E., & Pabortsava, K. (2020). Identification of tidal trapping of microplastics in a temperate salt marsh system using sea surface microlayer sampling. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70306-5>

Su, X., Liu, M., Chen, Y., Feng, D., Xu, J., & He, Y. (2025). Microplastics aging potentially enlarge the ecological risk to wetland sediments as revealed by their interactive effects on γ -HCH dissipation and methane production. *Water Research*, 285, 124137. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124137>

Teixeira, J. A., Mazzini, P. L. F., Cai, X., Colombo, M., Qin, Q., Seeley, M. E., & Zhang, Y. J. (2026). Distribution and fate of microplastics from the Chesapeake Bay to the Mid-Atlantic Bight: A Lagrangian particle tracking approach. *Continental Shelf Research*, 297, 105627. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2025.105627>

Vermeiren, P., Muñoz, C. C., & Ikejima, K. (2016). Sources and sinks of plastic debris in estuaries: A conceptual model integrating biological, physical and chemical distribution mechanisms. *Marine Pollution Bulletin*, 113, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.002>

Waldschläger, K., & Schüttrumpf, H. (2019). Effects of particle properties on the settling and rise velocities of microplastics in freshwater under laboratory conditions. *Environmental Science & Technology*, 53, 1958–1966. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06794>

Watkins, L., McGrattan, S., Sullivan, P. J., & Walter, M. T. (2019). The effect of dams on river transport of microplastic pollution. *Science of the Total Environment*, 664, 834–840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.028>

Weiss, L., Ludwig, W., Heussner, S., Canals, M., Ghiglione, J.-F., Estournel, C., Constant, M., & Kerhervé, P. (2021). The missing ocean plastic sink: Gone with the rivers. *Science*, 373(6550), 107–111.

Windsor, F. M., Durance, I., Horton, A. A., Thompson, R. C., Tyler, C. R., & Ormerod, S. J. (2019). A catchment-scale perspective of plastic pollution. *Global Change Biology*, 25, 1207–1221. <https://doi.org/10.1111/gcb.14572>

Yan, G., Wharton, M., Hala, D., Du, J., Park, K., Gahn, M. B., & Kaiser, K. (2026). Pollution load and transport dynamics govern microplastic export from subtropical estuaries. *ACS ES&T Water*, 6(4), 2194–2203. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.5c01196>

Yang, X., Huang, G., Geng, X., Lyu, L., Bi, H., & An, C. (2025). Deciphering the behavior and fate of microplastics in coastal aquatic environments: A comprehensive review illuminating coastal dynamics and driving mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 270, 105235. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105235>

- Yonkos, L. T., Friedel, E. A., Perez-Reyes, A. C., Ghosal, S., & Arthur, C. D. (2014). Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, U.S.A. *Environmental Science & Technology*, 48, 14195–14202.
- Yuan, H., Sun, M., Zhou, B., Jin, G., Zhang, Z., Tian, Y., Chen, H., & Zhang, S. (2025). Infiltration and retention of micro/nanoplastics in the hyporheic zone of rivers. *Environmental Pollution*, 384, 126956.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126956>
- Zhang, X., Lei, Y., Chu, T., Zheng, L., Su, M., Ke, Y., Shen, Z., Hong, H., Liu, J., & Lu, H. (2026). Laser direct infrared (LDIR) spectroscopy reveals microplastic sorting and risk evolution in a subtropical river–estuary–coastal continuum: Insights on risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 505, 141518.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141518>