

Spatial–Vertical Distribution of Microplastics Abundance and Characteristics in the Coastal Waters of Raha City, Muna Regency

Annisa Syaesar Rahman¹, La Ode Alirman Afu^{1*}, Emiyarti¹, Warsidah²

¹Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia;

²Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Kalimantan Barat, Indonesia;

Article History

Received : December 15th, 2025

Revised : January 10th, 2026

Accepted : January 23th, 2026

*Corresponding Author: **La Ode Alirman Afu**, Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia; Email: alirmanotsudari@uho.ac.id

Abstract: Microplastics are emerging pollutants increasingly detected in coastal waters and may disrupt marine ecosystem functioning as well as pose potential risks to human health. This study aimed to analyze the spatial–vertical distribution of microplastic abundance and characteristics in the coastal waters of Raha City. Sampling was conducted at three stations representing an anthropogenic activity gradient: the harbor/fish landing port (Station I), the tourism–residential area (Station II), and the river mouth (Station III). At each station, samples were collected at three depths (surface, mid-water, and near-bottom) using a plankton net, then filtered and microscopically identified based on microplastic type and color. The results showed a consistent spatial gradient, with the highest mean abundance at Station I (5.58 particles/m³), followed by Station III (4.45 particles/m³), and the lowest at Station II (1.87 particles/m³). Vertically, microplastic abundance tended to be higher in the surface and mid-water layers than near the bottom, indicating the dominance of low-density particles remaining suspended in the water column. Microplastic characteristics were dominated by fibers across all stations, while black-colored particles were most frequently observed, accounting for >30% at each station. These findings confirm the strong contribution of fisheries–harbor activities and land-based waste inputs (particularly via the river mouth) as the main sources of microplastics in the study area. This study provides important baseline data on the three-dimensional distribution of microplastics in the coastal waters of Raha City and underscores the need to strengthen land-based waste management and regulate marine-related activities in the area.

Keywords: Coastal waters, microplastics, Raha City, spatial–vertical distribution, water column.

Pendahuluan

Dua dekade terakhir, mikroplastik diakui sebagai salah satu polutan emergen yang paling mengkhawatirkan di ekosistem laut. Mikroplastik didefinisikan sebagai partikel plastik berukuran kurang dari 5 mm, yang kemunculannya umumnya berasal dari dua sumber utama, yaitu: (1) fragmentasi sampah plastik berukuran lebih besar yang terdegradasi menjadi partikel-partikel kecil (mikroplastik sekunder), dan (2) material yang sejak awal

diproduksi dalam ukuran mikro, seperti pelet industri, mikrobeads pada produk kosmetik, serta berbagai bahan sintetis lainnya (Seoane *et al.*, 2019).

Mikroplastik di lingkungan perairan memiliki karakteristik antara lain luas permukaan relatif besar dan bersifat hidrofobik, sehingga mampu mengadsorpsi berbagai polutan. Selain itu, mikroplastik juga dapat berperan sebagai substrat kolonisasi mikroorganisme dan pembentukan biofilm, yang pada akhirnya berpotensi meningkatkan

kompleksitas risiko ekologis dan kesehatan pada sistem perairan (Frère *et al.*, 2018; B. Zhang *et al.*, 2021). Peningkatan produksi plastik global yang tidak diimbangi oleh sistem pengelolaan sampah yang memadai menyebabkan sebagian besar plastik berakhir di lingkungan, termasuk laut. Di perairan, plastik mengalami pelapukan fisik-kimia dan terfragmentasi menjadi mikroplastik yang persisten serta sulit terdegradasi secara alami (Payel *et al.*, 2025).

Mikroplastik telah dilaporkan terdeteksi pada berbagai kompartemen lingkungan laut, mulai dari perairan permukaan, kolom air, hingga sedimen, serta pada jaringan biota lintas tingkat trofik. Keberadaannya dapat menimbulkan dampak biologis melalui ingestasi akibat salah dikenali sebagai pakan; pada fase larva ikan, paparan mikroplastik dilaporkan berkaitan dengan gangguan pertumbuhan dan reproduksi (Cormier *et al.*, 2022; Fabri-Ruiz *et al.*, 2023). Lebih lanjut, mikroplastik juga menjadi substrat kolonisasi mikroba dan biofilm yang berpotensi mengubah struktur komunitas serta dinamika interaksi ekologis, termasuk kompetisi dalam jejaring makanan ((Frère *et al.*, 2018; Tu *et al.*, 2020). Kombinasi dampak langsung dan tidak langsung tersebut berpotensi meningkatkan tekanan lingkungan serta menurunkan ketahanan biota terhadap paparan polutan lain di perairan.

Keberadaan mikroplastik di kolom air juga dipandang signifikan dalam kaitannya dengan perubahan ekosistem laut dan potensi risiko kesehatan manusia. Organisme akuatik yang terpapar mikroplastik berpotensi mentransfer partikel maupun zat berbahaya yang terikat pada mikroplastik kepada predator tingkat trofik lebih tinggi dalam rantai makanan, termasuk manusia (Kazour *et al.*, 2019).

Zona pesisir merupakan salah satu kawasan yang paling rentan terhadap pencemaran mikroplastik karena berfungsi sebagai antarmuka antara daratan dan laut, sekaligus menampung intensitas aktivitas antropogenik yang tinggi. Aktivitas pelabuhan, perikanan tangkap, permukiman padat penduduk, pariwisata bahari, serta muara sungai yang membawa limpasan limbah dari daratan, secara bersama-sama berkontribusi

sebagai sumber potensial mikroplastik. Sejumlah studi di perairan pesisir menunjukkan bahwa kelimpahan dan karakteristik mikroplastik bervariasi antar lokasi, bergantung pada intensitas aktivitas manusia serta kondisi hidrodinamika seperti arus, pasang surut, dan morfologi pantai yang dapat membentuk zona akumulasi (*hotspot*) partikel plastik.

Selain variasi horizontal (*spasial*), distribusi mikroplastik dalam kolom air juga dipengaruhi oleh faktor vertikal. Perbedaan densitas polimer, ukuran partikel, bentuk (misalnya fiber, film, fragmen, pelet, foam, dan lainnya), serta proses biofouling dan agregasi akan menentukan apakah mikroplastik cenderung mengapung di permukaan, tersuspensi di lapisan tengah, atau tenggelam mendekati dasar (Kooi & Koelmans, 2019). Oleh karena itu, kajian yang hanya berfokus pada satu lapisan (misalnya permukaan saja) berpotensi meremehkan kompleksitas distribusi tiga dimensi dan tidak sepenuhnya merepresentasikan risiko bagi organisme yang menempati kedalaman berbeda.

Di Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan garis pantai yang sangat panjang dan ketergantungan tinggi terhadap sumber daya pesisir-laut, penelitian mengenai mikroplastik terus berkembang. Sejumlah studi telah melaporkan keberadaan mikroplastik di sedimen, padang lamun, kawasan mangrove, serta perairan pesisir di berbagai lokasi, termasuk Teluk Benoa (Bali), Muara Badak (Kalimantan Timur), dan sejumlah teluk serta estuaria lainnya. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa mikroplastik telah menjadi komponen pencemar nyata di perairan nasional, meskipun tingkat dan pola distribusinya berbeda antar lokasi, bergantung pada sumber pencemar dan dinamika perairan.

Namun demikian, masih terdapat kesenjangan pengetahuan terkait distribusi spasial-vertikal mikroplastik di kolom air, khususnya di perairan pesisir Indonesia bagian timur. Salah satu wilayah yang belum banyak tersentuh kajian mikroplastik adalah Perairan Kota Raha, Kabupaten Muna, Sulawesi Tenggara. Kawasan ini memiliki peran penting sebagai pusat aktivitas perikanan (pelabuhan dan Tempat Pelelangan Ikan), kawasan permukiman, serta muara beberapa aliran

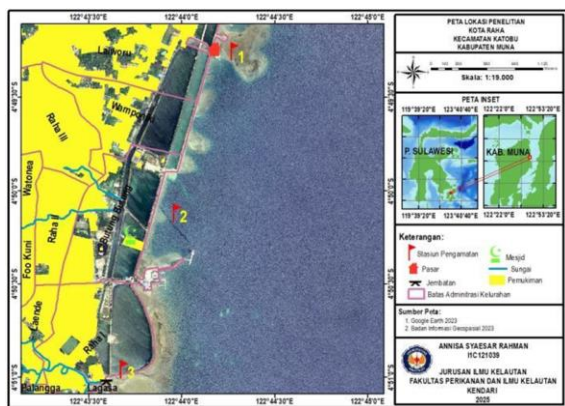
sungai yang berpotensi membawa limbah domestik. Kombinasi aktivitas tersebut berpotensi menjadikan perairan ini sebagai lokasi akumulasi mikroplastik, tetapi data ilmiah mengenai kelimpahan dan karakteristiknya terutama dengan pendekatan spasial–vertikal masih sangat terbatas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi spasial–vertikal kelimpahan dan karakteristik fisik mikroplastik di Perairan Kota Raha, Kabupaten Muna. Hasil penelitian diharapkan dapat menyediakan data dasar (*baseline*) bagi pengelolaan wilayah pesisir Kota Raha, sekaligus memperkaya basis pengetahuan mengenai distribusi tiga dimensi mikroplastik di perairan tropis Indonesia.

Bahan dan Metode

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Februari 2023 di perairan Kota Raha, Kabupaten Muna, Sulawesi Tenggara (Gambar 1). Tiga stasiun dipilih berdasarkan tingkat aktivitas antropogenik yang berbeda: Stasiun I a. Stasiun I berada pada titik koordinat 4°49'19" LS dan 122°44'13" BT (pelabuhan/TPA ikan), Stasiun II berada pada koordinat 4°50'22.5" LS dan 122°43'47.1" BT (permukiman dan wisata), dan Stasiun III berada pada koordinat 4°51'01.1" LS dan 122°43'39.3" BT (muara sungai).

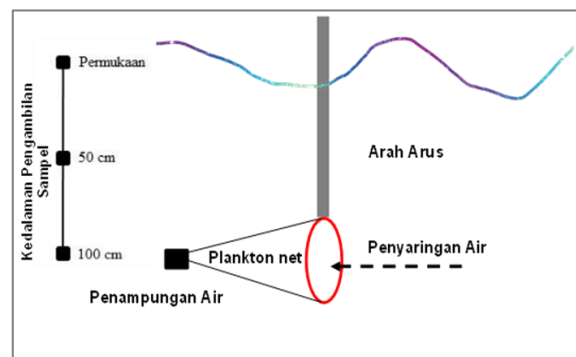


Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Metode pengambilan contoh

Mikroplastik dikumpulkan dengan menyaring air Sungai Cisadane menggunakan plankton net berdiameter 30 cm dan mesh size 30 μ m (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012; Kataoka *et al.*,

2019). Penyaringan dilakukan pada tiga kedalaman: permukaan, 50 cm, dan 100 cm (Manalu, 2017). Untuk kedalaman 50 cm dan 100 cm, jaring dipasang pada tongkat berskala dengan asumsi tidak terjadi pencampuran volume air (Gambar 2). Jaring diarahkan berlawanan arus selama 5 menit per kedalaman (Kataoka *et al.*, 2019). Kecepatan arus diukur menggunakan flowmeter untuk menghitung volume air tersaring dengan asumsi arus muara homogen (Isobe *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2014). Sampel kemudian dimasukkan ke botol dan dianalisis di laboratorium; pengambilan dilakukan satu kali untuk tiap kedalaman



Gambar 2. Skema pengambilan sampel air menggunakan plankton net

Analisis contoh

Analisis laboratorium dilakukan secara visual. Volume sampel hasil penyaringan diukur dengan gelas ukur, kemudian sampel dipisahkan menggunakan saringan bertingkat berukuran 4 mm, 2 mm, 1 mm, dan 500 μ m. Partikel yang tertahan pada tiap saringan diidentifikasi secara visual. Partikel pada saringan 4 mm disortir, diukur dengan penggaris (ketelitian 0,5 mm), lalu dikelompokkan menjadi mikroplastik dan makroplastik. Partikel yang lolos hingga saringan terakhir dianalisis secara mikroskopis (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012). Untuk pengamatan mikroskopis, sampel dimasukkan ke SRC (*Sedgwick Rafter Counter*) dan diamati memakai mikroskop binokuler pada perbesaran 10×10. Pembeda mikroplastik dari partikel non-plastik (Obbard *et al.*, 2014).

Pengukuran kualitas air

Parameter kualitas air yang diamati meliputi suhu, kecepatan arus, pH, dan salinitas. Suhu diukur menggunakan thermometer, pH menggunakan pH-meter, serta salinitas

menggunakan refraktometer. Seluruh parameter diukur secara in situ pada permukaan air dan dilakukan satu kali bersamaan dengan pengambilan contoh.

Perhitungan kelimpahan mikroplastik

Kelimpahan mikroplastik dinyatakan sebagai jumlah partikel per satuan volume air (item/m³). Jumlah partikel dihitung dengan metode sensus, yaitu menyapu seluruh kotak pada SRC (*Sedgwick Rafter Counter*). Kelimpahan dihitung dengan rumus yang diadaptasi dari perhitungan kelimpahan plankton (APHA, 2012), yaitu pada prinsipnya:

$$\text{Kelimpahan (item/m}^3\text{)} = \frac{C \times V_t}{V_h \times V_s} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

C = jumlah partikel yang terhitung dalam SRC (n per 1 mL ruang SRC)

V_t = volume air tersaring/terkonsentrasi (mL)

V_h = volume yang diamati (volume ruang SRC = 1 mL)

V_s = volume air yang disaring (m³)

Volume air yang disaring dihitung dengan:

$$V_s = A \times v \times t \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

V_s = volume air yang disaring (m³)

A = luas bukaan mulut plankton net (m²) = $\pi \times r^2$,
 $\pi = 3,14$

r = jari-jari bukaan mulut plankton net (m)

v = kecepatan arus (m/s)

t = lama penyaringan (s)

Analisis data

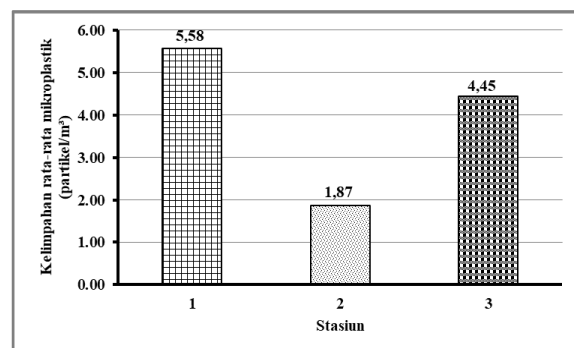
Analisis kelimpahan mikroplastik secara temporal dan spasial diawali dengan uji homogenitas untuk melihat keseragaman varians antar kelompok. Selanjutnya, analisis statistik dilakukan menggunakan uji nonparametrik Kruskal–Wallis dan Mann–Whitney (Claessens *et al.*, 2011). Uji Kruskal–Wallis digunakan untuk menguji perbedaan kelimpahan berdasarkan kedalaman, tipe, dan ukuran mikroplastik. Uji Mann–Whitney digunakan untuk membandingkan dua kelompok, seperti perbedaan antar waktu dan antar lokasi, serta dipakai sebagai uji lanjut jika Kruskal–Wallis

menunjukkan hasil berbeda nyata. Pengolahan data dilakukan dengan Microsoft Excel dan SPSS 25.0.

Hasil dan Pembahasan

Distribusi spasial–vertikal kelimpahan mikroplastik

Partikel mikroplastik terdeteksi di semua stasiun dan kedalaman selama periode pengambilan sampel. Rata-rata total kelimpahan mikroplastik pada kolom air berkisar antara 1,87 hingga 5,58 partikel/m³. Konsentrasi rerata tertinggi tercatat di Stasiun I (Pelabuhan/TPI) sebesar 5,58 partikel/m³, diikuti Stasiun III (Muara Sungai) sebesar 4,45 partikel/m³, sedangkan Stasiun II (Kawasan Permukiman–Wisata) menunjukkan konsentrasi rerata terendah sebesar 1,87 partikel/m³ (Gambar 3).



Gambar 3. Kelimpahan Rata-Rata Mikroplastik

Tabel 1. Persentase jenis mikroplastik yang di temukan berdasarkan tingkat kedalaman

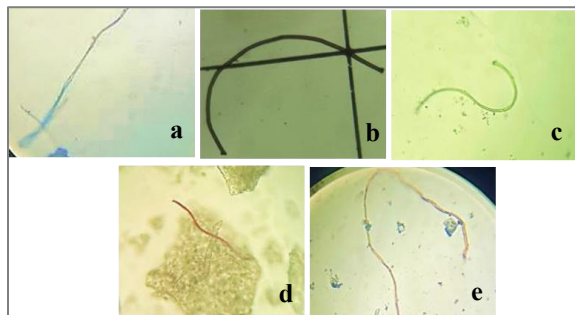
ST	Kedalam an (cm)	Fiber	Film	Frag men	Pellet
I	0	76,7	3,9	5,3	14,0
	50	73,6	8,8	13,7	3,9
	100	56,9	26,9	15,1	1,1
II	0	62,9	10,7	16,9	9,6
	50	59,8	19,3	17,8	3,1
	100	5,8	43,1	42,2	8,9
III	0	61,9	18,0	14,4	5,7
	50	61,7	21,8	15,2	1,3
	100	48,5	24,6	19,0	7,9

Secara vertikal, kelimpahan mikroplastik cenderung lebih tinggi pada lapisan permukaan dan lapisan tengah dibandingkan lapisan dekat dasar. Pada ketiga stasiun, lapisan permukaan secara konsisten memiliki jumlah partikel tertinggi, yang mengindikasikan bahwa sebagian

besar mikroplastik tetap tersuspensi pada bagian atas kolom air (Tabel 1). Hasil ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan dalam kelimpahan mikroplastik antarstasiun ($p < 0,05$), terutama antara Stasiun I dan Stasiun II.

Karakteristik fisik mikroplastik

Analisis mikroskopis menunjukkan bahwa partikel mikroplastik bervariasi dalam bentuk dan warna, dengan serat (fiber) menjadi bentuk yang paling dominan (Gambar 4 yang teramati di semua stasiun dan kedalaman. Bentuk lain yang teridentifikasi meliputi fragmen, film, dan pelet), namun dalam proporsi yang jauh lebih kecil (Tabel 2).



Gambar 4. Warna mikroplastik jenis Fiber yang ditemukan (a) Biru (b) Hitam (c) Hijau (d) Merah (e) Kuning

Tabel 2. Persentase mikroplastik yang ditemukan berdasarkan jenis

Jenis Mikroplastik	Persentase mikroplastik / Stasiun (%)		
	ST.1	ST.2	ST.3
Fiber	23,88	17,27	19,57
Film	6,12	5,67	6,91
Fragmen	4,73	6,02	5,16
pellet	1,50	1,79	1,38

Di antara warna yang teramati, mikroplastik berwarna hitam merupakan yang paling dominan, mencakup 30,71%–35,94% dari partikel. Selanjutnya diikuti oleh partikel berwarna biru, transparan, dan merah. Dominasi serat berwarna gelap mengindikasikan adanya kontribusi dari alat tangkap perikanan, tali sintetis, serta limbah plastik industri yang umum digunakan dalam aktivitas operasional pelabuhan.

Parameter Lingkungan dan Hubungannya dengan Distribusi Mikroplastik

Pengukuran kualitas air selama pengambilan sampel menunjukkan bahwa kecepatan arus berkisar 0,04 m/s–0,07 m/s, suhu berkisar antara 29,4°C–30,1°C, salinitas 32,1–33,5 Ppt, dan nilai pH 7,8–8,2. Kecepatan arus umumnya lebih tinggi di Stasiun II karena lokasi ini lebih terbuka terhadap paparan aliran pasang surut. Analisis korelasi menunjukkan adanya korelasi positif sedang antara kelimpahan mikroplastik dan kecepatan arus pada perairan permukaan, yang mengindikasikan bahwa kondisi hidrodinamika dapat memengaruhi tersuspensinya partikel serta proses transport (perpindahan) partikel. Tidak ditemukan korelasi yang signifikan antara kelimpahan mikroplastik dengan suhu, salinitas, maupun pH, sehingga menunjukkan bahwa faktor oseanografi fisik dan masukan antropogenik memiliki peran yang lebih kuat dalam menentukan pola distribusi mikroplastik dibandingkan kimia perairan semata.

Pembahasan

Distribusi Spasial dan Vertikal Mikroplastik

Keberadaan mikroplastik di seluruh stasiun dan kedalaman yang disampel di perairan Kota Raha menegaskan bahwa kontaminasi mikroplastik telah tersebar luas di lingkungan laut tropis ini. Distribusi yang merata menunjukkan bahwa partikel mikroplastik mampu bertahan dan berpindah melalui dinamika perairan, mencerminkan tekanan antropogenik yang konsisten di berbagai lokasi.

Kelimpahan mikroplastik yang secara signifikan lebih tinggi di Stasiun I (pelabuhan/TPI) menunjukkan bahwa aktivitas kepelabuhanan, seperti penggunaan jaring, tali-temali, serta kemasan plastik, merupakan sumber utama pencemaran mikroplastik secara lokal. Hal ini konsisten dengan temuan Tallec *et al.* (2018), yang menyatakan bahwa mikroplastik cenderung terakumulasi di wilayah yang terpapar langsung oleh aktivitas pelabuhan dan sumber pencemaran lokal lainnya.

Konsentrasi mikroplastik yang lebih tinggi di muara sungai (Stasiun III) mencerminkan adanya masukan signifikan dari sumber berbasis daratan. Hal ini kemungkinan besar berasal dari aliran air

tawar yang membawa limbah domestik dan limpasan permukaan dari kawasan permukiman atau aktivitas perkotaan. Temuan ini memperkuat peran sungai sebagai jalur utama transportasi mikroplastik menuju perairan pesisir, sebagaimana dijelaskan oleh Conan *et al.* (2022), yang menyatakan bahwa sistem sungai merupakan kontributor dominan dalam membawa partikel mikroplastik ke lingkungan laut.

Proses pembilasan alami melalui pasang surut turut memengaruhi distribusi mikroplastik di zona pesisir. Zhang *et al.*, (2021) menjelaskan bahwa sistem hidrologi yang dinamis, dengan sirkulasi air yang baik, dapat mengurangi akumulasi mikroplastik melalui proses pengenceran dan penyebaran. Selain itu, gelombang laut yang cukup kuat berkontribusi terhadap dispersi partikel, memecah dan menyebarkan mikroplastik yang sebelumnya terakumulasi di satu lokasi (Teng *et al.*, 2020).

Lingkungan pesisir yang terbuka cenderung memiliki arus yang lebih kuat dan variasi dalam gelombang, yang mendukung pengenceran dan pemindahan mikroplastik ke area yang lebih luas. Faktor ini telah diobservasi dalam berbagai penelitian, yang menunjukkan bahwa area pesisir dengan dinamika hidrodinamik yang kuat mempunyai konsentrasi mikroplastik yang lebih rendah dibandingkan dengan area yang terpencil atau terhalang (Teng *et al.*, 2020). Di Stasiun II, interaksi antara arus dan gelombang menunjukkan efek positif pada pengurangan akumulasi mikroplastik.

Sebagai perbandingan, di area dengan masukan plastik yang lebih tinggi terjadi akumulasi mikroplastik yang lebih besar, dan populasi biota yang terpengaruh lebih banyak (Teng *et al.*, 2020). Hal ini mendemonstrasikan bahwa akumulasi mikroplastik yang lebih rendah di Stasiun II kemungkinan besar berhubungan dengan kurangnya intervensi manusia serta kondisi fisik lingkungan. Pola distribusi vertikal mikroplastik yang menunjukkan konsentrasi lebih tinggi pada lapisan permukaan dan lapisan tengah sejalan dengan temuan Xu *et al.*, (2021) dan Zhang *et al.* (2021). Stratifikasi ini umumnya disebabkan oleh sifat daya apung polimer berdensitas rendah, seperti polietilena dan polipropilena, yang memungkinkan partikel mikroplastik tetap tersuspensi dalam kolom air dan terkonsentrasi di lapisan atas.

Sebaliknya, mikroplastik yang terdeteksi di lapisan dekat dasar kemungkinan telah mengalami

proses biofouling, yaitu kolonisasi permukaan plastik oleh mikroorganisme, atau mengalami agregasi dengan partikel organik dan anorganik lain di lingkungan perairan. Proses-proses ini meningkatkan densitas efektif mikroplastik, sehingga mengurangi daya apungnya dan mendorong pergerakan vertikal ke arah bawah melalui sedimentasi. Hal ini menunjukkan bahwa dinamika vertikal mikroplastik sangat dipengaruhi oleh interaksi antara sifat fisik polimer dan kondisi biogeokimia perairan.

Partikel mikroplastik yang ditemukan di dekat dasar laut sering kali mengalami proses *biofouling*, yaitu kolonisasi oleh mikroorganisme yang membentuk biofilm pada permukaan partikel (Conan *et al.*, 2022; Tu *et al.*, 2020). *Biofouling* ini merupakan mekanisme penting yang mengubah perilaku lingkungan mikroplastik, terutama dalam hal daya apung dan mobilitas vertikalnya di kolom air. *Biofilm* yang terbentuk terdiri dari koloni bakteri, diatom, dan organisme laut mikroskopis lainnya yang menempel dan berkembang pada permukaan mikroplastik. Kehadiran biofilm tersebut tidak hanya mengubah sifat fisik, seperti tekstur permukaan dan massa partikel, tetapi juga memodifikasi sifat kimia, termasuk potensi interaksi dengan senyawa organik dan anorganik di lingkungan (Hermabessière *et al.*, 2019; Teng *et al.*, 2021).

Akibat terbentuknya biofilm serta terjadinya agregasi dengan bahan organik dan mineral, densitas efektif partikel mikroplastik meningkat. Peningkatan densitas ini mempercepat laju sedimentasi dan mendorong redistribusi partikel dari lapisan permukaan ke dasar laut (Mohsen *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2018). Proses ini menjelaskan akumulasi mikroplastik pada lapisan bawah, meskipun sebagian besar polimer penyusunnya memiliki densitas alami yang lebih rendah dari air laut.

Karakteristik Fisik Mikroplastik

Mikroplastik yang ditemukan didominasi oleh tipe fiber di seluruh stasiun dan kedalaman. Dominasi fiber mengindikasikan bahwa sumber utama mikroplastik berasal dari aktivitas perikanan dan penggunaan bahan sintetis berbasis serat, seperti jaring, tali, dan tekstil. Serat-serat ini cenderung memiliki bentuk memanjang, sehingga memudahkan suspensinya di kolom air, dan memungkinkan untuk menempuh jarak yang signifikan yang difasilitasi oleh arus laut (B. Zhang

et al., 2021). Selain fiber, mikroplastik lain yang ditemukan mencakup fragmen, film, pelet, dan busa, meskipun jumlahnya jauh lebih sedikit. Fragmen umumnya berasal dari degradasi plastik keras akibat radiasi UV dan proses mekanis. Paparan sinar UV mempercepat pemecahan rantai polimer dan memperkuat fragmentasi fisik, menunjukkan peran ganda dalam proses degradasi (Han *et al.*, 2021; Mohsen *et al.*, 2020).

Di sisi lain, Biofilm yang terbentuk dapat mengubah sifat permukaan mikroplastik, meningkatkan interaksi kimia dengan lingkungan sekitarnya, serta mempengaruhi laju degradasi plastik itu sendiri (Tu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021). Pelet plastik, atau yang dikenal sebagai nurdles, merupakan bahan baku utama dalam industri manufaktur plastik. Partikel ini umumnya berukuran kecil, berbentuk bulat atau oval, dan digunakan dalam produksi berbagai produk plastik, mulai dari kemasan hingga peralatan rumah tangga. Keberadaan nurdles di lingkungan laut mencerminkan bentuk awal polusi plastik sebelum mengalami proses penggunaan dan degradasi lebih lanjut.

Pelepasan nurdles ke lingkungan perairan sering terjadi secara tidak langsung. Insiden dapat terjadi selama proses produksi di pabrik, saat pemindahan antar fasilitas industri, maupun saat bongkar muat di pelabuhan. Karena ukurannya yang kecil dan ringan, pelet ini mudah tersebar dan sulit ditangani jika tidak ada pengawasan ketat. Kebocoran kecil yang terjadi secara terus-menerus dapat menghasilkan akumulasi partikel yang signifikan di lingkungan pesisir (Frias & Nash, 2019).

Selain nurdles, jenis mikroplastik lain yang turut menyumbang pencemaran adalah busa atau foam, khususnya yang berbahan dasar styrofoam. Material ini banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti untuk pengemasan makanan, pelampung perikanan, dan peralatan pendingin. Namun, sifat fisiknya yang rapuh membuat styrofoam sangat mudah pecah menjadi partikel mikro saat terkena tekanan atau pengaruh cuaca. Di lingkungan terbuka, fragmen-fragmen kecil ini dapat tersebar luas dan berkontribusi sebagai mikroplastik sekunder di perairan.

Keberadaan berbagai tipe mikroplastik, meskipun tidak mendominasi, menunjukkan bahwa pencemaran mikroplastik di wilayah ini tidak hanya bersumber dari sektor perikanan, tetapi juga berasal dari aktivitas domestik dan limbah plastik rumah

tangga. Jenis-jenis seperti fragmen, film, pelet, dan busa mencerminkan kontribusi dari penggunaan plastik dalam kehidupan sehari-hari yang akhirnya terbawa ke lingkungan perairan melalui aliran limbah atau limpasan permukaan.

Variasi spasial dalam distribusi mikroplastik di antara stasiun pengamatan menunjukkan adanya perbedaan intensitas dan karakteristik sumber pencemar di tiap lokasi. Demikian pula, distribusi vertikal mikroplastik yang berbeda di setiap lapisan air mencerminkan adanya dinamika fisik, seperti arus, turbulensi, dan proses sedimentasi, yang turut menentukan jalur transportasi dan akumulasi partikel. Kombinasi dari variasi spasial dan vertikal ini mengindikasikan kompleksitas sistem perairan dalam menanggapi masukan mikroplastik dari berbagai sumber. Temuan ini sejalan dengan penelitian Teng *et al.* (2020), distribusi dan dampak mikroplastik di perairan pesisir sangat dipengaruhi oleh interaksi antara sumber dan faktor lingkungan, termasuk arus laut dan pola sirkulasi.

Warna mikroplastik merupakan indikator penting yang dapat memberikan informasi mengenai sumber asal partikel serta potensi risikonya terhadap organisme laut. Dalam penelitian ini, mikroplastik berwarna hitam ditemukan sebagai warna yang paling dominan, dengan proporsi yang sangat tinggi pada seluruh stasiun dan kedalaman yang diamati. Dominasi ini mencerminkan kecenderungan penggunaan plastik berwarna gelap di sektor-sektor tertentu yang beraktivitas intensif di wilayah pesisir.

Secara umum, warna hitam pada plastik dikaitkan dengan produk industri dan peralatan perikanan, seperti jaring tahan sinar ultraviolet (UV), pelampung, tali-temali, serta komponen kapal. Warna ini biasanya berasal dari penambahan karbon hitam dalam proses produksi plastik, yang berfungsi sebagai penstabil terhadap radiasi UV. Penambahan karbon hitam dalam proses produksi plastik menjadi faktor utama yang memberikan warna hitam ini. Karbon hitam berfungsi sebagai penstabil terhadap radiasi UV, meningkatkan daya tahan material terhadap degradasi fotooksidatif dan memperpanjang masa pakai produk di lingkungan terbuka (Teng *et al.*, 2019; B. Zhang *et al.*, 2021).

Dominasi warna hitam pada mikroplastik yang ditemukan di wilayah ini memperkuat dugaan bahwa sumber pencemaran utama berasal dari aktivitas pelabuhan dan perikanan. Jenis plastik yang digunakan di sektor tersebut umumnya dirancang untuk tahan terhadap kondisi lingkungan

laut yang ekstrem, sehingga sering mengandung karbon hitam sebagai penstabil UV. Material ini banyak ditemukan pada jaring, tali-temali, pelampung, dan komponen kapal lainnya yang digunakan secara intensif dalam kegiatan maritim.

Kegiatan rutin di kawasan pelabuhan, seperti perbaikan jaring, pembongkaran muatan, serta pembuangan peralatan yang sudah tidak layak pakai, merupakan jalur utama pelepasan fragmen plastik ke lingkungan laut. Aktivitas-aktivitas ini tidak jarang dilakukan di area terbuka atau langsung di atas perairan, sehingga berkontribusi langsung terhadap masuknya mikroplastik ke dalam ekosistem pesisir.

Selain itu, abrasi mekanis yang terjadi selama penggunaan alat tangkap di laut juga merupakan sumber signifikan pelepasan mikroplastik. Kontak berulang antara peralatan dan substrat laut, seperti batuan karang atau dasar perairan, menyebabkan keausan bertahap pada bahan sintesis, melepaskan serat-serat kecil atau fragmen plastik ke kolom air secara perlahan namun terus-menerus (Lusher *et al.*, 2017). Temuan ini menegaskan pentingnya sektor perikanan sebagai kontributor utama dalam kontaminasi mikroplastik di perairan pesisir Kota Raha.

Warna lain yang ditemukan dalam sampel mikroplastik mencakup biru, transparan, merah, kuning, dan putih, meskipun jumlahnya jauh lebih sedikit dibandingkan warna hitam. Warna-warna ini umumnya diasosiasikan dengan plastik konsumen, seperti botol air mineral (transparan dan biru), tas belanja plastik (merah dan kuning), serta berbagai produk rumah tangga lainnya. Meskipun proporsinya rendah, keberadaan mikroplastik berwarna cerah ini mengindikasikan adanya kontribusi dari limbah domestik. Produk-produk plastik yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari dapat terbawa ke lingkungan perairan melalui aliran sungai, saluran pembuangan domestik, atau limpasan permukaan, khususnya selama musim hujan ketika intensitas aliran meningkat.

Temuan ini menunjukkan bahwa, meskipun bukan merupakan sumber utama, aktivitas rumah tangga tetap memberikan kontribusi nyata terhadap pencemaran mikroplastik di wilayah pesisir. Warna-warna cerah seperti merah, kuning, putih, biru, dan transparan yang ditemukan dalam jumlah terbatas mengindikasikan adanya masukan dari plastik konsumen, termasuk botol kemasan, tas plastik, dan alat rumah tangga. Produk-produk ini umum digunakan dalam aktivitas domestik dan

sangat mungkin terbawa ke lingkungan laut melalui saluran drainase dan sungai.

Limpasan permukaan selama musim hujan merupakan salah satu mekanisme utama transportasi mikroplastik dari lingkungan daratan ke wilayah pesisir. Aliran air yang meningkat mampu membawa partikel plastik ringan dari jalan, halaman, tempat pembuangan sampah, maupun daerah pemukiman langsung ke badan air. Hal ini diperkuat oleh Uguen *et al.*, (2023), yang menyatakan bahwa sistem drainase di kawasan urban dan padat penduduk berfungsi sebagai jalur signifikan dalam mengalirkan plastik konsumen menuju perairan laut.

Meskipun proporsinya rendah dibandingkan mikroplastik dari sektor perikanan dan pelabuhan, kontribusi plastik konsumen tetap penting untuk diperhatikan dalam upaya pengendalian pencemaran. Keberadaan warna-warna mencolok pada mikroplastik ini dapat menjadi indikator tambahan untuk mengidentifikasi sumber pencemar, terutama dalam konteks perencanaan manajemen limbah domestik. Penanganan yang kurang tepat terhadap sampah rumah tangga berpotensi memperburuk akumulasi mikroplastik dalam sistem perairan pesisir.

Warna mikroplastik juga memainkan peran penting dalam interaksi ekologis, khususnya dalam konteks visual antara partikel plastik dan organisme laut. Mikroplastik berwarna gelap, seperti hitam dan biru tua, memiliki kontras visual rendah terhadap latar belakang laut, terutama di perairan keruh atau dalam kondisi pencahayaan rendah. Akibatnya, partikel ini lebih sulit dikenali oleh organisme filtrator atau predator visual, sehingga meningkatkan kemungkinan untuk tertelan secara tidak sengaja (Wright *et al.*, 2013).

Kondisi ini berpotensi mempercepat proses akumulasi mikroplastik dalam tubuh biota laut dan memperbesar risiko perpindahan partikel tersebut dalam rantai makanan. Mikroplastik yang tertelan oleh organisme kecil dapat berpindah ke predator tingkat trofik yang lebih tinggi, hingga akhirnya masuk ke dalam sistem pangan manusia. Oleh karena itu, pemahaman terhadap warna dan karakter visual mikroplastik tidak hanya penting dari sisi identifikasi sumber, tetapi juga dalam penilaian risiko ekologis dan kesehatan publik.

Karakteristik fisik mikroplastik, baik dari segi bentuk maupun warna, memainkan peran penting dalam menentukan distribusi spasial dan vertikal partikel di kolom air, sekaligus

memengaruhi potensi dampaknya terhadap organisme laut. Faktor-faktor ini tidak hanya memengaruhi perilaku fisik mikroplastik di lingkungan, tetapi juga menentukan tingkat interaksinya dengan biota akuatik.

Fiber, sebagai bentuk mikroplastik yang dominan dalam penelitian ini, memiliki karakteristik morfologi yang menyerupai filamen alami seperti ganggang atau detritus organik. Kemiripan ini menyebabkan fiber lebih mudah tertelan oleh organisme laut, terutama spesies yang mengandalkan penyaringan atau penglihatan untuk memperoleh makanan. Dengan tertelannya fiber, risiko paparan terhadap bahan kimia aditif pada plastik, serta kontaminan lingkungan yang teradsorpsi di permukaannya, menjadi lebih tinggi (McIlwraith *et al.*, 2021; Wright *et al.*, 2013).

Interaksi mikroplastik dengan biota laut terbukti menimbulkan dampak fisiologis yang signifikan. Sejumlah studi menunjukkan bahwa ingestasi mikroplastik dapat menyebabkan luka internal, peradangan jaringan, dan penurunan nafsu makan pada ikan. Gangguan-gangguan ini dapat menghambat pertumbuhan dan reproduksi, dan dalam kondisi paparan tinggi, bahkan dapat berujung pada kematian organisme (Cormier *et al.*, 2022; Justino *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2021).

Skala permasalahan ini tergambar dari temuan mikroplastik dalam berbagai spesies ikan di beragam habitat laut. Partikel mikroplastik bahkan ditemukan di saluran pencernaan ikan yang dikonsumsi manusia (Fabri-Ruiz *et al.*, 2023; Justino *et al.*, 2022), yang mengindikasikan potensi risiko tidak hanya bagi organisme akuatik, tetapi juga bagi manusia sebagai bagian akhir dari rantai makanan (Akoueson *et al.*, 2020). Selain itu, dominasi warna hitam pada mikroplastik memiliki implikasi termal yang signifikan. Plastik berwarna gelap, seperti hitam, memiliki kemampuan menyerap energi matahari lebih besar dibandingkan plastik berwarna cerah. Akibatnya, partikel mikroplastik berwarna gelap dapat menjadi titik panas mikro di dalam kolom air, menciptakan kondisi termal yang berbeda dari lingkungan sekitarnya. Perbedaan suhu mikro ini berpotensi memengaruhi proses fisik dan biologis di sekitarnya, termasuk aktivitas mikroba (Seoane *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2021).

Kondisi termal tersebut dapat mengubah struktur dan fungsi komunitas mikroba yang membentuk biofilm pada permukaan mikroplastik. Perubahan ini dapat memengaruhi interaksi antar

mikroorganisme serta proses ekologis penting, seperti dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi. Dalam jangka panjang, ketidakseimbangan mikroekosistem ini dapat berdampak pada dinamika komunitas planktonik dan kualitas ekosistem perairan secara keseluruhan.

Lebih lanjut, biofilm yang terbentuk di permukaan mikroplastik juga dapat memperbesar daya apung partikel, memungkinkan mikroplastik tetap tersuspensi lebih lama di kolom air. Selain itu, permukaan yang telah dilapisi biofilm menjadi habitat yang sesuai bagi organisme asing, termasuk spesies invasif. Proses kolonisasi ini meningkatkan risiko penyebaran organisme non-asli antar wilayah, yang dapat menimbulkan tekanan ekologis tambahan bagi ekosistem lokal (Zettler *et al.*, 2013). Dengan demikian, warna mikroplastik tidak hanya berimplikasi pada aspek visual dan sumber pencemaran, tetapi juga berkontribusi terhadap dampak ekologis yang lebih kompleks di lingkungan laut.

Parameter Lingkungan dan Hubungannya dengan Distribusi Mikroplastik

Distribusi mikroplastik di perairan laut dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan yang mencakup parameter fisik dan kimia. Dalam konteks ini, penting untuk memahami bagaimana variabel-variabel tersebut berinteraksi dan berkontribusi terhadap pola sebaran mikroplastik, baik secara horizontal maupun vertikal, di ekosistem laut. Penelitian ini mengukur beberapa parameter lingkungan utama, yaitu suhu, salinitas, pH, dan kecepatan arus, untuk mengevaluasi keterkaitannya dengan distribusi spasial mikroplastik di perairan pesisir Kota Raha. Pengukuran dilakukan secara sistematis pada berbagai stasiun dan kedalaman, guna memperoleh gambaran yang representatif mengenai kondisi lingkungan setempat.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa suhu perairan berada pada kisaran 27–30°C, salinitas antara 32–34 Ppt, dan pH sekitar 7,9–8,2. Nilai-nilai ini masih berada dalam batas normal bagi kehidupan organisme laut tropis dan tidak menunjukkan variasi ekstrem antar stasiun. Dengan demikian, faktor-faktor ini diperkirakan tidak menjadi pengendali utama dalam distribusi mikroplastik di wilayah studi. Distribusi mikroplastik di perairan Kota Raha menunjukkan bahwa parameter kimia seperti suhu, salinitas, dan pH tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap

variasi kelimpahan mikroplastik antar stasiun. Ketiganya tercatat dalam kisaran normal dan relatif stabil di seluruh titik pengamatan. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya Tang *et al.*, (2018) dan Teng *et al.*, (2020) yang menunjukkan bahwa distribusi mikroplastik lebih dipengaruhi oleh faktor fisik dan aktivitas antropogenik dibandingkan kondisi kimia perairan.

Sebaliknya, kecepatan arus laut memiliki keterkaitan yang lebih kuat dengan pola distribusi mikroplastik, terutama pada lapisan permukaan. Arus yang lebih cepat menjaga partikel tetap tersuspensi dan memfasilitasi penyebaran horizontal, seperti yang teramati di kawasan wisata-permukiman dengan sirkulasi air terbuka dan kelimpahan mikroplastik lebih rendah. Sebaliknya, area pelabuhan dan teluk yang cenderung tertutup memiliki arus lemah dan akumulasi mikroplastik lebih tinggi.

Arus permukaan laut memiliki kemampuan untuk membawa mikroplastik dari sumber pencemaran ke area yang jauh, mempengaruhi distribusi dan konsentrasi mikroplastik di permukaan air. Arus dapat berkontribusi pada penyebaran bahan pencemar ini (Tang *et al.*, 2018). Di samping itu, interaksi antara mikroplastik dan faktor lingkungan, seperti suhu dan salinitas, juga dapat mempengaruhi pergerakan dan agregasi mikroplastik dalam sistem laut (Frère *et al.*, 2018; Tu *et al.*, 2020).

Kesimpulan

Distribusi spasial–vertikal mikroplastik di perairan Kota Raha menunjukkan pola kontaminasi yang nyata, dengan konsentrasi tertinggi teridentifikasi di kawasan pelabuhan dan muara sungai. Mikroplastik yang dominan berupa serat berwarna hitam menandakan kuatnya kontribusi aktivitas antropogenik, terutama dari sektor perikanan dan limbah daratan. Secara vertikal, kelimpahan yang lebih tinggi pada lapisan permukaan dan tengah mengindikasikan karakteristik fisik polimer berdensitas rendah yang memungkinkan partikel tetap tersuspensi dalam kolom air. Temuan ini menegaskan bahwa perairan Kota Raha merupakan zona akumulasi mikroplastik aktif dan menyoroti urgensi penanganan terpadu terhadap sumber pencemar dari laut dan darat. Oleh karena itu, hasil ini dapat dijadikan dasar ilmiah untuk perumusan strategi pengelolaan

pesisir yang berkelanjutan serta pengendalian polusi plastik di wilayah tropis Indonesia.

Referensi

- Akoueson, F., Sheldon, L. M., Danopoulos, E., Morris, S., Hotten, J., Chapman, E., Li, J., & Rotchell, J. M. (2020). A Preliminary Analysis of Microplastics in Edible Versus Non-Edible Tissues From Seafood Samples. *Environmental Pollution*, 263, 114452.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114452>
- APHA (American Public Health Association). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington DC (US): AWWA (American Water Works Association) and WEF (Water Environment Federation)
- Claessens, M., Meester, S. De, Landuyt, L. Van, Clerck, K. De, & Janssen, C. R. (2011). Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast. *Marine Pollution Bulletin*, 62(10), 2199–2204.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.030>
- Conan, P., Philip, L., Ortega-Retuerta, E., Odobel, C., Duran, C., Pandin, C., Giraud, C., Meistertzheim, A., Barbe, V., Hall, A. Ter, Pujo-Pay, M., & Ghiglione, J. (2022). Evidence of Coupled Autotrophy and Heterotrophy on Plastic Biofilms and Its Influence on Surrounding Seawater. *Environmental Pollution*, 315, 120463.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120463>
- Cormier, B., Cachot, J., Blanc, M., Cabar, M., Clérandeau, C., Dubocq, F., Bihanic, F. Le, Morin, B., Zapata, S., Bégout, M., & Cousin, X. (2022). Environmental Microplastics Disrupt Swimming Activity in Acute Exposure in Danio Rerio Larvae and Reduce Growth and Reproduction Success in Chronic Exposure in D. Rerio and Oryzias Melastigma. *Environmental Pollution*, 308, 119721.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119721>
- Fabri-Ruiz, S., Baudena, A., Moullec, F., Lombard, F., Irissou, J., & Pedrotti, M. L.

- (2023). Mistaking Plastic for Zooplankton: Risk Assessment of Plastic Ingestion in the Mediterranean Sea. *The Science of the Total Environment*, 856, 159011. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159011>
- Frère, L., Maignien, L., Chalopin, M., Huvet, A., Rinnert, E., Morrison, H. G., Kerninon, S., Cassone, A.-L., Lambert, C., Réveillaud, J., & Paul-Pont, I. (2018). Microplastic Bacterial Communities in the Bay of Brest: Influence of Polymer Type and Size. *Environmental Pollution*, 242, 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.023>
- Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Han, H., Wang, Z., Wang, J., Wang, T., Li, Y., Guan, D., & Sun, H. (2021). Impact of High Dietary Cornstarch Level on Growth, Antioxidant Response, and Immune Status in GIFT Tilapia *Oreochromis niloticus*. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86172-8>
- Hermabessière, L., Paul-Pont, I., Cassone, A.-L., Himber, C., Receveur, J., Jézéquel, R., Rakwe, M. El, Rinnert, E., Rivière, G., Lambert, C., Huvet, A., Dehaut, A., Duflos, G., & Soudant, P. (2019). Microplastic Contamination and Pollutant Levels in Mussels and Cockles Collected Along the Channel Coasts. *Environmental Pollution*, 250, 807–819. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.051>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Justino, A. K. S., Ferreira, G. V. B., Schmidt, N., Eduardo, L. N., Fauvelle, V., Lenoble, V., Sempéré, R., Panagiotopoulos, C., Mincarone, M. M., Frédou, T., & Lucena-Frédou, F. (2022). The Role of Mesopelagic Fishes as Microplastics Vectors Across the Deep-Sea Layers From the Southwestern Tropical Atlantic. *Environmental Pollution*, 300, 118988. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118988>
- Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K., & Hinata, H. (2019). Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan. *Environmental Pollution*, 244, 958–965. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.111>
- Kazour, M., Jemaa, S., Issa, C., Khalaf, G., & Amara, R. (2019). Microplastics Pollution Along the Lebanese Coast (Eastern Mediterranean Basin): Occurrence in Surface Water, Sediments and Biota Samples. *The Science of the Total Environment*, 696, 133933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133933>
- Kooi, M., & Koelmans, A. A. (2019). Simplifying Microplastic via Continuous Probability Distributions for Size, Shape, and Density. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(9), 551–557. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00379>
- Lusher, A. L., Welden, N. A., Sobral, P., & Cole, M. (2017). Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Analytical Methods*, 9(9), 1346–1360. <https://doi.org/10.1039/C6AY02415G>
- McIlwraith, H. K., Kim, J., Helm, P., Bhavsar, S. P., Metzger, J. S., & Rochman, C. M. (2021). Evidence of Microplastic Translocation in Wild-Caught Fish and Implications for Microplastic Accumulation Dynamics in Food Webs. *Environmental Science & Technology*, 55(18), 12372–12382. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02922>
- Manalu, A. A. (2017). *Kelimpahan mikroplastik di Teluk Jakarta* (Tesis). Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia
- Mohsen, M., Zhang, L., Sun, L., Lin, C., Wang, Q., & Yang, H. (2020). Microplastic Fibers Transfer From the Water to the Internal Fluid of the Sea Cucumber *Apostichopus japonicus*. *Environmental Pollution*, 257, 113606.

- <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113606>
- Obbard, R. W., Sadri, S., Wong, Y. Q., Khitun, A. A., Baker, I., & Thompson, R. C. (2014). Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*, 2(6), 315–320. <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>.
- Payel, S., Pahlevani, F., Ghose, A., & Sahajwalla, V. (2025). From Bulk to Bits: Understanding The Degradation Dynamics from Plastics to Microplastics, Geographical Influences and Analytical Approaches. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 44(4), 895–915. <https://doi.org/10.1093/etjnl/vgaf037>.
- Seoane, M., González-Fernández, C., Soudant, P., Huvet, A., Esperanza, M., Cid, Á., & Paul-Pont, I. (2019). Polystyrene Microbeads Modulate the Energy Metabolism of the Marine Diatom *Chaetoceros Neogracile*. *Environmental Pollution*, 251, 363–371. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.142>
- Sun, T., Zhan, J., Li, F., Ji, C., & Wu, H. (2021). Effect of Microplastics on Aquatic Biota: A Hormetic Perspective. *Environmental Pollution*, 285, 117206. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117206>
- Taltec, K., Huvet, A., Poi, C. Di, González-Fernández, C., Lambert, C., Petton, B., Goïc, N. Le, Berchel, M., Soudant, P., & Paul-Pont, I. (2018). Nanoplastics Impaired Oyster Free Living Stages, Gametes and Embryos. *Environmental Pollution*, 242, 1226–1235. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.020>
- Tang, G., Liu, M., Zhou, Q., He, H., Chen, K., Zhang, H., Hu, J., Huang, Q., Luo, Y., Ke, H., Chen, B., Xu, X., & Cai, M. (2018). Microplastics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Xiamen Coastal Areas: Implications for Anthropogenic Impacts. *The Science of the Total Environment*, 634, 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.336>
- Teng, J., Wang, Q., Ran, W., Wu, D., Liu, Y., Sun, S., Liu, H., Cao, R., & Zhao, J. (2019). Microplastic in Cultured Oysters From Different Coastal Areas of China. *The Science of the Total Environment*, 653, 1282–1292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.057>
- Teng, J., Zhao, J., Zhang, C., Cheng, B., Koelmans, A. A., Wu, D., Gao, M., Sun, X., Liu, Y., & Wang, Q. (2020). A Systems Analysis of Microplastic Pollution in Laizhou Bay, China. *The Science of the Total Environment*, 745, 140815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140815>
- Teng, J., Zhao, J., Zhu, X., Shan, E., Zhang, C., Zhang, W., & Wang, Q. (2021). Toxic Effects of Exposure to Microplastics With Environmentally Relevant Shapes and Concentrations: Accumulation, Energy Metabolism and Tissue Damage in Oyster *Crassostrea Gigas*. *Environmental Pollution*, 269, 116169. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116169>
- Tu, C., Chen, T., Zhou, Q., Liu, Y., Wei, J., Waniek, J. J., & Luo, Y. (2020). Biofilm Formation and Its Influences on the Properties of Microplastics as Affected by Exposure Time and Depth in the Seawater. *The Science of the Total Environment*, 734, 139237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139237>
- Uguen, M., Gaudron, S. M., Nicastro, K. R., Zardi, G. I., Spilmont, N., & Seuront, L. (2023). Size-Dependent Response of the Mussel Collective Behaviour to Plastic Leachates and Predator Cues. *The Science of the Total Environment*, 888, 164037. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164037>
- Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
- Xu, Y., Chan, F. K. S., Stanton, T. H., Johnson,

-
- M. F., Kay, P., He, J., Wang, J., Kong, C., Wang, Z., Liu, D., & Xu, Y. (2021). Synthesis of Dominant Plastic Microfibre Prevalence and Pollution Control Feasibility in Chinese Freshwater Environments. *The Science of the Total Environment*, 783, 146863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146863>
- Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “Plastisphere”: Microbial Communities on Plastic Marine Debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>
- Zhang, B., Yang, X., Liu, L., Chen, L., Teng, J., Zhu, X., Zhao, J., & Wang, Q. (2021). Spatial and Seasonal Variations in Biofilm Formation on Microplastics in Coastal Waters. *The Science of the Total Environment*, 770, 145303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145303>
- Zhang, Y., Soerensen, A. L., Schartup, A. T., & Sunderland, E. M. (2020). A Global Model for Methylmercury Formation and Uptake at the Base of Marine Food Webs. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(2). <https://doi.org/10.1029/2019gb006348>