

**MIKROPLASTIK DARI SUNGAI KE PERAIRAN PESISIR: JALUR TRANSPORTASI,
NASIB LINGKUNGAN, DAN RISIKO EKOLOGIS_TINJAUAN NARATIF**

***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

Sungai umumnya digambarkan sebagai saluran yang memindahkan mikroplastik yang berasal dari daratan ke laut. Representasi ini berguna untuk inventarisasi, tetapi menutupi proses-proses yang menentukan di mana partikel tertahan, mengalami transformasi, termobilisasi kembali, dan menjadi tersedia secara biologis. Tinjauan naratif ini membingkai ulang kontinum sungai–estuaria–pesisir sebagai rangkaian penyaring hidrodinamika dan biogeokimia, bukan sebagai sabuk konveyor satu arah. Bukti dari jaringan sungai, waduk, estuari, lahan basah pasang surut, dan perairan dekat pantai menunjukkan bahwa fluks mikroplastik dikendalikan oleh interaksi antara debit, morfologi saluran, dinamika sedimen, pasang surut, salinitas, gelombang, angin, ukuran dan bentuk partikel, densitas polimer, agregasi, dan biofouling. Dengan demikian, retensi bersifat sementara dan bergantung pada keadaan: dasar sungai, waduk, maksimum kekeruhan estuari, rawa pasang surut, dan sedimen pesisir dapat berubah dari penyerap menjadi sumber sekunder ketika tegangan geser, banjir, pengelolaan sedimen, atau gaya pasang surut meningkat. Bukti lapangan terbaru juga menunjukkan bahwa pengambilan sampel hanya di permukaan dan penggunaan jaring bermata kasar dapat sangat membiaskan estimasi fluks, sementara metrik jumlah partikel, massa, dan bahaya polimer dapat menghasilkan peringkat risiko yang berbeda. Kami berpendapat bahwa risiko ekologis paling mungkin meningkat pada “zona peralihan” tempat partikel terakumulasi, mengalami penuaan, berinteraksi dengan kontaminan dan komunitas mikroba, serta berulang kali tersuspensi kembali ke habitat yang digunakan organisme bentik, penyaring, larva ikan, dan konsumen lainnya. Karena itu, kebutuhan riset utama bukanlah peta konsentrasi global tambahan, melainkan pemantauan berbasis proses dan peka terhadap kejadian yang menggabungkan pengukuran fluks lintas-penampang dengan pertukaran sedimen, sifat partikel, dan paparan biologis. Kerangka ini menyelaraskan ilmu transportasi dengan penilaian risiko ekologis dan memberikan dasar yang lebih dapat dipertanggungjawabkan untuk pengendalian sumber, pengelolaan waduk dan sedimen, serta mitigasi estuari/pesisir.

Kata kunci: mikroplastik sungai; retensi estuari; transportasi pesisir; remobilisasi sedimen; risiko ekologis

ABSTRACT

Rivers are generally portrayed as conduits that transport land-derived microplastics to the ocean. Although this representation is useful for inventory purposes, it obscures the processes that determine where particles are retained, undergo transformation, become remobilized, and become biologically available. This narrative review reframes the river–estuary–coastal continuum as a series of hydrodynamic and biogeochemical filters rather than as a unidirectional conveyor belt. Evidence from river networks, reservoirs, estuaries, tidal wetlands, and nearshore waters indicates that microplastic fluxes are governed by interactions among discharge, channel morphology, sediment dynamics, tides, salinity, waves, wind, particle size and shape, polymer density, aggregation, and biofouling.

Accordingly, retention is transient and state-dependent: riverbeds, reservoirs, estuarine turbidity maxima, tidal marshes, and coastal sediments can shift from sinks to secondary sources when shear stress, flooding, sediment management, or tidal forcing increases. Recent field evidence also indicates that surface-only sampling and the use of coarse-mesh nets can substantially bias flux estimates, while metrics based on particle abundance, mass, and polymer-specific hazard may produce different risk rankings. We argue that ecological risks are most likely to increase in "transition zones" where particles accumulate, undergo aging, interact with contaminants and microbial communities, and are repeatedly resuspended into habitats utilized by benthic organisms, filter feeders, fish larvae, and other consumers. Therefore, the primary research need is not additional global concentration maps, but process-based and event-sensitive monitoring that integrates cross-sectional flux measurements with sediment exchange, particle characteristics, and biological exposure. This framework aligns transport science with ecological risk assessment and provides a more defensible basis for source control, reservoir and sediment management, and estuarine/coastal mitigation.

Keywords: *riverine microplastics; Estuarine retention; Coastal transport; Sediment remobilization; Ecological risk*

1. Pendahuluan

Kontaminasi plastik kini diamati di seluruh kontinum daratan–air tawar–laut, namun bahasa ilmiah yang digunakan untuk menggambarkan kontinum tersebut masih cenderung linear. Plastik berbasis daratan dilepaskan, masuk ke sungai, diangkut ke hilir, melintasi estuari, dan mencapai laut. Model global sangat penting dalam menunjukkan bahwa sungai merupakan jalur utama yang menghubungkan limbah plastik yang salah kelola dengan laut, tetapi kesederhanaan jalur tersebut dapat menyembunyikan penyimpanan besar dan pertukaran berulang di dasar sungai, waduk, dataran banjir, estuari, rawa pasang surut, dan sedimen pesisir (Jambeck et al., 2015; Lebreton et al., 2017; Meijer et al., 2021). Karena itu, tinjauan terbaru semakin membedakan antara emisi, transfer ke sungai, transportasi sungai, dan ekspor akhir, alih-alih memperlakukan "masuk sungai" sebagai satu tahapan tunggal (Wang et al., 2024; Yang et al., 2025).

Mikroplastik (MP), yang secara konvensional didefinisikan sebagai partikel plastik berukuran lebih kecil dari 5 mm, sangat sulit ditempatkan dalam neraca sumber-ke-laut yang sederhana. Ukurannya yang kecil membuatnya peka terhadap proses yang kurang penting bagi

sampah plastik berukuran lebih besar: suspensi turbulen, pengendapan, infiltrasi ke pori sedimen, heteroagregasi, biofouling, flokulasi yang dipengaruhi salinitas, dan ingesti. Karena itu, sungai dapat bertindak pada waktu yang berbeda sebagai jalur pengangkut, tempat penyimpanan sementara, atau zona remobilisasi; hal serupa juga berlaku bagi estuari dan lahan basah pesisir (Malli et al., 2022; Owowenu et al., 2023; Quadroni et al., 2024). Nasib suatu partikel MP tidak semata-mata ditentukan oleh densitas polimernya. Bentuk, ukuran, tingkat pelapukan, biofilm permukaan, keterkaitan dengan partikel mineral atau organik, serta kondisi hidraulik yang dilaluinya dapat mengubah perilaku pengendapan efektif dan waktu tinggalnya (Kowalski et al., 2016; Kooi et al., 2017; Nguyen et al., 2020).

Pembedaan antara konsentrasi dan fluks sama pentingnya. Konsentrasi dapat menurun saat debit tinggi akibat pengenceran, meskipun jumlah total partikel yang diekspor per satuan waktu meningkat. Sebaliknya, konsentrasi tinggi pada debit rendah dapat merepresentasikan akumulasi lokal dan bukan ekspor hilir yang kuat. Studi sungai melaporkan hubungan positif, negatif, maupun tidak signifikan antara debit dan

konsentrasi MP, bergantung pada penggunaan lahan, ukuran partikel, posisi saluran, dan desain pengambilan sampel (Campanale et al., 2020; Carvalho et al., 2021; Moses et al., 2023). Banjir dapat mengikis partikel yang sebelumnya tersimpan dalam sedimen, sedangkan waduk dapat mencegat sebagian besar plastik sungai sampai aliran ekstrem atau operasi pengelolaan sedimen membalik arah pertukaran tersebut (Hurley et al., 2018; Gao et al., 2023; Quadroni et al., 2024).

Estuari menambahkan lapisan ketidaklinearan lainnya. Siklus pasang-surut harian, variasi purnama-perbani, gradien salinitas, maksimum kekeruhan estuari, sirkulasi yang digerakkan densitas, windage, dan bioturbasi berulang kali memindahkan MP di antara air permukaan, kolom air, vegetasi intertidal, dan sedimen. Sintesis yang paling dapat dipertanggungjawabkan dari bukti yang tersedia adalah bahwa estuari berfungsi sebagai penyaring semipermeabel: estuari menunda dan mentransformasi masukan dari sungai, tetapi tidak secara permanen mengisolasi dari laut (Malli et al., 2022; Yang et al., 2025). Pengukuran lapangan terbaru yang spesifik-polimer di estuari Teluk mendukung pandangan ini, dengan menunjukkan baik retensi sementara maupun ekspor yang dominan saat surut, dengan kecepatan pengendapan mulai dari perilaku mengapung hingga lebih dari 38 m hari⁻¹ karena interaksi partikel mengubah ekspektasi sederhana berdasarkan densitas (Yan et al., 2026).

Kompleksitas proses ini memiliki konsekuensi ekologis langsung. Paparan dikendalikan bukan hanya oleh jumlah partikel dalam sampel air, tetapi juga oleh waktu tinggal partikel di habitat, fraksi ukuran yang tersedia untuk tertelan, frekuensi resuspensi, toksisitas polimer dan aditif terkait, serta kerentanan biota setempat. Organisme benthik sangat relevan karena sedimen merupakan tempat penyimpanan utama MP dan karena aktivitas makan serta rekayasa habitat menempatkan banyak taksa dalam

kontak langsung dengan partikel yang telah mengalami penuaan dan mengakumulasi kontaminan (Cera et al., 2020; Ehlers et al., 2020; Gallitelli et al., 2021). Pada saat yang sama, bukti transfer trofik lebih kuat dibanding bukti biomagnifikasi yang konsisten, sehingga ingesti tidak boleh langsung diterjemahkan menjadi amplifikasi di jaringan makanan (Provencher et al., 2019; O'Connor et al., 2022).

Masalah lain bersifat metodologis. Estimasi fluks global dan regional dapat berbeda beberapa orde besaran karena penelitian menggunakan ukuran mata jaring, kedalaman pengambilan sampel, teknologi identifikasi, faktor konversi jumlah-ke-massa, dan asumsi keterwakilan spasial yang berbeda (Weiss et al., 2021; Wang et al., 2024; Yang et al., 2025). Studi lapangan terbaru yang sangat penting di Estuari Sungai Yangtze menunjukkan bahwa estimasi fluks MP tahunan sangat sensitif terhadap pengambilan sampel lintas-penampang. Pengukuran sepanjang tahun menghasilkan fluks tahunan sebesar $5,20 \times 10^{15}$ partikel, 74,6% di antaranya merupakan partikel berukuran kecil, sementara penelitian tersebut menunjukkan bahwa mengandalkan lapisan permukaan saja dapat secara substansial melebihestimasi ekspor massa (Chen et al., 2026). Temuan ini mengubah kekhawatiran metodologis lama menjadi peringatan praktis: fluks merupakan sifat dari suatu penampang melintang sepanjang waktu, bukan sekadar konsentrasi yang dikalikan dengan debit.

Tinjauan ini mengajukan tesis khusus: kontinum sungai-estuari-pesisir perlu dipahami sebagai rangkaian zona peralihan, tempat penyimpanan dan ekspor bergantian sesuai keadaan hidrodinamika, sifat partikel, dan pengondisian biologis. Dalam kerangka ini, hotspot ekologis diperkirakan tidak selalu berada di lokasi dengan konsentrasi sesaat tertinggi, tetapi di tempat partikel tertahan cukup lama untuk mengalami penuaan dan berinteraksi dengan organisme, lalu termobilisasi kembali secara berkala.

Karena itu, tinjauan ini mengintegrasikan transportasi, nasib, dan risiko ekologis alih-alih memperlakukannya sebagai topik terpisah. Empat pertanyaan diajukan: (1) proses apa yang menentukan apakah MP diteruskan atau ditahan di sungai; (2) bagaimana estuari dan perairan pesisir memodifikasi sinyal dari sungai; (3) di mana proses transportasi menciptakan paparan yang bermakna secara ekologis; dan (4) perubahan metodologis apa yang diperlukan untuk beralih dari pemetaan konsentrasi menuju penilaian risiko sumber-ke-laut yang dapat dipertanggungjawabkan.

2. Cakupan Dan Pendekatan Tinjauan Naratif

Artikel ini menggunakan desain tinjauan naratif terstruktur. Artikel ini bukan tinjauan sistematis dan tidak bertujuan menghitung ukuran efek gabungan. Basis bukti awal terdiri atas tinjauan kritis terbaru mengenai kendali hidro-geomorfologi sungai, transportasi estuari, interaksi pengelolaan sumber daya air dan perubahan iklim dengan pencemaran MP sungai, serta nasib di pesisir (Malli et al., 2022; Owowenu et al., 2023; Quadroni et al., 2024; Yang et al., 2025). Sumber tersebut dilengkapi dengan pencarian terarah terhadap studi lapangan asli, eksperimen, dan pemodelan, dengan penekanan pada literatur yang diterbitkan hingga Agustus 2026 dan studi yang secara langsung menguraikan suatu mekanisme transportasi, mengkuantifikasi fluks atau proses retensi, atau menghubungkan distribusi lingkungan dengan risiko ekologis.

Seleksi mengutamakan studi yang dapat membedakan mekanisme yang saling bersaing. Sebagai contoh, survei yang hanya melaporkan kelimpahan MP dianggap kurang informatif bagi tinjauan ini dibanding penelitian yang mengambil sampel pada beberapa kondisi aliran, kedalaman air, fase pasang surut, lapisan sedimen, atau kelas ukuran partikel. Studi fundamental yang mendahului literatur terbaru tetap dipertahankan ketika

membangun konsep yang masih diperlukan untuk interpretasi, termasuk emisi plastik global sungai-ke-laut, front perangkap estuari, penenggelaman yang dikendalikan biofouling, dan remobilisasi akibat banjir (Acha et al., 2003; Lebreton et al., 2017; Kooi et al., 2017; Hurley et al., 2018). Studi terbaru diprioritaskan bila mengubah interpretasi, bukan sekadar menambahkan catatan keberadaan geografis baru (Gao et al., 2023; Zhang et al., 2026; Chen et al., 2026; Yan et al., 2026).

Bukti diinterpretasikan secara hierarkis. Observasi lapangan langsung dengan konteks hidrologi atau pasang surut yang eksplisit dianggap paling kuat untuk menjelaskan perilaku lingkungan; eksperimen terkontrol dan model proses digunakan untuk mengidentifikasi mekanisme yang masuk akal; sedangkan artikel tinjauan digunakan untuk mengintegrasikan area yang studi primernya masih terbatas. Nilai numerik dilaporkan hanya apabila dapat ditelusuri ke suatu studi atau ke tinjauan yang secara eksplisit merangkum data dasarnya. Karena studi MP sangat berbeda dalam batas ukuran partikel bawah, volume sampel, konfirmasi polimer, satuan konsentrasi, dan matriks, nilai numerik tidak digabungkan lintas studi. Sebaliknya, sintesis menekankan arah pengaruh, konsistensi proses, kondisi batas, dan sumber perbedaan hasil (Malli et al., 2022; Wang et al., 2024; Yang et al., 2025).

Narasi diorganisasi berdasarkan proses, bukan inventaris habitat. Sungai, waduk, estuari, dan perairan pesisir dibahas sebagai elemen yang saling terhubung dalam satu kontinum, dengan perhatian khusus pada transisi saat rezim transportasi dominan berubah. Desain ini dimaksudkan untuk menyingkap sumber utama ketidakpastian dalam literatur: partikel yang sama dapat bergantian antara keadaan tersuspensi, terdeposit, terkubur, terkolonisasi biofilm, tertelan, dan tersuspensi kembali, sehingga "nasib" sering kali merupakan keadaan yang

bergantung waktu dan bukan titik akhir permanen.

3. Sumber Dan Jalur Masuk Mikroplastik Ke Sistem Sungai

Jumlah dan komposisi MP yang masuk ke sungai mencerminkan intensitas sumber sekaligus efisiensi jalur pengantaran. Sumber titik meliputi pembuangan air limbah, luapan saluran pembuangan gabungan, buangan industri, dan infrastruktur drainase; sedangkan sumber difus meliputi limpasan perkotaan, keausan jalan dan ban, plastik pertanian, deposisi atmosfer, serta fragmentasi sampah plastik yang lebih besar di seluruh daerah tangkapan. Kepentingan relatif jalur-jalur tersebut berbeda menurut wilayah dan konteks pembangunan, sehingga penggunaan lahan sering memprediksi kelimpahan MP di sungai tetapi tidak secara unik menentukan fluks ke hilir (Kabir et al., 2021; Woodward et al., 2021; Wang et al., 2024).

Urbanisasi sering dikaitkan dengan konsentrasi yang lebih tinggi karena meningkatkan baik pembuangan langsung maupun limpasan dari permukaan kedap air. Di sungai-sungai Jepang, analisis sumber-ke-penyerap menghubungkan penggunaan lahan lokal dengan pencemaran MP dan menyoroti peran gabungan sumber titik dan non-titik (Kabir et al., 2021). Di Garonne, variasi spasial dan temporal mencerminkan urbanisasi bersama keadaan hidrologis, bukan salah satunya secara tunggal (Carvalho et al., 2021). Implikasinya adalah bahwa inventaris emisi bukan inventaris transportasi: fraksi yang mencapai saluran bergantung pada hujan, konektivitas drainase, intersepsi tanah dan vegetasi, kedekatan sumber terhadap badan air, serta peluang partikel untuk tersimpan sebelum kejadian limpasan berikutnya (Owowunu et al., 2023; Wang et al., 2024). Komposisi campuran dalam sungai juga tersaring secara selektif ketika memasuki sistem. Serat ringan dapat diangkut melalui udara atau air limbah dan tetap tersuspensi dalam waktu lama, sedangkan fragmen yang lebih padat dapat masuk

melalui limpasan hujan lalu segera berasosiasi dengan material dasar. Karena itu, sungai dapat mengandung distribusi polimer dan bentuk yang sangat berbeda dari profil emisi primer daerah tangkapan. Ketidaksesuaian ini telah disoroti dalam tinjauan sumber-ke-laut dan menjadi salah satu alasan mengapa menghitung balik emisi dari konsentrasi hilir dapat menyesatkan (Wang et al., 2024). Masalah ini diperparah oleh fragmentasi: makroplastik yang tersimpan di tepi sungai, dataran banjir, atau infrastruktur dapat menjadi sumber tertunda MP sekunder, sehingga konsentrasi sungai saat ini sebagian merekam pengelolaan sampah masa lalu.

Curah hujan menggambarkan keterkaitan antara ketersediaan sumber dan kapasitas transportasi. Perairan permukaan Swiss menunjukkan peningkatan setelah hujan yang berkisar sekitar lima kali lipat di satu sungai hingga 150 kali lipat di sistem lain yang sangat dipengaruhi limpasan jalan (Faure et al., 2015; Quadroni et al., 2024). Di Sungai Ofanto, konsentrasi MP lebih tinggi selama periode basah dan berhubungan positif dengan tinggi muka air dan kecepatan aliran, konsisten dengan mobilisasi dari daerah tangkapan pertanian (Campanale et al., 2020). Sebaliknya, Garonne menunjukkan konsentrasi lebih tinggi selama periode hangat dengan debit rendah, menggambarkan bagaimana pengenceran dan penyimpanan dapat membalik hubungan konsentrasi-debit yang diamati (Carvalho et al., 2021).

Pengamatan yang berlawanan ini tidak seharusnya diperlakukan sebagai bukti kontradiktif mengenai apakah hujan "meningkatkan" MP. Hujan dapat secara bersamaan memobilisasi partikel daratan, meresuspensi simpanan di dasar sungai, meningkatkan debit, dan mengencerkan konsentrasi. Sinyal mana yang dominan bergantung pada simpanan sebelumnya, konektivitas daerah tangkapan, waktu hidrograf, posisi pengambilan sampel, dan kelas partikel. Pada daerah tangkapan perkotaan, first flush dapat menghasilkan lonjakan konsentrasi yang kuat; pada

sungai besar, peningkatan volume air dapat menurunkan konsentrasi sementara fluks total meningkat. Oleh karena itu, penilaian berbasis proses setidaknya harus membedakan tiga besaran: konsentrasi, fluks sesaat, dan beban terintegrasi kejadian (Wagner et al., 2019; Quadroni et al., 2024).

Implikasi akhir bagi pengelolaan sumber adalah bahwa intervensi perlu ditempatkan di lokasi dengan konektivitas sumber terbesar, bukan hanya di lokasi dengan konsentrasi hilir tinggi. Pengendalian air limbah, penangkapan air hujan, pengelolaan limpasan jalan, pengendalian plastik pertanian, dan pengebakan sampah menangani fraksi campuran MP yang berbeda. Pemantauan di hulu dan hilir jalur-jalur tersebut dapat mengidentifikasi efektivitas pengendalian sumber, sedangkan pemantauan hanya di ujung sungai tidak dapat menunjukkan apakah perubahan disebabkan oleh berkurangnya emisi, retensi yang lebih kuat, atau perubahan hidrologi. Pembedaan ini semakin penting di bawah variabilitas iklim karena efisiensi transfer dari daerah tangkapan ke sungai juga sedang berubah (Ford et al., 2022; Quadroni et al., 2024).

4. Dinamika Transportasi Mikroplastik Dalam Sistem Sungai

Setelah MP memasuki sungai, tiga komponen transportasi dapat dibedakan: pergerakan longitudinal mengikuti aliran utama, pertukaran vertikal antara kolom air dan dasar, serta pertukaran lateral dengan tebing, bar, dataran banjir, vegetasi, dan lahan di sekitarnya. Owowenu et al. (2023) menekankan bahwa komponen-komponen ini tersusun pada skala biotop hidraulik—pool, run, glide, riffle, dan lingkungan aliran lain tempat kedalaman, kecepatan, kekasaran substrat, dan morfologi berinteraksi. Kerangka ini berguna karena menjelaskan mengapa dua sampel yang hanya berjarak beberapa meter dapat mewakili keadaan transportasi yang berbeda. Konsentrasi yang diukur pada pool deposisional tidak dapat dipertukarkan dengan yang diukur

pada run turbulen meskipun keduanya berada pada ruas sungai yang sama.

Kecepatan aliran memengaruhi adveksi sekaligus ambang resuspensi. Kecepatan yang lebih tinggi dapat mengangkut partikel lebih jauh dan mengerosi material dari dasar serta tebing, sementara zona berenergi rendah mendorong pengendapan. Namun, perilaku partikel tidak identik dengan sedimen alami karena densitas, bentuk, dan kondisi permukaan berbeda beberapa orde besaran. Polipropilena dan polietilena secara intrinsik mengapung di air tawar, sedangkan polietilena tereftalat dan polivinil klorida lebih padat; meskipun demikian, biofouling dan agregasi dapat menyebabkan partikel yang secara nominal mengapung menjadi tenggelam, sedangkan turbulensi dapat mempertahankan partikel padat dalam suspensi (Kowalski et al., 2016; Kooi et al., 2017; Owowenu et al., 2023). Karena itu, identitas polimer saja merupakan prediktor transportasi yang tidak lengkap.

Studi lapangan menunjukkan bahwa hubungan debit–konsentrasi bersifat kondisional. Banjir di berbagai daerah tangkapan Inggris mengurangi kontaminasi MP pada sedimen dasar sungai sekitar 70%, yang menunjukkan bahwa aliran ekstrem dapat mengikis partikel tersimpan dari dasar dan memindahkannya ke hilir (Hurley et al., 2018). Pengambilan sampel yang berfokus pada badai juga menunjukkan bahwa MP pada sedimen fluvial dapat dimobilisasi dengan cepat di bawah kondisi energi tinggi (Ockelford et al., 2020). Di Sungai Ofanto, konsentrasi periode basah meningkat bersama tinggi muka air dan kecepatan, sedangkan Garonne menunjukkan hubungan konsentrasi–debit yang berlawanan (Campanale et al., 2020; Carvalho et al., 2021). Pengamatan musiman di Rhine dan Weser lebih lanjut menunjukkan bahwa hubungan dapat berbeda menurut fraksi ukuran dan bagian sungai, dengan partikel kecil berperilaku berbeda dari partikel yang lebih besar

(Mani & Burkhardt-Holm, 2020; Moses et al., 2023).

Ukuran partikel mengubah respons hidraulik karena kecepatan pengendapan, gaya hambat, dan probabilitas terperangkap bergantung pada ukuran. Di Weser, hubungan dengan debit berbeda tajam antara fraksi 10–500 µm dan MP yang lebih besar, memperkuat gagasan bahwa satu nilai “konsentrasi MP” menyembunyikan populasi dengan karakteristik transportasi berbeda (Moses et al., 2023). Lu et al. (2023), dengan menggunakan pelacakan partikel dan pemodelan hidrodinamika di Sungai Hanjiang, melaporkan mobilitas yang lebih besar untuk polipropilena berdensitas rendah dibanding PET yang lebih padat serta menemukan bahwa aliran tinggi meningkatkan migrasi ke hilir dan mengubah partisi antara suspensi dan sedimen. Bukti semacam ini mendukung pengambilan sampel yang teresolusi ukuran dan polimer, bukan hanya perhitungan keseluruhan.

Bentuk menambahkan lapisan pengendali lainnya. Serat memiliki gaya hambat besar relatif terhadap massa dan dapat tetap tersuspensi lebih lama daripada fragmen kompak, tetapi juga dapat terjerat pada vegetasi, bahan organik, atau struktur dasar yang kasar. Film merespons kuat terhadap angin dan turbulensi dekat permukaan; busa dapat sangat mengapung sampai pelapukan atau fouling mengubah densitas efektifnya. Kapp dan Yeatman (2018) menemukan pola partikel di Sungai Snake dan Columbia bagian hilir yang bervariasi menurut konteks hidrodinamika, sedangkan Barrows et al. (2018) mendokumentasikan heterogenitas skala daerah tangkapan yang besar pada sungai dengan penggunaan lahan campuran. Studi-studi ini secara kolektif memperingatkan agar tidak menganggap sampel pada satu kedalaman atau satu transek mewakili seluruh populasi yang bergerak.

Pada skala ruas sungai, morfologi saluran menentukan lokasi terbentuknya penyimpanan sementara. Bar, backwater,

tepiian bervegetasi, pool, dan substrat kasar menciptakan zona berkecepatan lebih rendah atau intersepsi lebih tinggi. Mani et al. (2019) menunjukkan kontaminasi MP yang besar pada sedimen benthik Rhine, mendukung peran dasar sungai sebagai reservoir aktif. Kekasaran hidraulik dapat menurunkan kecepatan dekat dasar dan menciptakan retensi, tetapi peningkatan gaya geser saat banjir dapat tiba-tiba membalik fungsi tersebut. Logika yang sama berlaku secara lateral: dataran banjir dan vegetasi riparian menahan partikel selama aliran biasa, tetapi dapat melepaskannya ketika tergenang atau terganggu secara mekanis (Owowunu et al., 2023; Quadroni et al., 2024).

Hal ini mengarah pada model konseptual sungai yang lebih berguna. Alih-alih bertanya seberapa cepat MP bergerak ke hilir, pertanyaan yang lebih relevan adalah seberapa sering partikel berpindah antara keadaan bergerak dan tersimpan. Waktu tempuh kumulatif dari sumber ke estuari dapat jauh lebih lama daripada waktu tempuh air karena partikel mengalami siklus deposisi dan remobilisasi berulang. Waktu tinggal juga mengubah partikel itu sendiri melalui abrasi, oksidasi, kolonisasi mikroba, dan agregasi, sehingga riwayat transportasi menjadi bagian dari perilaku transportasi selanjutnya. Hal ini menciptakan ketergantungan lintasan: dua partikel dengan polimer dan ukuran nominal yang sama dapat berperilaku berbeda bila satu baru dilepaskan dan yang lain telah berbulan-bulan berada pada zona deposisional yang kaya biofilm (Amaral-Zettler et al., 2020; Nguyen et al., 2020). Dasar sungai karena itu bukan sekadar penyerap pasif. MP yang berasosiasi dengan sedimen dapat tetap tersedia untuk transportasi berikutnya dan paparan biologis. Penyimpanan benthik menjadi sangat penting selama kekeringan dan aliran rendah, ketika partikel terakumulasi di pori dan endapan halus, serta selama aliran tinggi berikutnya ketika endapan tersebut dapat tererosi. Pergantian antara penyimpanan dan ekspor ini merupakan

inti dalam menafsirkan catatan pemantauan karena konsentrasi rendah pada satu kampanye pengambilan sampel dapat mencerminkan deposisi dan bukan berkurangnya masukan (Quadroni et al., 2024). Hal ini juga berarti bahwa intervensi pengelolaan dapat menunjukkan manfaat yang tertunda bila partikel yang terakumulasi secara historis terus mengalami remobilisasi.

Jaringan sungai menimbulkan persoalan skala lainnya. Anak sungai dapat membawa beban yang tidak proporsional dibanding debitnya ketika sumber lokal intensif, sedangkan saluran utama dapat mengencerkan konsentrasi tetapi membawa fluks total yang lebih besar. Karena itu, posisi dalam daerah tangkapan penting. Konsentrasi MP di DAS Rhine berhubungan dengan posisi hilir dan karakteristik daerah tangkapan, namun curah hujan jangka pendek tidak menjelaskan seluruh variabilitas temporal (Mani & Burkhardt-Holm, 2020). Aliran keluar anak sungai tingkat menengah di Sungai Jiulong juga terbukti berkontribusi nyata terhadap transportasi MP ke hilir (Li et al., 2021). Desain sumber-ke-laut yang dapat dipertanggungjawabkan karena itu perlu menggabungkan pemantauan anak sungai secara bertingkat dengan pengukuran lintas-penampang di sungai utama.

Pelajaran utama dari studi sungai adalah bahwa mobilitas bergantung pada keadaan hidrodinamika sekaligus keadaan partikel. Debit tinggi tidak menjamin konsentrasi tinggi, densitas rendah tidak menjamin partikel terus mengapung, dan sedimentasi tidak berarti penguburan permanen. Hubungan kondisional inilah alasan pertama mengapa model sabuk conveyor gagal. Alasan kedua adalah keberadaan struktur rekayasa yang secara sengaja mengubah hidrologi dan dinamika sedimen.

Mekanisme skala sungai ini membentuk bagian hulu dari kerangka zona peralihan yang dirangkum dalam Tabel 1. Tabel tersebut menegaskan bahwa gaya hidraulik yang sama dapat mendorong

transportasi atau retensi bergantung pada sifat partikel, kondisi saluran, dan penyimpanan sebelumnya.

5. Peran Waduk Dan Bendungan Dalam Retensi Dan Remobilisasi Mikroplastik

Bendungan dan waduk memutus konektivitas longitudinal, menurunkan kecepatan aliran, meningkatkan waktu tinggal, dan menjebak sedimen alami; karena itu tidak mengherankan jika keduanya juga mengubah transportasi MP. Studi awal menunjukkan akumulasi MP mengapung di belakang Bendungan Tiga Ngarai dan membantu menetapkan waduk sebagai tempat penyimpanan potensial yang penting (Zhang et al., 2015). Perbandingan antara sungai dan impoundment kemudian menunjukkan bahwa kecepatan rendah mendorong deposisi dan bahwa komposisi MP yang tertahan dapat berbeda dari material tersuspensi di hulu, konsisten dengan pengendapan dan perangkat yang selektif (Watkins et al., 2019; Guo et al., 2021). Bukti global dari waduk sangat heterogen, tetapi heterogenitas itu sendiri informatif. Sintesis terhadap 43 waduk melaporkan kelimpahan MP yang membentang beberapa orde besaran baik pada air maupun sedimen, dengan partikel kecil membentuk proporsi besar MP yang terdeteksi, sementara penggunaan lahan, musim, metode analisis, dan geografi memengaruhi konsentrasi yang diamati (Guo et al., 2021). Rentang yang luas berarti bahwa "efek waduk" tidak dapat direpresentasikan oleh koefisien perangkat universal. Waktu tinggal, kedalaman, regulasi muka air, ukuran butir sedimen, konfigurasi aliran masuk, dan sifat partikel menentukan apakah MP tetap tersuspensi, mengendap di dekat inflow, terakumulasi di sepanjang garis pantai, atau terkubur dalam sedimen halus.

Bukti lapangan dan pemodelan semakin mendukung bahwa perangkat sedimen bersifat substansial. He et al. (2021) menemukan perilaku sedimen sungai yang konsisten dengan retensi MP yang penting,

sedangkan studi berfokus pada bendungan menunjukkan akumulasi yang meningkat di endapan berenergi rendah. Sedimen berbutir halus sangat efektif karena luas permukaannya yang besar dan sifat kohesifnya mendorong asosiasi dengan partikel plastik kecil serta bahan organik. Proses penyimpanan ini dapat mengurangi ekspor langsung ke hilir, tetapi meningkatkan paparan lokal terhadap komunitas benthik dan menciptakan reservoir warisan yang rentan terhadap gangguan (Bellasi et al., 2020; Quadroni et al., 2024).

Sistem Tiga Ngarai menyediakan bukti kuantitatif yang luar biasa. Catatan sedimen menunjukkan akumulasi progresif dan retensi preferensial partikel kecil, dan Gao et al. (2023) memperkirakan bahwa waduk menahan sekitar $47 \pm 44\%$ fluks MP dari Yangtze, setara dengan 8.048 ± 7.494 t/tahun—1 berdasarkan asumsi studi. Alih-alih sekadar membilas MP tersimpan, banjir skala daerah tangkapan pada 2020 justru meningkatkan deposisi di belakang bendungan; konsentrasi MP pada sedimen waduk dilaporkan sekitar 1,7 kali tingkat tahun 2019. Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa kejadian ekstrem dapat meningkatkan sekaligus remobilisasi di hulu dan deposisi di hilir inflow: “pembilasan banjir” tidak selalu berarti ekspor melalui seluruh waduk.

Zona fluktuasi muka air menciptakan perilaku peralihan tambahan. Sedimen yang terekspos saat muka air rendah dapat mengumpulkan MP dari garis pantai dan sumber daratan; ketika muka air naik, sebagian material tersebut dapat terdistribusi ulang ke endapan waduk yang lebih dalam atau dilepas ke kolom air. Chen et al. (2022) menunjukkan bahwa banjir skala daerah tangkapan menata ulang MP di sabuk hidro-fluktuasi, memperkuat konsep penyimpanan dinamis dan bukan terminal. Pembendungan di DAS Shaying juga mengubah proses migrasi dan risiko pencemaran (Shen et al., 2023).

Operasi pengelolaan dapat membalik retensi waduk dengan lebih tiba-tiba. Pembilasan sedimen, pengerukan,

drawdown, dan penghilangan bendungan dirancang untuk memindahkan sedimen tersimpan atau memulihkan kontinuitas sedimen. Jika MP berasosiasi dengan endapan tersebut, operasi juga dapat melepaskan inventaris historis yang terkonsentrasi ke hilir. Quadroni et al. (2024) karena itu berpendapat bahwa perencanaan pengelolaan sedimen harus secara eksplisit mempertimbangkan kontaminasi MP. Ini merupakan kesenjangan praktis: penilaian lingkungan untuk pembilasan sedimen umumnya berfokus pada kekeruhan, penurunan oksigen, nutrisi, dan kontaminan konvensional, sementara partikel polimer dan aditif terkaitnya dapat terabaikan.

Waduk dengan demikian menempati posisi ambigu dalam mitigasi. Waduk mengurangi fluks sumber-ke-laut secara langsung dengan mencegat partikel, tetapi memindahkan kontaminasi dari kolom air ke simpanan sedimen berumur panjang dan dapat meningkatkan paparan ekologis lokal. Karena itu, menganggap retensi sebagai “penghilangan” tidak tepat kecuali penguburan cukup stabil dan kontak ekologis rendah. Dari perspektif pengelolaan, metrik yang relevan bukan efisiensi perangkat semata, melainkan keseimbangan antara massa tertahan, waktu tinggal, probabilitas remobilisasi, dan paparan ekologis. Logika yang sama menjadi lebih penting di estuari, tempat mekanisme perangkat bersifat alami, dua arah, dan terus dimodulasi oleh pasang surut.

6. Transformasi dan Retensi Mikroplastik di Estuari

Estuari merupakan transisi penentu dalam jalur darat-laut karena debit sungai berinteraksi dengan arus pasang surut, gradien densitas, dinamika sedimen tersuspensi, gaya angin, dan resuspensi perairan dangkal. Malli et al. (2022) mensintesis mekanisme ini sebagai migrasi horizontal dan vertikal yang saling terkait dan menyimpulkan bahwa estuari secara umum berfungsi sebagai penyerap sementara, bukan jalur sederhana. Yang et

al. (2025) mencapai kesimpulan serupa dari perspektif pesisir yang lebih luas: maksimum kekeruhan estuari, struktur salinitas, dan pertukaran sedimen dapat menahan MP yang dibawa sungai dan membantu menjelaskan mengapa beban laut yang teramati tidak langsung sesuai dengan estimasi dari hulu.

Pasang surut menciptakan pembalikan arah yang berulang. Saat surut, partikel dapat diekspor ke laut; saat pasang, sebagian dapat diadveksi ke darat atau tertahan dalam zona resirkulasi. Besarnya pertukaran berubah antara pasang purnama dan perbani karena kecepatan arus dan kisaran muka air berubah. Di Estuari Itchen, konsentrasi menurun sekitar dua pertiga antara kondisi pasang dan surut, konsisten dengan perangkat intertidal (Stead et al., 2020; Malli et al., 2022). Pemodelan di Ría de Vigo menunjukkan ekspor yang lebih kuat pada kondisi pasang purnama dibanding perbani dan perbedaan besar antara skenario pelepasan saat surut dan pasang (Sousa et al., 2021). Hasil semacam ini menjelaskan mengapa pengambilan sampel pada satu fase dapat menghasilkan estimasi kelimpahan yang tidak kompatibel meskipun emisi dasarnya tidak berubah.

Aliran sungai musiman biasanya lebih berpengaruh daripada variasi pasang surut dalam menentukan jumlah MP daratan yang masuk estuari, tetapi pengaruhnya terhadap konsentrasi tetap bergantung konteks. Musim basah meningkatkan limpasan dan dapat meresuspensi material terdeposit, sedangkan volume air yang lebih besar secara bersamaan dapat mengencerkan konsentrasi. Balthazar-Silva et al. (2020) mengamati variasi musiman yang kuat pada pelet di pantai, sementara Suteja et al. (2021) melaporkan konsentrasi musim basah dan kering yang sangat mirip di Teluk Benoa, tempat masukan lokal yang terus-menerus mengurangi kontras musiman. Variabel kuncinya karena itu bukan "basah versus kering" semata, melainkan keseimbangan antara masukan akibat kejadian, pengenceran, resuspensi, dan pembilasan.

Angin mengubah keseimbangan ini, terutama bagi partikel mengapung dan sistem dangkal. Windage dapat mendorong MP mengapung mendekati atau menjauhi pantai, mendistribusikannya secara vertikal melalui pencampuran turbulen, dan meresuspensi sedimen ketika gerak orbital gelombang mencapai dasar. Arah angin dominan relatif terhadap geometri estuari dapat menciptakan akumulasi di sisi bawah angin dan retensi di zona terlindung. Observasi dan pemodelan di Ría de Vigo menunjukkan bahwa angin yang mendukung upwelling dan downwelling dapat menata ulang sirkulasi dua lapis sehingga memisahkan nasib partikel mengapung dan tenggelam (Díez-Minguito et al., 2020). Ini mengingatkan bahwa "estuaria" bukan satu kompartemen transportasi tunggal: arus permukaan dan dekat dasar dapat bergerak berlawanan arah.

Salinitas menambahkan kendali khas estuari. Peningkatan kekuatan ionik dapat mendorong agregasi antara MP, partikel mineral tersuspensi, dan bahan organik. Pada saat yang sama, densitas air ambien meningkat ke arah kondisi laut, sehingga mengubah kontras daya apung polimer. Front salinitas dan maksimum kekeruhan estuari karena itu bertindak sebagai struktur penyortiran tempat bahan partikulat tersuspensi, sedimen halus, dan MP dapat terakumulasi. Pengamatan lama bahwa front salinitas dasar di Río de la Plata mengonsentrasikan debris merupakan pendahulu bagi pemahaman mekanisme yang lebih luas ini (Acha et al., 2003). Studi estuari yang lebih baru telah mengonfirmasi asosiasi kuat antara sedimen berbutir halus dan retensi MP (Alves & Figueiredo, 2019; Pazos et al., 2021).

Biofouling dan agregasi mengubah struktur hidrodinamika tersebut menjadi penyaring biogeokimia. Kolonisasi mengubah densitas dan kimia permukaan partikel; zat polimer ekstraseluler meningkatkan kelengketan; heteroagregasi dengan sedimen mempercepat pengendapan. Proses yang sama kemudian dapat berbalik

ketika agregat terfragmentasi, biofilm berubah, atau gaya geser dasar meningkat. Sedimen estuari karena itu merupakan permukaan pertukaran aktif dan bukan titik akhir. Studi lapangan berulang kali mendeteksi konsentrasi MP pada sedimen yang lebih tinggi daripada air di atasnya berdasarkan matriks masing-masing, sementara bioturbasi, gelombang kapal, badai, dan pasang surut menyediakan mekanisme untuk mengembalikannya ke suspensi (Malli et al., 2022; Bailey et al., 2021; Ghayebzadeh et al., 2021).

Bukti terbaru memperkuat interpretasi penyaring semipermeabel. Yan et al. (2026) menggunakan pyrolysis-GC-MS/MS spesifik-polimer dan eksperimen pengendapan di estuari subtropis Teluk. Konsentrasi rata-rata lokasi mencapai $0,82\text{--}19,8 \mu\text{g L}^{-1}$ di Galveston Bay dan $0,09\text{--}3,7 \mu\text{g L}^{-1}$ di Matagorda Bay, sedangkan perilaku pengendapan terukur berkisar dari mengapung hingga >38 m hari $^{-1}$. Penyimpangan dari ekspektasi berbasis densitas umum terjadi, konsisten dengan agregasi, biofouling, dan resuspensi. Pengamatan deret waktu di mulut estuari menunjukkan ekspor dominan saat surut, yang menegaskan bahwa penyimpanan dan ekspor berlangsung bersamaan dan bukan sebagai dua keadaan estuari yang saling eksklusif. Penelitian sedimen beresolusi tinggi memberikan pandangan jangka panjang yang melengkapi. Di Estuari Zhangjiang, pencitraan LDIR terhadap MP $10\text{--}500 \mu\text{m}$ mengukur $10.463\text{--}399.481$ item kg^{-1} dan menunjukkan penurunan ke hilir, pengayaan permukaan, serta penguburan hingga kedalaman 80 cm. Kelimpahan berkorelasi positif dengan lanau dan bahan organik serta negatif dengan salinitas dan pH; yang penting, sektor estuari memiliki risiko bahaya polimer yang lebih tinggi karena kontribusi relatif polimer berbahaya berubah sepanjang kontinum (Zhang et al., 2026). Hal ini menunjukkan mengapa kelimpahan saja dapat melewati evolusi risiko: penyortiran hidrodinamika dapat menurunkan jumlah total partikel ke hilir

sambil memperkaya campuran polimer yang lebih berbahaya.

Analisis terbaru daratan-sedimen-air mencapai kesimpulan konseptual yang sama dari perspektif sumber. Dalam sistem sungai-estuari pesisir yang didominasi pasang surut, gradien penggunaan lahan dan sumber titik lokal menjelaskan akumulasi sedimen, sementara gaya geser pasang surut meresuspensi MP yang tersimpan dan mendistribusikannya kembali ke kolom air (Li et al., 2026). Sedimen karena itu berfungsi sebagai reservoir perantara yang menghubungkan masukan daerah tangkapan dengan paparan kolom air yang episodik. Estuari selanjutnya perlu diperlakukan sebagai kondisi batas reaktif dalam model sumber-ke-laut, bukan sebagai koefisien transmisi tetap.

Interpretasi ini menyelesaikan kontradiksi semu dalam literatur. Estuari dapat secara bersamaan disebut sebagai penyerap dan sumber karena kedua label tersebut mengacu pada skala waktu dan keadaan hidrodinamika yang berbeda. Saat energi rendah, estuari menahan; saat pasang kuat, banjir, badai, pengerukan, atau bioturbasi, estuari melepaskan. Efek bersih tahunan bergantung pada waktu tinggal dan besarnya kedua fase. Namun, bagi risiko ekologis, yang penting bukan hanya neraca bersih tetapi juga paparan berulang yang tercipta selama siklus penyimpanan-resuspensi.

7. Nasib Dan Redistribusi Mikroplastik Di Perairan Pesisir

Melewati mulut estuari bukanlah nasib akhir. Di perairan dekat pantai, MP menghadapi gelombang, arus yang digerakkan angin, jet pesisir, front, pengarahan oleh batimetri, pertukaran pantai, dan perubahan stratifikasi musiman. Yang et al. (2025) menekankan bahwa transportasi pesisir dikendalikan oleh interaksi hidrologi, meteorologi, topografi, geokimia, dan sifat partikel. Kendali ini dapat mengangkut partikel ke lepas pantai, mengembalikannya ke pantai, mengonsentrasikannya di teluk,

atau memindahkannya ke bawah menuju sedimen.

Pecahnya gelombang sangat penting karena turbulensi mendistribusikan kembali MP mengapung ke seluruh kolom air dan menghasilkan zona konvergensi di dekat transisi pecah gelombang-surf. Studi laboratorium dan lapangan menunjukkan bahwa ukuran, densitas, dan bentuk partikel memengaruhi transportasi lintas-pantai di bawah gelombang, sementara angin dapat memperkuat atau melawan redistribusi yang digerakkan gelombang (Ho & Not, 2019; Forsberg et al., 2020). Hal ini membuat konsentrasi permukaan menjadi proksi yang tidak stabil bagi inventaris total dekat pantai. Jumlah rendah di permukaan dapat mencerminkan pencampuran vertikal dan bukan penghilangan.

Pasang surut dan geometri pesisir menciptakan retensi di teluk serta sistem semi-tertutup. Di Xiangshan Bay, transportasi yang digerakkan pasang surut dan lokasi pelepasan memengaruhi akumulasi serta migrasi MP, menunjukkan bahwa saluran sempit dan aliran osilasi dapat mempertahankan partikel di dalam teluk pesisir (Yin et al., 2022). Badai pesisir dapat secara tiba-tiba menata ulang distribusi ini. Peningkatan terkait topan telah didokumentasikan di teluk-teluk Tiongkok, dan resuspensi sedimen akibat badai dapat memindahkan MP yang terkubur kembali ke kolom air (Wang et al., 2019; Yang et al., 2025).

Biofouling semakin penting seiring bertambahnya waktu tinggal karena mengubah densitas efektif partikel dan dapat memindahkan polimer yang awalnya mengapung ke bawah permukaan. Model dan eksperimen menunjukkan bahwa transisi ini bersifat dinamis, bukan satu arah: pertumbuhan biofilm mendorong penenggelaman, sedangkan perubahan biomassa komunitas, grazing, atau pecahnya agregat dapat memulihkan daya apung (Kooi et al., 2017). Pemodelan skala shelf terbaru dari Chesapeake Bay juga menunjukkan bahwa biofouling dapat membentuk ulang jalur ekspor dan waktu

tinggal setelah pelepasan dari estuari, dengan partikel kecil yang terbiofouling menyebar berbeda dari partikel mengapung yang tidak terfouling (Teixeira et al., 2026).

Sedimen pesisir karena itu merupakan tempat penyimpanan jangka panjang utama, tetapi permanensinya bergantung pada kedalaman dan gangguan. Endapan halus yang kaya bahan organik mendukung akumulasi, sedangkan dasar dangkal berenergi tinggi dapat berulang kali tersuspensi kembali. Lahan basah seperti mangrove, rawa asin, dan padang lamun menambahkan intersepsi fisik oleh vegetasi serta mendorong pengendapan sedimen halus, menciptakan habitat retensi tinggi yang juga sensitif secara biologis. Dalam konteks ini, "retensi" yang berhasil dari perspektif neraca massa dapat bertepatan dengan paparan ekologis yang tidak diinginkan.

Kontinum sungai-ke-pesisir karena itu berakhir bukan pada satu penyerap laut, tetapi pada kumpulan reservoir tersebar dengan skala waktu remobilisasi yang berbeda. Pantai dapat melepaskan partikel secara musiman, sedimen dangkal selama badai, dan endapan shelf yang lebih dalam hanya selama gangguan yang lebih jarang. Pengelolaan karenanya harus membedakan ekspor melewati estuari dari sekuestrasi yang sesungguhnya. Yang pertama adalah hasil transportasi; yang kedua memerlukan bukti bahwa partikel telah memasuki kompartemen dengan probabilitas kembali yang rendah dan aksesibilitas biologis yang rendah.

8. Pengaruh Kejadian Ekstrem, Perubahan Iklim, dan Pengelolaan Air

Transportasi pada skala kejadian adalah salah satu alasan terkuat mengapa pemantauan berbasis rata-rata tahunan dapat menyesatkan. Banjir memobilisasi sampah daratan, mengikis dasar dan tebing sungai, menghubungkan dataran banjir, meningkatkan luapan saluran pembuangan, dan memindahkan partikel lebih jauh ke hilir. Pada saat yang sama, banjir dapat mengencerkan konsentrasi

kolom air atau meningkatkan deposisi pada bendungan di hilir. Pengurangan 70% MP pada sedimen dasar sungai di Inggris setelah banjir merupakan contoh jelas remobilisasi skala daerah tangkapan, namun catatan Tiga Ngarai menunjukkan bahwa jenis kejadian yang sama dapat meningkatkan deposisi dalam waduk (Hurley et al., 2018; Gao et al., 2023).

Respons pesisir dan estuari dapat lebih dramatis. Hitchcock (2020) mendokumentasikan peningkatan terkait badai di Estuari Cooks River dari sekitar 400 menjadi 17.383 partikel m^{-3} . Banjir di Mersin Bay menghasilkan peningkatan konsentrasi MP sekitar 14 kali lipat, dan kondisi topan di Sanggou Bay berasosiasi dengan peningkatan kontaminasi pada air dan sedimen (Gündoğdu et al., 2018; Wang et al., 2019). Di Sungai Gangga, ekspor harian MP meningkat dari sekitar satu miliar partikel sebelum monsun menjadi sekitar tiga miliar setelah monsun, menggambarkan konsentrasi musiman dalam pengantaran sumber-ke-laut (Napper et al., 2021; Quadroni et al., 2024).

Perubahan iklim diperkirakan memodifikasi jalur-jalur ini melalui perubahan intensitas curah hujan, frekuensi kekeringan, keparahan badai, muka laut, dan musim hidrologi. Dampaknya tidak selalu berupa "lebih banyak transportasi". Kekeringan dapat membuat MP terdampar, mengonsentrasikan partikel yang berasal dari air limbah, dan meningkatkan waktu tinggal; banjir setelahnya dapat kemudian meremobilisasi simpanan tersebut. Karena itu, rangkaian kejadian gabungan lebih penting daripada variabel iklim yang berdiri

sendiri (Ford et al., 2022; Quadroni et al., 2024).

Pengelolaan air berinteraksi dengan sinyal iklim ini. Pengambilan air menurunkan aliran dan dapat meningkatkan konsentrasi lokal, bendungan menjebak sedimen dan MP, sedangkan operasi pembilasan dapat melepaskan material tersimpan. Karena intervensi ini mengubah variabel hidraulik yang sama yang mengendalikan mobilitas MP, pencemaran plastik, regulasi sungai, dan adaptasi iklim tidak seharusnya dinilai secara terpisah. Waduk yang dioperasikan untuk pengendalian banjir, tenaga air, atau kontinuitas sedimen juga mengubah waktu dan lokasi paparan MP.

Konsekuensi praktisnya adalah kebutuhan akan pengambilan sampel yang peka terhadap kejadian. Program bulanan tetap dapat melewati sejumlah kecil hari yang mendominasi ekspor tahunan. Pemantauan perlu menggabungkan observasi kondisi dasar dengan pengambilan sampel terpicu selama fase kenaikan hidrograf, puncak banjir, resesi, pasang badai, dan operasi pengelolaan sedimen. Tujuannya bukan sekadar memperoleh lebih banyak sampel, tetapi menangkap transisi keadaan yang mengubah zona penyimpanan menjadi sumber.

Kontras kuantitatif yang dirangkum dalam Tabel 2 menunjukkan mengapa pengambilan sampel peka-kejadian sangat diperlukan: banjir dan badai dapat mengubah kelimpahan teramati satu hingga dua orde besaran, sementara debit musiman dapat melipatgandakan ekspor partikel meskipun pemantauan rutin menunjukkan kontaminasi sedang.

Tabel 1. Penyaring mekanistik dan zona peralihan di sepanjang kontinum sungai–estuaria–pesisir.

Zona kontinum	Gaya dominan	Respons tipikal mikroplastik	Kondisi yang membalik respons	Implikasi ekologis	Referensi (Nama, Tahun)
Antarmuka daerah tangkapan–sungai	Limpasan, drainase hujan, pembuangan titik dan difus	Muatan lateral dan lonjakan ke saluran akibat kejadian	Periode kering dapat menyimpan partikel di daratan; hujan lebat melepaskan material yang terakumulasi	Lonjakan paparan singkat berkonsentrasi tinggi dapat terjadi di hilir sumber perkotaan dan pertanian	Kabir et al., 2021; Woodward et al., 2021
Saluran utama sungai	Debit, kecepatan, turbulensi, geometri saluran	Adveksi, pengenceran, penyortiran, dan suspensi intermiten	Aliran tinggi dapat meningkatkan fluks melalui mobilisasi atau menurunkan konsentrasi melalui pengenceran	Konsentrasi saja dapat salah merepresentasikan paparan dan ekspor	Campanale et al., 2020; Carvalho et al., 2021; Moses et al., 2023
Dasar sungai, bar, dan unit berkecepatan rendah	Tegangan geser dasar, kekasaran, pengendapan partikel	Deposisi dan penyimpanan sementara	Banjir dan peningkatan gaya geser dapat meremobilisasi partikel yang terkubur atau terdampar	Organisme benthik mengalami paparan berulang terhadap partikel yang tertahan	Hurley et al., 2018; Ockelford et al., 2020
Tepian bervegetasi dan dataran banjir	Peredaman aliran, intersepsi, inundasi	Perangkap fisik dan penundaan transportasi hilir	Inundasi, erosi tebing, dan gangguan vegetasi dapat melepaskan partikel tersimpan	Menciptakan paparan yang berpola bercak pada skala habitat	Owowunu et al., 2023
Waduk dan bendungan	Penurunan kecepatan, sedimentasi,	Waktu tinggal panjang, pengendapan	Banjir, drawdown, pembilasan sedimen, dan	Paparan benthik jangka panjang dapat terjadi bersamaan	Watkins et al., 2019; Gao et al., 2023

Zona kontinum	Gaya dominan	Respons tipikal mikroplastik	Kondisi yang membalik respons	Implikasi ekologis	Referensi (Nama, Tahun)
	regulasi muka air	, dan penguburan	operasi bendungan dapat menghasilkan pelepasan sekunder	dengan lonjakan episodik ke hilir	
Zona pasang surut estuari	Arus surut–pasang, siklus purnama–perbani, debit sungai	Transportasi dua arah, perangkap, dan ekspor parsial	Fase pasang surut dan aliran sungai dapat dengan cepat membalik arah transportasi bersih	Habitat asuhan dapat terpapar partikel yang berulang kali didaur ulang	Sousa et al., 2021; Malli et al., 2022
Front salinitas / maksimum kekeruhan	Stratifikasi densitas, sedimen tersuspensi, agregasi	Peningkatan interaksi antarpartikel dan deposisi	Pencampuran kuat, debit besar, atau pergeseran front salinitas dapat meremobilisasi material tertahan	Waktu tinggal tinggi meningkatkan peluang pertumbuhan biofilm, penuaan, dan kontak dengan organisme	Yang et al., 2025; Zhang et al., 2026
Rawa pasang surut dan tepian dangkal	Vegetasi, kecepatan rendah, inundasi pasang	Intersepsi dan akumulasi sedimen permukaan	Badai dan pasang berenergi tinggi dapat mengerosi serta mengeksport partikel tersimpan	Penggunaan habitat yang tinggi dapat mengubah konsentrasi sedang menjadi paparan biologis bermakna	Stead et al., 2020; Malli et al., 2022
Perairan pesisir dekat pantai	Gelombang, angin, arus pesisir, batimetri	Redistribusi lintas-pantai dan pencampuran vertikal	Badai dapat mendistribusikan ulang partikel antara air permukaan, pantai, dan dasar laut	Hotspot paparan berpindah mengikuti keadaan hidrodinamika	Ho & Not, 2019; Forsberg et al., 2020

Zona kontinum	Gaya dominan	Respons tipikal mikroplastik	Kondisi yang membalik respons	Implikasi ekologis	Referensi (Nama, Tahun)
Shelf dan dasar laut pesisir	Pengendapan, biofouling, transportasi sedimen	Penguburan dan retensi jangka lebih panjang	Resuspensi, bioturbasi, dan perubahan daya apung partikel dapat mengembalikan MP ke kolom air	Sedimen dapat memperpanjang paparan ekologis, bukan menjadi penyerap terminal	Kooi et al., 2017; Teixeira et al., 2026

9. Paparan dan Risiko Ekologis Mikroplastik pada Biota Akuatik

Proses transportasi menentukan risiko ekologis dengan mengendalikan di mana partikel tersedia bagi organisme, berapa lama, dan dalam keadaan fisik serta kimia seperti apa. Ingesti telah banyak didokumentasikan pada taksa air tawar dan laut, tetapi probabilitas paparan bergantung pada ukuran partikel relatif terhadap struktur makan, kelimpahan, bentuk, kedalaman, dan habitat. Suatu sintesis alometrik menunjukkan bahwa ukuran plastik terbesar yang dapat tertelan hewan berskala kira-kira terhadap ukuran tubuh, memperkuat relevansi khusus MP kecil bagi konsumen bertubuh kecil dan tahap kehidupan awal (Jâms et al., 2020). Habitat sungai dan estuari yang menahan partikel halus karena itu dapat menghasilkan paparan yang tidak proporsional meskipun massa plastik total sedang.

Organisme benthik menjadi prioritas karena sedimen adalah kompartemen penyimpanan utama. Eksperimen laboratorium pada konsentrasi yang relevan secara lingkungan melaporkan penurunan kelangsungan hidup dan pertumbuhan pada chironomid air tawar *Chironomus tepperi* setelah paparan MP polietilena di sedimen, sementara studi lain mengidentifikasi stres oksidatif, perubahan metabolisme, serta respons imun atau neurofisiologis pada berbagai taksa akuatik (Ziajahromi et al., 2018; Geremia et al.,

2023). Efek tersebut tidak boleh digeneralisasi untuk semua polimer dan konsentrasi, tetapi membangun jalur yang masuk akal yang menghubungkan retensi sedimen dengan gangguan biologis.

MP juga dapat mengubah habitat secara fisik. Larva caddisfly memasukkan plastik ke dalam rumahnya, dan partikel PVC atau PET dapat mengurangi kestabilan rumah; substrat buatan yang lebih ringan dapat mengubah perilaku menggali atau hanyut pada invertebrata benthik (Ehlers et al., 2020; Gallitelli et al., 2021). Efek semacam ini penting secara konseptual karena tidak memerlukan toksisitas kimia. Suatu partikel dapat mengubah fungsi ekologis hanya melalui sifat materialnya, terutama pada habitat tempat sedimen dan partikel organik menjadi komponen struktural bagi perlindungan, makan, atau reproduksi.

Risiko kimia lebih kompleks. MP yang telah lapuk dapat menyerap kontaminan hidrofobik dan logam serta mengandung aditif bawaan proses produksi. Biofilm membentuk "plastisfer" dengan komunitas mikroba yang berbeda dari air atau sedimen sekitarnya, menciptakan jalur tambahan bagi pertukaran kontaminan dan transportasi mikroba (Amaral-Zettler et al., 2020). Namun, efek sebagai vektor harus dievaluasi relatif terhadap media paparan lain, bukan diasumsikan dominan. Signifikansi ekologis bergantung pada konsentrasi kontaminan, kinetika desorpsi, laju ingesti, kondisi usus, dan paparan latar

belakang dari air, makanan, serta partikel alami.

Transfer trofik telah didokumentasikan, tetapi biomagnifikasi masih belum pasti. MP dapat berpindah dari mangsa ke predator, dan observasi lapangan telah mendeteksi partikel di beberapa tingkat trofik. Namun, model bioakumulasi jaring makanan tidak mendukung biomagnifikasi sistematis pada jaringan sungai yang dimodelkan, dan tinjauan tetap membedakan transfer trofik dari peningkatan konsentrasi seiring naiknya tingkat trofik (Provencher et al., 2019; O'Connor et al., 2022). Perbedaan ini penting karena komunikasi risiko sering memperlakukan keduanya seolah setara.

Transisi sungai–estuari menciptakan peluang paparan yang spesifik. Estuari menyediakan area asuhan, organisme penyaring, invertebrata benthik, dan larva ikan, sekaligus menahan MP halus di maksimum kekeruhan, sedimen rawa, dan endapan intertidal. Di Estuari Douro, Rodrigues et al. (2019) melaporkan periode ketika kelimpahan MP tinggi relatif terhadap larva ikan, menekankan potensi pertemuan di habitat asuhan. Di Dongshan Bay, indeks berbasis polimer menunjukkan risiko ekologis yang bervariasi menurut komposisi MP, bukan semata-mata kelimpahan partikel (Pan et al., 2021). Studi-studi ini mendukung pendekatan tumpang tindih habitat: risiko meningkat ketika organisme rentan dan kelas partikel yang tertahan secara transportasi bertemu di lokasi yang sama.

Studi skala kontinum terbaru mempertajam interpretasi ini. Di Estuari Zhangjiang, kelimpahan MP secara keseluruhan menurun ke hilir, namun proporsi polimer berbahaya menghasilkan risiko yang meningkat di sektor estuari (Zhang et al., 2026). Sepanjang transek sungai pedalaman–estuaria–dekat pantai di Laut Kuning, konsentrasi air berkisar $0,89 \pm 0,15$ 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 pencemaran umumnya menurun ke hilir; meskipun demikian, penilaian

berbasis polimer mengidentifikasi risiko ekologis yang besar pada sektor perkotaan yang lebih tercemar (Chen et al., 2025). Hasil ini menunjukkan bahwa pengenceran spasial tidak menjamin penurunan risiko yang proporsional.

Metrik risiko itu sendiri memerlukan kehati-hatian. Indeks beban pencemaran dan bahaya polimer dapat berguna untuk memeringkat lokasi, tetapi nilainya bergantung pada baseline acuan, skor bahaya polimer, batas deteksi ukuran partikel, dan asumsi yang mungkin tidak langsung sesuai dengan ambang efek tingkat spesies. Jumlah, massa, luas permukaan, dan bahaya polimer merepresentasikan aspek paparan yang berbeda. Partikel kecil mendominasi jumlah dan luas permukaan reaktif; partikel padat atau besar dapat mendominasi massa; fraksi kecil polimer berbahaya dapat mendominasi indeks bahaya. Karena itu, tidak ada satu metrik yang menangkap seluruh dimensi yang relevan secara ekologis.

Kerangka yang lebih dapat dipertanggungjawabkan adalah memisahkan empat unsur: intensitas paparan (partikel, massa, atau luas permukaan dalam habitat organisme), persistensi paparan (waktu tinggal dan frekuensi resuspensi), bahaya partikel (ukuran, bentuk, polimer, aditif, pelapukan), dan kerentanan biologis (cara makan, tahap kehidupan, habitat, kapasitas detoksifikasi). Ilmu transportasi menyediakan dua unsur pertama dan sebagian unsur ketiga. Ekotoksikologi menyediakan sisanya. Mengintegrasikan semuanya sangat penting bila bidang ini ingin bergerak melampaui peta keberadaan menuju penilaian risiko ekologis yang kausal.

Dalam kerangka ini, habitat berprioritas tertinggi tidak otomatis sama dengan habitat dengan konsentrasi kolom air tertinggi. Zona deposisi sedimen halus, dasar waduk, maksimum kekeruhan estuari, permukaan rawa asin, dan endapan pesisir dangkal dapat menghasilkan kontak berulang antara MP

tersimpan dengan organisme bentik atau penyaring. Sebaliknya, saluran tengah berfluks tinggi dapat mengekspor banyak partikel tetapi memberikan waktu tinggal lokal yang relatif singkat. Perbedaan antara hotspot fluks dan hotspot paparan merupakan salah satu pemisahan konseptual terpenting bagi pemantauan masa depan.

10. Ketidakpastian Metodologis dalam Pengukuran Fluks dan Risiko Mikroplastik

Ketidakpastian terbesar dalam penilaian sumber-ke-laut bukan sekadar kurangnya sampel; masalah utamanya adalah bahwa studi sering mengukur populasi partikel yang berbeda. Ukuran mata jaring menetapkan batas bawah deteksi, teknik analitik berbeda dalam konfirmasi polimer dan resolusi spasial, sementara pengambilan sampel air permukaan mengabaikan heterogenitas vertikal dan lateral. Yang et al. (2025) mencatat bahwa jaring 80 μm dapat menghasilkan kelimpahan MP jauh lebih tinggi daripada jaring 450 μm karena partikel kecil mendominasi jumlah. Perbedaan ini bukan sekadar noise analitik: perbedaan tersebut mengubah pertanyaan ekologis karena partikel kecil juga memiliki perilaku transportasi dan ingesti yang berbeda.

Konversi jumlah-ke-massa merupakan sumber galat besar lainnya. Studi fluks sungai sering mengalikan kelimpahan partikel dengan asumsi massa rata-rata partikel, padahal massa tersebut sangat bergantung pada ukuran dan bentuk. Di Delta Sungai Pearl, estimasi model sebesar 91.000–170.000 t tahun⁻¹ jauh di atas estimasi berbasis lapangan 2.400–3.800 t tahun⁻¹, menggambarkan sensitivitas perhitungan fluks terhadap asumsi (Mai et al., 2019; Yang et al., 2025). Serat dapat mendominasi jumlah partikel tetapi hanya menyumbang sedikit massa, sehingga satu faktor konversi untuk semua bentuk dapat mendistorsi neraca massa.

Perdebatan “plastik yang hilang” sebagian mencerminkan pilihan metodologis ini. Analisis ulang menunjukkan bahwa

masukannya MP global dari sungai mungkin telah dilebihestimasi dua hingga tiga orde besaran, sehingga mengurangi kebutuhan untuk mengasumsikan adanya penyerap laut tak teridentifikasi yang sangat besar (Weiss et al., 2021). Apakah suatu estimasi global tertentu benar kurang penting di sini dibanding pelajarannya: ketidaksesuaian antara model dan pengukuran seharusnya digunakan untuk mengidentifikasi asumsi mana tentang ukuran partikel, inventaris sumber, retensi, dan pengambilan sampel yang gagal.

Heterogenitas lintas-penampang kini tidak dapat diabaikan. Di Estuari Yangtze, Chen et al. (2026) menemukan kelimpahan rata-rata tahunan menurun dari 8.110 ± 12.400 partikel m⁻³ di permukaan menjadi 4.730 ± 4.005 partikel m⁻³ dekat dasar, sementara saluran lateral memiliki kelimpahan yang sangat berbeda dari saluran tengah yang lebih cepat. Fluks partikel tahunan diperkirakan $5,20 \times 10^{15}$ partikel, dan MP kecil menyumbang 74,6% dari total tersebut. Data hanya permukaan karena itu akan salah merepresentasikan struktur kelimpahan sekaligus fluks. Kontribusi saluran tengah tetap besar meski konsentrasi lebih rendah karena volume air jauh lebih besar—contoh yang jelas mengapa konsentrasi dan fluks tidak dapat saling menggantikan.

Resolusi waktu sama pentingnya. Fluks tahunan yang disimpulkan dari beberapa sampel cuaca cerah tidak dapat mewakili lonjakan badai, ekspor monsun, akumulasi kekeringan, atau perangkap purnama-perbani. Studi yang peka terhadap kejadian menunjukkan bahwa sebagian kecil hari dalam setahun dapat mengantarkan sebagian besar transportasi tahunan (Napper et al., 2021; Chen et al., 2026). Karena itu, frekuensi pengambilan sampel yang tepat bergantung pada proses: proksi kontinu atau berfrekuensi tinggi untuk debit dan kekeruhan perlu dipasangkan dengan pengambilan sampel MP intensif pada berbagai keadaan hidrologis yang representatif.

Jaminan mutu juga harus menangani kontaminasi dan identifikasi. Serat udara,

pakaian laboratorium, peralatan plastik, dan verifikasi polimer yang tidak lengkap dapat menggelembungkan jumlah. Metode spektroskopi dan termal modern mengurangi salah klasifikasi visual tetapi mengukur sifat yang berbeda dan memiliki batas ukuran berbeda. Pendekatan throughput tinggi yang berkembang seperti LDIR dan pyrolysis-GC-MS/MS sensitif dapat menguraikan partikel lebih kecil atau massa polimer dengan lebih efektif, tetapi keterbandingan tetap memerlukan pelaporan umum mengenai rentang ukuran, recovery, blanko, matriks, satuan, dan ketidakpastian (Zhang et al., 2026; Yan et al., 2026).

Untuk ilmu sumber-ke-laut, set pelaporan minimum seharusnya mencakup: batas ukuran bawah dan atas; kedalaman pengambilan sampel serta posisi lintas-penampang; volume yang disampel atau massa sedimen; keadaan hidrologi dan pasang surut; metode konfirmasi polimer;

koreksi blanko; jumlah berdasarkan bentuk; metrik jumlah dan massa bila memungkinkan; serta ketidakpastian eksplisit dalam perhitungan fluks. Tanpa variabel ini, perbedaan geografis yang tampak dapat tetap tidak terpisahkan dari perbedaan metodologis. Karena itu, standardisasi seharusnya kurang berfokus pada memaksa semua studi menggunakan satu perangkat dan lebih pada memastikan hasil dapat diharmonisasikan lintas perangkat.

Tabel 2 menggambarkan konsekuensi praktis dari pilihan metodologis ini. Fluks yang diturunkan dari lapangan dan model di wilayah yang sama dapat berbeda beberapa orde besaran, sedangkan pengukuran teresolusi vertikal menunjukkan bahwa observasi hanya di permukaan tidak selalu mewakili ekspor seluruh saluran.

Tabel 2. Bukti kuantitatif terpilih yang mengubah interpretasi transportasi mikroplastik dari sumber ke laut.

Lokasi/konteks studi	Observasi kuantitatif	Mekanisme dominan	Makna interpretatif	Keterbatasan utama / kehati-hatian	Referensi (Nama, Tahun)
Sedimen sungai Inggris setelah banjir skala daerah tangkapan	Penurunan kelimpahan mikroplastik sedimen sekitar 70% setelah banjir besar	Erosi banjir dan remobilisasi	Dasar sungai merupakan tempat penyimpanan dinamis; kejadian besar dapat dengan cepat mengatur ulang kontaminasi yang tampak	Pengukuran pascakejadian tidak menguraikan seluruh tujuan material di hilir	Hurley et al., 2018
Sungai Swiss saat hujan	Konsentrasi plastik meningkat sekitar 5× di Venoge dan hingga	Muatan lateral dan remobilisasi yang digerakkan limpasan	Lonjakan kejadian dapat mendominasi transportasi lokal meskipun konsentrasi latar belakang rendah	Besarnya sangat spesifik terhadap sumber dan daerah tangkapan	Faure et al., 2015

Lokasi/konteks studi	Observasi kuantitatif	Mekanisme dominan	Makna interpretatif	Keterbatasan utama / kehati-hatian	Referensi (Nama, Tahun)
	150× di Vuachère				
Waduk Tiga Ngarai, Tiongkok	Retensi diperkirakan $47 \pm 44\%$ dari fluks mikropartikel masuk, setara $8.048 \pm 7.494 \text{ t/tahun}$	Perangkap sedimen waduk	Waduk besar dapat secara substansial menghambat transfer sungai-ke-laut	Ketidakpastian besar mencerminkan asumsi dalam estimasi fluks massa	Gao et al., 2023
Waduk Tiga Ngarai selama banjir 2020	Konsentrasi sedimen $\sim 1,7\times$ tingkat tahun 2019	Redistribusi akibat banjir diikuti perangkap waduk	Banjir tidak selalu hanya membilas waduk; dapat meningkatkan akumulasi internal	Respons satu waduk mungkin tidak dapat digeneralisasi ke impoundment lain	Gao et al., 2023
Sungai Gangga	~ 1 miliar partikel hari ⁻¹ sebelum monsun dan ~ 3 miliar partikel hari ⁻¹ setelah monsun	Debit musiman dan limpasan	Ekspor tahunan sangat episodik dan tidak dapat diestimasi andal dari satu musim	Pengambilan sampel air permukaan dan batas ukuran partikel membatasi ekstrapolasi	Napper et al., 2021
Estuari Cooks River, Australia	Kelimpahan terkait badai meningkat dari ~ 400 menjadi $17.383 \text{ partikel m}^{-3}$	Masukan badai dan resuspensi	Kejadian singkat dapat melampaui kondisi dasar dan menciptakan hotspot paparan sementara	Observasi spesifik kejadian; pemisahan sumber tetap sulit	Hitchcock, 2020

Lokasi/konteks studi	Observasi kuantitatif	Mekanisme dominan	Makna interpretatif	Keterbatasan utama / kehati-hatian	Referensi (Nama, Tahun)
Estuari Ría de Vigo, Spanyol	Saat pasang purnama, ~45% diekspor selama surut dibanding ~25% saat pasang; pada perbani, ekspor turun menjadi ~5% dan 3,7%	Transportasi pasang surut dan kendali waktu tinggal	Retensi dan ekspor estuari dapat beralih pada skala waktu kurang dari sebulan	Hasil pelacakan partikel bergantung pada konfigurasi model dan skenario pelepasan	Sousa et al., 2021; Malli et al., 2022
Delta Sungai Pearl ke Laut Tiongkok Selatan	Estimasi lapangan 2.400–3.800 t tahun ⁻¹ dibanding estimasi model 91.000–170.000 t tahun ⁻¹	Asumsi model dan konversi jumlah-ke-massa	Estimasi fluks dari wilayah yang sama dapat berbeda beberapa orde besaran	Estimasi lapangan dan model tidak setara secara metodologis	Mai et al., 2019; Yang et al., 2025
Sungai Yangtze, seluruh kolom air	Fluks tahunan $5,20 \times 10^{15}$ partikel; 74,6% berupa partikel kecil	Penyortiran lintas-penampang dan transportasi teresolusi vertikal	Partikel kecil dapat mendominasi ekspor berbasis jumlah dan memerlukan pengambilan sampel seluruh kolom	Merepresentasikan satu sungai dan satu periode pemantauan	Chen et al., 2026
Profil vertikal Sungai Yangtze	Kelimpahan rata-rata: $8.110 \pm$	Penyortiran hidrodinamika vertikal	Pengambilan sampel hanya permukaan dapat	Variabilitas temporal tetap tinggi	Chen et al., 2026

Lokasi/konteks studi	Observasi kuantitatif	Mekanisme dominan	Makna interpretatif	Keterbatasan utama / kehati-hatian	Referensi (Nama, Tahun)
	12.400 partikel m ⁻³ di permukaan, 6.878 ± 7.761 di tengah air, dan 4.730 ± 4.005 dekat dasar		membiaskan estimasi fluks seluruh sungai		
Kontinum sedimen sungai–estuaria–pesisir Zhangjiang	10.463–399.481 item kg ⁻¹ ; pengayaan pada 0–20 cm teratas dengan penguburan terdeteksi hingga 80 cm	Retensi sedimen halus, penguburan, dan penyortiran polimer	Arsip sedimen mengintegrasikan riwayat transportasi dan dapat mengonsentrasikan polimer berbahaya	Konsentrasi sedimen tidak dapat langsung dikonversi menjadi paparan kolom air	Zhang et al., 2026
Estuari subtropis Texas	Galveston Bay: 0,82–19,8 µg L ⁻¹ ; Matagorda Bay: 0,09–3,7 µg L ⁻¹ ; laju pengendapan termodelkan dari perilaku mengapung hingga >38 m hari ⁻¹	Sifat partikel yang berinteraksi dengan sirkulasi estuari	Muatan massa dan perilaku pengendapan bersama-sama menentukan efisiensi ekspor	Hasil berbasis massa tidak dapat langsung dibandingkan dengan studi berbasis jumlah partikel	Yan et al., 2026
Kontinum sungai–	Air: 0,89 ± 0,15 hingga	Transportasi hilir, asosiasi	Konsentrasi dan risiko ekologis	Studi regional; indeks risiko	Chen et al., 2025

Lokasi/konteks studi	Observasi kuantitatif	Mekanisme dominan	Makna interpretatif	Keterbatasan utama / kehati-hatian	Referensi (Nama, Tahun)
estuaria—dekat pantai Laut Kuning	11,47 ± 1,80 item L-1; sedimen: 93,33 ± 23,09 hingga 653,33 ± 50,33 item kg-1 berat kering	sedimen, dan masukan perkotaan	dapat menurun ke arah laut namun tetap tinggi dekat sumber perkotaan	bergantung pada asumsi bahaya polimer	

11. Kerangka Konseptual Terintegrasi dan Arah Penelitian Masa Depan

Bukti mendukung kerangka konseptual empat tahap. Pertama, muatan sumber menentukan campuran partikel apa yang tersedia untuk masuk ke sungai. Kedua, penyortiran hidraulik dan penyimpanan mempartisi partikel tersebut di antara air mengalir, tebing, dataran banjir, vegetasi, waduk, dan sedimen dasar. Ketiga, transformasi estuari mengeksposnya pada pasang dua arah, salinitas, sedimen tersuspensi, biofouling, dan pertukaran sedimen berulang. Keempat, redistribusi pesisir menyebarkan fraksi bergerak yang tersisa di antara pantai, lahan basah, sedimen dangkal, teluk, dan shelf. Setiap tahap dapat menurunkan konsentrasi hilir sesaat sambil meningkatkan waktu tinggal lokal dan paparan ekologis.

Mekanisme pemersatu adalah zona peralihan. Zona peralihan adalah lokasi tempat perubahan gaya yang relatif kecil membalik arah pertukaran partikel yang dominan: deposisi menjadi resuspensi, retensi menjadi ekspor, atau mengapung menjadi tenggelam. Contohnya meliputi pool sungai saat awal banjir, sabuk hidro-fluktuasi waduk, maksimum kekeruhan estuari sepanjang siklus purnama-perbani, permukaan rawa saat inundasi, dan dasar pesisir dangkal saat badai. Zona-zona ini layak diprioritaskan karena mengendalikan

ketidakpastian neraca massa sekaligus paparan biologis (Hurley et al., 2018; Chen et al., 2022; Malli et al., 2022; Yang et al., 2025).

Lima prioritas penelitian mengikuti kerangka tersebut. Pertama, ukur fluks sebagai besaran lintas-penampang dan terintegrasi kejadian. Bukti dari Yangtze menunjukkan kesalahan yang dapat timbul dari pengambilan sampel hanya di permukaan, sedangkan studi badai dan monsun menunjukkan kesalahan dari pengambilan sampel hanya saat cuaca normal (Hitchcock, 2020; Chen et al., 2026). Sungai besar memerlukan transek vertikal dan lateral yang disinkronkan dengan debit; sistem yang lebih kecil memerlukan pengambilan sampel terpicu kejadian yang mampu menguraikan first flush dan fase resesi.

Kedua, gabungkan pemantauan kolom air dengan inventaris sedimen dan laju pertukaran. Konsentrasi saja tidak dapat menunjukkan apakah penurunan mencerminkan penguburan, pengenceran, atau ekspor. Inti sedimen berulang, ambang resuspensi, pengukuran deposisi, dan model berbasis tracer diperlukan untuk memperkirakan berapa banyak material tersimpan yang dapat kembali ke kolam bergerak. Studi pengelolaan waduk dan estuari seharusnya secara eksplisit mengkuantifikasi pelepasan MP selama

pembilasan sedimen, pengerukan, dan kejadian ekstrem (Gao et al., 2023; Li et al., 2026).

Ketiga, beralih dari MP curah menuju transportasi teresolusi sifat. Ukuran, bentuk, densitas, pelapukan, biofilm, dan keadaan agregasi seharusnya diukur bersama identitas polimer. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa partikel kecil mendominasi jumlah dan bahwa kecepatan pengendapan efektif sering menyimpang dari densitas nominal polimer (Zhang et al., 2026; Yan et al., 2026). Model teresolusi-sifat akan lebih dapat ditransfer dibanding regresi konsentrasi empiris yang spesifik lokasi.

Keempat, hubungkan transportasi dengan paparan spesifik habitat. Pemantauan ekologis seharusnya ditempatkan bersama zona retensi fisik dan membedakan habitat pelagik, bentik, intertidal, dan area asuhan. Organisme bentik, penyaring, dan tahap kehidupan awal perlu diprioritaskan ketika retensi serta resuspensi sedimen kuat. Metrik paparan seharusnya mencakup tidak hanya kelimpahan tetapi, bila memungkinkan, distribusi ukuran, luas permukaan, bahaya polimer, dan waktu tinggal (Jâms et al., 2020; Pan et al., 2021; Zhang et al., 2026).

Kelima, evaluasi pengelolaan sebagai perubahan keadaan dan konektivitas partikel. Pengendalian sumber seharusnya dinilai dari penurunan beban terintegrasi kejadian, bukan hanya konsentrasi lokal. Operasi waduk perlu mempertimbangkan inventaris warisan di sedimen. Restorasi estuari perlu menyadari bahwa lahan basah dapat sekaligus mencegat MP dan mengonsentrasikannya di habitat sensitif. Titik intervensi terbaik karena itu dapat berbeda tergantung apakah tujuannya mengurangi ekspor ke laut, paparan ekologis lokal, atau keduanya.

Prioritas ini juga memperjelas peran pemodelan. Model seharusnya tidak hanya digunakan untuk mengekstrapolasi konsentrasi dari data populasi dan statistik limbah. Keunggulan komparatif model adalah mengintegrasikan hidraulik, sifat partikel, waktu sumber, dan transisi

penyimpanan–pelepasan yang tidak dapat diamati di semua tempat. Validasi model karena itu perlu menargetkan proses yang paling bertanggung jawab atas ketidakpastian: ambang pengendapan dan resuspensi, agregasi, heterogenitas lintas-penampang, lonjakan badai, dan waktu tinggal. Regionalisasi tetap diperlukan karena geometri estuari, rentang pasang surut, penggunaan lahan daerah tangkapan, dan profil sumber berbeda kuat antar sistem (Malli et al., 2022).

Terakhir, bidang ini memerlukan hubungan yang lebih disiplin antara metrik transportasi dan bahasa risiko. Suatu lokasi tidak seharusnya dilabeli berisiko tinggi hanya karena memiliki kelimpahan tinggi, atau berisiko rendah hanya karena konsentrasi menurun ke hilir. Penilaian risiko harus menyatakan dimensi mana—paparan, persistensi, bahaya polimer, efek biologis, atau fungsi ekosistem—yang sedang dievaluasi. Kerangka terintegrasi yang diusulkan di sini memprediksi bahwa risiko dapat meningkat bahkan ketika kelimpahan partikel menurun apabila penyortiran hidrodinamika mengonsentrasikan polimer yang lebih kecil atau lebih berbahaya di zona retensi yang penting secara biologis. Observasi lapangan terbaru mulai mendukung kemungkinan ini (Chen et al., 2025; Zhang et al., 2026).

Tabel 1 menerjemahkan argumen ini menjadi matriks proses yang dapat memandu desain penelitian: setiap zona memiliki mekanisme retensi dominan, kondisi pembalikan yang dapat dikenali, dan konsekuensi ekologis yang bersesuaian. Program pemantauan yang berguna karena itu perlu mengambil sampel baik pada keadaan penyimpanan maupun saat kejadian peralihan, alih-alih memperlakukan salah satunya sebagai gambaran lengkap mengenai nasib partikel.

12. Kesimpulan

Transportasi mikroplastik dari sungai ke perairan pesisir bukan proses pengantaran satu arah. Transportasi tersebut merupakan rangkaian pertukaran antara air bergerak, sedimen, vegetasi, bendungan rekayasa, front estuari, lahan basah, pantai, dan endapan pesisir. Hidrologi menentukan kapan partikel bergerak, tetapi sifat partikel dan pengondisian biologis menentukan bagaimana partikel merespons gaya tersebut. Karena itu, sungai, waduk, atau estuari yang sama dapat bergantian antara penyerap dan sumber.

Bukti terbaru yang paling kuat mendukung tiga kesimpulan. Pertama, konsentrasi dan fluks harus dipisahkan: pengenceran dapat menurunkan konsentrasi sementara ekspor meningkat, dan akumulasi lokal dapat meningkatkan konsentrasi sementara fluks hilir tetap sedang. Kedua, retensi sedimen bersifat sementara pada skala waktu yang relevan untuk pengelolaan karena banjir, pasang surut, badai, pengerukan, dan bioturbasi dapat mengaktifkan kembali MP yang tersimpan. Ketiga, risiko ekologis dikendalikan oleh tumpang tindih habitat dan riwayat paparan sama kuatnya dengan kelimpahan; zona peralihan yang berulang kali menahan dan meresuspensi partikel kecil atau berbahaya layak mendapat perhatian khusus.

Kemajuan ke depan karena itu kurang bergantung pada penambahan peta keberadaan dan lebih pada penguraian transisi keadaan. Pemantauan lintas-penampang yang peka terhadap kejadian perlu digabungkan dengan pertukaran sedimen, karakterisasi partikel teresolusi sifat, dan endpoint biologis spesifik habitat. Pendekatan semacam ini dapat merekonsiliasi estimasi fluks yang berbeda, mengidentifikasi lokasi yang mengendalikan transfer sumber-ke-laut, dan membedakan intervensi yang mengurangi ekspor ke laut dari intervensi yang mengurangi paparan ekologis. Membingkai ulang kontinum sebagai rangkaian penyaring semipermeabel yang

bergantung pada keadaan memberikan dasar yang lebih realistis bagi ilmu pengetahuan maupun pengelolaan.

Daftar Pustaka

Referensi yang dikutip dalam sintesis naratif; tautan DOI dipertahankan jika tersedia.

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. *Mar. Pollut. Bull.* 46, 197–202. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00356-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00356-9).

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

Amaral-Zettler, L.A., Zettler, E.R., Mincer, T.J. (2020). Ecology of the plastisphere. *Nat. Rev. Microbiol.* 18, 139–151. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0308-0>.

Bailey, K., Sipps, K., Saba, G.K., Arbuckle-Keil, G., Chant, R.J., Fahrenfeld, N.L. (2021). Quantification and composition of microplastics in the Raritan Hudson Estuary: comparison to pathways of entry and implications for fate. *Chemosphere* 272, 129886. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129886>.

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>.

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>.

- Bellasi, A., Binda, G., Pozzi, A., Galafassi, S., Volta, P., & Bettinetti, R. (2020). Microplastic contamination in freshwater environments: A review, focusing on interactions with sediments and benthic organisms. *Environments*, 7, 30. <https://doi.org/10.3390/environments7040030>.
- 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>.
- 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>.
- Cera, A., Cesarini, G., & Scalici, M. (2020). Microplastics in freshwater: What is the news from the world? *Diversity*, 12, 276. <https://doi.org/10.3390/d12070276>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104401>.
- 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., 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>.
- 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). *Mar. Chem.* 222, 103780. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2020.103780>.
- Ehlers, S.M., Al Najjar, T., Taupp, T., & Koop, J.H.E. (2020). PVC and PET microplastics in caddisfly (*Lepidostoma basale*) cases reduce case stability. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 22380–22389. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08790-5>.
- Faure, F., Demars, C., Wieser, O., Kunz, M., De Alencastro, L.F. (2015). Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environ. Chem.* 12, 582–591. <https://doi.org/10.1071/EN14218>.
- Ford, H.V., Jones, N.H., Davies, A.J., Godley, B.J., Jambeck, J.R., Napper, I.E., Suckling, C.C., Williams, G.J., Woodall, L.C., & Koldewey, H.J. (2022). The fundamental links between climate change and marine plastic pollution. *Science of the Total Environment*, 806, 150392.
- Forsberg, P.L., Sous, D., Stocchino, A., & Chemin, R. (2020). Behaviour of plastic litter in nearshore waters: First insights from wind and wave laboratory experiments. *Marine Pollution Bulletin*, 153.
- Gallitelli, L., Cera, A., Cesarini, G., Pietrelli, L., Scalici, M. (2021). Preliminary indoor evidences of microplastic effects on freshwater benthic macroinvertebrates. *Sci. Rep.* 11, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80606-5>.
- Gao, B., Chen, Y., Xu, D., Sun, K., Xing, B. (2023). Substantial burial of terrestrial microplastics in the Three Gorges reservoir, China. *Commun. Earth Environ.* 4, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00701-z>.

- Geremia, E., Muscari Tomajoli, M.T., Murano, C., Petito, A., Fasciolo, G. (2023). The impact of micro-and nanoplastics on aquatic organisms: mechanisms of oxidative stress and implications for human health—a review. *Environments* 10 (9), 161. <https://doi.org/10.3390/environments10090161>.
- Ghayebzadeh, M., Taghipour, H., Aslani, H. (2021). Abundance and distribution of microplastics in the sediments of the estuary of seventeen rivers: Caspian southern coasts. *Mar. Pollut. Bull.* 164, 112044. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112044>.
- Guo, Z., Boeing, W.J., Xu, Y., Borgomeo, E., Mason, S.A., Zhu, Y.G. (2021). Global meta-analysis of microplastic contamination in reservoirs with a novel framework. *Water Res.* 207, 117828. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117828>.
- Gündoğdu, 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.
- He, B., Smith, M., Egodawatta, P., Ayoko, G.A., Rintoul, L., Goonetilleke, A. (2021). Dispersal and transport of microplastics in river sediments. *Environ. Pollut.* 279, 116884. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116884>.
- Hitchcock, J.N. (2020). Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems. *Sci. Total Environ.* 734, 139436. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139436>.
- Ho, N.H.E., & Not, C. (2019). Selective accumulation of plastic debris at the breaking wave area of coastal waters. *Environmental Pollution*, 245, 702–710.
- Hurley, R., Woodward, J., Rothwell, J.J. (2018). Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding. *Nat. Geosci.* 11, 251–257. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0080-1>.
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K.L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.
- Jâms, I.B., Windsor, F.M., Poudevigne-Durance, T., Ormerod, S.J., & Durance, I. (2020). Estimating the size distribution of plastics ingested by animals. *Nature Communications*, 11, 1594. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15406-6>.
- Kabir, A.E., Sekine, M., Imai, T., Yamamoto, K., Kanno, A., Higuchi, T. (2021). Assessing small-scale freshwater microplastics pollution, land-use, source-to-sink conduits, and pollution risks: perspectives from Japanese rivers polluted with microplastics. *Sci. Total Environ.* 768, 144655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144655>.
- Kapp, K.J., Yeatman, E. (2018). Microplastic hotspots in the Snake and lower Columbia rivers: a journey from the Greater Yellowstone ecosystem to the Pacific Ocean. *Environ. Pollut.* 241, 1082–1090. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.033>.
- 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. *Environ. Sci. Technol.* 51, 7963–7971. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04702>.
- Kowalski, N., Reichardt, A.M., & Waniek, J.J. (2016). Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 310–319. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.064>.
- Lebreton, L.C.M., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J.W., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nat. Commun.* 8, 1–

10.
<https://doi.org/10.1038/ncomms15611>.
Li, Y., Liu, S., Liu, M., Huang, W., Chen, K., Ding, Y., Wu, F., Ke, H., Lou, L., Lin, Y., Zhang, M., Liu, F., Wang, C., & Cai, M. (2021). Mid-level riverine outflow matters: A case of microplastic transport in the Jiulong River, China. *Frontiers in Marine Science*, 8, 712727. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.712727>.
- 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>.
- Lu, X., Wang, X., Liu, X., Singh, V.P. (2023). Dispersal and transport of microplastic particles under different flow conditions in riverine ecosystem. *J. Hazard Mater.* 442, 130033. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.130033>.
- 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? *Environ. Sci. Technol.* 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>.
- Mani, T., Primpke, S., Lorenz, C., Gerdt, G., & Burkhardt-Holm, P. (2019). Microplastic pollution in benthic midstream sediments of the Rhine River. *Environmental Science & Technology*, 53, 6053–6062. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01363>.
- Mani, T., Burkhardt-Holm, P. (2020). Seasonal microplastics variation in nival and pluvial stretches of the Rhine River – from the Swiss catchment towards the North Sea. *Sci. Total Environ.* 707, 135579. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135579>.
- Meijer, L.J.J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Sci. Adv.* 7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>.
- Moses, S.R., Löder, M.G.J., Herrmann, F., Laforsch, C. (2023). Seasonal variations of microplastic pollution in the German River Weser. *Sci. Total Environ.* 902, 166463. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.166463>.
- 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>.
- Nguyen, T.H., Tang, F.H.M., Maggi, F. (2020). Sinking of microbial-associated microplastics in natural waters. *PLoS One* 15, 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228209>.
- Ockelford, A., Cundy, A., & Ebdon, J.E. (2020). Storm response of fluvial sedimentary microplastics. *Scientific Reports*, 10, 1865. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58765-2>.
- 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>.
- O'Connor, J.D., Lally, H.T., Koelmans, A.A., Mahon, A.M., O'Connor, I., Nash, R., O'Sullivan, J.J., Bruen, M., Heerey, L., Murphy, S. (2022). Modelling the transfer and accumulation of microplastics in a

riverine freshwater food web. *Environmental Advances* 8, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100192>.

Pan, Z., Liu, Q., Jiang, R., Li, W., Sun, X., Lin, H., Jiang, S., Huang, H. (2021). Microplastic pollution and ecological risk assessment in an estuarine environment: the Dongshan Bay of China. *Chemosphere* 262, 127876. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127876>.

Pazos, R.S., Amalvy, J., Cocherio, 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. *Mar. Pollut. Bull.* 168, 112382 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112382>.

Provencher, J.F., Ammendolia, J., Rochman, C.M., Mallory, M.L. (2019). Assessing plastic debris in aquatic food webs: what we know and don't know about uptake and trophic transfer. *Environ. Rev.* 27 (3), 304–317. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0079>.

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>.

Rodrigues, S.M., Almeida, C.M.R., Silva, D., Cunha, J., Antunes, C., Freitas, V., Ramos, S. (2019). Microplastic contamination in an urban estuary: abundance and distribution of microplastics and fish larvae in the Douro estuary. *Sci. Total Environ.* 659, 1071–1081. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.273>.

Shen, J., Gu, X., Liu, R., Feng, H., Li, D., Liu, Y., Jiang, X., Qin, G., An, S., Li, N., Leng, X. (2023). Damming has changed the migration process of microplastics and increased the pollution risk in the reservoirs in the Shaying River Basin. *J. Hazard Mater.* 443, 130067. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130067>.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130067>.

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>.

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. *Sci. Rep.* 10 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70306-5>.

Suteja, Y., Atmadipoera, A.S., Riani, E., Nurjaya, I.W., Nugroho, D., Cordova, M.R. (2021). Spatial and temporal distribution of microplastic in surface water of tropical estuary: case study in Benoa Bay, Bali, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 163, 111979 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.111979>.

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>.

Wagner, S., Klöckner, P., Stier, B., Römer, M., Seiwert, B., Reemtsma, T., & Schmidt, C. (2019). Relationship between discharge and river plastic concentrations in a rural and an urban catchment. *Environmental Science & Technology*, 53, 10082–10091. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03048>.

Wang, J., Lu, L., Wang, M., Jiang, T., Liu, X., Ru, S. (2019). Typhoons increase the abundance of microplastics in the marine environment and cultured organisms: a case study in Sanggou Bay, China. *Sci. Total Environ.* 667, 1–8.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.02.367>.

Wang, T., Li, B., Shi, H., Ding, Y., Chen, H., Yuan, F., Liu, R., & Zou, X. (2024). The processes and transport fluxes of land-based macroplastics and microplastics entering the ocean via rivers. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133623. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133623>.

Watkins, L., McGrattan, S., Sullivan, P.J., Walter, M.T. (2019). The effect of dams on river transport of microplastic pollution. *Sci. Total Environ.* 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.

Woodward, J., Li, J., Rothwell, J., Hurley, R. (2021). Acute riverine microplastic contamination due to avoidable releases of untreated wastewater. *Nat. Sustain.* 4, 793–802.

<https://doi.org/10.1038/s41893-021-00718-2>. WWF Italia, 2022. Fiumi, la minaccia arriva da insetticidi e plastica. <https://www.wwf.it/cosa-facciamo/pubblicazioni/fiumi-la-minaccia-arriva-da-insetticidi-e-plastica/>, 1.4.24.

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>.

Yin, M.C., Cao, H.J., Zhao, W.L., Wang, T., Huang, W., & Cai, M.G. (2022). Tide-driven

microplastics transport in an elongated semi-closed bay: A case study in Xiangshan Bay, China. *Science of the Total Environment*, 846.

Zhang, K., Gong, W., Lv, J., Xiong, X., Wu, C. (2015). Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges dam. *Environ. Pollut.* 204, 117–123. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2015.04.023>.

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>.

Ziajahromi, S., Kumar, A., Neale, P.A., & Leusch, F.D.L. (2018). Environmentally relevant concentrations of polyethylene microplastics negatively impact the survival, growth and emergence of sediment-dwelling invertebrates. *Environmental Pollution*, 236, 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.094>.