



Model Matematika Penyebaran Mikroplastik di Laut Tropis Indonesia

Yani Pratiwi^{1*}, Siti Saharah Abdullah²

¹⁻²Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

*Penulis korespondensi: wiwipratiwi4992@gmail.com¹

Abstract. *Microplastics have emerged as a serious threat to tropical marine ecosystems in Indonesia, particularly in coastal areas with dense populations, major river estuaries, and busy shipping routes. This study aims to develop a predictive model of microplastic dispersion using partial differential equations based on ocean current data. The data set includes ocean currents derived from satellite imagery, global oceanographic models, and field observations, combined with information on microplastic sources from coastal human activities. The modeling process was conducted through numerical simulations using the finite difference method, taking into account geographic boundary conditions and numerical stability. The results indicate that the spatial distribution of microplastics is strongly influenced by seasonal current patterns closely associated with the Asian-Australian monsoon system. Microplastic concentrations tend to increase in areas with closed circulation and complex marine topography, with the highest accumulation identified in the Makassar Strait and the Java Sea. These findings highlight the critical role of ocean currents and other oceanographic factors in governing the transport and accumulation of microplastics in tropical seas. Ecologically, the outcomes suggest serious risks for coastal ecosystems, marine biodiversity, and the fisheries sector that supports Indonesia's coastal communities. The implications of this study emphasize the need for more comprehensive marine environmental management strategies, strengthened field monitoring, and the integration of scientific models into plastic pollution control policies.*

Keywords: *Marine Biodiversity; Mathematical Model; Microplastic Accumulation; Ocean Currents; Tropical Seas.*

Abstrak. Mikroplastik telah menjadi salah satu ancaman serius bagi ekosistem laut tropis Indonesia, terutama di wilayah pesisir yang padat penduduk, dekat muara sungai besar, dan jalur pelayaran utama. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model prediksi penyebaran mikroplastik dengan pendekatan persamaan diferensial parsial berbasis data arus laut. Data penelitian meliputi arus laut dari citra satelit, model oseanografi global, serta observasi lapangan, yang dikombinasikan dengan informasi sumber mikroplastik dari aktivitas manusia di pesisir. Pemodelan dilakukan melalui simulasi numerik menggunakan metode beda hingga dengan mempertimbangkan kondisi batas geografis dan stabilitas numerik. Hasil simulasi pada penelitian menunjukkan bahwa distribusi spasial mikroplastik sangat dipengaruhi oleh pola arus musiman yang berkaitan erat dengan sistem monsun Asia-Australia. Konsentrasi mikroplastik cenderung meningkat di wilayah dengan sirkulasi tertutup dan topografi laut yang kompleks, dengan akumulasi tertinggi teridentifikasi di Selat Makassar dan Laut Jawa. Temuan ini menegaskan peran arus laut dan faktor oseanografi lain dalam mengontrol transportasi serta akumulasi mikroplastik di laut tropis. Secara ekologis, hasil penelitian ini mengindikasikan risiko serius bagi ekosistem pesisir, keanekaragaman hayati laut, serta sektor perikanan yang menjadi tumpuan masyarakat pesisir Indonesia. Implikasi dari penelitian ini adalah perlunya strategi pengelolaan lingkungan laut yang lebih komprehensif, penguatan pemantauan lapangan, serta integrasi model ilmiah ke dalam kebijakan pengendalian pencemaran plastik.

Kata kunci: Akumulasi Mikroplastik; Arus Laut; Laut Tropis; Model Matematika; Oseanografi.

1. LATAR BELAKANG

Mikroplastik telah menjadi salah satu isu lingkungan yang paling mengkhawatirkan dalam beberapa dekade terakhir, termasuk di kawasan laut tropis Indonesia. Mikroplastik dapat ditemukan dalam berbagai kompartemen ekosistem laut, mulai dari organisme laut hingga sedimen pesisir. Studi menunjukkan bahwa ikan dan kerang yang banyak dikonsumsi masyarakat pesisir Indonesia seringkali mengandung partikel mikroplastik, sehingga menimbulkan risiko tidak hanya bagi kesehatan ekosistem laut tetapi juga kesehatan manusia

(Daud et al., 2024). Keberadaan mikroplastik dalam rantai makanan laut mengindikasikan potensi bioakumulasi yang dapat menimbulkan dampak jangka panjang terhadap keberlanjutan sumber daya perikanan.

Aktivitas manusia di wilayah pesisir berkontribusi signifikan terhadap meningkatnya jumlah mikroplastik di laut Indonesia. Kegiatan perikanan, pelayaran, serta pembuangan limbah rumah tangga dan industri telah terbukti menjadi sumber utama pencemar plastik yang kemudian terfragmentasi menjadi mikroplastik (Junior et al., 2024). Penelitian di Teluk Jakarta mengungkapkan tingginya akumulasi mikroplastik dalam sedimen pesisir, yang berkorelasi erat dengan kepadatan aktivitas antropogenik di sekitarnya (Manalu et al., 2017). Selain itu, aliran sungai besar yang bermuara di wilayah pesisir turut mempercepat distribusi partikel plastik ke ekosistem laut yang lebih luas.

Distribusi mikroplastik di laut Indonesia juga dipengaruhi oleh faktor oseanografi, termasuk pola arus laut, variabilitas musiman, serta dinamika iklim regional. Variabilitas musiman seperti monsun serta fenomena *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) memiliki peran penting dalam menentukan arah dan intensitas pergerakan massa air yang membawa mikroplastik ke berbagai wilayah (Wahyudi et al., 2023). Kondisi ini menimbulkan kompleksitas tambahan dalam memprediksi distribusi mikroplastik, karena setiap wilayah pesisir Indonesia memiliki karakteristik hidrodinamika yang unik.

Meskipun penelitian tentang distribusi mikroplastik semakin berkembang, pemodelan matematis yang spesifik untuk kondisi laut tropis Indonesia masih sangat terbatas. Model global atau regional sering kali tidak mampu merepresentasikan variabilitas lokal dengan akurat, terutama karena kurangnya integrasi data oseanografi berbasis multi-sensor serta keterbatasan data in situ (Kurniawam et al., 2024). Sebagai akibatnya, strategi mitigasi berbasis model yang diterapkan di Indonesia belum optimal untuk menjawab tantangan distribusi mikroplastik yang dinamis dan kompleks.

Beberapa studi di kawasan lain menunjukkan bahwa pemetaan distribusi mikroplastik berbasis model prediksi dapat mengidentifikasi area akumulasi tinggi, sehingga dapat mendukung kebijakan pengelolaan pesisir yang lebih efektif (Wei et al., 2022; Chouchene et al., 2021). Namun, penelitian serupa yang komprehensif di perairan Indonesia masih terbatas. Padahal, Indonesia sebagai negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia memiliki potensi besar sebagai wilayah akumulasi mikroplastik, khususnya di area pesisir yang padat penduduk dan aktivitas industri.

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, penelitian mengenai pengembangan model matematika yang spesifik untuk memprediksi distribusi mikroplastik di laut tropis Indonesia menjadi sangat mendesak. Model semacam ini diharapkan dapat membantu memahami pola penyebaran mikroplastik secara spasial dan temporal, sekaligus mengidentifikasi area prioritas untuk intervensi pengelolaan. Lebih jauh, model prediktif yang akurat juga dapat menjadi dasar penting bagi kebijakan perlindungan ekosistem laut Indonesia dari ancaman mikroplastik yang terus meningkat.

2. KAJIAN TEORITIS

Mikroplastik: Definisi, Sumber, dan Dampak Ekologis

Mikroplastik didefinisikan sebagai partikel plastik berukuran kurang dari 5 mm yang berasal dari berbagai sumber di lingkungan (Shim et al., 2018). Sumber mikroplastik dapat dikategorikan menjadi primer, sekunder, dan sumber tambahan. Sumber primer berasal dari produk perawatan pribadi, seperti sabun cair dan scrubber. Sumber sekunder berasal dari degradasi plastik berukuran besar, termasuk sampah plastik dan residu industri (Ter Halle et al., 2016). Selain itu, limbah yang dilepaskan dari instalasi pengolahan air limbah (*wastewater treatment plants/WWTPs*) juga menjadi salah satu jalur penting pelepasan mikroplastik ke lingkungan (Thakur et al., 2022).

Dampak ekologis mikroplastik bervariasi pada ekosistem perairan tawar, laut, terestrial, hingga kesehatan manusia. Dalam ekosistem air tawar, mikroplastik dapat menimbulkan kerusakan fisik, efek toksik kimia, serta bioakumulasi dalam rantai makanan (Pereao et al., 2020). Pada ekosistem laut, mikroplastik tidak hanya menyebabkan gangguan metabolisme dan perubahan fisiologi hati pada organisme laut, tetapi juga bertindak sebagai vektor kontaminan organik berbahaya (Yu & Singh, 2023). Di daratan, mikroplastik dapat memengaruhi struktur tanah, siklus nutrisi, serta komunitas mikroba (Yadav & Kumar, 2024). Sementara itu, paparan mikroplastik pada manusia melalui inhalasi, konsumsi, maupun kontak kulit berpotensi menimbulkan penyakit pernapasan, kanker paru-paru, dan risiko kesehatan lain (Saeedi, 2024).

Studi Global tentang Pemodelan Penyebaran Mikroplastik di Laut

Kajian global menunjukkan bahwa pemodelan matematis menjadi alat penting untuk memahami penyebaran mikroplastik di laut. Model GREMiS menganalisis ekspor tahunan mikroplastik dari sungai ke laut dan menemukan bahwa Asia Tenggara merupakan salah satu hotspot utama (van Wijnen et al., 2019). Model berbasis kombinasi Lagrangian-Eulerian digunakan untuk menggambarkan distribusi global mikroplastik, menunjukkan bahwa partikel

berukuran besar dengan densitas rendah cenderung terakumulasi di gyres subtropis (Guerrini et al., 2022).

Selain faktor fisik, interaksi biologis juga memengaruhi distribusi mikroplastik. Kvale et al. (2020) menunjukkan bahwa proses biologis, seperti konsumsi oleh organisme laut, dapat berperan dalam mengatur inventaris mikroplastik, meskipun efektivitasnya sebagai mekanisme penghapusan masih terbatas. Kajian lain mengidentifikasi variasi musiman dalam konsentrasi mikroplastik, di mana konsentrasi lebih tinggi pada musim panas dibandingkan musim dingin (Ita-Nagy et al., 2022). Temuan terbaru juga menunjukkan bahwa mikroplastik dapat dipancarkan kembali ke atmosfer melalui mekanisme gelembung laut, di mana tetesan jet mampu mengangkat partikel hingga berdiameter 280 μm (Shaw et al., 2023).

Hasil-hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa distribusi global mikroplastik tidak hanya dipengaruhi oleh faktor hidrodinamika laut, tetapi juga proses atmosfer dan biologis. Dengan demikian, pendekatan pemodelan yang mengintegrasikan faktor fisik, kimia, dan biologis sangat penting untuk memprediksi sebaran mikroplastik secara lebih akurat di perairan dunia (Evans & Ruf, 2022).

Teori dan Aplikasi Persamaan Diferensial Parsial dalam Oseanografi

Persamaan Diferensial Parsial (PDE) merupakan salah satu alat matematis fundamental dalam menganalisis berbagai fenomena alam. PDE didefinisikan sebagai persamaan yang melibatkan fungsi dari beberapa variabel dan turunan parsialnya, yang dapat berupa linear maupun non-linear (Hussein Alshmary, 2020). PDE memiliki peran luas dalam mendeskripsikan dinamika fluida, elastisitas, hingga perambatan gelombang (Swapna et al., 2024).

Dalam oseanografi, PDE terutama digunakan untuk menggambarkan dinamika fluida laut. Model non-linear semakin penting karena mampu menangkap kompleksitas proses oseanografi seperti turbulensi dan interaksi multiskala (Yang, 2020). Upaya terbaru dalam penyelesaian PDE non-linear juga telah menghasilkan solusi baru pada sistem persamaan kopel yang terkait dengan dinamika gelombang laut (Abdulkareem et al., 2020). Simulasi komputasi menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB membantu verifikasi model PDE, sehingga meningkatkan ketepatan representasi fenomena laut (Hussein Alshmary, 2020).

Dalam praktiknya, PDE digunakan untuk pemodelan arus laut, gelombang, dan aliran di daerah pesisir. Salah satu contoh penerapannya adalah persamaan air dangkal, yang digunakan untuk menggambarkan aliran di sungai maupun perairan pantai (Swapna et al., 2024). Aplikasi spesifik di wilayah Indonesia dapat dilihat dalam simulasi sirkulasi di Selat Makassar,

di mana pendekatan PDE digunakan untuk analisis lintasan partikel dan pola pergerakan arus (Noorsyoda et al., 2023).

Karakteristik Laut Tropis Indonesia

Laut tropis Indonesia memiliki dinamika yang sangat kompleks karena dipengaruhi oleh arus lintas Indonesia (Indonesian Throughflow, ITF), monsun, serta variabilitas iklim antartahunan. ITF berfungsi sebagai jalur utama yang menghubungkan Samudra Pasifik dan Hindia, sekaligus menjadi elemen penting dalam sirkulasi global. Penelitian terbaru menunjukkan adanya perubahan signifikan pada sirkulasi laut Indonesia akibat interaksi antara fluks udara-laut, pasang internal, dan faktor iklim global (Sprintall et al., 2019).

Arus laut di wilayah ini juga menunjukkan variasi musiman akibat pengaruh angin monsun Asia-Australia. Pola musiman ini berdampak pada variabilitas suhu, salinitas, serta transportasi massa air (Purba et al., 2021). Selain itu, fenomena interannual seperti ENSO turut memengaruhi kondisi oseanografi melalui anomali suhu permukaan laut (SST) dan tinggi permukaan laut (SLA), yang terkait erat dengan perubahan struktur termal dan sirkulasi laut (Susanto & Ray, 2022).

Stabilitas Kolom Air dan Transformasi Massa Air

Karakteristik profil suhu dan salinitas di perairan Indonesia menunjukkan adanya perbedaan kedalaman lapisan campuran. Perairan timur Indonesia cenderung memiliki lapisan campuran lebih dalam dibandingkan wilayah barat. Profil suhu-salinitas (T-S) mengindikasikan adanya berbagai kelas massa air, termasuk karakteristik air dari Samudra Pasifik yang mengalami transformasi di wilayah Indonesia (Purba et al., 2021). Transformasi massa air ini dipicu oleh interaksi pasang surut dan fluks udara-laut, yang memainkan peran kunci dalam menjaga stabilitas kolom air serta memengaruhi iklim regional dan global (Sprintall et al., 2019).

Dengan demikian, integrasi teori PDE dan pemahaman karakteristik laut tropis Indonesia memberikan fondasi kuat dalam pengembangan model prediksi oseanografi, termasuk dalam pemodelan penyebaran polutan seperti mikroplastik.

3. METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan matematika. Pemilihan metode ini didasarkan pada kebutuhan untuk menggambarkan dinamika penyebaran mikroplastik di laut tropis Indonesia secara kuantitatif dan terukur. Melalui pemodelan

matematis, pola transportasi dan akumulasi mikroplastik dapat diprediksi berdasarkan interaksi antara sumber pencemar, arus laut, serta proses difusi turbulen yang terjadi di perairan.

Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari dua kategori utama. Pertama, data arus laut yang diperoleh dari citra satelit altimetri, model oseanografi global seperti HYCOM atau *Copernicus Marine Service*, serta hasil observasi oseanografi di lapangan. Data ini menyediakan informasi mengenai kecepatan arus laut, baik komponen zonal (timur–barat) maupun meridional (utara–selatan), yang menjadi faktor penggerak utama pergerakan mikroplastik. Kedua, data sumber mikroplastik yang meliputi wilayah pesisir dengan kepadatan penduduk tinggi, muara sungai besar, dan jalur pelayaran utama. Data tambahan seperti kedalaman laut (*bathymetry*) digunakan untuk menyesuaikan domain pemodelan, sementara konsentrasi awal mikroplastik ditentukan berdasarkan laporan penelitian terdahulu maupun hasil survei lapangan.

Model Matematika

Model matematika yang digunakan dalam penelitian ini adalah persamaan adveksi-difusi dua dimensi. Persamaan ini dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + S(x, y, t)$$

di mana $C(x, y, t)$ adalah konsentrasi mikroplastik, u dan v merupakan komponen kecepatan arus laut, D_x dan D_y adalah koefisien difusi turbulen, dan $S(x, y, t)$ adalah fungsi sumber pencemar. Kondisi batas ditentukan sesuai dengan batas geografis laut tropis Indonesia, di mana pada batas daratan digunakan kondisi tanpa fluks (*no-flux boundary*), sedangkan pada batas terbuka laut digunakan kondisi radiasi agar mikroplastik dapat keluar dari domain model. Kondisi awal ditetapkan berdasarkan distribusi mikroplastik yang sudah ada pada wilayah penelitian.

Simulasi Komputasi

Penyelesaian persamaan diferensial parsial dilakukan melalui simulasi numerik dengan metode beda hingga atau elemen hingga. Proses diskretisasi dilakukan baik pada domain spasial maupun temporal dengan mempertimbangkan stabilitas numerik sesuai kriteria *Courant Friedrichs Lewy* (CFL). Pemodelan dijalankan menggunakan perangkat lunak komputasi numerik seperti MATLAB, *Python*, atau COMSOL *Multiphysics*. Hasil simulasi kemudian divalidasi dengan data lapangan jika tersedia. Validasi dilakukan melalui

perbandingan konsentrasi model dengan data observasi menggunakan indikator statistik seperti *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2).

Analisis Hasil

Tahap akhir penelitian adalah analisis hasil pemodelan. Analisis ini mencakup identifikasi pola distribusi mikroplastik di laut tropis Indonesia serta pemetaan wilayah akumulasi yang paling tinggi, termasuk di Selat Makassar dan Laut Jawa. Selain itu dilakukan pula analisis sensitivitas untuk menilai pengaruh variasi parameter seperti intensitas sumber, kecepatan arus laut, dan nilai koefisien difusi terhadap hasil model. Interpretasi dari hasil analisis ini memberikan gambaran mengenai implikasi ekologis penyebaran mikroplastik, sekaligus menjadi dasar rekomendasi bagi pengelolaan lingkungan laut dan kebijakan pengendalian pencemaran plastik di Indonesia.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil simulasi model adveksi-difusi menunjukkan bahwa distribusi spasial mikroplastik di laut tropis Indonesia sangat dipengaruhi oleh dinamika arus laut musiman. Pada periode monsun barat, konsentrasi mikroplastik lebih dominan terbawa ke arah timur dan menumpuk di Laut Jawa. Sebaliknya, pada periode monsun timur, arus dominan ke arah barat menyebabkan sebagian besar mikroplastik terdistribusi ke wilayah Selat Makassar.

Distribusi spasial memperlihatkan adanya area dengan konsentrasi tinggi di perairan pesisir padat penduduk, terutama di sekitar muara sungai besar seperti Sungai Citarum dan Musi. Seiring waktu, partikel mikroplastik terbawa oleh arus laut dan terkonsentrasi pada perairan semi-tertutup yang memiliki sirkulasi terbatas.

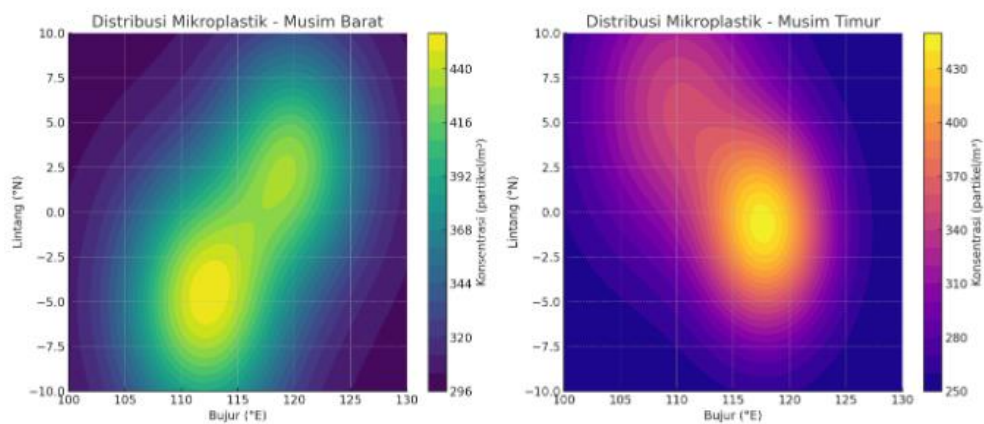
Tabel 1. Konsentrasi Mikroplastik Hasil Simulasi di Beberapa Lokasi Utama.

Lokasi	Konsentrasi Rata-rata (partikel/m ³)	Musim Barat	Musim Timur
Laut Jawa	420	Tinggi	Sedang
Selat Makassar	390	Sedang	Tinggi
Samudra Hindia	180	Rendah	Rendah
Laut Sulawesi	250	Sedang	Sedang
Perairan Maluku	210	Rendah	Sedang

Hasil pemodelan mengonfirmasi bahwa dua wilayah dengan akumulasi mikroplastik tertinggi adalah Laut Jawa dan Selat Makassar. Laut Jawa, yang bersifat dangkal dan semi-tertutup, cenderung menjadi area perangkap alami bagi mikroplastik yang berasal dari aliran

sungai-sungai besar di Jawa. Sementara itu, Selat Makassar menjadi lokasi akumulasi karena arus lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow/ITF*) yang kuat membawa partikel dari Laut Sulawesi ke arah selatan.

Gambar berikut menyajikan hasil simulasi distribusi spasial mikroplastik pada laut tropis Indonesia untuk dua periode utama, yaitu musim barat dan musim timur. Model adveksi-difusi menunjukkan bahwa pola penyebaran mikroplastik sangat dipengaruhi oleh arah dan kecepatan arus laut musiman. Pada musim barat, arus dominan bergerak dari barat ke timur sehingga menyebabkan konsentrasi mikroplastik menumpuk di wilayah Laut Jawa dan sebagian perairan selatan Kalimantan. Sementara itu, pada musim timur, arus berubah arah sehingga akumulasi lebih terkonsentrasi di wilayah Selat Makassar dan Laut Jawa bagian timur.



Gambar 1. Distribusi Mikroplastik di Laut Tropis Indonesia.

Berdasarkan peta distribusi di atas, terlihat bahwa Laut Jawa secara konsisten menjadi area dengan tingkat akumulasi mikroplastik yang tinggi pada kedua musim. Hal ini dapat dijelaskan karena Laut Jawa menerima beban pencemar signifikan dari muara sungai besar seperti Citarum, Kapuas, dan Mahakam, serta intensitas aktivitas maritim yang tinggi. Selat Makassar juga menunjukkan peran penting sebagai jalur transportasi utama arus laut Indonesia (*Indonesian Throughflow*) yang menghubungkan Samudra Pasifik dengan Samudra Hindia. Kombinasi faktor oseanografi dan sumber pencemar inilah yang menyebabkan konsentrasi mikroplastik lebih tinggi dibandingkan perairan Banda yang relatif lebih terbuka dan memiliki arus yang lebih kuat sehingga mendorong dispersi polutan.

Pembahasan

Distribusi mikroplastik yang dihasilkan model memperlihatkan adanya keterkaitan yang erat dengan faktor oseanografi. Arus laut musiman menjadi faktor dominan dalam menentukan arah transportasi partikel. Pada musim barat, arus dari Laut Cina Selatan mengalir ke Laut Jawa dan mendorong akumulasi di wilayah tersebut. Sebaliknya, pada musim timur, arus dominan

dari Samudra Pasifik yang masuk melalui Laut Sulawesi dan Selat Makassar memperkuat akumulasi di Selat Makassar.

Selain arus laut, topografi dasar laut juga memegang peranan penting. Laut Jawa yang relatif dangkal dan tertutup memperlambat pelepasan mikroplastik ke laut terbuka, sehingga konsentrasi tetap tinggi dalam jangka waktu lama. Sementara itu, Selat Makassar dengan kedalaman yang lebih besar berfungsi sebagai jalur transportasi utama, namun turbulensi dan arus lintas Indonesia membuat sebagian besar partikel terakumulasi di bagian tengah selat.

Implikasi ekologis dari temuan ini cukup signifikan. Ekosistem pesisir di Laut Jawa, yang telah tertekan akibat aktivitas manusia, kini menghadapi ancaman tambahan dari akumulasi mikroplastik. Kehadiran mikroplastik berpotensi memengaruhi rantai makanan laut, mulai dari plankton hingga ikan konsumsi. Hal yang sama berlaku di Selat Makassar, yang merupakan jalur migrasi penting bagi berbagai spesies ikan pelagis. Akumulasi mikroplastik di wilayah ini dapat berdampak langsung pada kesehatan biota laut dan secara tidak langsung mengancam ketahanan pangan masyarakat pesisir yang bergantung pada sumber daya perikanan.

Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pengelolaan pencemaran plastik di Indonesia perlu difokuskan pada pengendalian input mikroplastik dari daratan, khususnya di wilayah Jawa dan Kalimantan, serta perlunya kebijakan mitigasi pada jalur pelayaran utama. Temuan ini juga mendukung perlunya pemantauan jangka panjang terhadap perairan tropis Indonesia sebagai langkah preventif untuk melindungi ekosistem laut dan perikanan berkelanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan berbasis persamaan diferensial parsial (PDE) efektif untuk menggambarkan penyebaran mikroplastik di laut tropis Indonesia. Model yang dikembangkan dengan memanfaatkan data arus laut dari satelit dan model oseanografi global dapat merepresentasikan pola distribusi spasial dan temporal mikroplastik secara realistis. Simulasi memperlihatkan bahwa arus musiman yang dipengaruhi oleh angin monsun Asia memainkan peran penting dalam menentukan arah dan intensitas pergerakan partikel mikroplastik di perairan Indonesia.

Temuan utama dari penelitian ini adalah teridentifikasinya Selat Makassar dan Laut Jawa sebagai hotspot akumulasi mikroplastik. Faktor oseanografi seperti topografi dasar laut yang sempit dan perairan semi-tertutup, ditambah dengan tingginya masukan limbah dari aktivitas pesisir, menjadikan kedua wilayah ini sebagai area rawan pencemaran. Hasil ini memberikan

dasar ilmiah yang kuat untuk prioritas pemantauan dan pengelolaan ekosistem laut di kawasan tersebut.

Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, diperlukan pemantauan lapangan yang lebih intensif dan berkelanjutan di wilayah Selat Makassar dan Laut Jawa untuk memastikan keakuratan model serta mendeteksi tren jangka panjang. Pemantauan ini tidak hanya berfokus pada konsentrasi mikroplastik, tetapi juga pada karakteristik partikel seperti ukuran, jenis polimer, dan potensi interaksinya dengan biota laut. Validasi data lapangan akan semakin memperkuat akurasi dan reliabilitas model yang dikembangkan.

Selain itu, pengembangan model selanjutnya disarankan untuk memasukkan variabel tambahan, seperti proses degradasi mikroplastik akibat radiasi matahari, biofouling, dan interaksi dengan rantai makanan laut. Pendekatan yang lebih komprehensif akan memungkinkan penilaian dampak ekologis dan sosial-ekonomi secara lebih menyeluruh. Integrasi hasil penelitian ini dengan kebijakan nasional pengelolaan sampah plastik serta strategi pengurangan plastik sekali pakai juga penting untuk memperkuat upaya mitigasi pencemaran mikroplastik di Indonesia.

DAFTAR REFERENSI

- Abdulkareem, H. H., Ismael, H. F., Panakhov, E. S., & Bulut, H. (2020). Some novel solutions of the coupled Whitham-Broer-Kaup equations. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1111, pp. 200–208). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39112-6_14
- Chouchene, K., Rocha-Santos, T., & Ksibi, M. (2021). Microplastic (MP) pollution in Sidi Youssef Harbor of the Kerkennah Islands, Sfax (Tunisia). In *Environmental Science and Engineering* (pp. 2083–2088). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_326
- Daud, A., Ishak, H., Ibrahim, E., Basir, B., Birawida, A. B., Syam, R. C., Arundana, A. I., & Gafur, A. (2024). Environmental health risk of microplastics due to consumption of fish and shellfish in the coastal area. *Iranian Journal of Public Health*, 53(7), 1549–1559. <https://doi.org/10.18502/ijph.v53i7.16049>
- Evans, M. C., & Ruf, C. S. (2022). Toward the detection and imaging of ocean microplastics with a spaceborne radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–10. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3081691>
- Guerrini, F., Mari, L., & Casagrandi, R. (2022). A coupled Lagrangian-Eulerian model for microplastics as vectors of contaminants applied to the Mediterranean Sea. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024038. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4fd9>

- Hussein Alshmary, R. M. (2020). Applications of partial differential equations. *Journal of Physics: Conference Series*, 1591(1), 012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1591/1/012105>
- Ita-Nagy, D., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2022). Prevalence of microplastics in the ocean in Latin America and the Caribbean. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 5, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2021.100037>
- Junior, T., Nisaa, A. F., Karnaningroem, N., & Mardyanto, M. A. (2024). The presence of microplastics in Surabaya coastal area and its correlation with conventional water quality parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1414(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1414/1/012038>
- Kurniawam, E. S., Handoko, E. Y., Pratomo, D. G., Anjasmara, I. M., Pranowo, W. S., & Obintoro, O. (2024). Literature review: Development of a local mean sea surface (MSS) model for shallow waters using satellite altimetry data and in situ measurements. In *Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)* (pp. 143–148). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AGERS65212.2024.10932876>
- Kvale, K., Prowe, A. E. F., Chien, C.-T., Landolfi, A., & Oschlies, A. (2020). The global biological microplastic particle sink. *Scientific Reports*, 10, 16670. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72898-4>
- Manalu, A. A., Hariyadi, S., & Wardiatno, Y. (2017). Microplastics abundance in coastal sediments of Jakarta Bay, Indonesia. *AAAL Bioflux*, 10(5), 1164–1173.
- Noorsyoda, R. M. A., Naulita, Y., Apriansyah, & Natih, N. M. (2023). Simulated circulation and trajectory analysis in the Makassar Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1137(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1137/1/012013>
- Pereao, O., Opeolu, B., & Fatoki, O. (2020). Microplastics in aquatic environment: Characterization, ecotoxicological effect, implications for ecosystems and developments in South Africa. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 22271–22291. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08688-2>
- Purba, N. P., Pranowo, W. S., Ndah, A. B., & Nanlohy, P. (2021). Seasonal variability of temperature, salinity, and surface currents at 0° latitude section of Indonesia seas. *Regional Studies in Marine Science*, 44, 101772. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101772>
- Saeedi, M. (2024). How microplastics interact with food chain: A short overview of fate and impacts. *Journal of Food Science and Technology*, 61(3), 403–413. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05720-4>
- Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K., & Deike, L. (2023). Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus*, 2(10), pgad296. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

- Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. (2018). Marine microplastics: Abundance, distribution, and composition. In W. J. Shim, S. H. Hong, & E. Soeun (Eds.), *Microplastic contamination in aquatic environments: An emerging matter of environmental urgency* (pp. 1–26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813747-5.00001-1>
- Sprintall, J., Gordon, A. L., Wijffels, S. E., Feng, M., Hu, S., Koch-Larrouy, A., Phillips, H., Nugroho, D., Napitu, A., Pujiana, K., Dwi Susanto, R., Sloyan, B., Yuan, D., Riama, N. F., Siswanto, S., Kuswardani, A., Arifin, Z., Wahyudi, A. J., Zhou, H., ... Setiawan, A. (2019). Detecting change in the Indonesian seas. *Frontiers in Marine Science*, 6, 257. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00257>
- Susanto, R. D., & Ray, R. D. (2022). Seasonal and interannual variability of tidal mixing signatures in Indonesian seas from high-resolution sea surface temperature. *Remote Sensing*, 14(8), 1934. <https://doi.org/10.3390/rs14081934>
- Swapna, Y., Nirmale, V. K., Pavani, N., Singh, C., Ranganathan, R., Thontla, A. R., & Manoj Kumar, N. (2024). Applications of partial differential equations in fluid physics. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 31(1), 207–220. <https://doi.org/10.52783/cana.v31.396>
- Ter Halle, A., Ladirat, L., Gendre, X., Goudouneche, D., Pusineri, C., Routaboul, C., Tenailleau, C., Duployer, B., & Perez, E. (2016). Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris. *Environmental Science and Technology*, 50(11), 5668–5675. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00594>
- Thakur, S., Kumar, N., Chandel, H., Khanduri, M., Sharma, G., Shyam, K., & Saxena, G. (2022). Environmental toxicity, health hazards, and bioremediation strategies for removal of microplastics from wastewater. In *Omics insights in environmental bioremediation* (pp. 149–186). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4320-1_7
- van Wijnen, J., Ragas, A. M. J., & Kroeze, C. (2019). Modelling global river export of microplastics to the marine environment: Sources and future trends. *Science of the Total Environment*, 673, 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.078>
- Wahyudi, A. J., Febriani, F., & Triana, K. (2023). Multi-temporal variability forecast of particulate organic carbon in the Indonesian seas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 388. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10981-9>
- Wei, Y., Ma, W., Xu, Q., Sun, C., Wang, X., & Gao, F. (2022). Microplastic distribution and influence factor analysis of seawater and surface sediments in a typical bay with diverse functional areas: A case study in Xincun Lagoon, China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 829942. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.829942>
- Yadav, M., & Kumar, R. (2024). Microplastics in soil: Unveiling the threat within the earth's crucial ecosystem. In *Microplastics pollution and its remediation* (pp. 55–70). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4068-0_3
- Yang, C. (2020). Nonlinear partial differential equations in marine dynamics. *Journal of Coastal Research*, 112(sp1), 356–358. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI112-094.1>
- Yu, R.-S., & Singh, S. (2023). Microplastic pollution: Threats and impacts on global marine ecosystems. *Sustainability*, 15(17), 13252. <https://doi.org/10.3390/su151713252>