

Studi Hidrodinamika dan Dispersi Mikroplastik di Muara Sungai Loji, Pekalongan, Jawa Tengah

Abrar Dalifasha Azhary¹, Aris Ismanto^{1*}, Tony Hadibarata², Muhammad Zainuri¹

*Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia*
*Department of Civil and Construction Engineering, Faculty of Engineering & Science,
Curtin University
CDT 250, 98009 Miri, Sarawak, Malaysia.
Email: *aris109@lecturer.undip.ac.id*

Abstrak

Pekalongan, yang dikenal sebagai kota batik, mengalami peningkatan timbunan sampah harian dari 418.182 m³/hari menjadi 478.642 m³/hari pada tahun 2023, yang berpotensi memperbesar kontaminasi mikroplastik di perairan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sebaran dan kelimpahan mikroplastik pada permukaan air dan sedimen di kawasan muara hingga pesisir Sungai Loji, Pekalongan. Pengambilan sampel dilakukan secara in-situ di 11 stasiun, dengan mempertimbangkan kondisi pasang menuju surut dari hulu ke arah pesisir. Analisis kelimpahan dilakukan di laboratorium, sementara sebaran mikroplastik dimodelkan menggunakan pendekatan hidrodinamika dan *particle tracking* dua dimensi. Hasil menunjukkan kelimpahan mikroplastik pada air berkisar 6,9–28 partikel/m³ dan pada sedimen 587,5–682,5 partikel/kg, dengan bentuk fragment dan warna hitam mendominasi lebih dari 50% sampel. Konsentrasi tertinggi pada air ditemukan di area perairan terbuka, sedangkan pada sedimen terkonsentrasi di wilayah pesisir. Faktor-faktor seperti aktivitas antropogenik, debit sungai, angin, dan arus laut memengaruhi distribusi, sementara keberadaan jetty di pesisir memperkuat akumulasi partikel di dasar perairan. Pola distribusi divergen teridentifikasi melalui model hidrodinamika yang menggambarkan pengaruh arus pasang surut dan arus sejajar pantai.

Kata kunci: Mikroplastik; distribusi spasial; Particle Tracking; Model Hidrodinamika; Pekalongan

Abstract

Analysis of the Distribution and Abundance of Microplastics in the Waters of the Loji River Estuary, Pekalongan, Central Java.

Pekalongan, known as the city of batik, has experienced an increase in daily waste generation from 418,182 m³/day to 478,642 m³/day in 2023, potentially exacerbating microplastic contamination in aquatic environments. This study aimed to examine the distribution and abundance of microplastics in both surface water and sediment, spanning from estuarine to coastal areas of the Loji River in Pekalongan. Sampling was carried out in situ at 11 stations, taking into account tidal conditions from the upstream areas to the coastal zone. In the laboratory, microplastic abundance was analyzed, and distribution patterns were modeled using a two-dimensional hydrodynamic and particle tracking approach. The findings indicated that the abundance of microplastics ranged from 6.9 to 28 particles per cubic meter in water and from 587.5 to 682.5 particles per kilogram in sediment. Notably, fragments and black-colored particles constituted more than 50% of the samples. In water, the highest concentrations were found in open areas, while in sediment, they were concentrated in the coastal region. The distribution was affected by anthropogenic activities, river discharge, wind, and ocean currents, with jetty structures contributing to the accumulation of particles in the bottom sediments. Hydrodynamic modeling revealed a divergent distribution pattern, underscoring the influence of tidal and longshore currents on particle movement.

Keywords: Microplastics; Hydrodynamics; Particle Tracking; Loji River; Pekalongan

PENDAHULUAN

Pekalongan merupakan salah satu wilayah pesisir di Provinsi Jawa Tengah yang berbatasan langsung dengan Laut Jawa dan dikenal luas sebagai sentra industri batik nasional. Aktivitas industri batik yang berkembang mulai dari skala besar hingga rumah tangga telah menjadi bagian penting dari dinamika sosial ekonomi kota ini. Namun, di balik kontribusinya terhadap perekonomian, proses produksi tersebut turut menghasilkan limbah, termasuk limbah plastik, yang berpotensi mencemari lingkungan perairan. Selain itu, penggunaan plastik dalam kehidupan sehari-hari masyarakat Pekalongan juga terus meningkat seiring pertumbuhan aktivitas urban.

Menurut data Dinas Lingkungan Hidup Kota Pekalongan, jumlah timbunan sampah harian menunjukkan tren peningkatan pada tahun 2023, yang mencerminkan potensi peningkatan beban pencemaran di lingkungan, termasuk risiko akumulasi mikroplastik. Dalam konteks ini, perairan Kota Pekalongan, khususnya di kawasan muara seperti Sungai Loji, menjadi area yang rentan terhadap pencemaran akibat aliran limbah domestik maupun industri. Sungai Loji sendiri merupakan salah satu sungai utama yang bermuara ke Laut Jawa dan dikelilingi oleh kawasan permukiman, aktivitas perikanan, serta kegiatan industri yang beragam. Tingginya tekanan dari aktivitas antropogenik di sepanjang aliran sungai hingga ke wilayah pesisir menjadikan kawasan ini penting untuk dikaji dalam konteks distribusi dan akumulasi mikroplastik. Tingginya intensitas aktivitas masyarakat di kawasan Muara Sungai Loji, termasuk sektor rumah tangga, perikanan, pertanian, dan wirausaha, berkontribusi terhadap peningkatan beban pencemaran, khususnya dari limbah plastik yang berpotensi menjadi mikroplastik. Kawasan pesisir dan estuarin seperti muara Sungai Loji merupakan wilayah yang rentan terhadap akumulasi limbah dari darat, karena karakteristiknya yang menjadi zona transisi antara ekosistem perairan tawar dan laut. Sampah plastik yang masuk ke perairan dapat mengalami proses degradasi melalui mekanisme fisik, kimia, maupun biologis, yang pada akhirnya menghasilkan partikel berukuran mikro, atau disebut mikroplastik.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sedimen laut memiliki kemampuan untuk menumpuk partikel mikroplastik akibat proses sedimentasi yang berlangsung secara kontinu, sehingga menjadi salah satu media utama akumulasi partikel ini di lingkungan perairan. Jika tidak terkontrol, keberadaan mikroplastik berpotensi menjadi sumber kontaminasi jangka panjang dan menimbulkan dampak ekologis serta sosial yang signifikan, menjadikannya isu lingkungan berskala global.

Mikroplastik didefinisikan sebagai partikel plastik berukuran <5 mm (Azizah *et al.*, 2020), dengan bentuk, warna, dan komposisi yang sangat beragam (Browne, 2015). Tiga bentuk yang umum dijumpai di lingkungan perairan adalah fragment, film, dan fiber (Nor dan Obbard, 2014). Fragment berasal dari pecahan plastik berukuran besar seperti kantong plastik tebal, botol, dan pipa (Ayuningtyas *et al.*, 2019); fiber berasal dari material sintetik seperti jaring ikan, tali, atau residu tekstil rumah tangga; sementara film biasanya berasal dari kemasan plastik berdensitas rendah (Hanif *et al.*, 2021).

Penyebaran mikroplastik di perairan dipengaruhi oleh faktor oseanografis seperti pasang surut, arus permukaan, kecepatan arus, serta gaya angin (Anggiani, 2020; Ambarsari dan Anggiani, 2022). Arus laut yang digerakkan oleh angin dan perbedaan elevasi pasang surut menyebabkan pergerakan massa air yang kompleks dan dinamis. Interaksi antara densitas partikel, kekuatan arus, dan karakteristik perairan akan menentukan distribusi spasial mikroplastik, baik secara horizontal maupun vertikal dalam kolom air (Purba *et al.*, 2019). Partikel dengan densitas rendah cenderung terbawa arus lebih jauh, sedangkan partikel berat lebih mudah mengendap.

Penelitian ini dilakukan dengan menggabungkan pendekatan observasi lapangan dan pemodelan numerik untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi pencemaran mikroplastik di wilayah studi. Analisis dilakukan terhadap kelimpahan partikel di air dan sedimen, serta pemetaan pola sebarannya secara spasial menggunakan model hidrodinamika berbasis arus pasang surut dan *particle tracking* dua dimensi. Studi ini difokuskan pada musim peralihan I, saat dinamika perairan mengalami transisi dan memungkinkan identifikasi pola sebaran mikroplastik yang khas di kawasan muara hingga pesisir.

MATERI DAN METODE

Penelitian dilakukan pada 30 Mei 2024 di wilayah Muara Sungai Loji, Kabupaten Pekalongan, Jawa Tengah hingga laut lepas. Area penelitian memiliki letak geografis yang berada di titik koordinat $6^{\circ} 51' 58,665''$ LS – $109^{\circ} 41' 18,364''$ BT hingga $6^{\circ} 50' 41,017''$ LS – $109^{\circ} 42' 17,805''$ BT. Penelitian ini dilakukan pada

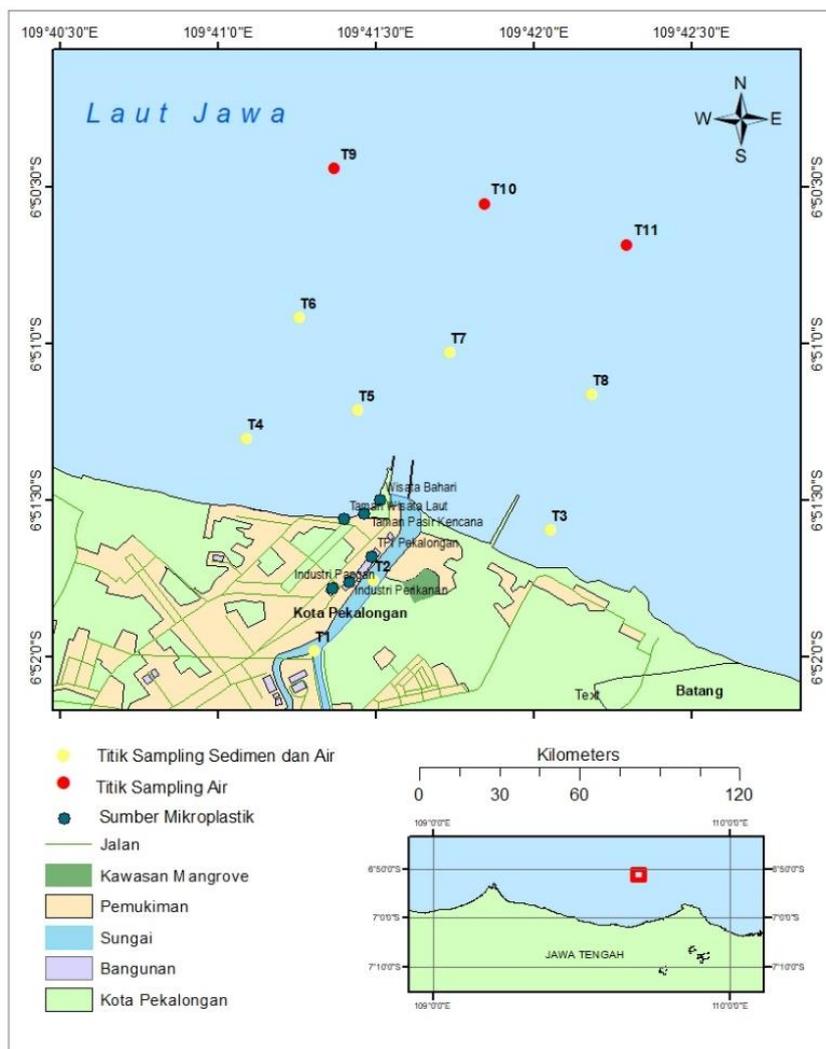
musim peralihan 1 ketika laut dalam keadaan surut menuju pasang. Pengolahan sampel mikroplastik dilakukan di Laboratorium Geologi, Kimia, dan Biologi Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro.

Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam pengolahan data yaitu, metode kuantitatif dan analisa sampel menggunakan metode deskriptif. Menurut Putri *et al.* (2022), analisis deskriptif untuk mengetahui jenis, bentuk, warna, ukuran, jumlah, kelimpahan mikroplastik serta penyebarannya di muara Sungai Mrican, Pekalongan. Diperlukan juga untuk penelitian ini untuk mengkaji penelitian terdahulu terkait teori suatu masalah atau topik.

Penentuan Lokasi dan Waktu Penelitian

Penentuan titik pengambilan sampel dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode *purposive sampling*, dengan mempertimbangkan karakteristik hidrodinamika dan potensi pencemaran di kawasan Muara Sungai Loji, Pekalongan. Pengambilan sampel dilaksanakan pada tanggal 30 Mei 2024, bertepatan dengan musim timur, antara pukul 07.00 hingga 11.00 WIB. Sebanyak sebelas titik sampling ditetapkan (**Gambar 1**), di mana masing-masing titik digunakan untuk pengambilan sampel air (titik 1 hingga 11), dan delapan di antaranya digunakan untuk pengambilan sampel sedimen (titik 1 hingga 8). Deskripsi rinci mengenai lokasi dan karakteristik masing-masing titik pengambilan sampel disajikan pada Tabel 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Titik Pengambilan Sampel di Sungai Loji

Tabel 1. Titik Koodinat Lokasi Pengambilan Sampel

Titik	X (DMS)	Y (DMS)	Deskripsi Lokasi Sampling
T1	109° 41' 18,364" E	6° 51' 58,665" S	Sungai Loji, tempat menepinya kapal, Muara Sungai
T2	109° 41' 29,671" E	6° 51' 45,230" S	Kawasan indsutri pangan dan Perikanan, tempat menepinya kapal
T3	109° 42' 3,272" E	6° 51' 35,594" S	Daerah pesisir
T4	109° 41' 53,654" E	6° 51' 18,092" S	Daerah pesisir, kawasan wisata
T5	109° 41' 26,493" E	6° 51' 12,559" S	Perairan dekat dengan <i>Jetty</i>
T6	109° 41' 15,555" E	6° 50' 54,958" S	Perairan tengah
T7	109° 41' 44,103" E	6° 51' 1,627" S	Perairan tengah
T8	109° 42' 11,133" E	6° 51' 9,550" S	Perairan tengah
T9	109° 41' 22,228" E	6° 50' 26,426" S	Perairan dalam
T10	109° 41' 50,775" E	6° 50' 33,094" S	Perairan dalam
T11	109° 42' 17,805" E	6° 50' 41,017" S	Perairan dalam

Pengambilan Sampel Air

Menurut Febriani *et al.* (2020), sampel mikroplastik pada air diambil dengan menggunakan *plankton net* pada setiap titik dan pastikan koordinat titik pengambilan sesuai dengan titik yang sudah ditentukan. Pengambilan sampel pada bagian kolom perairan dengan kedalaman sekitar 0 – 100 cm dengan menggunakan *plankton net*. Sampel air laut diambil dengan menggunakan ember dengan beberapa kali pengulangan. Sampel air yang telah diambil, dimasukkan ke dalam botol dengan volume 1 liter, kemudian sampel diberi label dan dibawa ke laboratorium untuk dianalisis. Ulangi langkah tersebut di setiap titik pengambilan sampel. Lalu untuk langkah terakhir, sampel dibawa ke laboratorium untuk dianalisis.

Pengambilan Sampel Sedimen

Sampel sedimen yang diambil pada penelitian analisis sebaran dan kelimpahan yaitu, sebanyak 400 gr. Sedimen diambil dengan menggunakan *grab sampler* pada setiap titik yang telah ditentukan. Sampel sedimen yang telah diambil sebanyak 400 gr dimasukkan ke dalam *ziplock* berukuran 1 kg yang telah diberi label. Setelah dimasukkan, sampel sedimen disimpan untuk dianalisis di laboratorium.

Pengolahan Sampel

Metode pengolahan mikroplastik yang ada pada air dilakukan dengan berdasarkan modul NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Masura *et al.*, 2015). Dimana terdapat 4 langkah utama yaitu, Pengayakan Basah (mengacu pada modifikasi yang dilakukan oleh Zhang *et al.*, 2017), Pengeringan Sampel, *Wet Peroxide Oxidation* (WPO), dan Pemisahan Densitas. Pada sampel sedimen, terdapat langkah yang harus dilakukan terlebih dahulu yaitu, pengeringan sedimen dan pemisahan densitas pada sedimen menggunakan $ZnCl_2$

Identifikasi Kelimpahan Mikroplastik

Menurut Pradiptaadi dan Fallahian (2022), kelimpahan mikroplastik pada air dan sedimen dapat diidentifikasi dengan perhitungan yang merujuk pada NOAA yang mana kelimpahan mikroplastik didapat dari jumlah partikel dibagi dengan volume air tersaring serta sedimen:

$$C = \frac{n}{v}$$

Keterangan: C = Kelimpahan mikroplastik (partikel/ m^3)/(partikel/kg); n = Jumlah partikel; v = Volume tersaring (m^3).

Analisis Mikroskop

Metode analisis mikroskop mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Putri et al. (2022), yang menyatakan bahwa mikroplastik diidentifikasi menggunakan mikroskop binokuler stereo dengan perbesaran 40. Analisis tersebut berupa analisis deskriptif yang dilakukan untuk mengetahui jenis, bentuk, warna, ukuran, jumlah, dan juga kelimpahan mikroplastik.

Pemodelan Arus Pasang Surut

Pembuatan model pasang surut dilakukan untuk mengetahui pola arus laut yang terdapat pada perairan Sungai Mrican, Pekalongan. Dalam hidrodinamika pesisir mengacu pada perambatan gelombang, perubahan kecepatan arus yang berada di sepanjang pantai yang disebabkan oleh faktor oseanografi seperti, gelombang angin dan pasang surut. Pemodelan arus pasang surut menggunakan *software* MIKE 21 dengan sistem pemodelan yang memiliki aliran permukaan bebas 2 dimensi berdasarkan sistem pendekatan jaringan fleksibel atau *flexible mesh* yang sesuai dengan kebutuhan (Suharyo dan Adrianto, 2018). Menurut Hapsari et al. (2022), proses penyelesaian pemodelan dengan metode numerik dapat dilakukan dengan beberapa tahap yaitu: (1) *Pre-processing* model yaitu persiapan data batimetri, garis pantai/*coastline*. (2) *Processing* model yaitu *set up* nilai koefisien parameter model pada bagian *control* model. (3) *Post-processing* model yaitu *extract* data hasil simulasi numerik model, dan verifikasi data.

Pemodelan Particulate Tracking

Pembuatan model *particle tracking* mengacu pada Wulandari et al. (2021), yang menyatakan bahwa model partikel *tracking* dalam kasus mikroplastik dilakukan menggunakan persamaan transportasi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + a_1 C + a_2$$

Keterangan: C = Konsentrasi Mikroplastik (partikel/ m^3 , partikel/kg); t = Waktu, detik; u = Kecepatan aliran arah x, m/d; v = Kecepatan aliran arah y, m/d; D_x = Koefisien arah dispersi x, m^2/d ; D_y = Koefisien arah dispersi y, m^2/d ; a_1 = Koefisien istilah sumber (erosi-deposisi), 1/detik; a_2 = Koefisien seimbang istilah sumber (erosi-deposisi), $kg/m^3/d = -a_1 C_{eq}$.

Pengolahan Model *Particle Tracking*: (1) Skenario Model: Hidrodinamika dan model dispersi mikroplastik disimulasikan dengan memasukkan data pasang surut dan angin. (2) Area Domain: Input data untuk model ini adalah data batimetri dan garis pantai. Domain model dibagi menjadi kondisi batas daratan dan perairan. Proses model dimulai dengan membagi area *domain* dilanjutkan dengan memasukkan nilai parameter, kontrol waktu, dan menjalankan model. (3) Validasi Model: Validasi dalam model ini menggunakan metode RMS (*Root Mean Square*). Dimana RMS adalah nilai non dimensional untuk mengindikasikan kecocokan untuk dua jenis data.

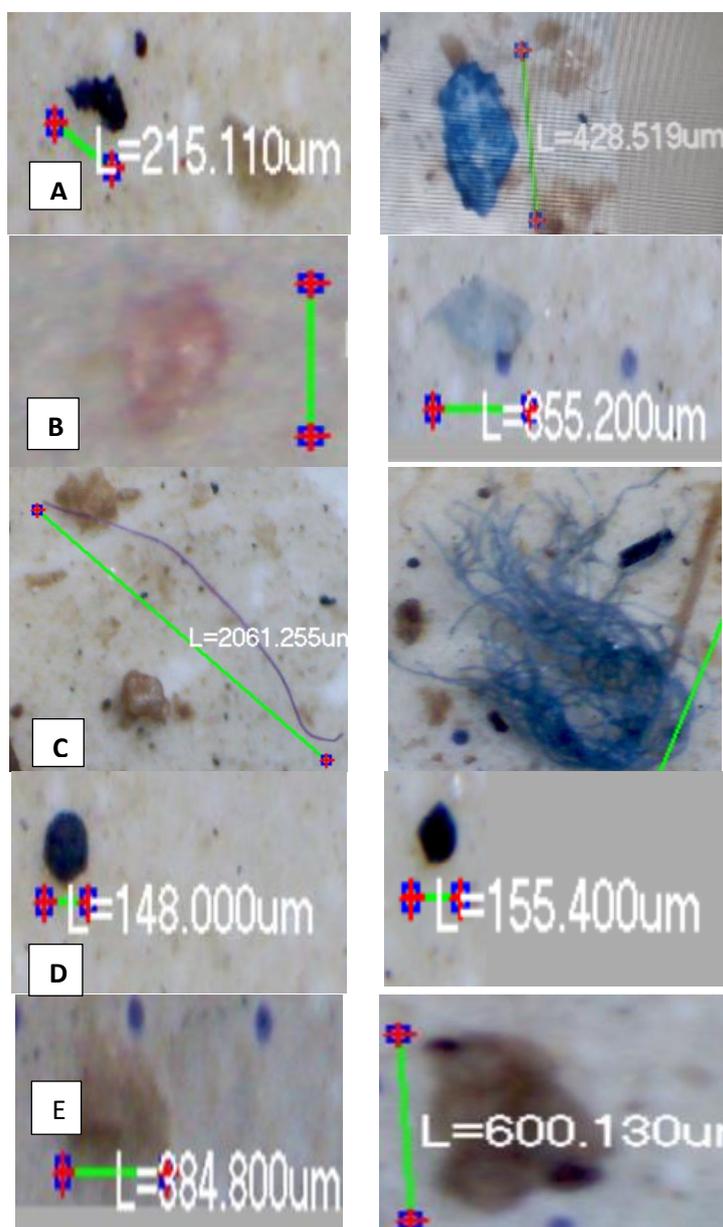
HASIL DAN PEMBAHASAN

Mikroplastik yang ditemukan dalam penelitian ini diklasifikasikan berdasarkan bentuk, warna, dan ukuran. Lima bentuk utama yang teridentifikasi adalah fragment, fiber, pellet, film, dan foam. Hasil analisis menunjukkan bahwa bentuk fragment mendominasi baik pada sampel air maupun sedimen (Gambar 3). Dominasi ini diduga berasal dari limbah plastik rumah tangga, terutama kantong plastik, yang mengalami fragmentasi menjadi potongan tidak beraturan dengan warna bervariasi seperti merah, hijau, biru, coklat, dan transparan. Fragment memiliki densitas dan struktur fisik yang memudahkan pengendapan, dibandingkan bentuk mikroplastik lainnya seperti pellet atau film (Laila et al., 2020).

Setelah fragment, bentuk fiber menjadi yang paling umum ditemukan, yang diduga berasal dari aktivitas perikanan, seperti penggunaan jaring dan tali pancing (Azizah et al., 2020). Bentuk pellet ditemukan dalam jumlah cukup signifikan, yang kemungkinan berasal dari limbah industri plastik di sekitar wilayah studi (Seprandita et al., 2022). Film, meskipun berasal dari sumber serupa seperti kantong plastik, memiliki karakteristik transparan dan densitas lebih rendah dibanding fragment, menjadikannya kurang stabil di perairan. Foam ditemukan dalam jumlah paling sedikit, diduga karena densitasnya yang sangat rendah (0,05

g/cm³), sehingga mudah terbawa arus dan sulit terendapkan (Nainggolan *et al.*, 2022). Dalam hal warna, mikroplastik yang teridentifikasi terdiri dari enam warna utama: hitam, putih/bening, biru, coklat, merah, dan hijau. Warna hitam merupakan warna yang paling dominan, baik pada air maupun sedimen, yang mengindikasikan asal dari kantong plastik atau material sintetis lain yang telah mengalami degradasi (Ibrahim *et al.*, 2023). Dominasi warna hitam juga dapat menunjukkan kapasitas tinggi dalam menyerap kontaminan. Perbedaan distribusi warna antara air dan sedimen mengindikasikan variasi sumber serta proses degradasi yang berbeda. Di sisi lain, keberagaman warna juga dapat dipengaruhi oleh pewarna sintetis dari industri batik, yang banyak terdapat di Pekalongan (Budiyanto *et al.*, 2018).

Dampak lingkungan dari keberadaan mikroplastik tidak hanya mencakup degradasi kualitas air, tetapi juga berpotensi mengganggu biota perairan dan kesehatan manusia. Partikel-partikel kecil ini dapat dikonsumsi oleh organisme akuatik, masuk ke rantai makanan, dan akhirnya berdampak pada manusia (Faujiah & Wahyuni, 2022). Oleh karena itu, temuan ini menegaskan pentingnya pengelolaan limbah yang lebih baik dan perlunya pemantauan berkelanjutan terhadap kontaminasi mikroplastik di wilayah pesisir dan muara sungai.



Gambar 3. Bentuk Mikroplastik yang Ada di Muara Sungai Loji, Pekalongan (A) *Fragment* (B) *Film* (C) *Fiber* (D) *Pellet* (E) *Foam*

Distribusi Mikroplastik di Air dan Sedimen

Analisis laboratorium menunjukkan bahwa total mikroplastik yang teridentifikasi di perairan Sungai Loji mencapai 1.688 partikel/m³ pada media air dan 5.572 partikel/kg pada media sedimen (Gambar 4). Konsentrasi ini menunjukkan adanya variasi spasial antar stasiun, dengan nilai pada air berkisar antara 9,2 hingga 28 partikel/m³, dan pada sedimen antara 633 hingga 925 partikel/kg. Nilai tertinggi pada media air ditemukan di stasiun 10, yang terletak di area perairan terbuka, sedangkan pada sedimen, kelimpahan tertinggi terdeteksi di stasiun 4 yang berada di kawasan pesisir.

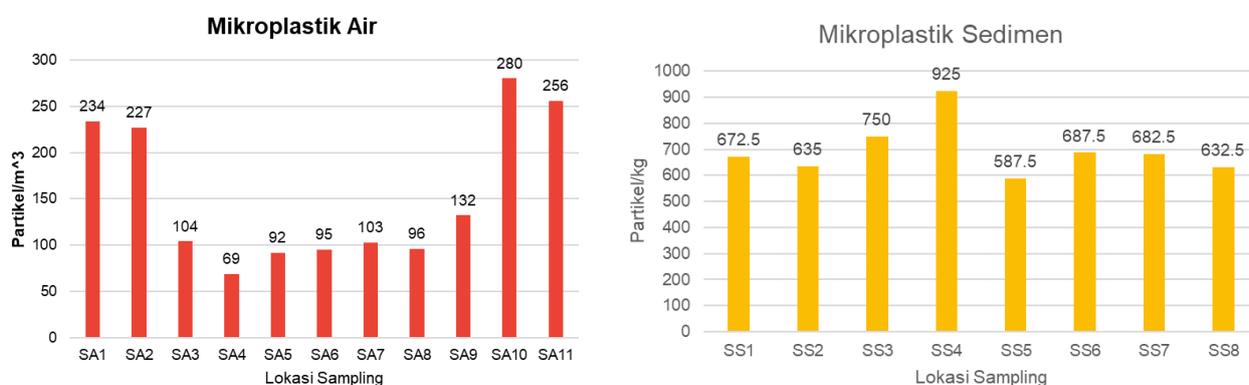
Secara kuantitatif, kelimpahan mikroplastik lebih tinggi pada sedimen dibandingkan air permukaan, diduga akibat gaya gravitasi dan densitas partikel yang lebih tinggi daripada air (Ambarsari *et al.*, 2022). Nilai tertinggi pada air ditemukan di perairan terbuka, sementara pada sedimen dominan di stasiun pesisir. Hal ini menunjukkan bahwa perairan muara berperan sebagai zona akumulasi karena pengaruh arus yang melambat, pasang surut, serta hambatan struktural seperti jetty yang memperkuat pengendapan. Dibandingkan dengan studi sebelumnya, seperti oleh Ismanto *et al.* (2023), yang melaporkan kelimpahan mikroplastik pada sedimen di hulu hingga muara sebesar $0,77 \pm 0,07$ hingga $1,5 \pm 0,05$ partikel/g dan pada air $45,2 \pm 1,3$ hingga $99,1 \pm 1,6$ partikel/L, hasil penelitian ini menunjukkan nilai yang relatif tinggi, khususnya pada sedimen. Studi Anindita *et al.* (2024) juga melaporkan nilai yang lebih rendah, yaitu $168 \pm 42,6$ partikel/m³ di air dan $236,5 \pm 215,9$ partikel/kg pada sedimen. Perbedaan ini mengindikasikan adanya peningkatan tekanan antropogenik di wilayah Muara Sungai Loji.

Kontaminasi mikroplastik di kawasan pesisir dan muara diduga erat kaitannya dengan aktivitas masyarakat, seperti permukiman padat, kegiatan perdagangan, serta keberadaan industri pengolahan pangan. Ketidakterpenuhinya sistem pengelolaan limbah menjadi salah satu faktor utama akumulasi mikroplastik, sebagaimana disampaikan oleh Laila *et al.* (2020), yang menyatakan bahwa kawasan pesisir merupakan zona akumulasi mikroplastik tertinggi akibat intensitas aktivitas antropogenik.

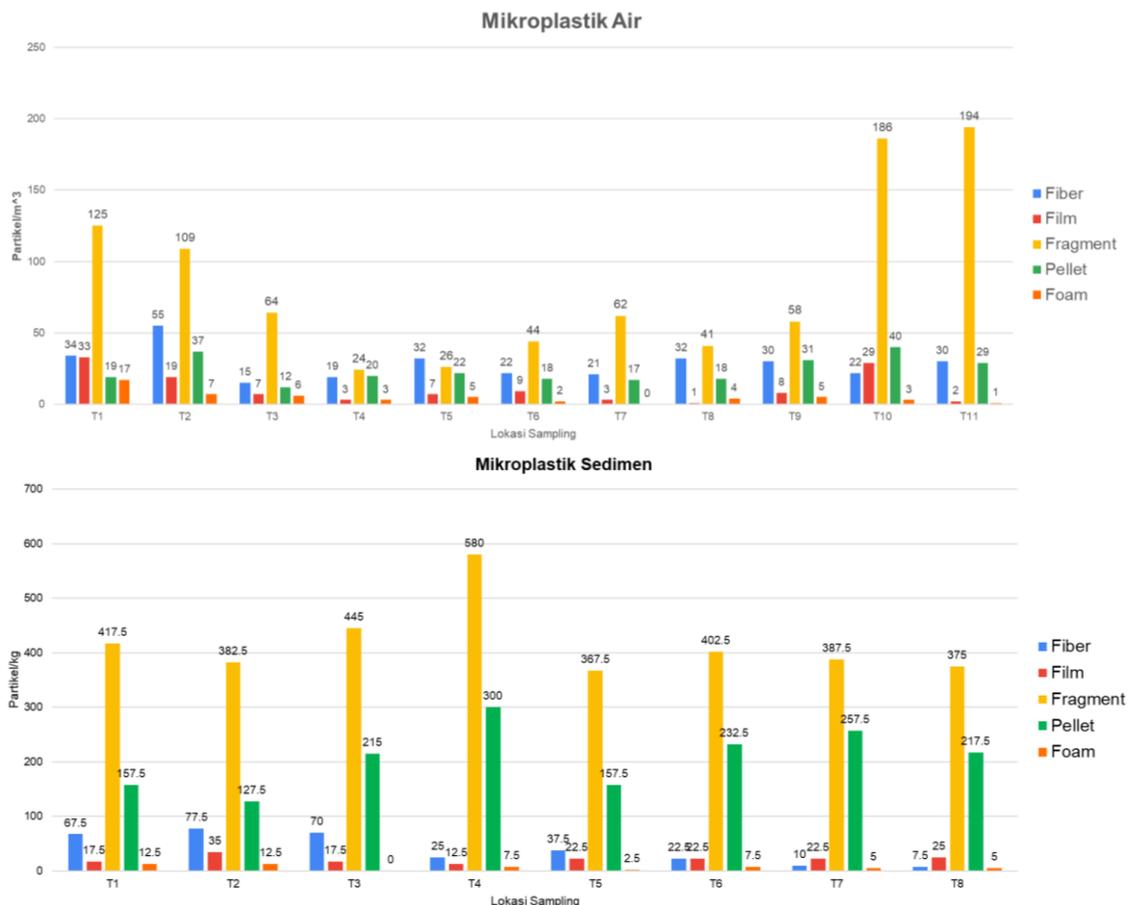
Secara fisik, perbedaan densitas antar jenis mikroplastik turut memengaruhi distribusinya di perairan. Partikel berdensitas rendah lebih mudah terdistribusi di permukaan dan terbawa arus, sementara partikel dengan densitas tinggi cenderung mengendap dan terakumulasi di sedimen, terutama di lingkungan dengan aliran lambat dan struktur dasar yang mendukung sedimentasi (Nainggolan *et al.*, 2022).

Pola distribusi spasial mikroplastik juga dipengaruhi oleh parameter oseanografi seperti arus pasang surut dan arus sejajar pantai. Proses fragmentasi yang dipicu oleh radiasi UV, gelombang, dan turbulensi arus turut berkontribusi terhadap ukuran dan bentuk partikel yang ditemukan. Hafitri *et al.* (2022) juga menekankan pentingnya peran arus dalam mengangkut mikroplastik dari sungai ke laut.

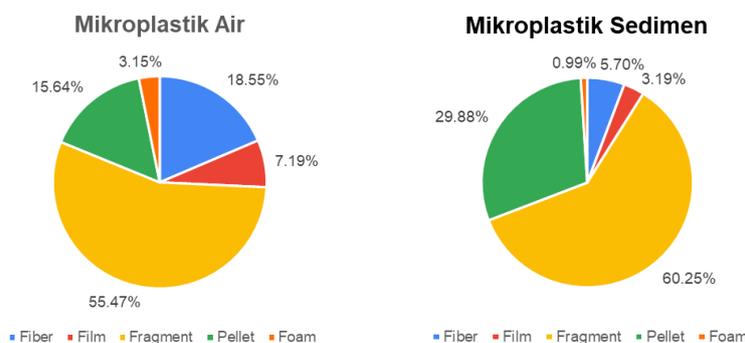
Mikroplastik dalam penelitian ini diklasifikasikan berdasarkan bentuk, warna, dan ukuran. Lima jenis mikroplastik teridentifikasi, yaitu: fiber, fragment, pellet, film, dan foam. Jumlah dan persentase relatif masing-masing jenis ditampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Fragment merupakan bentuk dominan, yang kemungkinan berasal dari pecahan produk plastik rumah tangga dan kemasan yang mengalami fragmentasi. Fiber menduduki posisi kedua dan diduga berasal dari aktivitas perikanan, seperti jaring dan tali.



Gambar 4. Kelimpahan Mikroplastik Air dan Sedimen pada Setiap Titik



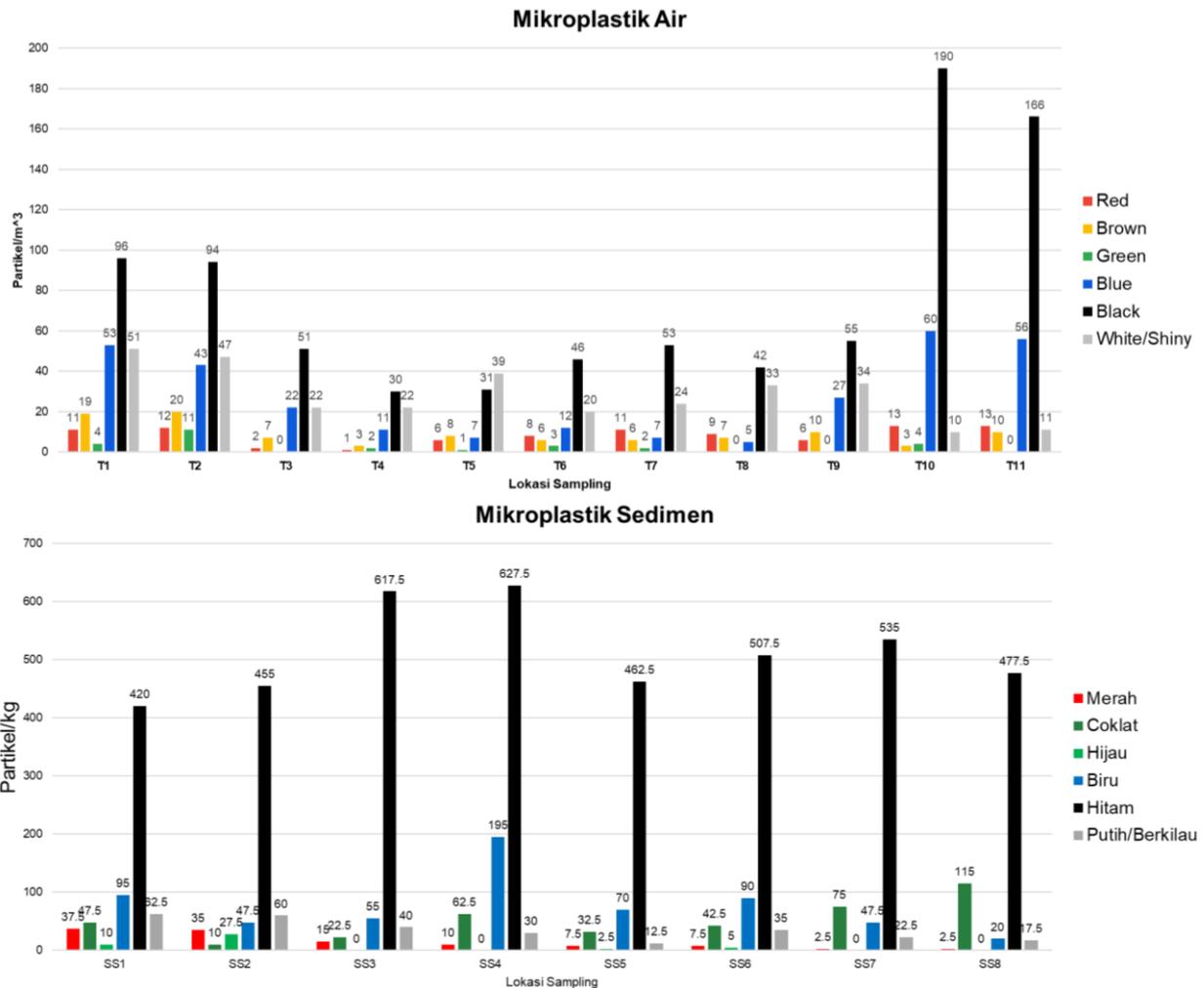
Gambar 5. Kelimpahan Jenis Mikroplastik pada Setiap Titik



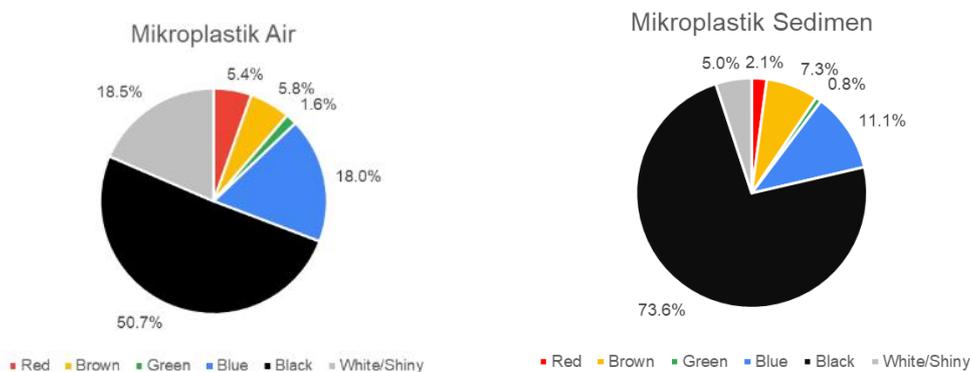
Gambar 6. Presentase Kelimpahan Jenis Mikroplastik pada Setiap Titik

Warna mikroplastik yang ditemukan mencakup merah, coklat, hijau, biru, hitam, dan putih/bening. Warna hitam mendominasi baik pada air maupun sedimen, mengindikasikan kemungkinan degradasi dari kantong plastik dan kontaminasi logam berat. Distribusi warna di setiap stasiun disajikan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Variasi warna juga menunjukkan tingkat degradasi yang berbeda akibat pengaruh lingkungan dan aktivitas manusia, termasuk industri batik di Pekalongan yang dapat memengaruhi pewarnaan partikel melalui limbah tekstil (Budiyanto *et al.*, 2018). Ukuran mikroplastik yang ditemukan diklasifikasikan ke dalam empat kelompok, yaitu: 1–50 µm, 50–250 µm, 250–1000 µm, dan 1–10 mm. Ukuran 50–250 µm menjadi yang paling dominan pada semua stasiun (Gambar 9 dan Gambar 10). Hal ini menunjukkan bahwa proses fragmentasi

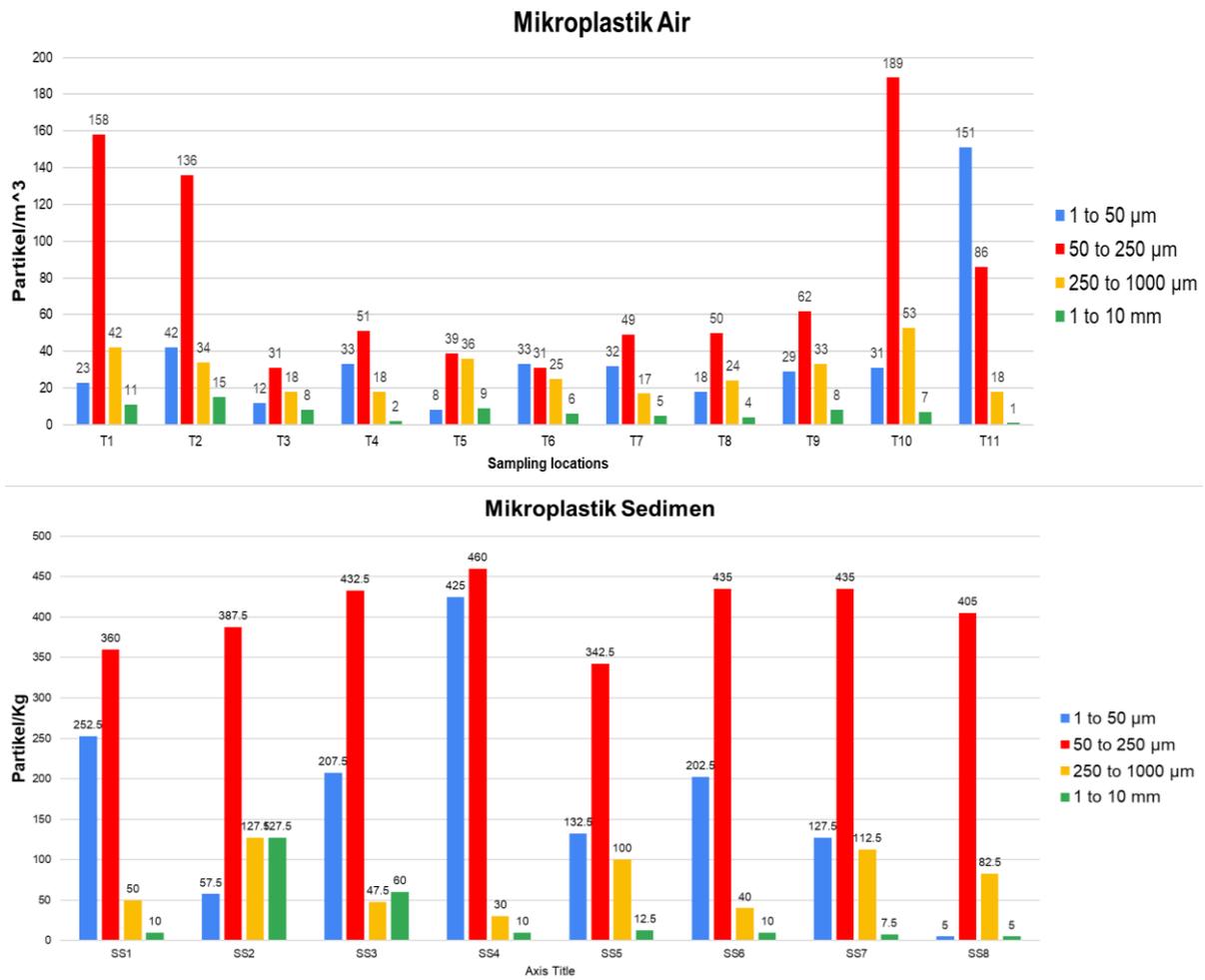
berlangsung aktif di lingkungan ini, didukung oleh pengaruh sinar UV, suhu, dan kondisi hidrodinamika sebagaimana dijelaskan oleh Rahim *et al.* (2022). Urutan kelimpahan ukuran menunjukkan kecenderungan bahwa partikel yang lebih kecil lebih mudah menyebar dan menetap di berbagai media.



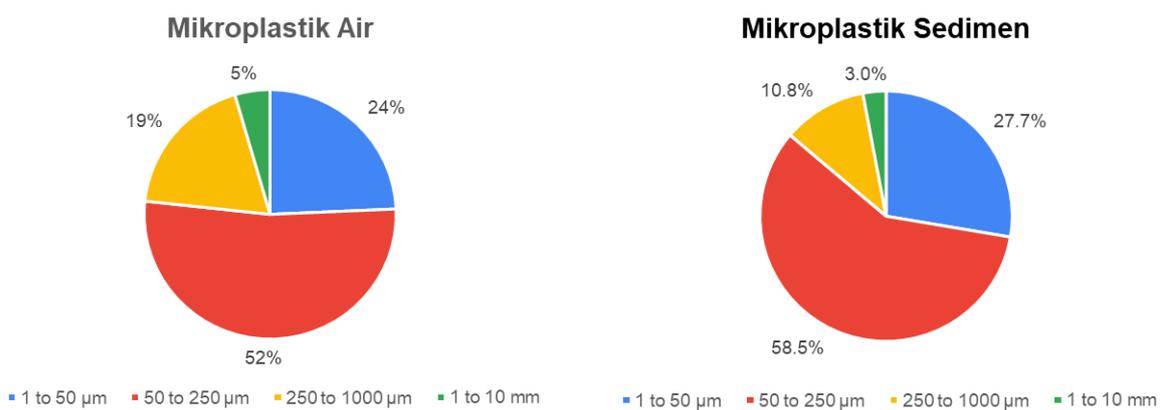
Gambar 7. Kelimpahan Warna Mikroplastik pada Setiap Titik



Gambar 8. Presentase Kelimpahan Warna Mikroplastik pada Setiap Titik



Gambar 9. Kelimpahan Ukuran Mikroplastik pada Setiap Titik



Gambar 10. Ukuran Mikroplastik pada Setiap Titik

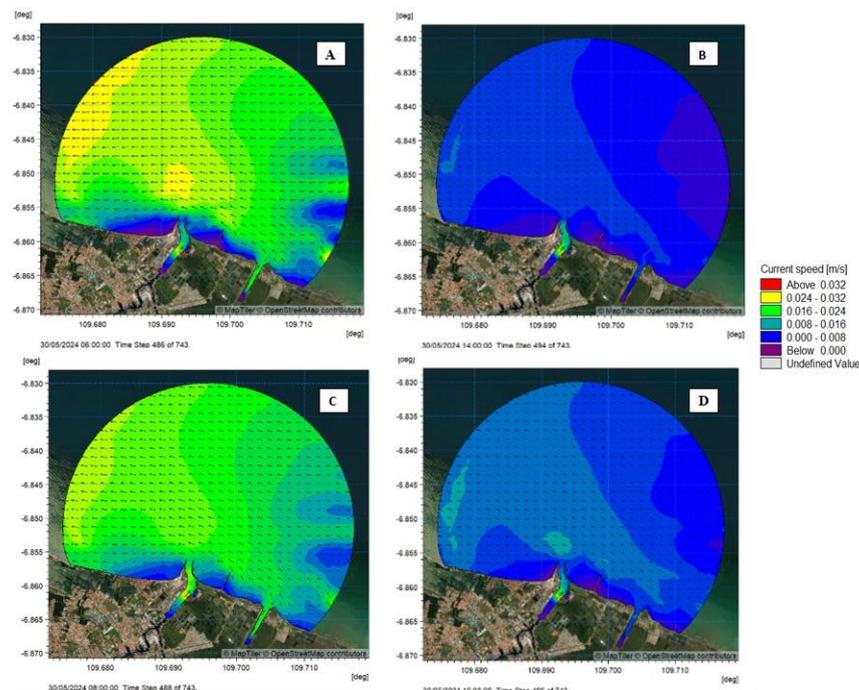
Secara umum, hasil ini menguatkan dugaan bahwa kontaminasi mikroplastik di kawasan Sungai Loji bersifat multifaktor, dipengaruhi oleh aktivitas manusia, dinamika arus, dan karakteristik partikel itu sendiri. Temuan ini dapat menjadi dasar untuk evaluasi kebijakan pengelolaan limbah di wilayah pesisir dan sungai secara terpadu.

Sebaran Mikroplastik dan Dinamika Oseanografi

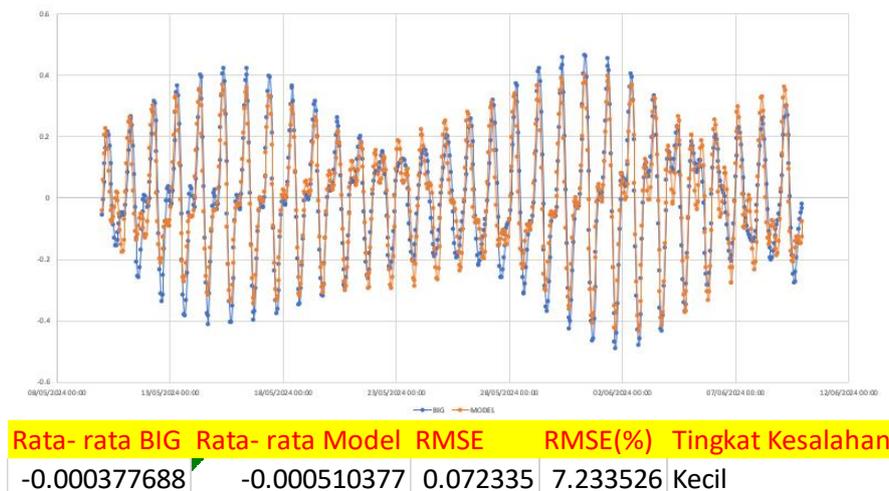
Sebaran mikroplastik di kawasan Muara Sungai Loji dianalisis dengan mempertimbangkan faktor oseanografis seperti arus laut, angin, pasang surut, serta karakteristik morfologi pesisir. Ketiga parameter tersebut berperan penting dalam proses transportasi, akumulasi, dan deposisi mikroplastik di lingkungan perairan. Hasil pemodelan arus menunjukkan bahwa arah dominan pergerakan massa air di kawasan studi adalah dari timur menuju barat, dengan kecepatan rata-rata berkisar antara 0,001 hingga 0,0375 m/s (Gambar 12). Arah ini konsisten dengan hasil visualisasi wind rose yang menunjukkan angin dominan berhembus dari timur ke barat dengan kecepatan rata-rata 3,14 m/s. Data angin diambil dari rata-rata bulanan selama sepuluh tahun (Mei 2015–2024), mencerminkan pengaruh musim timur yang cukup kuat pada saat pengambilan data. Model arus diverifikasi menggunakan data pasang surut dari Badan Informasi Geospasial (BIG), dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,07. Nilai ini tergolong rendah (RMSE < 3,0), sehingga menunjukkan bahwa simulasi hidrodinamika cukup representatif terhadap kondisi aktual di lapangan (Gambar 13). Oleh karena itu, model ini layak digunakan untuk mensimulasikan pergerakan mikroplastik dengan pendekatan particle tracking.

Simulasi pergerakan mikroplastik dilakukan dengan mengasumsikan pelepasan partikel secara homogen dari bibir muara (Gambar 14). Hasilnya menunjukkan bahwa partikel cenderung menyebar ke arah barat secara divergen, mengikuti arah dominan arus dan angin. Simulasi dilakukan pada kondisi neap tide, di mana dinamika arus berada pada titik minimum, memungkinkan identifikasi zona akumulasi secara lebih jelas.

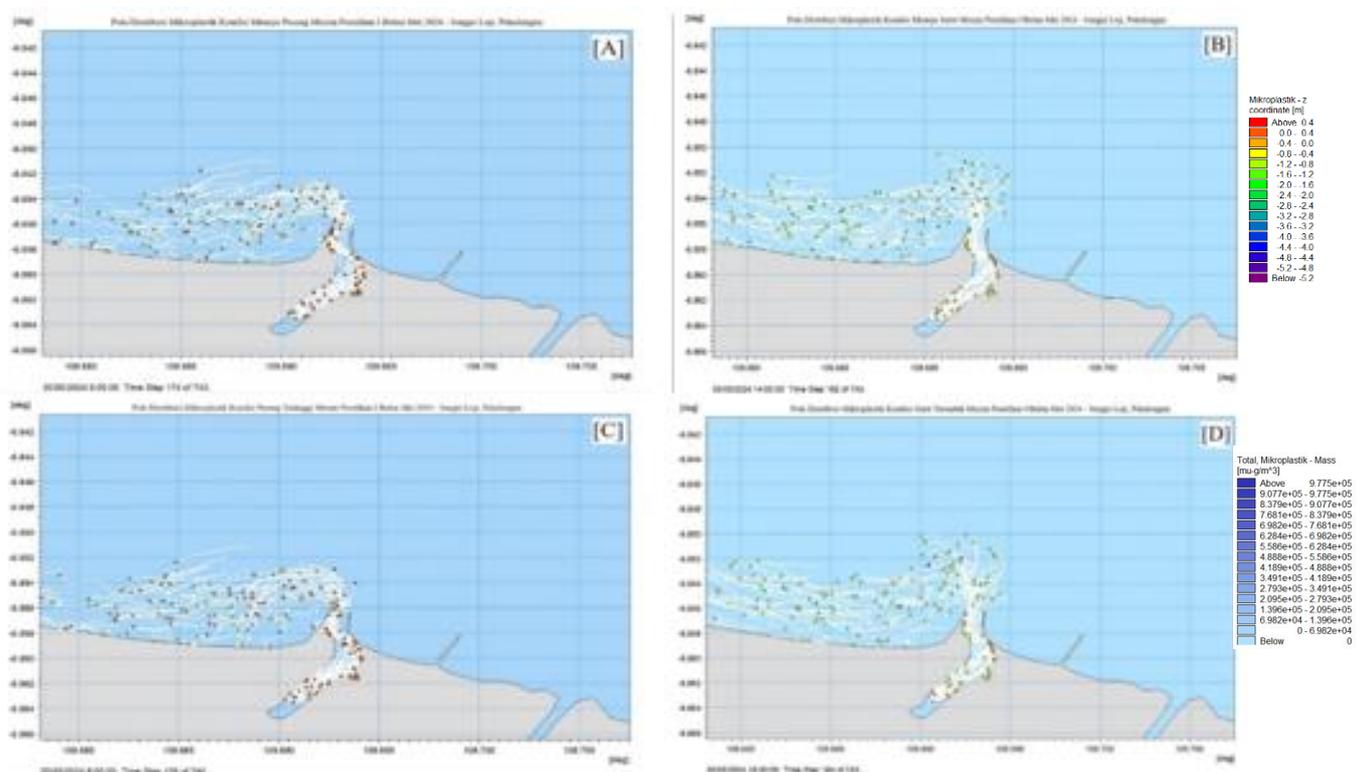
Saat pasang tertinggi, partikel mikroplastik terdorong ke arah pesisir dan cenderung terakumulasi di wilayah perairan dengan arus lemah seperti teluk, muara, dan zona transisi. Sebaliknya, pada saat surut terendah, partikel lebih banyak tersebar ke laut lepas, akibat lepasnya partikel dari kolom air dan interaksi dengan arus balik. Temuan ini mendukung hasil penelitian Febriani *et al.* (2020) dan Febriyanti *et al.* (2024), yang menunjukkan bahwa mikroplastik dengan ukuran <5 mm dapat terdorong dari sungai hingga laut lepas oleh dinamika arus dan pasang surut. Keberadaan mikroplastik yang melimpah di wilayah muara dan pesisir berkorelasi erat dengan aktivitas manusia, terutama permukiman, perdagangan, serta industri pangan dan batik. Kondisi ini diperkuat oleh studi Seprandita *et al.* (2022) di Karimunjawa, yang menunjukkan bahwa arus perairan dapat mentransportasikan mikroplastik dari wilayah padat penduduk menuju ekosistem laut. Mikroplastik dengan ukuran kecil dan bentuk ringan akan lebih mudah terbawa arus dan menyebar secara luas, terutama pada kondisi pasang surut.



Gambar 12. Model Hidrodinamika 2D pada Saat Pasang Perbani Kondisi (A) Menuju Pasang, (B) Menuju Surut, (C) Pasang Tertinggi, (D) Surut Terendah



Gambar 13. Hasil Validasi Model



Gambar 14. Model Particle Tracking pada Saat Pasang Perbani Kondisi (A) Menuju Pasang, (B) Menuju Surut, (C) Pasang Tertinggi, (D) Surut Terendah

Jetty yang terdapat di kawasan muara juga berperan dalam proses sedimentasi dan akumulasi mikroplastik. Misalnya, pada stasiun 5 yang berdekatan dengan struktur jetty, tercatat kelimpahan mikroplastik sebesar 588 partikel/kg pada sedimen. Keberadaan jetty menyebabkan penghambatan arus lokal, menciptakan zona stagnan yang mendukung pengendapan mikroplastik (Susanto *et al.*, 2022).

Kondisi lingkungan seperti debit Sungai Loji yang mencapai 6,4 m³/s pada bulan Mei (data PUSDATARU) berkontribusi terhadap pengangkutan partikel dari hulu ke laut. Perbedaan densitas antara air

tawar dan air laut menciptakan sirkulasi estuarin yang memperkuat penyebaran mikroplastik di zona transisi. Penelitian oleh Tristanova *et al.* (2024) menunjukkan bahwa pasang surut dan arus sungai menciptakan pola distribusi yang kompleks, dengan akumulasi terjadi di area berarus lemah.

Jenis dan densitas polimer juga menentukan nasib partikel di perairan. Mikroplastik berdensitas rendah (misalnya polietilen) lebih mudah mengapung dan terbawa arus, sedangkan polimer berdensitas tinggi cenderung mengendap (Rohmah *et al.*, 2023). Hal ini menjelaskan dominasi mikroplastik di sedimen pada beberapa titik dengan arus rendah dan substrat lunak. Selain sebagai polutan fisik, keberadaan mikroplastik dapat mengganggu proses ekologis. Partikel-partikel ini menyerupai plankton secara visual setelah mengalami perubahan warna akibat paparan UV (Putri *et al.*, 2022), meningkatkan risiko tertelan oleh biota laut. Paparan tersebut juga mempercepat degradasi plastik dan pelepasan aditif berbahaya. Dalam konteks ekosistem, mikroplastik berpotensi mendorong eutrofikasi dengan meningkatkan konsentrasi nutrisi yang mendorong pertumbuhan fitoplankton, termasuk Harmful Algae Blooms (HABs) (Wardani *et al.*, 2024). Warna mikroplastik, seperti hitam atau transparan, juga dapat berperan dalam menyerap logam berat dan bahan toksik, memperkuat dampaknya terhadap rantai makanan. Seiring waktu, partikel mikroplastik berwarna terang pun dapat berubah warna dan morfologi, menyerupai makanan alami bagi fauna laut (Perancak *et al.*, 2021).

Secara keseluruhan, hasil pemodelan menunjukkan bahwa penyebaran mikroplastik di Muara Sungai Loji sangat dipengaruhi oleh interaksi antara arus, angin, struktur fisik pesisir, dan karakteristik limbah. Zona pesisir dan muara menjadi area utama akumulasi, dengan kontribusi besar dari aktivitas antropogenik. Temuan ini penting untuk mendukung perencanaan pengelolaan pesisir dan strategi mitigasi pencemaran plastik di kawasan perairan pantai.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkap bahwa mikroplastik telah menjadi bagian dari beban pencemaran di kawasan Muara Sungai Loji, dengan karakteristik distribusi dan komposisi yang mencerminkan tekanan aktivitas manusia dan dinamika oseanografis di wilayah tersebut. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan berkala terhadap keberadaan mikroplastik di kawasan pesisir dan muara sebagai langkah awal mitigasi pencemaran plastik di laut. Selain itu, hasil studi ini menunjukkan bahwa penggabungan antara observasi laboratorium dan pemodelan spasial memberikan pendekatan yang efektif untuk memahami mekanisme penyebaran partikel di lingkungan perairan. Implikasi ekologis dari keberadaan mikroplastik tidak dapat diabaikan, terutama dalam konteks potensi bioakumulasi dan masuknya partikel ke dalam rantai makanan. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengelolaan berbasis data ilmiah yang terintegrasi dengan pendekatan lintas sektor. Penelitian lanjutan diarahkan untuk mengembangkan sistem pemantauan mikroplastik secara real-time, serta mengevaluasi dampak ekologis dan kesehatan secara lebih mendalam, khususnya di wilayah pesisir yang hingga kini masih minim kajian mikroplastik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambarsari, D. A., & Anggiani, M. 2022. Kajian Kelimpahan Mikroplastik Pada Sedimen Di Wilayah Indonesia. *Oseana*, 47(1): 20-28.
- Anggiani, M. 2020. Potensi mikroorganisme sebagai agen bioremediasi mikroplastik di laut. *Oseana*, 45(2): 40-49.
- Anindita, M. A., Ismanto, A., Zainuri, M., Hadibarata, T., Kunarso, K., Maslukah, L., Widada, S., Indrayanti, E., Widiaratih, R., Sugianto, D. N., Rochaddi, B., Helmi, M., & Atmodjo, W. 2024. Trajectory of microplastic particles with 2-dimensional hydrodynamic modelling approach at Pekalongan waters, Central Java, Indonesia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9): p.832.
- Ayuningtyas, W. C., 2019. Kepadatan Mikroplastik Pada Perairan Di Banyuwirip, Gresik, Jawa Timur. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 3(1): 41-45.
- Azizah, P., Ridlo, A., dan Suryono, C. A. 2020. Mikroplastik pada Sedimen di Pantai Kartini Kabupaten Jepara Jawa Tengah. *Journal of marine Research*, 9(3): 326-332
- Browne, M. A., 2015. Sources and Pathways of Microplastics to Habitats. *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, 229-244.
- Budiyanto, S., Anies, N., Purnaweni, H., & Sunoko, H. R. 2018. Environmental analysis of the impacts of batik waste water pollution on the quality of dug well water in the Batik Industrial Center of Jenggog Pekalongan City. *E3S Web of Conferences*, 31(1): p.09008.

- Faujiah, I. N., & Wahyuni, I. R. 2022, March. Kelimpahan dan karakteristik mikroplastik pada air minum serta potensi dampaknya terhadap kesehatan manusia. In *Gunung Djati Conference Series*, (7): 89-95.
- Febriani, I. S., Amin, B., & Fauzi, M. 2020. Distribusi mikroplastik di perairan Pulau Bengkalis Kabupaten Bengkalis Provinsi Riau. *Depik*, 9(3): 386-392.
- Febriyanti, S. V., Utomo, K. P. & Sulastri, A. 2024. Analisis Bentuk Mikroplastik pada Sedimen Pantai Mangrove di Kalimantan Barat. *Journal of Marine Research*, 13(2): 231-238.
- Hafitri, M., Permata, L., Kurnia, M. U. & Yuniarti, M. S. 2022. Analisis Jenis Mikroplastik pada Sedimen Dasar Perairan Pulau Untung Jawa, Kepulauan Seribu, DKI Jakarta. *Jurnal Indonesia Sosial Sains*, 3(3): 443-454. <https://doi.org/10.59141/jiss.v3i03.551>.
- Hanif, K. H., Suprijanto, J., & Pratikto, I. 2021. Identifikasi Mikroplastik di Muara Sungai Kendal, Kabupaten Kendal. *Journal of Marine Research*, 10(1): 1-6.
- Hapsari, L. P. 2022. Pemodelan Hidrodinamika Pola Arus dan Pasang Surut di Perairan Pulau Tidung. *Maspari Journal-Marine Science Research*, 14(2): 79-89.
- Ibrahim, F. T., Suprijanto, J., & Haryanti, D. 2023. Analisis Kandungan Mikroplastik pada Sedimen di Perairan Semarang, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 12(1): 144-150.
- Ismanto, A., Hadibarata, T., Kristanti, R.A., Sugianto, D.N., Widada, S., Atmodjo, W., Satriadi, A., Anindita, M.A., Al-Mohaimed, A.M. & Abbasi, A.M., 2023. A novel report on the occurrence of microplastics in Pekalongan River Estuary, Java Island, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 196: p.115563.
- Laila, Q. N., Purnomo, P. W., & Jati, O. E. 2020. Kelimpahan Mikroplastik Pada Sedimen Di Desa Mangunharjo, Kecamatan Tugu, Kota Semarang. *Jurnal Pasir Laut*, 4(1): 28-35.
- Masura, J., Baker, J. E., Foster, G., Arthur, C., & Herring, C. E. 2015. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48,1-31. <https://doi.org/10.25607/OBP-604>
- Nainggolan, D. H., Indarjo, A., & Suryono, C. A. 2022. Mikroplastik yang Ditemukan di Perairan Karangjahe, Rembang, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 11(3): 374-382.
- Nor, N. H. M., & Obbard, J. P. 2013. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1-2): 278-283. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.025>
- Perancak, D. S., Yunanto, A., Sarasita, D., & Yona, D. 2021. Analisis Mikroplastik Pada Kerang Kijing (*Pilsbryconcha exilis*) Di Sungai Perancak, Jembrana, Bali. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(2):445-451
- 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>
- Purba, N. P., Pranowo, W. S., Simanjuntak, S. M., Faizal, I., Jasmin, H. H., Handyman, D. I., & Mulyani, P. G. 2019. Lintasan sampah mikro plastik di kawasan konservasi perairan Nasional Laut Sawu, Nusa Tenggara Timur. *Depik*, 8(2): 125-134.
- Putri, A. S., Nurhalimah, L., & Azzahra, M. F. 2022. Identifikasi Karakteristik dan Kelimpahan Mikroplastik Pada Sampel Air Kali Surabaya. *Environmental Pollution Journal*, 2(2): 42-435. <https://doi.org/10.58954/epj.v2i2.85>
- Rahim, Z., Zamani, N. P., & Ismet, M. S. 2022. Kontaminasi mikroplastik pada perna viridis di teluk Lampung. *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(1): 48-56.
- Rohmah, S. M., Karsa, A. P., Chandra, A. B., & Abida, I. W. 2023. Identifikasi Mikroplastik Pada Air, Sedimen, dan Bivalvia di Hilir Sungai Brantas. *Environmental Pollution Journal*, 2(2): 379-389.
- Seprandita, C. W., Suprijanto, J. & Ridlo, A. 2022. Kelimpahan mikroplastik di perairan zona pemukiman, zona pariwisata dan zona perlindungan Kepulauan Karimunjawa, Jepara. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(1): 111-122.
- Suharyo, S & Adrianto, D. 2018. Studi Hasil Running Model Arus Permukaan dengan Software Numerik Mike 21/3 (Guna Penentuan Lokasi Penempatan Stasiun Energi Arus Selat Lombok-Nusapenida). *Applied Technology and Computing Science Journal*, 1(1): 30-38. <https://doi.org/10.33086/atcsj.v1i1.8>
- Susanto, C. A. Z., Fitria, S. N., Purwaningrum, D., Fadila, M. D., Triajie, H., & Chandra, A. B. 2022. Kajian Kelimpahan Mikroplastik Pada Berbagai Tekstur Sedimen Di Kawasan Pantai Wisata Mangrove Desa Labuhan. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 3(4): 143-150.

- Tristanova, T., Ismanto, A., Widiaratih, R., Zainuri, M., Sugianto, D. N., Rochaddi, B., Ismuniarti, D. H., Wulandari, S. Y., Hernawan, U., Hadibarata, T., & Anindita, M. A. 2024. Modeling the fate of microplastics in the Sengkarang Estuary, Pekalongan City, Central Java, Indonesia. *Environmental Quality Management*, 34(1): p.e22239. <https://doi.org/10.1002/tqem.22239>
- Wardani, A. E., Zainuri, M., Wulandari, S. Y., & Rochaddi, B. 2024. Sebaran Klorofil-a dan Material Padatan Tersuspensi (MPT) di Muara Sungai Loji, Pekalongan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(3): 229-238.
- Wulandari, S. Y., Karna, R. O., Bambang, Y., Aris, I., Muslim, M., Jarot, S., Hendry, H., & Siti, M. 2021. Microplastics model distribution in Semarang Waters. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 25(1): 109–120
- Zhang, W., Zhang, S., Wang, J., Wang, Y., Mu, J., Wang, P., Lin, X. & Ma, D., 2017. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China. *Environmental pollution*, 231: 541-548.