

Kajian Literatur Identifikasi dan Pemahaman tentang Kontaminasi Mikroplastik di Biosfer

Literature Review of Identification and Understanding of Microplastics Contamination in The Biosphere

Wahyu Ratnaningsih^{1,2}, Wisnu Prayogo³, Andri Saputra², Husna Muizzati Shabrina⁴

¹Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Jl. Teknika Utara, Pogung, Sinduadi, Mlati, Sleman, D.I Yogyakarta, 55284

²Program Studi Teknologi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta, Jl. Prof. Dr. Wirjono Prodjodikoro, Glugo, Panggunharjo, Bantul, Yogyakarta 55188

³Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Jl. Willem Iskandar Pasar V Medan Estate, Medan, Sumatera Utara 20221

⁴Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Jl. Padjajaran Condong Catur, Yogyakarta 55283

✉corresponding author: wisnuprayogo@unimed.ac.id

Abstrak

Mikroplastik merupakan partikel plastik dengan ukuran kurang dari 5 mm yang kini menjadi zat kontaminan yang semakin diperhatikan dalam konteks ekotoksikologi lingkungan akuatik dan juga bagi kesehatan manusia. Walaupun polusi mikroplastik tersebar di biosfer daratan, air, dan udara, lingkungan ini sering kali dilihat sebagai entitas terpisah; meskipun, pada kenyataannya, keduanya saling terkait. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau literatur ilmiah yang terkait dengan penelitian mikroplastik di biosfer dan mengidentifikasi kesenjangan dalam penelitian yang dapat membantu menilai prioritas penelitian di masa depan. Artikel ilmiah yang membahas polusi mikroplastik, diterbitkan antara tahun 2015 dan 2024, diidentifikasi dalam basis data Web of Science. Artikel penelitian asli yang tercakup dalam kategori 'Environmental Sciences', 'Marine/Freshwater Biology', 'Toxicology', 'Multidisciplinary Sciences', 'Environmental Studies', 'Oceanography', 'Limnology', dan 'Ecology' di Web of Science dan lainnya dipilih untuk mengeksplorasi penelitian mikroplastik di laut, estuari, sungai, danau, tanah, dan atmosfer. Artikel yang terkait dengan laut, estuari, sungai, dan danau kemudian diklasifikasikan lebih lanjut berdasarkan (i) keberadaan dan karakterisasi, (ii) penyerapan dan dampak pada organisme, dan (iii) isu perilaku dan transportasi. Hasilnya menunjukkan bahwa sementara penelitian mikroplastik di laut telah menerima perhatian ilmiah yang signifikan, pemahaman terhadap sejauh mana polusi mikroplastik di lingkungan kontinental, seperti sungai, danau, tanah, dan udara, beserta interaksi lingkungannya, masih kurang memadai.

Kata kunci: Mikroplastik, biosfer, keberadaan dan karakterisasi, perilaku dan transportasi, ekotoksikologi

Abstract

Microplastics are particles of plastic with a size less than 5 mm which pose a growing concern in terms of ecotoxicology in aquatic environments and human health. Despite the widespread presence of microplastic pollution in land, water, and air, these environments are often viewed in isolation, although they are intricately interconnected. This study endeavors to examine the existing scientific literature pertaining to microplastic research across various environmental compartments and identify research gaps to shape future priorities. Scientific papers addressing microplastic pollution, published between 2015 and 2024, have been identified in the Web of Science database. Original research articles categorized under 'Environmental Sciences', 'Marine/Freshwater Biology', 'Toxicology', 'Multidisciplinary Sciences', 'Environmental Studies', 'Oceanography', 'Limnology', and 'Ecology' in the Web of Science are chosen for a detailed investigation into microplastic research in seas, estuaries, rivers, lakes, soil, and the atmosphere. The selected papers for seas, estuaries, rivers, and lakes are further categorized based on (i) occurrence and characterization, (ii) uptake by and effects on organisms, and (iii) issues related to fate and transport. The findings indicate that, despite significant scientific research on marine microplastics, our understanding of the extent of microplastic pollution in continental environments, including rivers, lakes, soil, and air, as well as the associated environmental interactions, remains limited.

Keywords: Microplastics, biosphere, occurrence and characterization, fate and transport, ecotoxicology

Pendahuluan

Jumlah sampah antropogenik di lingkungan air dan daratan telah meningkat secara dramatis selama beberapa dekade terakhir; sekitar 60-80% di antaranya adalah plastik. Produksi plastik massal dimulai pada tahun 1950-an, dan saat ini melebihi 280 juta ton secara global. Diperkirakan bahwa 4,8 hingga 12,7 juta ton metrik limbah plastik yang tidak terkelola memasuki lautan dari negara-negara pesisir setiap tahunnya (Guzzetti et al., 2018). Studi terbaru menunjukkan bahwa pertanian adalah salah satu aktivitas antropogenik utama antropogenik utama yang berkontribusi terhadap pencemaran mikroplastik di tanah baik karena karena aplikasi lumpur limbah untuk perbaikan tanah, dan penggunaan plastik pertanian, seperti mulsa plastik untuk meningkatkan hasil panen hasil panen (Jambeck et al., 2015). Selain itu, ada bukti yang menunjukkan bahwa ban dan marka jalan marka jalan juga dapat menyebabkan polusi mikroplastik, limpasan air hujan bertindak sebagai jalur transportasi utama untuk membawa partikel keausan ban dan jalan membawa partikel keausan ban dan jalan ke air permukaan (Leads & Weinstein, 2019; Luo et al., 2021; Sommer et al., 2018). Selain itu, penelitian terbaru telah menunjukkan bahwa sumber mikroplastik di udara yang mungkin adalah serat sintetis dari pakaian dan rumah, rumput-rumput sintetis, tempat pembuangan sampah, dan hasil pembakaran sampah yang meningkat terutama di daerah urban. Partikel-partikel di atmosfer ini dapat terbawa oleh angin ke lingkungan akuatik atau diendapkan di lingkungan darat. Akibatnya, distribusi spasial mikroplastik di antara biosfer yang berbeda dibentuk oleh proses fisik, seperti angin, pasang surut, limpasan permukaan, dan banjir yang berubah oleh kekuatan iklim.

Mikroplastik semakin menjadi perhatian di lingkungan akuatik karena risiko ekotoksikologi yang ditimbulkannya. Tertelannya mikroplastik oleh berbagai spesies dapat mengganggu cadangan energi, serta dapat terakumulasi secara biologis dan menjadi biomagnifikasi melalui rantai makanan. Selain itu, karena luas permukaannya yang relatif besar dan komposisi hidrofobiknya, mikroplastik cenderung menyerap banyak zat termasuk logam berat, dan dapat memindahkan polutan prioritas, seperti Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) dan Polychlorinated Biphenyls (PCBs), ke kehidupan akuatik (Fisner et al., 2017; Fries & Zarfl, 2012; Adam et al., 2024). Perilaku penyerapan polutan organik persisten (POPs) dengan perubahan parameter kualitas air dan jenis polimer telah menjadi subjek penelitian, terutama, selama beberapa tahun terakhir. Tinjauan ini bertujuan (i) untuk menyajikan kondisi penelitian mikroplastik saat ini dan memberikan gambaran komprehensif tentang kelimpahan mikroplastik di enam biosfer yang berbeda: laut, muara,

sungai, danau, tanah, dan atmosfer, dan, (ii) untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian sebagai panduan untuk prioritas penelitian di masa depan.

Metode Penelitian

Strategi Pencarian Literatur

Kajian ini menggunakan pendekatan *systematic narrative review* dengan fokus pada identifikasi, pemahaman, dan pemetaan penelitian mikroplastik di berbagai kompartemen biosfer. Pencarian literatur dilakukan pada basis data Web of Science (WoS) sebagai sumber primer sebagai sumber pelengkap untuk memperkuat cakupan global (Prayogo et al., 2025; Azizah et al., 2025). Periode pencarian dibatasi dalam sepuluh tahun terakhir antara tahun 2015 hingga 2024. Strategi pencarian disusun menggunakan kombinasi kata kunci berbasis konsep lintas-biosfer dan pendekatan perilaku polutan, dengan struktur search string sebagai berikut: ("microplastic" OR "nanoplastic") AND ("marine" OR "river" OR "lake" OR "soil" OR "atmosphere" OR "biosphere") AND ("occurrence" OR "characterization" OR "transport" OR "ecotoxicology"). Pencarian dibatasi pada kategori WoS: *Environmental Sciences*, *Marine/Freshwater Biology*, *Ecology*, *Environmental Studies*, dan *Oceanography*. Hasil awal pencarian menghasilkan 2.654 dokumen ilmiah yang menunjukkan tingginya laju pertumbuhan publikasi terkait mikroplastik secara internasional dan menegaskan urgensi penyaringan metodologis yang ketat agar tinjauan yang dihasilkan tetap fokus dan representatif secara ilmiah.

Kriteria Inklusi–Eksklusi dan Proses Seleksi Artikel

Tahap penyaringan literatur dilakukan melalui tiga lapisan pengurangan secara sistematis. Pertama, penyaringan judul dan abstrak (*title–abstract screening*) untuk menyingkirkan dokumen non-relevan yang tidak memiliki konteks empiris terkait mikroplastik di lingkungan nyata (misalnya *polymer synthesis*, prosiding non-peer-reviewed, dan paten teknologi). Tahap ini mengeliminasi sekitar 60% artikel. Kedua, dilakukan penyaringan berbasis kriteria eksklusi khusus, yakni: (i) karya review murni tanpa data lapangan, (ii) simulasi numerik tanpa validasi empiris, (iii) studi toksikologi hewan laboratorium murni tanpa keterhubungan ke biosfer, serta (iv) artikel yang tidak menyebutkan konsentrasi, karakter fisik–kimia, atau mekanisme perilaku mikroplastik. Setelah tahap ini, jumlah artikel menyusut secara signifikan. Ketiga, dilakukan *full-content eligibility screening*, yaitu evaluasi menyeluruh terhadap metodologi, indikator ukur, dan relevansi langsung terhadap lima kompartemen biosfer: laut, sungai, danau, tanah, dan

atmosfer. Hasil akhir seleksi menyisakan sekitar 358 artikel yang dianggap layak secara metodologis dan representatif.

Proses Klasifikasi dan Analisis Literatur

Seluruh artikel terpilih kemudian diklasifikasikan menggunakan struktur tematik tiga dimensi berdasarkan kerangka penelitian mikroplastik lintas-biosfer: (i) keberadaan dan karakterisasi, yaitu studi yang melaporkan konsentrasi, ukuran partikel, morfologi (fragmen, fiber, beads), serta jenis polimer dominan; (ii) penyerapan dan dampak terhadap organisme, yaitu studi yang mengevaluasi paparan, bioakumulasi, biomagnifikasi, serta efek fisiologis dan biokimia pada biota; serta (iii) perilaku dan transportasi, yang mencakup mobilitas mikroplastik antar-biosfer melalui angin, limpasan daratan, pasang surut, dan interaksi atmosfer–air–tanah. Proses klasifikasi ini dilakukan secara manual-terarah (researcher-guided coding) agar interpretasi lebih tepat daripada mengandalkan pendekatan bibliometrik murni. Setiap artikel dianalisis berdasarkan parameter kelimpahan (partikel/L atau partikel/kg), jenis polimer dominan (PE, PP, PET, PS), ukuran rerata, teknik pengambilan sampel (plankton net, sediment core, grab sampling), serta instrumen analitis seperti FTIR, Raman spectroscopy, SEM, atau pyrolysis-GC/MS. Selain itu, dilakukan pemetaan distribusi geografis serta identifikasi hotspot ekologis, yang kemudian dihubungkan dengan aktivitas antropogenik seperti kepadatan penduduk, pertanian intensif, dan tata kelola limbah.

Pendekatan Kuantitatif dan Penguatan Validitas Kajian

Menanggapi kelemahan yang sering dikritik pada kajian literatur deskriptif, penelitian ini tidak hanya menyajikan narasi tematik, tetapi juga menerapkan pendekatan semi-kuantitatif berbasis komparasi ekologis (Chairunnisa et al., 2025). Konsentrasi mikroplastik dari setiap studi dikonversi ke satuan yang setara untuk memungkinkan perbandingan antar-biosfer (misalnya particles per cubic meter untuk air, particles per kilogram dry weight untuk tanah dan sedimen). Data konsentrasi kemudian dipetakan dalam rentang minimum–maksimum untuk mengidentifikasi biosfer dengan beban polusi tertinggi serta potensi risiko ekologis paling kritis. Selain itu, tingkat dominansi jenis polimer (misalnya PE paling umum di laut, PP dominan di sungai urban, dan fiber sintetis mendominasi atmosfer) turut dianalisis sebagai indikator jejak aktivitas antropogenik. Analisis semi-kuantitatif ini memungkinkan interpretasi yang lebih kuat daripada laporan naratif murni, sekaligus tetap realistis mengingat heterogenitas metode pada literatur global. Validitas kajian diperkuat melalui perbandingan lintas kawasan geografis (Asia, Eropa, Amerika Utara, dll.), sehingga hasil yang diperoleh tidak bias regional dan dapat merepresentasikan variasi kondisi sosioekologis

antarwilayah secara lebih komprehensif dan kredibel, serta memberikan landasan empiris yang kuat bagi perumusan strategi mitigasi dan kebijakan lingkungan berbasis bukti ilmiah.

Hasil dan Pembahasan

Mikroplastik

Mikroplastik bersumber dari sumber primer dan sekunder. Sumber primer mikroplastik melibatkan partikel polietilena (PE), polipropilena (PP), dan polistirena (PS) dalam produk kosmetik dan medis. Karena efek buruknya di lingkungan, penjualan produk kosmetik yang mengandung mikroplastik telah dilarang di beberapa negara, termasuk Kanada dan Amerika Serikat (Cubas et al., 2022). Mikroplastik sekunder berasal dari proses fisik, kimia, dan biologis yang mengakibatkan fragmentasi serpihan plastik (Dewi, 2022). Paparan radiasi ultraviolet (UV) mengkatalisis fotooksidasi plastik, menyebabkannya menjadi rapuh dan memecah menjadi mikroplastik. Sementara panas dan sinar matahari, serta kondisi yang baik teraerasi, ideal untuk menghasilkan mikroplastik melalui proses fragmentasi berulang, kondisi dingin dan anoksik di lingkungan air dan sedimen dapat menyebabkan degradasi yang sangat lambat dari partikel plastik selama berabad-abad. Sumber mikroplastik yang berbeda menyebabkan mereka muncul dalam berbagai bentuk seperti pelet, serat, dan fragmen dalam sampel lingkungan (Shafani et al., 2022).

Mikroplastik primer kemungkinan besar masuk ke lingkungan akuatik melalui pembuangan limbah rumah tangga atau tumpahan serbuk atau pelet resin plastik yang digunakan untuk peledakan udara. Sumber mikroplastik primer lainnya yang signifikan adalah aplikasi lumpur limbah yang mengandung serat sintetis atau mikroplastik yang mengendap dari produk perawatan pribadi atau rumah tangga ke daratan. Serat adalah bentuk yang paling sering dilaporkan, kemungkinan besar disebabkan oleh abrasi pakaian dan pelapis yang terbuat dari tekstil sintetis secara terus-menerus, dan pembuangan limbah mesin cuci. Meskipun serat sintetis yang terutama terbuat dari poliester, akrilik, dan poliamida, merupakan mikroplastik sekunder, serat tersebut dilepaskan ke lingkungan bersama dengan mikroplastik primer. Diperkirakan bahwa 1900 serat per potong pakaian dapat keluar selama proses pencucian, dan dilepaskan ke lingkungan akuatik dan terestrial melalui limbah cair dan lumpur limbah. Dalam konteks ini, pabrik tekstil juga dapat menjadi sumber pelepasan ke lingkungan; yang belum diteliti. Daerah yang dekat dengan industri plastik diprediksi menjadi titik-titik rawan; konsentrasi sekitar 100.000 partikel plastik per m³ air laut telah dilaporkan di daerah pelabuhan Swedia yang berdekatan dengan pabrik produksi polietilena (PE) (Olatunji, 2022).

Sumber sekunder mikroplastik dianggap sebagai penyumbang kontributor besar polusi mikroplastik mengingat jumlah besar sampah makroplastik yang masuk ke lingkungan. Mikroplastik sekunder, berasal dari aktivitas antropogenik, seperti membuang sampah sembarangan dan dilepaskan selama proses pengumpulan dan pembuangan sampah pengumpulan dan pembuangan sampah. Benda-benda plastik berukuran besar ini dan produknya yang terdegradasi dapat masuk ke lingkungan akuatik melalui penyebaran angin, erosi tanah atau limpasan permukaan. Demikian juga, plastik makro dan mikro yang ringan dapat diangkut melintasi daratan oleh angin, sementara polimer yang lebih padat lebih mungkin terkubur lebih dalam di lapisan tanah. Limpasan permukaan dari lahan pertanian dan daerah perkotaan adalah sumber sumber beban mikroplastik yang signifikan ke air permukaan (Jambeck et al., 2015).

Penelitian Mikroplastik

Distribusi penelitian mikroplastik dalam artikel ini membahas tentang timbulannya di biosfer. Artikel penelitian asli yang tercakup dalam kategori '*Environmental Sciences*', '*Marine/Freshwater Biology*', '*Toxicology*', '*Multidisciplinary Sciences*', '*Environmental Studies*', '*Oceanography*', '*Limnology*', dan '*Ecology*' dipilih untuk mempelajari penelitian mikroplastik di laut, estuari, sungai, danau, tanah, dan atmosfer.

Penelitian Mikroplastik di Laut

Mikroplastik di laut telah menjadi isu lingkungan yang meningkat dan memunculkan keprihatinan ekologis. Mikroplastik telah tersebar di seluruh lautan, memberikan dampak serius pada ekosistem laut dan kesehatan manusia. Penelitian ilmiah yang signifikan telah dilakukan untuk memahami sejauh mana permasalahan ini dan mengeksplorasi solusi untuk mengatasi dampaknya. Mikroplastik berasal dari berbagai sumber, termasuk pecahan barang-barang plastik yang lebih besar, serat tekstil sintetis, dan partikel mikroplastik yang ditambahkan ke produk-produk kecantikan dan perawatan pribadi (Guzzetti et al., 2018; Patil et al., 2022). Ketika sampah plastik mencapai lautan, terjadi degradasi secara mekanis akibat gelombang, radiasi ultraviolet, dan aktivitas organisme laut. Hasilnya adalah partikel-partikel mikroskopis yang tersebar di seluruh lautan. Dampak ekologi mikroplastik di laut mencakup kerusakan pada biota laut, terutama organisme planktonik dan ikan. Mikroplastik dapat terbawa arus laut dan masuk ke rantai makanan, menyebabkan efek bioakumulasi. Organisme laut yang mengonsumsi mikroplastik dapat mengalami gangguan pencernaan, toksisitas, dan bahkan kematian. Selain itu, mikroplastik juga dapat memberikan tempat yang ideal bagi mikroorganisme patogen dan polutan kimia untuk terakumulasi. Dampak

kesehatan manusia dari konsumsi makanan laut yang terkontaminasi mikroplastik masih menjadi area penelitian yang berkembang. Meskipun belum sepenuhnya dipahami, khawatir bahwa manusia yang mengonsumsi ikan dan produk laut lainnya dapat terpapar mikroplastik dan bahan kimia yang terkait. Peningkatan kesadaran akan dampak mikroplastik di laut telah mendorong upaya konservasi dan kebijakan perlindungan lingkungan. Beberapa negara dan organisasi internasional telah mengambil langkah-langkah untuk mengurangi penggunaan plastik sekali pakai, membatasi pelepasan mikroplastik dari pakaian sintetis, dan meningkatkan pengelolaan limbah plastik (Conti et al., 2021; Deng et al., 2020; Umar et al., 2023). Solusi jangka panjang melibatkan pengurangan produksi plastik dan transisi ke bahan yang lebih ramah lingkungan. Inovasi dalam teknologi daur ulang plastik dan pengembangan bahan pengganti plastik konvensional menjadi fokus penting dalam mengatasi permasalahan ini. Secara keseluruhan, mikroplastik di laut merupakan tantangan serius bagi keberlanjutan lingkungan dan kesehatan bumi. Upaya kolaboratif dari berbagai pihak, mulai dari pemerintah, industri, hingga masyarakat umum, diperlukan untuk mengubah perilaku konsumsi, meningkatkan pengelolaan limbah, dan menciptakan solusi inovatif untuk mengatasi dampak mikroplastik ini.

Penelitian Mikroplastik di Estuari

Estuari merupakan lingkungan perairan unik tempat pertemuan air tawar dari sungai dengan air laut, yang membentuk ekosistem dengan produktivitas dan keanekaragaman hayati tinggi. Namun, sebagaimana ekosistem akuatik lainnya, estuari juga menghadapi permasalahan kontaminasi, termasuk keberadaan mikroplastik yang kini menjadi isu serius terhadap keberlanjutan lingkungan estuari (Shafani et al., 2022). Sumber utama mikroplastik di estuari berasal dari aliran sungai yang membawa limbah plastik dari berbagai sumber daratan ke perairan estuari. Plastik dapat terurai menjadi mikroplastik melalui proses mekanis, kimia, dan fotodegradasi yang terjadi selama perjalanan mereka ke estuari. Dalam estuari, mikroplastik memiliki dampak yang signifikan pada kehidupan laut dan ekosistem estuari secara keseluruhan. Organisme-organisme di estuari, seperti moluska, ikan, dan burung laut, dapat terpapar dan mengonsumsi mikroplastik. Hal ini dapat menyebabkan gangguan pencernaan, penurunan kesehatan, dan bahkan kematian pada organisme tersebut. Proses bioakumulasi, di mana mikroplastik menumpuk dalam jaring makanan, menjadi risiko tambahan karena dapat menyebabkan efek kesehatan yang lebih luas pada kelompok organisme tertentu. Selain dampak langsung pada biota estuari, mikroplastik juga dapat mempengaruhi ketersediaan nutrisi dan kimia dalam air. Mikroplastik dapat menjadi vektor bagi bahan kimia berbahaya dan patogen, membawa mereka ke dalam estuari dan mengubah

keseimbangan ekosistem (Patil et al., 2022). Peningkatan konsentrasi mikroplastik dalam sedimen estuari juga dapat memengaruhi kualitas habitat benthik dan proses biogeokimia. Salah satu tantangan utama dalam mengatasi masalah mikroplastik di estuari adalah kurangnya pemahaman menyeluruh tentang sumber, distribusi, dan dampaknya. Oleh karena itu, penelitian ilmiah yang lebih mendalam diperlukan untuk memahami dinamika mikroplastik di dalam estuari. Ini termasuk pemantauan yang cermat terhadap komposisi, ukuran, dan distribusi mikroplastik, serta pemahaman lebih lanjut tentang bagaimana mikroplastik berinteraksi dengan organisme dan ekosistem estuari. Solusi untuk mengurangi masalah mikroplastik di estuari melibatkan upaya bersama dari pemerintah, industri, dan masyarakat. Langkah-langkah seperti pengelolaan limbah yang lebih baik, pengurangan penggunaan plastik sekali pakai, dan edukasi publik tentang dampak mikroplastik dapat membantu mengurangi masukan mikroplastik ke dalam estuari. Penerapan kebijakan yang mendukung praktik-praktik berkelanjutan dan inovasi teknologi daur ulang plastik juga menjadi kunci dalam menjaga kelestarian estuari sebagai ekosistem yang penting bagi kehidupan laut dan manusia.

Penelitian Mikroplastik di Sungai

Mikroplastik telah menjadi isu serius di banyak sungai di seluruh dunia. Sebagai limbah padat yang paling umum ditemui di lingkungan perairan, mikroplastik memiliki dampak ekologis dan kesehatan manusia yang signifikan. Inisiatif penelitian dan kesadaran publik semakin meningkat terkait dengan masalah ini, menyoroti kebutuhan untuk memahami sumber, distribusi, dan efek mikroplastik di sungai. Sumber utama mikroplastik di sungai berasal dari berbagai kegiatan manusia, termasuk pembuangan limbah industri, rumah tangga, dan komersial. Plastik sekali pakai, mikroplastik dalam produk perawatan pribadi seperti scrub wajah, dan mikroplastik yang dihasilkan melalui pelapukan plastik yang lebih besar semuanya dapat mencapai sungai melalui aliran air permukaan atau langsung dibuang (Pradiptaadi & Fallahian, 2022). Pencemaran ini semakin diperparah oleh kurangnya pengelolaan limbah yang efektif dan kebijakan lingkungan yang kuat. Dalam konteks sungai, mikroplastik dapat memiliki dampak yang merugikan pada kehidupan akuatik dan ekosistem sungai secara keseluruhan. Organisme air, seperti ikan, krustasea, dan makhluk hidup kecil lainnya, dapat mengonsumsi mikroplastik, baik secara langsung maupun melalui rantai makanan (Chen et al., 2022). Ini dapat mengarah pada bioakumulasi, di mana konsentrasi mikroplastik meningkat seiring berjalannya waktu dalam organisme tertentu. Dampak kesehatan pada organisme ini termasuk kerusakan organ dalam, penurunan kesehatan reproduksi, dan bahkan kematian. Penting untuk diakui bahwa mikroplastik di

sungai juga memengaruhi kualitas air dan lingkungan sekitarnya. Selain itu, mikroplastik dapat menyimpan bahan kimia berbahaya dan bakteri, yang dapat dilepaskan dalam air dan memperburuk kondisi sungai. Peningkatan konsentrasi mikroplastik di sedimen sungai juga dapat memengaruhi keberlanjutan habitat benthik dan siklus biogeokimia. Upaya untuk mengatasi masalah mikroplastik di sungai melibatkan serangkaian tindakan. Peningkatan pengelolaan limbah, larangan produk mikroplastik tertentu, edukasi publik tentang dampak penggunaan plastik sekali pakai, dan penerapan teknologi daur ulang yang lebih efektif adalah beberapa langkah yang dapat diambil. Peran masyarakat, pemerintah, dan industri sangat penting dalam menciptakan solusi berkelanjutan untuk mengurangi dan mencegah masukan mikroplastik ke dalam sungai (B. Li et al., 2020). Selain itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami secara mendalam distribusi mikroplastik di sungai, efeknya pada ekosistem sungai, dan solusi terbaik untuk mengatasi masalah ini. Dengan upaya bersama dan kesadaran yang meningkat, dapat diharapkan bahwa langkah-langkah positif akan diambil untuk menjaga keberlanjutan sungai sebagai sumber daya air yang penting dan sebagai habitat bagi berbagai bentuk kehidupan akuatik.

Penelitian Mikroplastik di Tanah

Sebagian besar sampah plastik berakhir di lautan atau dibuang di daratan. Diperkirakan bahwa sekitar 6300 juta ton limbah plastik dihasilkan antara tahun 1950 dan 2015, dengan 4977 juta ton yang berkumpul di tempat pembuangan sampah dan lingkungan alam (Shenoy et al., 2022). Selain itu, diperkirakan antara 125 dan 850 ton mikroplastik per juta penduduk ditambahkan setiap tahun ke tanah pertanian Eropa melalui penggunaan lumpur limbah (Cyzdik-Kwiatkowska et al., 2022). Mikroplastik ringan dapat dibawa melintasi daratan oleh angin, sementara item plastik yang lebih padat lebih mungkin terkubur di lapisan yang lebih dalam dan tetap berada di dalam tanah. Ada bukti bahwa suhu rendah, kadar oksigen rendah, dan penutupan dengan air. Endapan, atau tanah, mengurangi paparan terhadap radiasi UV, menghambat fragmentasi plastik (Du et al., 2023; Umar et al., 2023). Oleh karena itu, fragmentasi foto-oksidatif sangat lambat untuk mikroplastik dan makroplastik yang terkubur di tanah; oleh karena itu, tanah telah dianggap sebagai tempat penyimpanan mikroplastik. Meskipun mikroplastik memiliki potensi untuk mengubah geokimia tanah dan berinteraksi dengan biota tanah, dampak mereka yang kemungkinan terjadi pada lingkungan terestrial masih kurang dipahami, namun telah mendapat perhatian, terutama sejak tahun 2016 (Deng et al., 2020). Sebagian besar penelitian ini umumnya berfokus pada masuknya mikroplastik oleh biota tanah, seperti cacing tanah dan serangga tanah dan peran organisme terestrial ini dalam transportasi mikroplastik di tanah. Huerta

Lwanga et al., (2016) meneliti kelangsungan hidup cacing tanah *Lumbricus terrestris* yang terpapar konsentrasi PE yang berbeda, sedangkan Hodson et al. (2017) mempelajari interaksi antara partikel PS dan seng (Zn) untuk memahami efek mikroplastik terhadap ketersediaan logam kepada cacing tanah. Liu et al. (2017) menguji efek mikroplastik pada bahan organik terlarut tanah (DOM) dengan menganalisis kandungan tanah dari karbon organik terlarut (DOC), nitrogen organik terlarut (DON), amonium (NH_4^+), fosfor organik terlarut (DOP), dan fosfat ($(\text{PO}_4)_3$). Para penulis juga menyelidiki perubahan dalam aktivitas enzim Phenol Oxidase (PO) dan hidrolase Diasetat Fluorescein (FDAse) dari komunitas bakteri. Menurut hasil penelitian mereka, penambahan mikroplastik memfasilitasi akumulasi material berbobot molekul tinggi yang mirip humus dan merangsang aktivitas enzimatik. Perilaku (*fate*) dan transportasi mikroplastik di tanah telah dipelajari dengan menyelidiki ingestasi partikel tersebut oleh cacing tanah, spesies kolembola, dan tungau. Selain kejadian dan transportasi biogenik, para peneliti juga menyelidiki dekomposisi mikroplastik oleh mikroba di tanah sebagai metode potensial untuk restorasi tanah. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa partikel PE dapat terdegradasi oleh bakteri yang diisolasi dari usus larva ngengat tepung dan ukuran PE dapat berkurang saat melewati usus cacing tanah *Lumbricus terrestris*. Uji efek bakteri yang diekstraksi dari usus *Lumbricus terrestris* pada dekomposisi polietilena berdensitas rendah (LDPE). Para penulis mengamati bahwa ukuran partikel LDPE berkurang secara signifikan, dan 60% dari konten mikroplastik mengalami dekomposisi dengan bakteri yang diisolasi.

Penelitian mikroplastik di lingkungan terestrial umumnya telah diselidiki melalui eksperimen laboratorium dengan menambahkan partikel mikroplastik dan organisme tanah ke sampel tanah (R. Li et al., 2022).

Penelitian Mikroplastik di Danau

Paparan mikroplastik di danau telah menjadi isu lingkungan yang semakin meningkat dan kompleks. Mikroplastik telah menjadi ancaman serius bagi ekosistem danau di seluruh dunia. Sumber utama mikroplastik di danau berasal dari beberapa sumber, termasuk sampah plastik yang memasuki perairan dan proses fragmentasi serpihan plastik yang lebih besar. Salah satu sumber utama mikroplastik di danau adalah limbah plastik dari aktivitas manusia. Sampah plastik seperti kantong plastik, botol, dan peralatan plastik lainnya dapat masuk ke danau melalui aliran air, angin, atau langsung dibuang ke perairan (Dusaucy et al., 2021). Di beberapa danau, aktivitas pariwisata dan perkotaan dapat meningkatkan jumlah sampah plastik yang memasuki danau, menyebabkan peningkatan risiko kontaminasi mikroplastik. Selain itu, proses fragmentasi plastik yang lebih besar juga berkontribusi pada keberadaan

mikroplastik di danau. Plastik yang terpapar sinar matahari dan proses oksidasi dapat menjadi rapuh dan pecah menjadi fragmen yang lebih kecil. Lingkungan air danau yang bersifat dinamis, dengan aliran air dan kondisi cuaca yang bervariasi, dapat mempercepat proses fragmentasi ini. Mikroplastik yang dihasilkan dari proses ini dapat tersebar di seluruh danau dan mengakumulasi di berbagai lapisan air dan sedimen. Efek mikroplastik terhadap lingkungan dan organisme akuatik menjadi perhatian utama. Organisme di danau, seperti plankton, ikan, dan organisme benthik, dapat secara tidak sengaja mengonsumsi mikroplastik (Patil et al., 2022). Dampaknya pada kesehatan organisme dan rantai makanan akuatik masih menjadi area penelitian yang aktif. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik dapat menyerap zat kimia beracun dari air, dan kemudian dapat ditransfer ke organisme yang mengonsumsinya. Upaya untuk mengatasi masalah mikroplastik di danau melibatkan langkah-langkah pencegahan dan mitigasi. Kampanye penyadaran masyarakat tentang bahaya sampah plastik, peningkatan infrastruktur pengelolaan sampah di sekitar danau, dan promosi penggunaan plastik ramah lingkungan adalah beberapa langkah yang dapat diambil. Pemantauan terus-menerus terhadap kualitas air danau, termasuk tingkat mikroplastik, juga diperlukan untuk memahami tren dan perubahan dalam waktu (Conti et al., 2021). Secara keseluruhan, masalah mikroplastik di danau merupakan tantangan serius yang memerlukan kerjasama lintas sektor dan pemahaman mendalam terhadap dampaknya. Upaya kolektif untuk mengurangi produksi plastik sekali pakai, meningkatkan pengelolaan limbah, dan menjaga keberlanjutan ekosistem danau menjadi kunci dalam menjaga kesehatan dan keberlanjutan lingkungan air tawar ini.

Penelitian Mikroplastik di Atmosfer

Mikroplastik di atmosfer adalah fenomena yang semakin diperhatikan seiring dengan peningkatan pemahaman tentang penyebaran partikel-partikel plastik ke berbagai lingkungan. Meskipun mikroplastik telah banyak diketahui dalam ekosistem air dan tanah, keberadaannya di atmosfer baru-baru ini menjadi fokus penelitian yang lebih intens. Sumber utama mikroplastik di atmosfer berasal dari berbagai sumber. Salah satunya adalah proses abrasi dan degradasi plastik yang lebih besar, baik di daratan maupun di perairan. Saat plastik mengalami pelapukan oleh sinar UV matahari dan gaya abrasi angin, partikel-partikel kecil dapat terlepas ke atmosfer. Selain itu, aktivitas manusia seperti pembakaran sampah, produksi industri, dan transportasi juga dapat menjadi kontributor utama dalam memperkenalkan mikroplastik ke udara (Sommer et al., 2018). Partikel mikroplastik di atmosfer dapat memiliki berbagai ukuran, mulai dari nanoplastik hingga mikroplastik yang lebih besar. Mereka dapat terbawa oleh angin dan tersebar ke seluruh wilayah, bahkan dapat

mencapai daerah terpencil. Kehadiran mikroplastik di atmosfer memunculkan kekhawatiran tentang potensi dampaknya pada kesehatan manusia dan lingkungan. Studi-studi awal telah menunjukkan bahwa mikroplastik di atmosfer dapat terendap di permukaan tanah dan perairan, dengan curah hujan menjadi salah satu jalur utama depositnya. Dengan demikian, mikroplastik yang terhirup oleh manusia dapat masuk ke sistem pernapasan dan menyebabkan potensi risiko kesehatan. Efek ekologis dari mikroplastik di atmosfer juga masih menjadi bidang penelitian yang berkembang. Partikel-partikel tersebut dapat mempengaruhi keseimbangan ekosistem, terutama jika terakumulasi dalam lingkungan tertentu. Dalam tanah, mikroplastik yang terendap dapat mempengaruhi kesehatan tanaman dan mikroorganisme tanah (Amoah et al., 2017). Untuk mengatasi masalah mikroplastik di atmosfer, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami mekanisme transportasi dan deposisi, serta dampaknya pada kesehatan manusia dan lingkungan. Monitoring yang lebih cermat terhadap konsentrasi mikroplastik di berbagai wilayah geografis juga penting untuk memahami sejauh mana penyebaran mikroplastik di atmosfer (Wright et al., 2020). Upaya pengurangan penggunaan plastik sekali pakai, pengelolaan limbah yang lebih baik, dan perubahan perilaku manusia dalam mengelola sampah plastik dapat membantu mengurangi sumber mikroplastik di atmosfer. Selain itu, pendekatan lintas sektor melibatkan pemerintah, industri, dan masyarakat perlu diterapkan untuk menciptakan solusi berkelanjutan dalam mengatasi dampak mikroplastik di atmosfer dan melindungi kesehatan lingkungan serta manusia.

Tindak Lanjut

Kondisi pengetahuan saat ini dan kesenjangan penelitian tentang penelitian mikroplastik di berbagai jenis biosfer dijelaskan lebih lanjut pada bagian ini. Mikroplastik di laut menjadi bidang penelitian yang berkembang, yang menunjukkan peningkatan cepat dalam jumlah publikasi, terutama dalam dekade terakhir. Tren peningkatan ini dapat diamati, terutama antara tahun 2015 dan 2019. Studi mikroplastik di lingkungan laut umumnya difokuskan pada keberadaan polutan ini, dan penelitian mengenai penyerapan oleh biota, serta adsorpsi berbagai kontaminan lingkungan, seperti POPs dan logam berat ke mikropartikel ini. Penyerapan mikroplastik oleh biota laut telah diuji untuk berbagai organisme, terutama di perut berbagai spesies ikan dan invertebrata, terutama yang dikumpulkan di lapangan. Namun, studi yang berkaitan dengan level trofik tertinggi, seperti mamalia laut, relatif terbatas.

Penelitian yang melibatkan mekanisme perilaku dan transportasi mikroplastik di lingkungan laut masih terbatas. Ada beberapa studi pemodelan tentang transportasi serpihan

plastik makro dan mikro di samudra; namun, publikasi yang melibatkan distribusi vertikal mikroplastik di kolom air sangat sedikit. Studi mengenai perilaku dan transportasi mikroplastik di sedimen pantai dangkal dan perairan dangkal juga relatif sedikit (Pradiptaadi & Fallahian, 2022). Karena arus laut dan variasi musiman, variabilitas spasial dan temporal yang tinggi dari mikroplastik di lingkungan laut menghambat penilaian terhadap kepadatan, kelimpahan, dan distribusi partikel ini. Dalam hal ini, studi lebih lanjut yang mengadopsi pendekatan holistik diperlukan untuk memahami kekuatan penggerak yang memengaruhi distribusi horizontal dan vertikal mikroplastik di lingkungan laut.

Sedangkan penelitian mikroplastik di lingkungan lain seperti air tawar, tanah, dan udara masih kurang dipahami. Meskipun sungai adalah rute transportasi utama yang memindahkan plastik ke samudra, dalam tinjauan ini, hanya sekitar 11% dari studi yang memiliki konteks sungai (Chen et al., 2022). Dengan melakukan penelitian terutama di bagian hilir sungai akan memberikan wawasan yang berguna untuk memahami mekanisme yang efektif dalam transportasi mikroplastik dan akumulasi di laut. Dalam beberapa tahun terakhir, terjadi pertumbuhan pengetahuan yang cepat mengenai kelimpahan mikroplastik di sistem air tawar. Namun, penelitian yang terbatas yang menghubungkan konsentrasi mikroplastik dan dampak ekologis yang terkait menghambat penilaian risiko lingkungan yang tepat dari mikroplastik dalam sistem ini. Meskipun lingkungan terestrial adalah sumber mikroplastik yang signifikan dengan kontribusi ~80% terhadap lingkungan pantai dan laut, studi yang melibatkan deteksi dan perilaku mikroplastik di tanah dan ekosistem terestrial masih jarang. Data mengenai keberadaan mikroplastik di lingkungan terestrial hampir tidak tersedia, sementara penyerapan mikroplastik oleh organisme terestrial sejauh ini hanya diteliti dalam beberapa studi. Ini dapat diatributkan pada kemudahan relatif, di mana serat mikroplastik dapat diekstraksi dan diukur dari air. Namun, hal ini telah mulai berubah dalam dua tahun terakhir, dan perhatian sekarang juga diarahkan pada lingkungan terestrial. Namun, dalam kebanyakan kasus, mengatasi sumber mikroplastik di lokasi tertentu sulit karena variasi potensi asal dan distribusi geografis sumber yang berbeda. Secara khusus, mengidentifikasi sumber mikroplastik tanpa titik sumber lebih sulit karena sumber ini lebih beragam.

Mikroplastik dapat dibawa ke perairan permukaan melalui limpasan; namun, hampir tidak ada data yang tersedia mengenai polusi mikroplastik dalam limpasan permukaan. Meskipun penelitian terbaru menunjukkan bahwa pertanian adalah sumber polusi mikroplastik yang signifikan karena penggunaan mulsa plastik, dan pemberian lumpur limbah domestik sebagai amandemen tanah; sejauh pengetahuan kami, dampak limpasan

pertanian terhadap transportasi dan beban mikroplastik ke perairan penerima belum pernah diteliti. Selain itu, kontribusi kerapatan populasi tinggi dan daerah perkotaan pada polusi mikroplastik telah ditunjukkan dalam banyak penelitian, namun sedikit data tentang beban mikroplastik dalam limpasan air hujan. Selain itu, meskipun penelitian sebelumnya melaporkan deposisi atmosfer sebagai sumber potensial mikroplastik, sedikit perhatian yang diberikan pada lingkungan atmosfer. Kurangnya penilaian komprehensif mengenai sumber dan aliran mikroplastik di daerah perkotaan membuat sulit untuk memahami kontribusi hujan atmosferik terhadap polusi mikroplastik di biosfer akuatik, dan untuk mengevaluasi gaya iklim sebagai jalur transportasi mikroplastik. Dalam hal ini, studi lebih lanjut harus menyelidiki kontribusi hujan atmosferik kering dan basah terhadap beban mikroplastik di sistem air tawar dan laut, dengan mempelajari aliran deposisi di antarmuka udara-air.

Studi yang berkaitan dengan penyerapan mikroplastik sebagian besar difokuskan pada keberadaan partikel-partikel kecil ini dalam organisme akuatik dan terestrial. Namun, jumlah studi yang terbatas terkait dengan efek toksik mikroplastik pada organisme laut dapat ditemukan dalam literatur. Sebenarnya, studi-studi ini lebih sedikit pada organisme air tawar dan terestrial. Hingga saat ini, akibat buruk dari mikroplastik sendiri atau dalam kombinasi dengan kontaminan emergen lainnya, serta transfer trofik melalui rantai makanan, telah dianalisis dalam kondisi laboratorium dengan media sintetis (Chen et al., 2022). Analisis paparan semacam ini juga telah dilakukan untuk organisme air tawar dan tanah; namun, pemeriksaan berbasis lapangan terkait mikroplastik di komunitas-komunitas ini masih terbatas. Berdasarkan pengetahuan saat ini, belum ada bukti pasti apakah mikroplastik membawa risiko signifikan atau tidak di lingkungan nyata. Efek dari perubahan kondisi lingkungan, jenis polimer yang berbeda, dan tingkat toksisitas yang terkait dengan spesies yang berbeda di lingkungan alami masih tidak diketahui. Karena keterbatasan metode, seperti kurangnya klasifikasi yang akurat, hanya sebagian kecil distribusi ukuran mikroplastik di biosfer yang diketahui. Meskipun beberapa penelitian menunjukkan bahwa ukuran partikel mikroplastik dan efek buruknya terhadap spesies berbanding terbalik, pengetahuan tentang keberadaan mikroplastik kecil dan nanoplastik serta dampak yang terkait pada lingkungan alam masih langka. Untuk melakukan penilaian risiko mikroplastik yang tepat, kesenjangan penelitian ini perlu diisi oleh skema pemantauan yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, diperlukan metode analitis yang lebih canggih untuk dapat menentukan proses yang mengontrol perilaku mikroplastik dan interaksinya dengan kontaminan lain di lingkungan.

Penelitian ilmiah menunjukkan bahwa metode standar untuk pengambilan sampel dan analisis mikroplastik tidak tersedia dalam literatur. Penelitian mikroplastik umumnya memerlukan volume sampel yang besar karena konsentrasi relatif rendah dari partikel-partikel ini di lingkungan. Sampel air permukaan dan kolom air dikumpulkan melalui jaring plankton yang menyaring volume air besar biasanya dengan ukuran mesh 330 μm . Jaring plankton yang digunakan untuk permukaan ini biasanya terbuat dari mesh nilon, yang menimbulkan risiko peningkatan potensi kontaminasi sampel dan dapat menyebabkan masalah selama analisis (Zobkov & Esiukova, 2018). Selain itu, kurangnya penggunaan jaring plankton yang standar dan ukuran mesh yang berbeda menghambat keberbandingan data kuantitatif pada konsentrasi mikroplastik dalam sampel air laut dan air tawar. Selanjutnya, hingga saat ini, metodologi pengambilan sampel yang digunakan selama bertahun-tahun untuk lingkungan laut telah diterapkan untuk pengambilan sampel mikroplastik dari sungai, namun kondisi aliran yang tinggi di sungai merupakan tantangan bagi penggunaan jaring plankton di lingkungan ini dan dalam beberapa kasus menjadi faktor pembatas bagi penelitian mikroplastik di sistem air tawar. Metode deteksi yang tidak standar di sampel alami juga menjadi batasan bagi kalibrasi dan validasi model numerik, yang menghambat perbandingan hasil model dengan observasi lapangan. Mengembangkan metode standar di masa depan untuk pengambilan, pengolahan, dan analisis sampel alami akan memungkinkan perbandingan langsung antar studi dan memfasilitasi penilaian sumber, jalur transportasi, dan risiko potensial mikroplastik.

Kontaminasi mikroplastik cukup merata di seluruh dunia, namun dampak potensialnya dapat menjadi lebih buruk ketika diakumulasi di lokasi tertentu. Meskipun keberadaan mikroplastik di air, tanah, dan udara telah terbukti, lingkungan ini umumnya dianggap secara independen, tetapi dalam kenyataannya saling terkait (Luo et al., 2021). Dengan mempelajari perilaku partikel dan mekanisme transportasi mikroplastik di dalam dan antara jenis-jenis biosfer, maka dapat membantu memahami bagaimana dan di mana mikroplastik akan terakumulasi. Keberadaan serpihan plastik di sungai dan danau baru-baru ini mulai mendapat perhatian, dan ada kekurangan penelitian yang menghubungkan sumber-sumbernya, seperti pembuangan instalasi pengolahan air limbah, air hujan, dan tempat pembuangan akhir. Hal ini diperlukan untuk menilai risiko yang terkait dengan konsentrasi mikroplastik. Kemungkinan besar kelimpahan mikroplastik berkorelasi dengan kedekatan dengan industri tertentu, pembuangan air limbah, dan praktik penggunaan lahan dalam suatu daerah aliran sungai. Tinjauan yang dilakukan di sini menyatakan bahwa salah satu area penelitian mikroplastik yang paling kurang dipelajari adalah praktik penelitian berbasis

cekungan sungai. Oleh karena itu, akan sangat berguna bagi peneliti ke depannya untuk fokus pada sumber, tempat pembuangan, dan jalur transportasi polutan yang muncul ini pada skala cekungan sungai. Diketahui bahwa studi lapangan yang dikombinasikan dengan pemodelan cekungan sungai terintegrasi dan pemetaan risiko akan memberikan wawasan berharga untuk memahami masalah-masalah yang mengatur akumulasi mikroplastik di tanah dan air. Oleh karena itu, penelitian ke depan seharusnya fokus pada pengembangan metode dan pendekatan pemodelan yang baru untuk menilai keberadaan, perilaku, dan transportasi mikroplastik di lingkungan. Efek jangka pendek dan jangka panjang dari mikroplastik juga perlu untuk dievaluasi.

Simpulan

Kajian ini telah meninjau dan menganalisis secara komprehensif perkembangan penelitian mikroplastik di enam kompartemen utama biosfer, yaitu laut, muara, sungai, danau, tanah, dan atmosfer. Hasil telaah menunjukkan bahwa perhatian ilmiah masih terpusat pada lingkungan laut, sedangkan penelitian di ekosistem kontinental seperti sungai, danau, tanah, dan atmosfer masih terbatas dan belum terintegrasi secara sistemik. Peta penelitian lintas-biosfer menunjukkan bahwa mikroplastik berasal dari berbagai aktivitas antropogenik dan berpindah antar kompartemen biosfer melalui udara, air, dan daratan. Hal ini menegaskan bahwa permasalahan mikroplastik bersifat lintas ekosistem dan memerlukan pendekatan multidisiplin untuk memahami perilaku, distribusi, serta dampaknya terhadap organisme dan lingkungan. Pengelompokan penelitian mikroplastik berdasarkan karakterisasi, dampak ekologis, serta perilaku dan transportasinya membentuk dasar arah riset terpadu ke depan, meliputi: (i) pengembangan metode standar pengambilan dan analisis sampel; (ii) penerapan sistem klasifikasi dan kuantifikasi yang seragam; (iii) studi lapangan pada tingkat trofik tinggi dan distribusi vertikal; (iv) penelitian transportasi di hilir sungai hingga laut; (v) pemetaan mikroplastik di lingkungan terestrial dan atmosfer; serta (vi) penilaian risiko lingkungan melalui pemodelan dan pemantauan jangka panjang.

Daftar Pustaka

- Adam, M. A., Talbia, H. S., Ariyanti, D., Kristianto, S., Chairunnisa, N. K., Aprilia, M., ... Masruroh, H. (2024). Microplastics contamination in environment and marine animals at Kodek Bay, Lombok, Indonesia. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(12), 789. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07607-2>
- Amoah, I. D., Singh, G., Stenstrom, T. A., & Reddy, P. (2017). Detection and quantification of soil-transmitted helminths in environmental samples : A review of current state-of-the-art and future perspectives. *Acta Tropica*, 169, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2017.02.014>

- Azizah, R. N., Prayogo, W., Mustaqiman, A. N., Awfa, D., & Zubir, M. (2025). Perkembangan penelitian pendidikan lingkungan hidup di kawasan Asia Tenggara selama kurun waktu 1991–2025. *Jurnal Wawasan Pendidikan*, 5(2), 1005–1019. <https://doi.org/10.26877/jwp.v5i2.24369>
- Chairunnisa, N. K., Adam, M. A., Kristianto, S., Candri, D. A., Talbia, H. S., Aprilia, M., ... Prayogo, W. (2025). Linking the tourism activity to the occurrence and distribution of microplastics. *Civil Engineering Journal*, 11(7), 2811–2825. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-010>
- Chen, Y., Shen, Z., Li, G., Wang, K., Cai, X., Xiong, X., & Wu, C. (2022). Factors affecting microplastic accumulation by wild fish: A case study in the Nandu River, South China. *Science of the Total Environment*, 847, 157486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157486>
- Conti, I., Simioni, C., Varano, G., Brenna, C., Costanzi, E., & Neri, L. M. (2021). Legislation to limit the environmental plastic and microplastic pollution and their influence on human exposure. *Environmental Pollution*, 288, 117708. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117708>
- Cubas, A. L. V., Bianchet, R. T., Reis, I. M. A. S. dos, & Gouveia, I. C. (2022). Plastics and Microplastic in the Cosmetic Industry: Aggregating Sustainable Actions Aimed at Alignment and Interaction with UN Sustainable Development Goals. *Polymers*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/polym14214576>
- Cydzik-Kwiatkowska, A., Milojevic, N., & Jachimowicz, P. (2022). The fate of microplastic in sludge management systems. *Science of The Total Environment*, 848, 157466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157466>
- Deng, Y., Zhang, J., Zhang, C., Ding, Z., Hao, C., & An, L. (2020). Countermeasures on plastic and microplastic garbage management. *Microplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges*, 447–469. https://doi.org/10.1007/698_2020_463
- Dewi, N. M. N. B. S. (2022). Studi Literatur Dampak Mikroplastik Terhadap Lingkungan. *Jurnal Sosial Sains Dan Teknologi*, 2(2), 239–250. <http://repository.unhas.ac.id/id/eprint/48288/3/L021211053-Dapus%28FILEminimizer%29.pdf>
- Du, Z., Li, G., Ding, S., Song, W., Zhang, M., Jia, R., & Chu, W. (2024). Effects of UV-based oxidation processes on the degradation of microplastic: Fragmentation, organic matter release, toxicity and disinfection byproduct formation. *Water Research*, 237, 119983. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119983>
- Dusaucy, J., Gateuille, D., Perrette, Y., & Naffrechoux, E. (2021). Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environmental Pollution*, 284, 117075. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117075>
- Fisner, M., Majer, A., Taniguchi, S., Bicego, M., Turra, A., & Gorman, D. (2017). Colour spectrum and resin-type determine the concentration and composition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in plastic pellets. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.072>
- Fries, E., & Zarfl, C. (2012). Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to low and high density polyethylene (PE). *Environmental Science and Pollution Research*, 19(4), 1296–1304. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0655-5>
- Guzzetti, E., Sureda, A., Tejada, S., & Faggio, C. (2018). Microplastic in marine organism:

- Environmental and toxicological effects. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 64, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.10.009>
- Hodson, M. E., Duffus-Hodson, C. A., Clark, A., Prendergast-Miller, M. T., & Thorpe, K. L. (2017). Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4714–4721. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00635>.
- Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., Van Der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2016). Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology*, 50(5), 2685–2691. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05478>
- 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(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Leads, R. R., & Weinstein, J. E. (2019). Occurrence of tire wear particles and other microplastics within the tributaries of the Charleston Harbor Estuary, South Carolina, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.061>
- Li, B., Su, L., Zhang, H., Deng, H., Chen, Q., & Shi, H. (2020). Microplastics in fishes and their living environments surrounding a plastic production area. *Science of the Total Environment*, 727, 138662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138662>
- Li, R., Xi, B., Tan, W., & Yuan, Y. (2022). Spatiotemporal heterogeneous effects of microplastics input on soil dissolved organic matter (DOM) under field conditions. *Science of the Total Environment*, 847, 157605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157605>
- Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2017). Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil. *Chemosphere*, 185, 907–917. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.064>
- Luo, Z., Zhou, X., Su, Y., Wang, H., Yu, R., Zhou, S., Xu, E. G., & Xing, B. (2021). Environmental occurrence, fate, impact, and potential solution of tire microplastics: Similarities and differences with tire wear particles. *Science of the Total Environment*, 795, 148902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148902>
- Olatunji, O. (2022). Microplastics: emerging issues in emerging urbanization. In *Plastic and Polymer Industry by Region: Production, Consumption and Waste Management in the African Continent* (pp. 177–199). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-5231-9>
- Patil, S. M., Rane, N. R., Bankole, P. O., Krishnaiah, P., Ahn, Y., Park, Y. K., Yadav, K. K., Amin, M. A., & Jeon, B. H. (2022). An assessment of micro- and nanoplastics in the biosphere: A review of detection, monitoring, and remediation technology. *Chemical Engineering Journal*, 430(P2), 132913. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132913>
- Pradiptaadi, B. P. A., & Fallahian, F. (2022). Analisis Kelimpahan Mikroplastik Pada Air dan Sedimen di Kawasan Hilir DAS Brantas. *Environmental Pollution Journal*, 2(1), 344–352. <https://doi.org/10.58954/epj.v2i1.39>
- Prayogo, W., Awfa, D., Qadafi, M., Wang, Y. F., & You, S. J. (2025). A comprehensive future research direction of natural organic matter: Findings from bibliometric and systematic reviews. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(8), 527.

<https://doi.org/10.1007/s11270-025-08163-z>

- Shafani, R. H., Nuraini, R. A. T., & Endrawati, H. (2022). Identifikasi Dan Kepadatan Mikroplastik Di Sekitar Muara Sungai Banjir Kanal Barat Dan Banjir Kanal Timur, Kota Semarang, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 11(2), 245–254. <https://doi.org/10.14710/jmr.v11i2.31885>
- Shenoy, A., Haritash, A. K., & Singh, S. K. (2022). Microplastics: Environmental Issues and Their Management. *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development (ICITCSD–2021)*, 95–110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93936-6_9
- Sommer, F., Dietze, V., Baum, A., Sauer, J., Gilge, S., Maschowski, C., & Gieré, R. (2018). Tire abrasion as a major source of microplastics in the environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(8), 2014–2028. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0099>
- Umar, M., Singdahl-Larsen, C., & Rannekleiv, S. B. (2023). Microplastics Removal from a Plastic Recycling Industrial Wastewater Using Sand Filtration. *Water*, 15(5), 896. <https://doi.org/10.3390/w15050896>
- Wright, S. L., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A., & Kelly, F. J. (2020). Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environment International*, 136, 105411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>
- Zobkov, M. B., & Esiukova, E. E. (2018). *Microplastics in a Marine Environment: Review of Methods for Sampling, Processing, and Analyzing Microplastics in Water, Bottom Sediments, and Coastal Deposits*. <https://doi.org/10.1134/S0001437017060169>