

**DINAMIKA DAN EMISI MIKROPLASTIK DI TELUK
JAKARTA**

ANNA IDA SUNARYO PURWIYANTO



**PROGRAM STUDI ILMU KELAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2023**

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Dinamika dan Emisi Mikroplastik di Teluk Jakarta” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Januari 2023

Anna Ida Sunaryo Purwiyanto
C561190011

RINGKASAN

ANNA IDA SUNARYO PURWIYANTO. Dinamika dan Emisi Mikroplastik di Teluk Jakarta. Dibimbing oleh TRI PRARTONO, ETTY RIANI, ALAN FRENDY KOROPITAN, dan YULI NAULITA.

Mikroplastik merupakan partikel dengan kisaran 1-5000 μm yang tersusun atas bahan polimer sintetis. Berbagai aktifitas (sanitasi, emisi lalu lintas, industri, pertanian, perikanan) merupakan sumber mikroplastik di alam. Mikroplastik tersebut kemudian mengalami transport ke perairan, melalui *run off*, aliran sungai, bahkan melayang di udara (mikroplastik atmosferik). Mikroplastik tersebut merupakan partikel padat dengan berbagai macam komposisi. Komponen utama mikroplastik adalah polimer yang kemudian diberi zat aditif sesuai peruntukan penggunaan plastik ketika berada dalam bentuk makro. Salah satu perairan yang mengalami tekanan mikroplastik dari sumber dan transportasi tersebut adalah Teluk Jakarta. Informasi keberadaan mikroplastik di Teluk Jakarta telah dilaporkan pada penelitian sebelumnya. Namun penelitian-penelitian tersebut masih bersifat dasar dan belum terintegrasi dengan baik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan menganalisis bagaimana dinamika dan neraca mikroplastik, serta mendeteksi kandungan zat aditif (*phthalate*) pada mikroplastik di Teluk Jakarta.

Sampling mikroplastik dilakukan terhadap mikroplastik atmosferik, mikroplastik di permukaan perairan dan sedimen. Sampling mikroplastik atmosferik dilakukan selama 12 bulan (Maret 2018 – Februari 2019) di atap gedung Pusat Penelitian Oseanografi - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Ancol. Sampling menggunakan *manual raingauge* yang dipasang selama 96 jam setiap bulannya, dengan 3 kali pengulangan. Sampling mikroplastik di perairan dan sedimen pada bulan Agustus 2020 pada sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta (Sungai Dadap, Sungai Angke, Sungai Pluit, Sungai Ciliwung, Sungai Kali Item, Sungai Koja, Sungai Cilincing, Sungai Marunda, dan Sungai Bekasi). Sembilan muara sungai tersebut berada pada Daerah Aliran Sungai (DAS) yang berbeda-beda, dengan kepadatan penduduk yang berbeda pula. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan *round net* dan *vanven grab*, dengan 3 kali pengulangan pada setiap stasiun. Neraca mikroplastik di Teluk Jakarta dianalisis dengan mempertimbangkan factor lingkungan seperti curah hujan, kecepatan angin, debit air sungai, jumlah partikel pada masing-masing stasiun, dan laju sedimentasi. Hasil perhitungan emisi dan perbandingan dominasi karakteristik mikroplastik digunakan dalam memprediksi fluks mikroplastik. Zat *phthalate* yang terkandung pada mikroplastik dideteksi menggunakan Micro-Raman Spectroscopic pada 25 sampel di perairan dan sedimen yang telah teridentifikasi sebagai mikroplastik.

Mikroplastik atmosferik tertangkap pada *raingauge* setiap bulan, dengan kelimpahan rata-rata 1,83 partikel/bulan. Kelimpahan mikroplastik yang diperoleh pada musim hujan lebih tinggi dibandingkan musim kemarau. Hal ini diduga karena adanya pengaruh intensitas cahaya matahari, angin dan curah hujan yang berbeda antara kedua musim tersebut. Meski demikian, secara statistik tidak ditemukan adanya perbedaan nyata pada kelimpahan mikroplastik setiap bulannya ($p > 0,05$). Karakteristik yang mendominasi mikroplastik atmosferik di Ancol

adalah bentuk fiber, rentang ukuran 300-500 μm , dan jenis polimer *polyester* (PET). Dominasi karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa mikroplastik atmosferik yang ditemukan berasal dari emisi lokal penduduk sekitarnya.

Perairan dan sedimen muara sungai juga berkontribusi terhadap pencemaran mikroplastik untuk Teluk Jakarta. Kelimpahan mikroplastik di permukaan air pada 9 muara sungai berkisar 9,729 – 89,164 partikel/ m^3 , dengan rata-rata $48,179 \pm 21,960$ partikel/ m^3 . Kelimpahan mikroplastik tertinggi diperoleh di Sungai Dadap (Stasiun 1), dan terendah pada Muara Sungai Angke (Stasiun 2). Secara statistik, setiap muara sungai tidak memberikan kelimpahan yang berbeda nyata ($p > 0,05$). Berdasarkan lokasi secara administratif, mikroplastik yang masuk dari wilayah Tangerang (Stasiun 1) memiliki kelimpahan lebih besar ($67,777 \pm 5,656$ partikel/ m^3) dibandingkan Jakarta Utara (Stasiun 2-8) ($47,715 \pm 4,207$ partikel/ m^3) dan Bekasi (Stasiun 9) ($31,834 \pm 2,503$ partikel/ m^3). Kelimpahan mikroplastik pada sembilan muara sungai ini sejalan dengan jumlah makrodebris pada masing-masing lokasi. Namun tidak dipengaruhi oleh kepadatan penduduk pada masing-masing DAS. Mikroplastik pada perairan memiliki dominasi karakteristik yang menunjukkan sumber domestik, yaitu bentuk fragmen, rentang ukuran 300-500 μm , dan jenis polimer *polyetilene* (PE).

Kelimpahan mikroplastik di perairan akan berkorelasi dengan kelimpahannya di sedimen. Secara statistik, hal ini dibuktikan dengan nilai korelasi yang tinggi ($r = 0,82$). Kelimpahan mikroplastik di sedimen pada 9 muara sungai berkisar 604-3108,97 partikel/kg berat kering sedimen, dengan rata-rata 1977,56 partikel/kg berat kering sedimen. Kelimpahan tertinggi diperoleh di Sungai Dadap (Stasiun 1), dan terendah di Sungai Angke (Stasiun 2). Hal ini dipengaruhi oleh kecepatan arus masing-masing sungai dan aktifitas pengerukan. Uji statistik menunjukkan bahwa kelimpahan setiap stasiun tidak berbeda secara nyata ($p > 0,05$). Secara berurutan, kelimpahan mikroplastik pada 3 wilayah administrasi muara sungai di Teluk Jakarta adalah Jakarta Utara (14037,20 partikel/kg berat kering sedimen) > Tangerang (3108,97 partikel/kg berat kering sedimen) > Bekasi (652 partikel/kg berat kering sedimen). Bentuk mikroplastik didominasi oleh fragmen, ukuran terbanyak 300-500 μm , dan jenis polimer PE. Dominasi bentuk dan ukuran pada sedimen ini sejalan dengan karakteristik mikroplastik pada perairan. Hal ini mengindikasikan bahwa mikroplastik di sedimen merupakan mikroplastik yang terendapkan dari perairan.

Keberadaan mikroplastik di atmosfer, perairan, dan sungai, menunjukkan bahwa mikroplastik di Teluk Jakarta memang berasal dari ketiga kompartmen tersebut. Deposisi mikroplastik atmosferik tertinggi pada bulan Februari 2019 ($3,68 \times 10^9$ partikel/hari), dan terendah pada Juli 2018 ($2,45 \times 10^8$ partikel/hari). Deposisi tersebut dipengaruhi oleh kondisi meteorologi, yaitu curah hujan dan kecepatan angin. Uji statistik memperoleh bahwa kedua faktor meteorologi tersebut memiliki korelasi positif terhadap laju deposisi mikroplastik atmosferik. Muara sungai di sekitar Teluk Jakarta juga berkontribusi terhadap mikroplastik di Teluk Jakarta. Emisi mikroplastik dari sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta tertinggi dari Sungai Ciliwung ($1,26 \times 10^7$ partikel/hari), dan terendah dari Sungai Angke ($16,71 \times 10^7$ partikel/hari), dengan rata-rata $6,71 \times 10^7 \pm 5,83 \times 10^7$ partikel/hari. Berdasarkan daerah adminitrasinya, neraca dari Jakarta Utara > Tangerang > Bekasi. Emisi mikroplastik dari perairan dipengaruhi oleh debit air dan jumlah partikel mikroplastik pada masing-masing sungai. Mikroplastik pada

sedimen masing-masing muara sungai memberikan emisi rata-rata $5,42 \times 10^6 \pm 2,84 \times 10^6$ partikel/hari.

Berdasarkan emisi, fluks dan dominasi karakteristik mikroplastik dari atmosfer, perairan, dan sedimen, dinamika mikroplastik di Teluk Jakarta dapat diprediksi. Mikroplastik dari permukaan air sembilan muara sungai memberikan emisi yang paling tinggi, namun memiliki karakteristik yang berbeda dengan mikroplastik atmosferik. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat mekanisme alami lain yang belum diketahui untuk mikroplastik atmosfer. Tingginya emisi mikroplastik di Teluk Jakarta mengakibatkan pada puncak musim timur, Teluk Jakarta mengakumulasi mikroplastik di perairan. Bahkan tanpa adanya *flushing* dari massa air sekitarnya, mikroplastik memiliki waktu tinggal yang cukup lama (21 hari) di perairan Teluk Jakarta. Kesamaan karakteristik mikroplastik dari sedimen mengindikasikan bahwa sedimen diduga memberikan kontribusi terhadap mikroplastik di Teluk Jakarta melalui kemungkinan resuspensi mikroplastik dari sedimen menuju kolom air. Meski demikian hal ini memerlukan penelitian lebih lanjut.

Mikroplastik yang diperoleh dari sembilan muara sungai tidak lagi mengandung zat *phthalate* pada partikelnya. Hal ini tampak dari tidak adanya puncak gelombang pada spektrum 3074, 1726, 1600, 1580, 1040, dan 652 cm^{-1} . Hal tersebut mengarahkan hipotesa bahwa tidak ditemukannya kandungan *phthalate* pada sampel mikroplastik di muara sungai sekitar Teluk Jakarta disebabkan karena zat tersebut telah sepenuhnya terlepas dari partikel mikroplastik. Kandungan *phthalate* kemungkinan berada pada perairan ataupun sedimen di muara sungai sekitar Teluk Jakarta. Namun hipotesa tersebut masih memerlukan penelitian lebih jauh mengingat kandungan *phthalate* di Teluk Jakarta belum pernah dikaji secara mendalam.

Kata kunci: atmosferik, DAS, fluks, muara sungai, permukaan air, sedimen

SUMMARY

ANNA IDA SUNARYO PURWIYANTO. Fate and Budget of Microplastic in Jakarta Bay. Supervised by TRI PRARTONO, ETTY RIANI, ALAN FRENDY KOROPITAN, dan YULI NAULITA. .

Microplastics are particles of 1-5000 μm composed of synthetic polymer materials. Various activities (sanitation, traffic emissions, industry, agriculture, fisheries) are a source of microplastics. The microplastics are transported to the waters through runoff, the river flows, and even drift in the air (atmospheric microplastics). These microplastics are solid particles with a variety of compositions. The main component of microplastics is a polymer added with additives according to the use of plastic when it is in macro form. Jakarta Bay is one of the waters experiencing microplastic pressure. Information on the presence of microplastics in Jakarta Bay has been reported in previous research. However, these studies are still basic and unintegrated. Therefore, this study aims to analyze the fate and budget of microplastics, as well as detect the content of additives (*phthalates*) in microplastics in Jakarta Bay.

Microplastic sampling was carried out on the atmosphere, the water surface, and sediments. A sampling of atmospheric microplastics was carried out for 12 months (March 2018 – February 2019) on the roof building of the Oceanographic Research Center - Indonesian Institute of Sciences (LIPI) Ancol. Sampling used a manual rain gauge installed for 96 hours every month, with three repetitions. Microplastic in waters and sediments was conducted in August 2020 at nine estuaries around Jakarta Bay (Dadap River, Angke River, Pluit River, Ciliwung River, Kali Item River, Koja River, Cilincing River, Marunda River, and Bekasi River). The nine estuaries are located in different watersheds (DAS), with different population densities. Sampling was done using a round net and van ven grab, with three repetitions at each station. The emission of microplastics in Jakarta Bay is analyzed by considering environmental factors such as rainfall, wind speed, river water discharge, the number of particles at each station, and sedimentation rate. The results of neraca calculations and comparisons of the dominance of microplastic characteristics are used in predicting the dinamika of microplastics. *Phthalates* contained in microplastics were detected using Micro-Raman Spectroscopic on 25 samples in water and sediments that had been identified as microplastics.

Atmospheric microplastics are caught at the rain gauge every month, with an average abundance of 1.83 particles/month. The abundance of microplastics obtained during the rainy season was higher than during the dry season. It is presumably due to the influence of the intensity of sunlight, wind, and rainfall, which differs between the two seasons. However, statistically, there was no significant difference in the abundance of microplastics every month ($p > 0.05$). The dominating characteristics of atmospheric microplastics in Ancol are the fiber shape, the size range of 300-500 μm , and the polyester polymer (PET) type. The dominance of these characteristics indicates that the atmospheric microplastics found are derived from local emissions from surrounding residents.

Estuary waters and sediments also contribute to the microplastic pollution of Jakarta Bay. Microplastics on the water surface at nine estuaries ranged from

9.729 to 89.164 particles/m³, with an average of 48.179 ± 21.960 particles/m³. The highest abundance was found in the Dadap River (Station 1) and the lowest at the Angke River Estuary (Station 2). Statistically, each estuary did not provide a significantly different abundance (p>0.05). Based on administrative location, microplastics from Tangerang (Station 1) have a greater abundance (67.777 ± 5,656 particles/m³) than North Jakarta (Station 2-8) (47.715 ± 4,207 particles/m³) and Bekasi (Station 9) (31,834 ± 2,503 particles/m³). The microplastic abundance in nine estuaries is in line with the quantity of macro debris in each location. However, it is not affected by population density in each watershed. Microplastics in waters indicate domestic sources, i.e., the fragments' shape, the size range of 300-500 μm, and the type of polymer polyethylene (PE).

The abundance of microplastics in the waters will correlate with their abundance in the sediment. Statistically, this is proven by a high correlation value (r = 0.82). The abundance of microplastics in sediments at nine estuaries ranged from 604 to 3108.97 particles/kg dry weight of sediment, with an average of 1977.56 particles/kg dry weight of sediment. The highest abundance was found at the Dadap River (Station 1), and the lowest was at the Angke River (Station 2). It is influenced by the current velocity of each river and the dredging activity. The statistical test showed that the abundance of each station was not significantly different (p>0.05). Sequentially, the abundance of microplastics in 3 administrative areas of estuaries in Jakarta Bay is North Jakarta (14037.20 particles/kg dry weight of sediment) > Tangerang (3108.97 particles/kg dry weight of sediment) > Bekasi (652 particles/kg dry weight sediment). Fragments dominate the shape of microplastics. The most size is 300-500 μm and the type of PE polymer. The dominance of shape and size in sediments is in line with the characteristics of microplastics in the waters. It indicates that the microplastics in the sediment are microplastics that were deposited from the waters.

Microplastics in the atmosphere, waters, and sediment indicate that the microplastics in Jakarta Bay originate from these three compartments. The highest atmospheric microplastic deposition was in February 2019 (3,68 x 10⁹ particles/day), and the lowest was in July 2018 (2,45 x 10⁸ particles/day). The deposition is affected by meteorological conditions (rainfall and wind speed). Statistical tests found that both meteorological factors positively correlated with atmospheric microplastic deposition. Nine estuaries around Jakarta Bay also contribute to microplastics in Jakarta Bay. The highest emission from the surface water of the Ciliwung River (1.26 x 10⁷ particles/day) and the lowest from the Angke River (16.71 x 10⁷ particles/day), with an average of 6.71 x 10⁷ ± 5.83 x 10⁷ particles/day. Based on the administration area, Jakarta Utara > Tangerang > Bekasi. It depends on the water discharge and the number of microplastic particles in each river. Microplastics in the sediments of each estuary provided an average emission of 5,42 x 10⁶ ± 2,84 x 10⁶ particles/day.

Based on the budget, flux, and predominance of microplastic characteristics, the fate of microplastics in Jakarta Bay can be predicted. Microplastics from the surface waters of nine river estuaries gave the highest emissions, but have different characteristics from atmospheric microplastics. It means that there was some unknown mechanism for atmospheric microplastic in Jakarta bay water. Jakarta Bay accumulates some microplastic in the water column as a result of high microplastic emissions. Even without any flushing from

the surrounding water masses, microplastics have a fairly long residence time (21 days) in the waters of Jakarta Bay. Meanwhile, the similarity of dominance characteristics from sediments indicates that sediments can contribute to microplastics in Jakarta Bay. It is through the possibility of resuspension into the water column. Nevertheless, this requires further research.

Microplastics obtained from nine estuaries no longer contain phthalates in their particles. It can be seen from the absence of wave crests in the spectrum of 3074, 1726, 1600, 1580, 1040, and 652 cm^{-1} . It leads to the hypothesis that the substance had been completely released from the microplastic particles. The phthalate content may be in the waters or sediments in the river around Jakarta Bay. However, this hypothesis still needs further research considering that the phthalate content in Jakarta Bay has never been studied in detail.

Keywords: atmospheric, watershed, flux, estuary, water surface, sediment

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2023
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

**DINAMIKA DAN EMISI MIKROPLASTIK DI TELUK
JAKARTA**

ANNA IDA SUNARYO PURWIYANTO

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Kelautan

**PROGRAM STUDI ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2023**

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. I Wayan Nurjaya, M.Sc
- 2 Prof. Agung Dhamar Syakti, S.Pi, DEA

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. I Wayan Nurjaya, M.Sc
- 2 Prof. Agung Dhamar Syakti, S.Pi, DEA

Judul Disertasi : Dinamika dan Emisi Mikroplastik di Teluk Jakarta
Nama : Anna Ida Sunaryo Purwiyanto
NIM : C561190011

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Ir. Tri Prariono, M.Sc.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ety Riani, MS



Pembimbing 3:
Dr. Alan Frendy Koropitan, S.Pi., M.Si.



Pembimbing 4:
Dr. Ir. Yuli Naulita, M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Ir. Yuli Naulita, M.Si
NIP. 196607121991032003



Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan:
Prof. Dr. Ir. Fredinan Yulianda, M.Sc
NIP. 196307311988031002



Tanggal Ujian:
(20 Desember 2022)

Tanggal Lulus:
(30 Januari 2023)

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ialah pencemaran mikroplastik, dengan judul “Dinamika dan Emisi Mikroplastik di Teluk Jakarta”.

Terima kasih dan penghargaan penulis ucapkan kepada

1. Seluruh komisi pembimbing, Dr. Ir. Tri Prariono, M.Sc, Prof. Dr. Etty Riani, MS, Dr. Alan Frendy Koropitan, M.Si dan Dr. Yuli Naulita, M.Si, yang telah membimbing dan banyak memberi saran.
2. Jajaran Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan dan Program Studi Ilmu Kelautan, atas segala bantuan dalam administrasi.
3. Moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing.
4. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah membiaya studi dan penelitian melalui skema Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN).
5. Muhammad Reza Cordova, Ph.D dari Badan Riset dan Inovasi Indonesia (BRIN) yang telah yang telah memperkenankan sebagian datanya digunakan untuk keperluan penulisan sebagian disertasi dan mengenalkan serta memfasilitasi dalam pelatihan monitoring sampah laut.
6. Kepala Divisi Oseanografi (Dr. Tri Paratono) yang telah memberi izin penggunaan laboratorium Oseanografi Kimia.
7. Pengelola Laboratorim Biologi Molekuler (Pak Aris) atas izin dan bantuannya selama proses penelitian.
8. Papa Sunaryo Purwiyanto, Mama Farida Hanim, Bapak Ishak, Ibu Hainim, Kakak (Ekantallo Rinaryanto, Kristin Ningrum, Yuanita R Ida Sunaryo, Rozaq, Saufi Rohayati, Kartini Eka Apriani), adik (Rizkian Ayu Handika) yang telah memberikan dukungan, terutama doa untuk penyelesaian studi ini.
9. Terima kasih kepada suami tercinta Yulianto Suteja dan kedua amanah (Muhammad Hafiz Arnawama dan Muhammad Hairaz Arnawama) yang selalu menemani dengan segala keikhlasan dan keceriaan selama proses studi ini
10. Apriansyah, Afdal, Kurniawan dan teman-teman yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang telah banyak membantu terutama semangat dan *sharing* selama proses disertasi.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Januari 2023

Anna Ida Sunaryo Purwiyanto

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xviii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	5
1.4 Kerangka Penelitian	5
1.5 Manfaat	6
1.6 Ruang Lingkup Penelitian Kebaruan (<i>Novelty</i>)	6
1.7 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	6
II KARAKTERISTIK MIKROPLASTIK ATMOSFERIK DI TELUK JAKARTA	7
2.1 Pendahuluan	7
2.2 Tujuan Penelitian	8
2.3 Metode Penelitian	8
2.4 Hasil	10
2.5 Pembahasan	13
2.6 Simpulan	15
III KARAKTERISTIK MIKROPLASTIK DI AIR DAN SEDIMEN DI MUARA SUNGAI TELUK JAKARTA	16
3.1 Pendahuluan	16
3.2 Tujuan Penelitian	17
3.3 Metode Penelitian	17
3.4 Hasil	20
3.5 Pembahasan	25
3.6 Simpulan	30
IV EMISI MIKROPLASTIK DI TELUK JAKARTA	31
4.1 Pendahuluan	31
4.2 Tujuan Penelitian	31
4.3 Metode Penelitian	31
4.4 Hasil	35
4.5 Pembahasan	40
4.6 Simpulan	44
V KANDUNGAN ZAT ADDITIF (<i>PHTHALATE</i>) PADA MIKROPLASTIK DI TELUK JAKARTA	45
5.1 Pendahuluan	45
5.2 Tujuan Penelitian	46
5.3 Metode Penelitian	46
5.4 Hasil	48
5.5 Pembahasan	54
5.6 Simpulan	54
VI PEMBAHASAN UMUM	55

VII SIMPULAN DAN SARAN	60
7.1 Simpulan	60
7.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	62
RIWAYAT HIDUP	80

DAFTAR TABEL

1. Kelimpahan mikroplastik (partikel/m ³) pada contoh air alat sampling yang digunakan dan ukuran di lokasi penelitian lain	28
2. Nilai data pendukung analisis neraca dan <i>residence time</i>	34
3. Debit air sembilan muara sungai Teluk Jakarta pada Agustus 2020	37
4. Emisi mikroplastik Teluk Jakarta pada Agustus 2020	39
5. Perbandingan dominasi karakteristik mikroplastik di Teluk Jakarta	43
6. Karakteristik spektrum Raman untuk <i>phthalate</i> (Aggarwal <i>et al.</i> 2013)	46

DAFTAR GAMBAR

1. Kerangka pemikiran penelitian dinamika dan neraca mikroplastik di Teluk Jakarta	5
2. Lokasi pengambilan sampel dan sumber potensial (jalan raya dan pemukiman) mikroplastik atmosferik di pesisir utara Jakarta	8
3. Kelimpahan rata-rata mikroplastik atmosferik (partikel) selama 12 bulan di Teluk Jakarta	11
4. Persentase bentuk mikroplastik atmosferik selama 12 bulan pengamatan di Teluk Jakarta	12
5. Persentase ukuran mikroplastik atmosferik selama 12 bulan pengamatan di Teluk Jakarta	12
6. Persentase jenis polimer mikroplastik atmosferik selama 12 bulan pengamatan di Teluk Jakarta	13
7. Lokasi penelitian mikroplastik di muara sungai Teluk Jakarta. Daerah aliran sungai ditandai dengan warna berbeda dan ditumpangtindihkan dengan pemukiman penduduk (warna merah)	17
8. Kelimpahan mikroplastik (partikel/m ³) di sembilan perairan muara sungai di Teluk Jakarta	21
9. Persentase distribusi bentuk mikroplastik di sembilan perairan muara sungai Teluk Jakarta	22
10. Persentase distribusi ukuran mikroplastik di perairan muara sungai Teluk Jakarta	22
11. Persentase polimer mikroplastik di sembilan perairan muara sungai Teluk Jakarta; <i>polypropylene</i> (PP), <i>polyethylene</i> (PE), dan <i>polystyrene</i> (PS)	23
12. Kelimpahan mikroplastik (partikel/kg berat kering sedimen) di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta	24
13. Persentase distribusi bentuk mikroplastik di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta	24
14. Persentase distribusi ukuran mikroplastik di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta	25

15. Persentase polimer mikroplastik di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta; <i>polypropylene</i> (PP), <i>polyethylene</i> (PE), dan <i>polystyrene</i> (PS)	25
16. Emisi mikroplastik atmosferik (grafik batang), curah hujan (grafik garis merah), dan kecepatan angin (grafik garis biru) selama dua belas bulan di sekitar Teluk Jakarta	35
17. Emisi mikroplastik permukaan air (grafik batang), debit air (grafik garis merah), dan kelimpahan mikroplastik (grafik garis biru) dari sembilan muara sungai Teluk Jakarta pada bulan Agustus 2020	36
18. DAS muara sungai di sekitar Teluk Jakarta (kiri) dan jumlah penduduk (individu) di DAS muara sungai Teluk Jakarta (kanan)	37
19. Emisi mikroplastik pada sedimen (partikel/hari) di sembilan muara sungai Teluk Jakarta pada Agustus 2020	38
20. Fluks mikroplastik (partikel/hari) di perairan sekitar muara sungai Teluk Jakarta pada Agustus 2020. Mikroplastik di atmosfer dan sungai berperan sebagai inputan, sedangkan yang berada di sedimen berperan sebagai output. Selisih antar inputan dan output merupakan mikroplastik yang tertinggal di perairan Teluk Jakarta.	39
21. Spektrum Raman yang mencirikan 15 <i>dialkyl ester phthalate</i> dan tujuh jenis <i>phthalate</i> (Nørbygaard dan Berg 2004)	47
22. Spektrum Raman sampel mikroplastik permukaan air dan sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta (spektrum sampel : warna biru; spektrum <i>phthalate</i> : warna merah)	49

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mikroplastik didefinisikan sebagai suatu partikel yang berbentuk padat, tersusun atas bahan sintesis dengan bentuk teratur maupun tidak teratur, memiliki ukuran dengan kisaran 1 μm hingga 5 mm, serta bersifat tidak larut dalam air (Frias dan Nash 2019). Bentuk mikroplastik dibedakan menjadi empat, yaitu bulat atau granula, fiber, film, dan *foam* (Hartmann *et al.* 2019). Klasifikasi bentuk mikroplastik tersebut didasarkan pada sumber mikroplastik, yaitu primer dan sekunder (Andrady 2011; Bogusz dan Oleszczuk 2017). Wang *et al.* (2019) menjelaskan bahwa mikroplastik primer merupakan mikroplastik yang dihasilkan dari proses produksi secara langsung, sedangkan mikroplastik sekunder merupakan mikroplastik yang terbentuk dari hasil degradasi plastik yang berukuran lebih besar. Mikroplastik primer umumnya berbentuk teratur berupa granula, sedangkan tiga bentuk mikroplastik lainnya (fiber, film, *foam*) merupakan bentuk dari mikroplastik sekunder.

Mikroplastik dapat berasal dari berbagai sumber yang kemudian mengalami transpor ke perairan. Aktifitas penduduk seperti kegiatan sanitasi (penggunaan sabun, pasta gigi, pembersih kosmetik, dll) menghasilkan mikroplastik yang terlepas ke saluran pembuangan (Leslie 2014; Napper *et al.* 2015; Anderson *et al.* 2016). Selain itu, emisi kegiatan lalu lintas juga diduga menjadi salah satu sumber mikroplastik di udara dan emisi terjadi melalui pergesekan antara ban kendaraan yang mengandung mikroplastik dengan aspal (Verschoor *et al.* 2016; OSPAR, 2017; Vogelsang *et al.*, 2019). Sumber lain dari mikroplastik adalah aktifitas industri dan pertanian. Kawecki dan Nowack (2019) menjelaskan bahwa berbagai macam industri, seperti perabotan, tekstil, konstruksi, dll, menghasilkan mikroplastik sebagai salah satu emisi yang dilepaskan ke udara maupun perairan. Penggunaan *plastic mulching*, pipa air juga ditemukan sebagai salah satu sumber mikroplastik di perairan (Zhang dan Liu 2018; Corradini *et al.* 2019). Mikroplastik-mikroplastik tersebut akan masuk ke saluran pembuangan dan terbawa oleh aliran sungai dan *run off*. Lebih lanjut, keberadaan mikroplastik di perairan juga tidak lepas dari aktifitas yang dilakukan di dalam perairan itu sendiri. Lusher *et al.* (2017) menjelaskan bahwa aktifitas perikanan juga memberikan kontribusi tersendiri bagi keberadaan mikroplastik. Sisa-sisa jaring dan alat tangkap lain yang berbahan polimer sintesis akan terkelupas dari jaring dan menghasilkan mikroplastik. Secara detail, sumber mikroplastik di perairan digambarkan oleh Pravettoni (2018).

Sumber mikroplastik yang juga penting adalah dari udara dan umumnya disebut dengan istilah mikroplastik atmosferik. Mikroplastik atmosfer terdistribusi dan terdeposisi ditentukan oleh berat partikel, kecepatan dan arah angin, serta curah hujan (K. Liu, Wu, *et al.* 2019; Constant *et al.* 2020). Liss (2020) mengungkapkan bahwa transportasi mikroplastik sebagai atmosferik akan lebih jauh dan lebih cepat dibandingkan melalui aliran sungai menuju perairan laut. Semakin ringan suatu partikel maka akan terdistribusi ke wilayah yang lebih jauh dari sumber. Begitu pula dengan semakin kencang kecepatan angin. Namun semakin tinggi curah hujan, menyebabkan makin banyak mikroplastik yang terdeposisi. Deposisi mikroplastik dapat terjadi di wilayah darat, laut, maupun

pegunungan. Hal ini seperti yang telah dilaporkan beberapa penelitian sebelumnya (Zhou *et al.* 2017; Kaya *et al.* 2018; Allen *et al.* 2019; Syafei *et al.* 2019). Karakter mikroplastik atmosferik hampir sama dengan mikroplastik pada umumnya. Bentuk mikroplastik atmosferik meliputi fiber, fragmen, granula, *foam* dan film dengan ukuran umumnya 25-300 μm (Zhang *et al.* 2019). Lebih lanjut, K. Liu, Wu, *et al.* (2019) juga memperoleh sekitar 1,21 ton mikroplastik atmosferik per tahun jatuh ke perairan laut melalui proses interaksi atmosfer dan air.

Mikroplastik yang berasal dari berbagai sumber tersebut merupakan partikel padat dengan berbagai macam komposisi. Komponen utama mikroplastik adalah polimer yang kemudian diberi komponen aditif sesuai peruntukan penggunaan plastik ketika berada dalam bentuk makro. GESAMP (2015) mengkategorikan polimer plastik menjadi 6 kelompok, yaitu *polyethylene* (PE, *high and low density*), *polypropylene* (PP), *polyvinyl chloride* (PVC), *polystyrene* (PS, termasuk turunan EPS), *polyurethane* (PUR), and *polyethylene terephthalate* (PETE). Beberapa komponen aditif yang sengaja dimasukkan dalam rangkaian polimer bahan baku plastik berfungsi untuk memodifikasi warna (pigmen dan zat warna), meningkatkan atau memodifikasi sifat mekanis (*filler*), meningkatkan kekuatan dan daya tahan panas (antioksidan dan penstabil), tahan terhadap radiasi UV (*UV stabilizer*), meningkatkan titik lebur, dan bahan lain untuk meningkatkan tampilan plastik (Fries *et al.* 2013). Bahan kimia yang ada dalam plastik berpotensi dapat bermigrasi (Hahladakis *et al.* 2018). Mikroplastik dapat melepaskan zat aditif yang terdapat di dalamnya menuju ke perairan (Foshtomi *et al.* 2019; Paluselli *et al.* 2019; Purwiyanto *et al.* 2020). Selain itu, mikroplastik juga dapat sebagai inang perantara untuk pencemar yang terdapat di perairan baik logam berat (Noik *et al.* 2015; Brennecke *et al.* 2016; Oz *et al.* 2019) maupun bahan organik (Yu *et al.* 2019).

Mikroplastik bersama dengan aditif yang dikandungnya akan mengalami proses transpor yang serupa, dari sumber di darat masuk ke perairan tawar (sungai dan *run off*) dan berakhir di perairan laut. Pada proses transpor, komponen penyusun mikroplastik dapat mengalami perubahan, baik secara fisik, kimia, dan biologi. Mikroplastik yang memiliki susunan kimia serupa dengan plastik primernya akan mengalami pelepasan aditif. Pada proses di alam, mikroplastik akan berinteraksi dengan material lain sehingga menjadi suatu koagulan (Ma *et al.* 2019). Koagulan mikroplastik mengakibatkan berat molekul menjadi lebih besar dan akhirnya tenggelam dan mengendap di sedimen. Salinitas, pH, dan turbiditas merupakan beberapa faktor yang mempengaruhi penenggelaman mikroplastik tersebut (Ma *et al.* 2019). Semakin berat koagulan mikroplastik akan menyebabkan mikroplastik semakin mudah membentuk agregasi dan akhirnya mengendap. Hal ini menjadikan sedimen sebagai tempat terakhir akumulasi mikroplastik di perairan.

Salah satu perairan yang menjadi lokasi akumulasi mikroplastik adalah Teluk Jakarta. Teluk Jakarta merupakan perairan yang memperoleh sumber air dari 13 sungai, yaitu Sungai Mookervaart, Sungai Angke, Sungai Pesanggrahan, Sungai Krukut, Sungai Grogol, Sungai Baru Barat, Sungai Ciliwung, Sungai Baru Timur, Sungai Cipinang, Sungai Sunter, Sungai Buaran, Sungai Jati Kramat, Sungai Cakung. Sungai-sungai yang bermuara di Teluk Jakarta tersebut merupakan sungai besar dan kecil yang digunakan masyarakat untuk berbagai kepentingan, termasuk untuk membuang sampah. Hal ini didukung oleh penelitian

Cordova dan Nurhati (2019) yang memperoleh rata-rata $97,098 \pm 28,932$ unit atau 23 ± 7.10 ton makrodebris berasal dari sungai kota yang masuk ke Teluk Jakarta setiap harinya. Keberadaan makrodebris di suatu perairan dapat menjadi awal kontaminasi mikroplastik di perairan tersebut. Hal ini mengingatkan mikroplastik yang merupakan hasil pecahan sampah makro berbahan polimer. Sumber mikroplastik yang juga dapat berasal dari mikroplastik atmosferik menambah beban perairan Teluk Jakarta dalam menampung material antropogenik.

DKI Jakarta yang berhadapan langsung dengan Teluk Jakarta merupakan provinsi terpadat dan tersibuk di Indonesia. Wilayah DKI Jakarta memiliki penduduk hingga mencapai 15.938 jiwa/km² pada tahun 2019 (Jayani 2020) dengan penggunaan lahan yang mencapai 48,41% untuk pemukiman dan 15,68% untuk bangunan industri, perkantoran dan perdagangan (Bappeda DKI Jakarta 2018). Hal tersebut mengakibatkan pencemar yang dihasilkan tinggi, termasuk mikroplastik. Rahmad *et al.* (2019) mengungkapkan bahwa tujuh muara sungai yang bermuara di Teluk Jakarta memiliki kandungan mikroplastik hingga mencapai 93-112 partikel. Mikroplastik juga ditemukan di sedimen daerah Ancol dan Pluit, Teluk Jakarta hingga mencapai 18,405-38,790 partikel/kg berat kering (Manalu *et al.* 2017). Hal ini mengindikasikan bahwa Teluk Jakarta menjadi tempat akumulasi mikroplastik yang berasal dari aktifitas darat. Namun, keberadaan mikroplastik di udara kota Jakarta belum ada informasi. Agustine *et al.* (2017) menjelaskan bahwa pencemaran udara bertipe PM₁₀ yang berasal dari pusat kota Jakarta mengalami transport akibat angin hingga ke seluruh wilayah Jakarta, terutama daerah tenggara. PM₁₀ terbanyak yang diperoleh adalah material dengan ukuran $>80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang banyak ditranspor di daerah timur dan tenggara kota Jakarta. Evangeliou *et al.* (2020) mengungkapkan bahwa pada pencemaran PM₁₀, terutama yang berasal dari lalu lintas, mengandung mikroplastik yang umumnya terdeposisi tidak jauh dari sumber pencemar. Kandungan mikroplastik juga ditemukan pada pencemar udara PM_{2.5}, bahkan hingga 3-7% dari total konsentrasi PM_{2.5} (Longhin *et al.* 2020). Deposisi PM_{2.5} di udara lebih jauh dibanding PM₁₀, sehingga distribusinya lebih luas dibanding PM₁₀ (Evangeliou *et al.* 2020).

1.2 Rumusan Masalah

Teluk Jakarta telah diketahui sebagai perairan yang mengalami pencemaran berat akibat limbah domestik (Yudo 2007; Sachoemar dan Wahjono 2018). Kualitas perairan terburuk terdapat di Teluk Jakarta yang berdekatan dengan pantai (5 km dari pantai) (Yudo 2007). Salah satu pencemar yang juga ditemukan di Teluk Jakarta adalah mikroplastik. Sumber mikroplastik di Teluk Jakarta adalah aliran sungai yang bermuara ke dalam teluk. Cordova dan Nurhati (2019) mengemukakan terdapat sembilan muara yang memberikan kontribusi makrodebris ke Teluk Jakarta dengan komposisi debris terbanyak adalah jenis plastik. Mikroplastik yang merupakan hasil degradasi memiliki keterkaitan dengan jumlah makroplastik yang terdapat di perairan. Selain itu, sembilan muara sungai tersebut berada pada wilayah administrasi dan Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan jumlah penduduk yang berbeda, sehingga diduga dapat memberikan kelimpahan mikroplastik yang berbeda pula. Sembilan muara sungai tersebut terletak di wilayah administrasi Tangerang (Sungai Dadap), Jakarta Utara (Sungai Angke, Pluit, Ciliwung, Kali Item, Koja, Cilincing, and Marunda), and

Bekasi (Sungai Bekasi). Selain itu, juga mencakup delapan wilayah DAS, yaitu Cikapadilan (Sungai Dadap), Angke (Sungai Angke), Krukut (Sungai Pluit), Ciliwung (Sungai Ciliwung dan Sungai Kali Item), Sunter (Sungai Koja), Cakung (Sungai Cilincing), Blencong (Sungai Marunda), dan Bekasi (Sungai Bekasi).

Penelitian sebelumnya memperoleh konsentrasi mikroplastik dari tujuh muara sungai di Teluk Jakarta (Muara Tiram, Muara Ciliwung, Muara Sunda Kelapa, Muara Baru, Muara Karang, Muara Angke, dan Muara Cengkareng Drain) dengan konsentrasi tertinggi berasal dari Muara Angke (Rahmad *et al.* 2019). Mikroplastik yang berukuran kecil juga sering kali termakan oleh ikan dan bahkan plankton (Desforges *et al.* 2015; Vandermeersch *et al.* 2015; Jovanović 2017; Steer *et al.* 2017). Kontaminasi mikroplastik pada organisme di Teluk Jakarta juga telah ditemukan dan dilaporkan pada penelitian sebelumnya (Manalu *et al.* 2017; Efadeswarni *et al.* 2019; Priscilla *et al.* 2019). Pencemaran mikroplastik di perairan dan sedimen Teluk Jakarta pun telah dilaporkan (Manalu *et al.* 2017; Priscilla *et al.* 2019; Rahmad *et al.* 2019). Namun penelitian tersebut hanya menghitung konsentrasi dan jenis mikroplastik sebagai emisi sungai. Hal ini menyebabkan beban mikroplastik yang berasal dari sungai belum diketahui.

Inputan mikroplastik di Teluk Jakarta juga berasal dari deposisi yang berasal dari atmosferik. DKI Jakarta, ibukota negara sebagai pusat pemerintahan dan pusat perekonomian di Indonesia, memiliki tingkat kepadatan penduduk yang tinggi dan diikuti dengan aktifitas penduduk yang juga tinggi dan beragam. Menilik dari peta penggunaan lahan, DKI Jakarta menggunakan lebih dari 70% wilayah daratan sebagai pemukiman dan industri. Hal ini tentu saja berimbas pada polusi yang ditimbulkan. Berdasarkan *Traffic Index Ranking*, DKI Jakarta menduduki peringkat 10 dunia sebagai kota termacet dengan level kemacetan sebesar 53% (TomTom International 2020). Hal ini menandakan aktifitas lalu lintas DKI Jakarta yang sangat padat dan rentan polusi. Data Dinas Lingkungan Hidup (2020) menunjukkan selama 2019, DKI Jakarta berada dalam kategori sedang hingga tidak sehat berdasarkan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU). Pencemaran PM₁₀ selama 2019 berkisar antara 51.90-75.52 µgram/m³ dengan rentang standar normal 21-69 µgram/m³. Hal ini mengindikasikan bahwa pencemaran PM₁₀ di udara DKI Jakarta tinggi. PM₁₀ juga mengandung mikroplastik, sehingga bila PM₁₀ di udara tinggi ada kemungkinan mikroplastik sebagai atmosferik juga tinggi. Namun, belum ada informasi mengenai bagaimana dan berapa kandungan mikroplastik sebagai atmosferik di DKI Jakarta.

Selain partikel mikroplastik yang perlu dikaji, keberadaan zat aditif pada mikroplastik juga menjadi salah satu perhatian penting. Hal ini mengingat pada proses produksi, umumnya industri plastik menambahkan zat aditif untuk memperoleh sifat plastik yang diinginkan. Salah satu zat aditif yang umum digunakan adalah *phthalate*. *Phthalate* merupakan salah satu bentuk ester asam *phthalate* yang digunakan sebagai plasticizer untuk menambah fleksibilitas dan daya tahan produk plastik. Keberadaan *phthalate* sangat berbahaya bagi kesehatan manusia karena sifatnya yang mudah larut dan bermigrasi dalam kulit. Pada proses degradasi menjadi mikroplastik, keberadaan *phthalate* akan menambah tekanan pencemaran di perairan, mengingat antara *phthalate* dan polimer plastik tidak memiliki ikatan kovalen yang kuat. Tinggi rendahnya mikroplastik dapat memberikan kemungkinan indikasi level *phthalate* di lingkungan, termasuk Teluk Jakarta. Apalagi mengingat sunga-sungai yang bermuara di Teluk Jakarta

merupakan sungai-sungai dengan kriteria tingkat pencemaran sedang hingga berat (Bukit dan Yusuf 2002; Yudo 2010; Hendrawan 2010).

Oleh karena itu, perlu diketahui dengan baik emisi mikroplastik dari sungai dan udara, serta karakteristik *phthalate* pada mikroplastik dari kedua sumber tersebut. Hal ini dimaksudkan untuk dapat menjadi dinamika yang lengkap dalam menentukan arah penanganan pencemaran Teluk Jakarta.

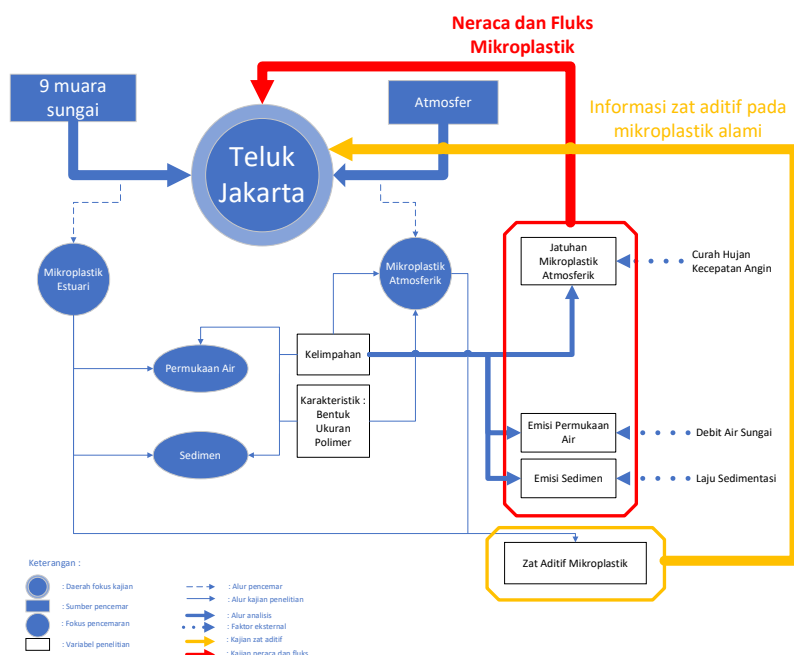
1.3 Tujuan

Berdasarkan uraian rumusan masalah, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengkaji inputan pencemar mikroplastik dan zat aditif (*phthalate*) mikroplastik di Teluk Jakarta, dengan melakukan beberapa tahapan:

- Menganalisis karakteristik dan kelimpahan mikroplastik atmosferik di Teluk Jakarta
- Menganalisis karakteristik dan kelimpahan mikroplastik di permukaan air dan sedimen muara sungai Teluk Jakarta
- Mengestimasi neraca dan fluks mikroplastik yang berasal dari atmosfer dan muara sungai di Teluk Jakarta
- Mengidentifikasi adanya kandungan zat aditif (*Phthalate*) pada mikroplastik yang teremisi ke dalam Teluk Jakarta

1.4 Kerangka Penelitian

Kerangka pemikiran penelitian tersaji dalam Gambar 1.



Gambar 1 Kerangka pemikiran penelitian dinamika dan neraca mikroplastik di Teluk Jakarta

1.5 Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat sebagai informasi dalam penanganan terkait pencemaran di Teluk Jakarta. Selain itu hasil penelitian ini juga dapat menjadi pertimbangan dalam pengambilan kebijakan pengelolaan lingkungan pada wilayah daerah aliran sungai yang bermuara di Teluk Jakarta khususnya dan wilayah pesisir uban lain

1.6 Ruang Lingkup Penelitian Kebaruan (*Novelty*)

Ruang lingkup penelitian meliputi :

- a. Identifikasi (bentuk, ukuran, dan jenis polimer) dan penghitungan kelimpahan mikroplastik atmosferik sebagai bagian dari pencemaran udara di Jakarta
- b. Identifikasi (bentuk, ukuran, dan jenis polimer) dan penghitungan kelimpahan mikroplastik pada permukaan air dan sedimen yang berasal dari muara sungai di Teluk Jakarta
- c. Penghitungan emisi dan fluks, serta waktu tinggal mikroplastik yang masuk ke perairan Teluk Jakarta
- d. Identifikasi ada atau tidaknya kandungan zat aditif (*Phthalate*) yang berikatan dengan partikel mikroplastik di Teluk Jakarta

1.7 Kebaruan (*Novelty*)

Partikel mikroplastik tidak hanya ditemukan pada permukaan air dan sedimen muara sungai di Teluk Jakarta. Keberadaan mikroplastik juga terdeteksi sebagai atmosferik yang menjadi salah satu sumber mikroplastik Teluk Jakarta. Kebaruan dalam penelitian ini adalah :

- 1 Mikroplastik di Teluk Jakarta bersumber dari aktifitas antropogenik masyarakat yang berada di sekitarnya
- 2 Sumbangan mikroplastik di Teluk Jakarta yang berasal dari sungai hampir sama pentingnya dengan yang berasal dari atmosfer
- 3 Kelimpahan mikroplastik di Teluk Jakarta tidak berkaitan dengan kepadatan penduduk yang berada di Daerah Aliran Sungai (DAS)
- 4 Mikroplastik di Teluk Jakarta memberikan pengaruh terhadap sumber daya perikanan Teluk Jakarta

II KARAKTERISTIK MIKROPLASTIK ATMOSFERIK DI TELUK JAKARTA

2.1 Pendahuluan

Mikroplastik atmosferik merupakan salah satu mikroplastik yang bersumber dari aktifitas penduduk seperti tekstil sintetis, penggunaan karet sintetis (pada ban mobil), resuspensi debu, fragmentasi perabot rumah tangga, emisi industri (Dris *et al.* 2016; Boucher dan Friot 2017; Dris *et al.* 2017). Mikroplastik ini terbang di udara dan mengalami proses transportasi sebelum terdeposisi di suatu tempat. Liss (2020) mengungkapkan bahwa mikroplastik atmosferik akan tertransportasi lebih jauh dan lebih cepat dibandingkan transportasi melalui aliran sungai menuju laut. Hal ini dibuktikan oleh Allen *et al.* (2019) yang menemukan keberadaan mikroplastik (K. Liu, Wu, *et al.* 2019) atmosferik di Pegunungan Pyrenees-Perancis. Bahkan hasil pemodelan memperoleh bahwa mikroplastik atmosferik mampu terdeposisi pada wilayah yang berjarak 95 km dari sumbernya (Allen *et al.* 2019).

Mikroplastik atmosferik umumnya memiliki ukuran yang berkisar >10 μm hingga 5 mm, dengan dominasi pada ukuran <500 μm (Enyoh *et al.* 2019; Y. Zhang *et al.* 2020). Penelitian sebelumnya menemukan keberadaan mikroplastik atmosferik di beberapa daerah perkotaan, seperti Paris-Perancis, Dongguan-China, Shanghai-China, dan Hamburg-Jerman, dengan kelimpahan, kisaran ukuran dan dominasi bentuk mikroplastik yang berbeda-beda (Dris *et al.* 2016; Klein dan Fischer 2019; K. Liu, Wu, *et al.* 2019; Y. Zhang *et al.* 2020). Mikroplastik atmosferik tersebut sebagian besar diduga berasal dari emisi aktifitas penduduk perkotaan di sekitarnya. Meski demikian, Cai *et al.* (2017) juga menemukan adanya kemungkinan mikroplastik atmosferik tersebut berasal dari laut yang kembali ke atmosfer bersamaan dengan percikan air laut (*sea bubbles*) dan kemudian terbawa oleh angin.

Salah satu kota besar yang diduga juga memiliki mikroplastik pada udaranya adalah Jakarta. Jakarta sebagai kota metropolitan yang padat aktifitas, mengakibatkan kota ini rentan terhadap pencemaran, mulai dari pencemaran perairan hingga udara. Berdasarkan perhitungan ISPU Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (Bapedal) Nomor KEP-107/Kabapedal/11/1997, tingkat pencemaran udara di Jakarta berada pada level sedang hingga tidak sehat pada periode Januari-Juni 2020 (Putra 2021). Penentuan tingkat pencemaran tersebut didasarkan pada parameter partikel debu (PM_{10}), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO_2), nitrogen dioksida (NO_2), dan ozon permukaan (O_3). Kondisi tersebut belum termasuk keberadaan mikroplastik atmosferik. Penelitian mengenai mikroplastik atmosferik di Jakarta belum pernah dilakukan, padahal partikel ini penting untuk dikaji. Hal ini karena selain mudah terhirup langsung oleh masyarakat, mikroplastik ini dapat tersebar sebelum akhirnya jatuh kembali dan menjadi salah satu inputan pencemar di perairan. Jakarta yang merupakan kota padat penduduk dengan berbagai aktifitas yang tinggi, berpotensi melepas mikroplastik atmosferik. Mikroplastik tersebut nantinya dapat terdeposisi, termasuk di Teluk Jakarta. Hal ini tentu saja akan menjadi tekanan tersendiri bagi Teluk Jakarta.

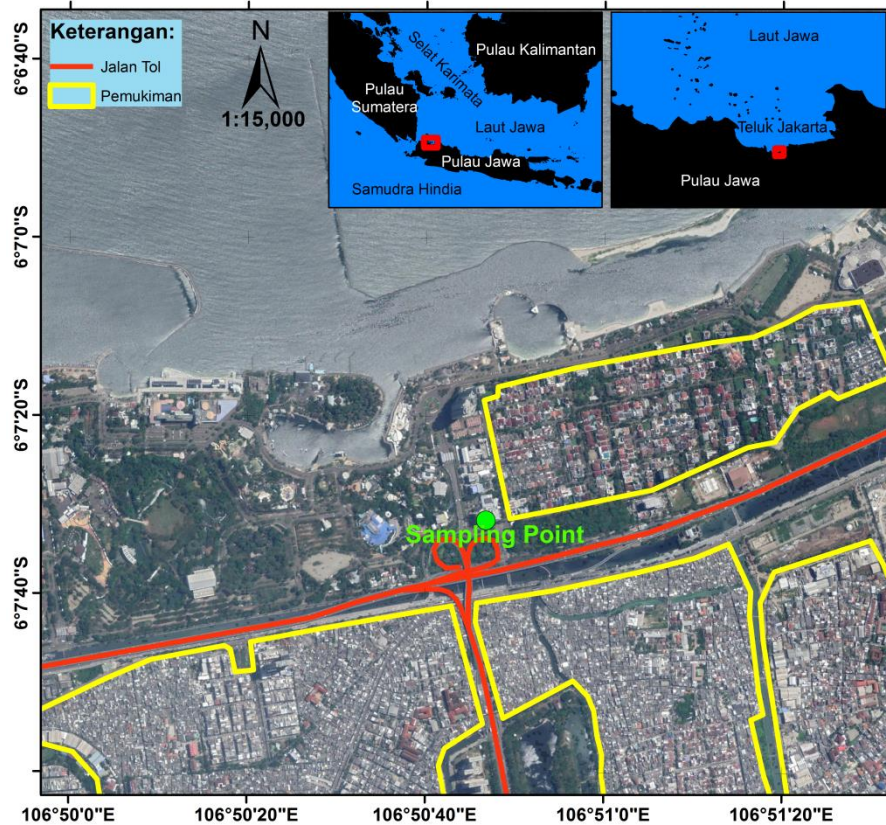
2.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi keberadaan mikroplastik atmosferik di daerah sekitar Teluk Jakarta, tepatnya di Ancol, Jakarta Utara. Selain itu, penelitian ini juga mencoba mengidentifikasi asal mikroplastik atmosferik dilihat berdasarkan dominasi karakteristik mikroplastik.

2.3 Metode Penelitian

2.3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian menggunakan satu stasiun yang ditempatkan di atap gedung Pusat Penelitian Oseanografi - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Ancol (Gambar 2). Pengambilan sampel dilakukan selama 12 bulan, yaitu Maret 2018 – Februari 2019. Penelitian mikroplastik atmosferik ini merupakan ide dan rancangan dengan dana penuh dari Penelitian COREMAP *Phase III* 2018: *Marine Debris and Pollution Research* (No. B-254/IPK.2/SK/I/2017), dengan ketua peneliti Muhammad Reza Cordova (Cordova 2018).



Gambar 2 Lokasi pengambilan sampel dan sumber potensial (jalan raya dan pemukiman) mikroplastik atmosferik di pesisir utara Jakarta

2.3.2 Teknik Sampling

Pengambilan sampel dilakukan selama 12 bulan dengan tiga ulangan pada setiap bulannya. Pengulangan ini dilakukan dengan mengambil sampel mikroplastik pada hari yang berbeda, sehingga setiap bulan dilakukan sampling selama tiga hari berturut-turut. Mikroplastik atmosferik yang diperoleh tidak

dibedakan antara deposisi basah (air hujan) dan deposisi kering (debu yang jatuh karena gravitasi). Pengambilan sampel mikroplastik atmosferik dilakukan dengan mengadaptasi metode pengukuran curah hujan menurut Bruggeman (2001) dan Miller (1994). Sampling dilakukan menggunakan manual *raingauge* berbahan kaca (diameter bukaan mulut 200 mm dan volume 2000 ml). *Raingauge* diletakkan di atap gedung (ketinggian 28 m) untuk mendapatkan *atmospheric airborne* yang terdeposisi tanpa terganggu oleh pohon maupun gedung lain.

Sebelum digunakan, *raingauge* dibersihkan dan dibilas dengan aquades yang telah disaring (triplicate) menggunakan kertas filter steril (*cellulose nitrate Whatman filter paper* Ø47 mm, pore size 0.45µm). *Raingauge* kemudian diisi dengan aquades saring sebanyak 10 ml untuk menangkap mikroplastik atmosferik. Bukaan mulut *raingauge* diletakkan dengan sudut 15° terhadap dinding untuk memastikan tidak ada halangan. Setiap sampling, *raingauge* diletakkan selama 96 jam. Proses peletakkan dan pengambilan sampel pada *raingauge* dilakukan dengan posisi berlawanan arah angin, menggunakan masker, sarung tangan, dan pakaian yang berbahan non-polimer sintetik, untuk mengurangi kontaminasi. Guna menghindari kontaminasi silang antar waktu sampling maka *raingauge* dicuci menggunakan aquades saring dan dikeringkan pada ruangan tertutup sebelum digunakan kembali.

2.3.3 Prosedur Laboratorium

Ekstraksi mikroplastik dilakukan dengan mengacu dan mengadaptasi penelitian sebelumnya (Masura, Baker, Foster, dan Courtney Arthur 2015; Zhang *et al.* 2015; Suaria *et al.* 2017; Sun *et al.* 2018; Cordova *et al.* 2019). Manual *raingauge* dibilas menggunakan aquades saring (triplicate), kemudian disaring menggunakan dua tingkat *stainless steel filter* berdiameter 3 inchi (ukuran 5 mm dan 200 µm). Hasil filtrasi diletakkan dalam cawan petri steril dan ditutup dengan *ParaFilm® sealing film* serta disimpan pada suhu 4 ± 2 °C.

Proses digesti mikroplastik dilakukan dengan meletakkan hasil ekstraksi pada tabung reaksi lalu ditambahkan 6 ml H₂O₂ 30% (*Merck Millipore, Emprove® Essential Medical*) dan 3 ml FeSO₄ (*Merck Millipore, EMSURE® ACS*). Sampel kemudian dipanaskan dengan *waterbath* (*Shibata waterbath WB-6C*) pada suhu 60°C, selama 24-48 jam dan dipindahkan ke kertas filter steril. Identifikasi mikroplastik dilakukan menggunakan mikroskop Leica M205C. Kriteria identifikasi mengikuti penelitian sebelumnya, yaitu ukuran partikel kurang dari 5 mm, memiliki warna homogen dan tidak alami, tidak memiliki bentuk seperti jaringan selular, dan tidak bercabang atau bersegmen (Hidalgo-Ruz *et al.* 2012; Cole *et al.* 2013). Atmosferik mikroplastik yang ditemukan dibedakan berdasarkan bentuk (fiber, granula, fragmen dan *foam*), dan ukuran (< 300 µm, 300-500 µm, 500-1000 µm, dan > 1000 µm). Guna meyakinkan bahwa yang teridentifikasi adalah mikroplastik, maka dilakukan uji polimer menggunakan *Nicolet™ iS5 FT-IR Spectrometer*. Uji ini dilakukan pada keseluruhan sampel mikroplastik yang tertangkap pada *raingauge*. Permukaan partikel mikroplastik dibersihkan menggunakan etanol steril 96% untuk menghindari kontaminan yang akan mengganggu pembacaan polimer (Käppler *et al.* 2015; Löder dan Gerdts 2015; Cordova *et al.* 2019; Falahudin *et al.* 2020). Selama proses analisis laboratorium, kontaminasi dihindari dengan membilas seluruh alat yang akan

digunakan dengan menggunakan akuades saring, kemudian disterilkan dan disimpan tertutup. Hal ini mengikuti prosedur kendali mutu (Nuelle *et al.* 2014).

2.3.4 Prosedur QA/QC (*Quality Assurance/Quality Control*)

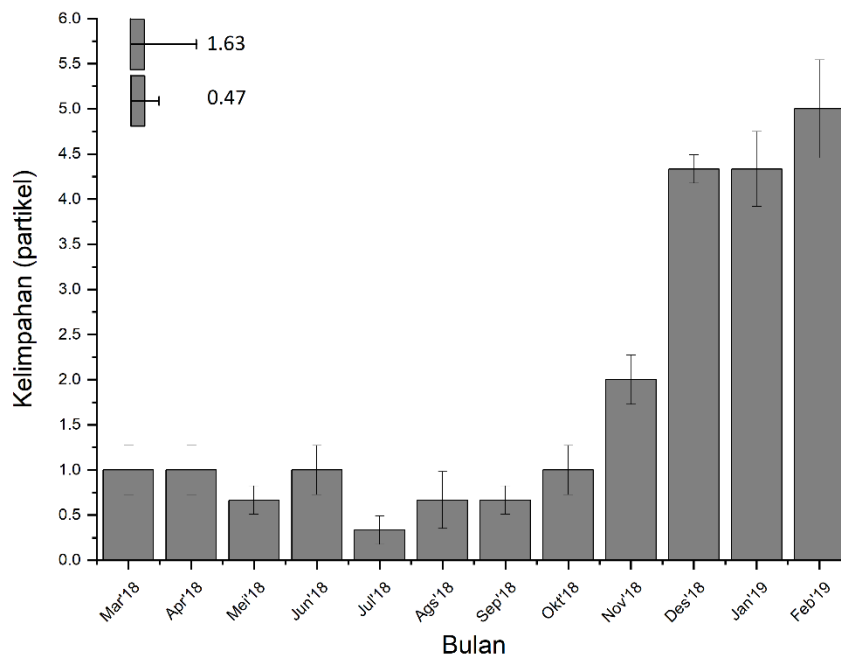
Prosedur QA/QC dilakukan selama penelitian dilakukan. QA/QC pada prosedur lapangan meliputi pencucian seluruh peralatan sampling dan laboratorium menggunakan aquades yang telah disaring (triplicate) dan dikeringkan pada ruangan tertutup, peletakkan dan pengambilan sampel pada *rain gauge* dengan posisi berlawanan arah angin, menggunakan masker, sarung tangan, dan pakaian yang berbahan non-polimer sintetik. Pada prosedur laboratorium, seluruh alat yang akan digunakan dengan dibilas menggunakan akuades saring sebelum disterilkan dan disimpan dalam ruangan tertutup. Prosedur *blank control*, menggunakan kertas saring steril juga dilakukan selama proses laboratorium berlangsung. Tidak ditemukannya mikroplastik pada *blank control* menunjukkan tidak adanya kontaminasi dari udara selama prosedur laboratorium.

2.3.5 Analisis Data

Uji statistik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PAST 4.03 dan Microsoft Excel. ANOVA Kruskal-Wallis digunakan untuk menguji kelimpahan mikroplastik atmosferik selama periode sampling dengan selang kepercayaan 95%. Korelasi Kendall dilakukan untuk mengetahui pengaruh karakteristik mikroplastik terhadap kelimpahan yang diperoleh selama periode sampling. Kelimpahan dan karakteristik mikroplastik disajikan dalam bentuk grafik.

2.4 Hasil

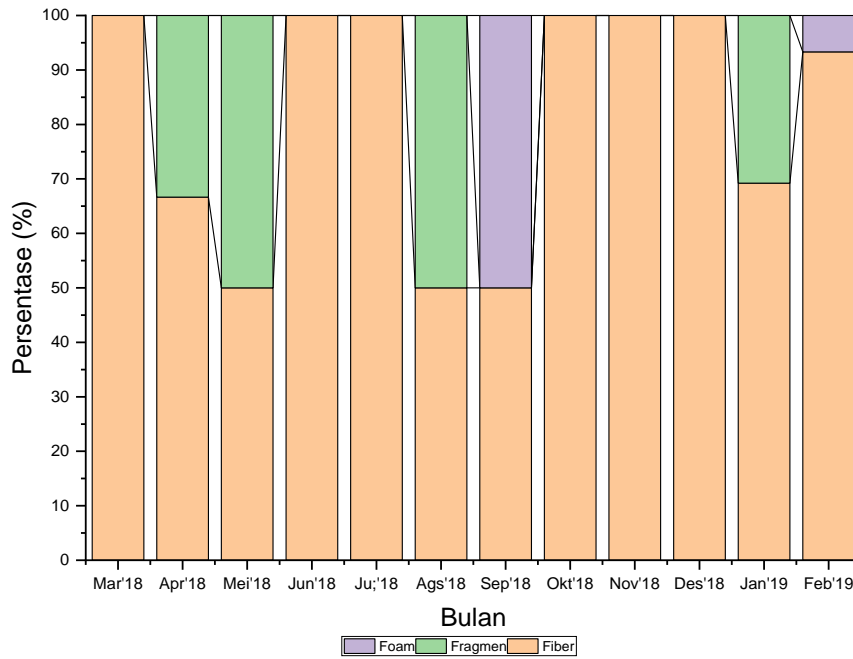
Kelimpahan mikroplastik atmosferik berkisar antara 0,33-5 partikel, dengan rata-rata setiap bulannya 1,83 partikel (Gambar 3). Kelimpahan tertinggi diperoleh pada bulan Februari 2019 dan terendah pada bulan Juli 2018. Secara statistik, kelimpahan mikroplastik atmosferik setiap bulan tidak berbeda nyata ($p > 0.05$).



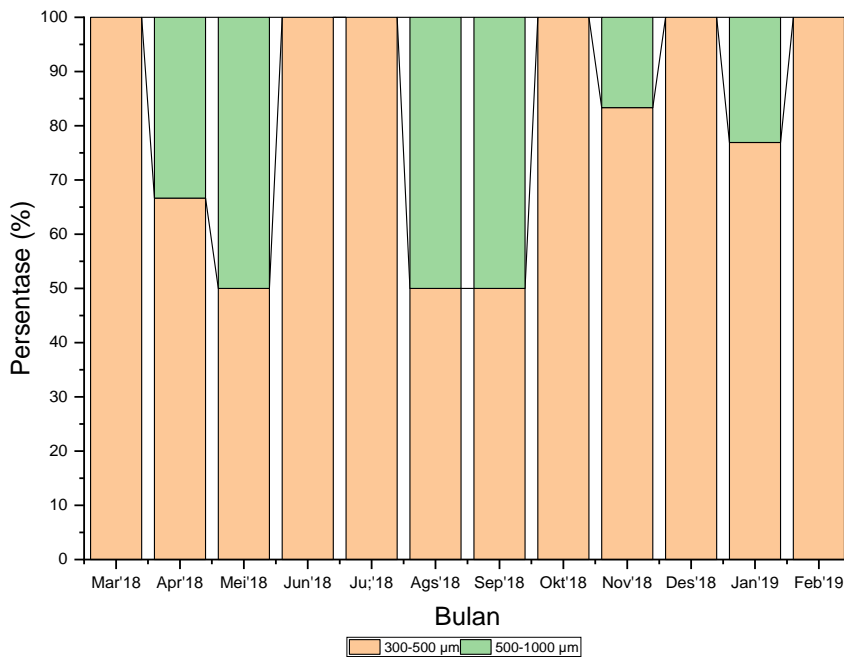
Gambar 3 Kelimpahan rata-rata mikroplastik atmosferik (partikel) selama 12 bulan di Teluk Jakarta

Mikroplastik atmosferik yang diperoleh memiliki tiga bentuk, yaitu fiber, fragmen, dan *foam* (Gambar 4). Bentuk mikroplastik didominasi oleh fiber (86,36%) dan ditemukan pada mikroplastik atmosferik yang terdeposisi setiap bulan. Fragmen dan *foam* memiliki persentase sebesar 10,61% dan 3,03%. Rentang empat ukuran yang dianalisa di laboratorium, mikroplastik atmosferik yang terdeposisi di Jakarta terdiri dari dua rentang ukuran, yaitu 300-500 μm dan 500-1000 μm (Gambar 5). Ukuran 300-500 μm diperoleh secara dominan (87.88%) dan terdeposisi setiap bulan. Seluruh sampel mikroplastik atmosferik yang diperoleh di Jakarta dapat teridentifikasi jenis polimernya, yaitu *polyester* (PET), *polystirene* (PS), *polybutadine* (PB), dan *polyethylene* (PE) (Gambar 6). PET merupakan polimer yang mendominasi (81.82%) dan ditemukan pada sampel setiap bulan. Pada penelitian ini PET yang ditemukan memiliki bentuk fiber (100%).

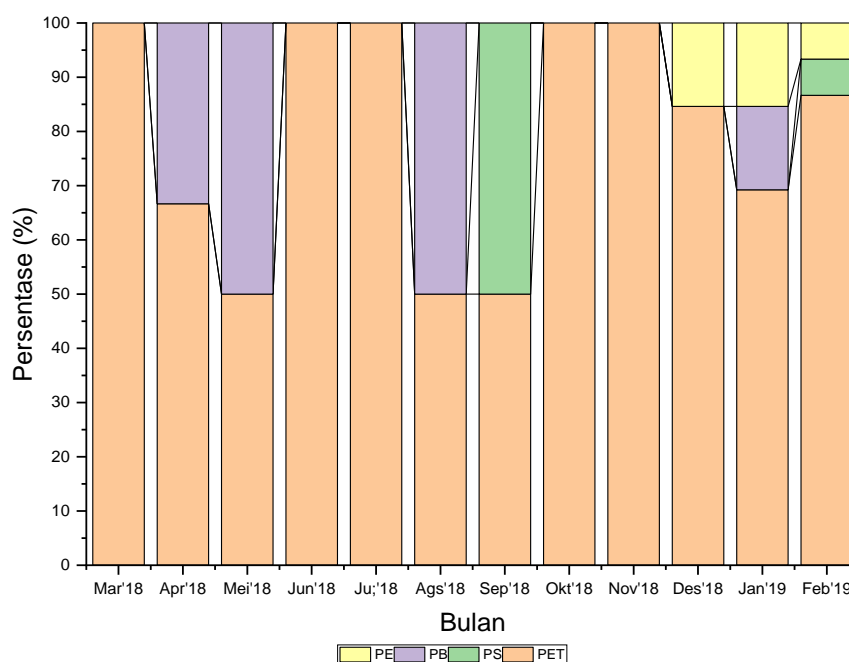
Uji korelasi Kendall menunjukkan bahwa kelimpahan mikroplastik atmosferik dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk mikroplastik. Ukuran mikroplastik 300-500 μm dan bentuk fiber memiliki korelasi positif yang kuat ($\tau = 0,94$), namun berkorelasi negatif sangat lemah dengan mikroplastik berukuran 500-1000 μm dan bentuk fragmen ($\tau = -0,07$). Kelimpahan mikroplastik atmosferik juga berkorelasi positif lemah dengan bentuk *foam* ($\tau = 0,12$).



Gambar 4 Persentase bentuk mikroplastik atmosferik selama 12 bulan pengamatan di Teluk Jakarta



Gambar 5 Persentase ukuran mikroplastik atmosferik selama 12 bulan pengamatan di Teluk Jakarta



Gambar 6 Persentase jenis polimer mikroplastik atmosferik selama 12 bulan pengamatan di Teluk Jakarta

2.5 Pembahasan

Perbedaan kelimpahan atmosferik mikroplastik terlihat dengan jelas pada setiap bulan. Bila dikategorikan berdasarkan musim, tampak kelimpahan mikroplastik atmosferik yang diperoleh pada musim hujan (November-April) lebih tinggi dibandingkan musim kemarau (Mei-Oktober). Dominasi ukuran mikroplastik pada rentang 300-500 μm dan bentuk fiber, memudahkan angin untuk mengangkat mikroplastik ke tempat yang lebih tinggi. Perez *et al.* (2012) mengemukakan bahwa ukuran dan berat partikel debu akan berkorelasi positif, dimana partikel yang memiliki ukuran lebih besar akan makin sulit terangkat oleh angin. Hal yang sama diduga juga berlaku pada partikel mikroplastik atmosferik. Hipotesis ini didukung oleh hasil korelasi positif yang menunjukkan bahwa semakin tinggi partikel mikroplastik ukuran kecil (300-500 μm), maka makin tinggi juga kelimpahan mikroplastik atmosferik. Namun, semakin banyak mikroplastik berukuran besar (500-1000 μm), kelimpahan mikroplastik atmosferik justru mungkin akan semakin sedikit, mengingat adanya korelasi negatif antara keduanya meski tidak berkaitan secara kuat.

Kondisi pada musim kemarau dimana intensitas matahari lebih tinggi, mengakibatkan mikroplastik atmosferik memiliki kemungkinan lebih tinggi untuk terdegradasi oleh UV dan ukurannya akan semakin kecil dan ringan. Angin yang berhembus pada musim kemarau memungkinkan mikroplastik tersebut terbawa ke tempat yang lebih jauh. Berbeda dengan musim hujan, dimana keberadaan partikel air hujan akan mempengaruhi mikroplastik atmosferik. Mikroplastik atmosferik memiliki kemampuan untuk berikatan dengan partikel lain, termasuk air hujan. Semakin tinggi curah hujan, maka semakin banyak partikel mikroplastik yang menempel pada air hujan. Hal ini menyebabkan mikroplastik atmosferik akan lebih mudah dan cepat terjatuh.

Penjabaran tersebut mengindikasikan bahwa kondisi meteorologi berperan penting dalam jatuhnya mikroplastik atmosferik. Beberapa penelitian yang dilakukan di Paris, Pegunungan Pyrenees, dan Australia, memperkuat bahwa presipitasi oleh hujan dan es, serta kecepatan angin dapat mempengaruhi kelimpahan mikroplastik atmosferik yang terjatuh di suatu lokasi (Dris *et al.* 2016; Allen *et al.* 2019; Su *et al.* 2020).

Rata-rata kelimpahan mikroplastik atmosferik yang diperoleh di Ancol-Jakarta lebih rendah dibandingkan di Hamburg-Jerman (103.2 partikel), Surabaya-Indonesia (39.3 partikel), Dongguan-China (123.6 partikel) (Cai *et al.* 2017; Klein dan Fischer 2019; Syafei *et al.* 2019). Perbedaan ini terjadi diduga karena perbedaan lokasi sampling dan aktifitas penduduk. Penelitian sebelumnya dilakukan di pusat kota dengan kepadatan dan aktifitas penduduk yang lebih bervariasi dan lebih tinggi. Hal ini mengakibatkan perbedaan jumlah emisi yang dihasilkan ke atmosfer. Kepadatan dan aktifitas penduduk menjadi salah satu sumber emisi mikroplastik atmosferik, seperti aktifitas lalu lintas, laundry, dan industri (Dris *et al.* 2016; Boucher dan Friot 2017; Dris *et al.* 2017; Prata 2018).

Karakteristik mikroplastik atmosferik di Ancol-Jakarta ditinjau dari dominasi bentuk, ukuran dan jenis polimer. Mikroplastik atmosferik di Jakarta didominasi oleh bentuk fiber. Karakteristik bentuk tersebut mengindikasikan keberadaan aktifitas lokal yang menjadi sumber emisi. Enyoh *et al.* (2019) mengungkapkan bahwa fiber pada umumnya mendominasi bentuk mikroplastik atmosferik dibanding non-fiber. Keberadaan fiber umumnya berasal dari industri garmen, dan pencucian baju (Atis *et al.* 2005; Liebezeit dan Liebezeit 2015; Dris *et al.* 2016; Prata 2018). Aktifitas tersebut merupakan aktifitas yang umum dilakukan di daerah urban. Dominasi fiber ini juga diperoleh pada mikroplastik atmosferik di daerah lain seperti Paris-Prancis (45%), Dongguan-China (90.11%), Surabaya-Indonesia (97.46%), London-UK (97.7%), Yantai-China (> 60%), dan Victoria-Australia (45.7-100%) (Dris *et al.* 2016; Cai *et al.* 2017; Syafei *et al.* 2019; Su *et al.* 2020; Wright *et al.* 2020; Y. Zhang *et al.* 2020).

Sumber emisi lokal juga terdeteksi dari ukuran dan polimer. Mikroplastik atmosferik di Jakarta didominasi oleh ukuran 300-500 μm dengan jenis polimer *polyethylene* (PET). Klein and Fischer (2019) mengungkapkan bahwa mikroplastik berukuran besar pada umumnya ditemukan pada wilayah yang dekat dengan sumber emisi dan hanya dapat tertransportasi beberapa meter oleh angin. Selain itu, Wright *et al.* (2020) mengemukakan bahwa mikroplastik dengan rentang ukuran 400-500 μm mampu terbawa angin hingga jarak 12-60 km dengan kecepatan angin 5 m/s, sedangkan ukuran < 300 μm mampu terbawa angin sejauh 10-1000 km (Brahney *et al.* 2020). Dominasi rentang ukuran yang diperoleh pada penelitian ini juga sejalan dengan dominasi ukuran yang ditemukan di Dongguan, Shanghai, Yantai-China, dan London-UK (Cai *et al.* 2017; Zhou *et al.* 2017; C. Liu *et al.* 2019; Wright *et al.* 2020).

PET merupakan polimer utama dalam produksi tekstil (Carmichael 2015) sehingga penggunaannya dalam industri dan kehidupan sehari-hari sangat tinggi. C. Liu *et al.* (2019) mengungkapkan bahwa PET merupakan salah satu jenis polimer yang umum ditemukan dalam kandungan debu dan memiliki korelasi positif dengan kelimpahan fiber. Dominansi PET pada mikroplastik atmosferik juga ditemukan di 39 kota di China, Victoria-Australia, Madrid-Mexico, Paris-Perancis (Dris *et al.* 2016; C. Liu *et al.* 2019; Su *et al.* 2020; González-Pleiter *et al.* 2021).

Hal ini menguatkan dugaan bahwa sumber mikroplastik atmosferik di Ancol, Jakarta merupakan emisi lokal dari sekitar wilayah Ancol.

2.6 Simpulan

Penelitian ini mengungkap bahwa mikroplastik ditemukan di udara Ancol, Jakarta. Kelimpahan mikroplastik atmosferik di lokasi penelitian bervariasi setiap bulan dengan kelimpahan pada musim hujan lebih tinggi dibanding musim kemarau. Meski demikian, kelimpahan mikroplastik atmosferik di Ancol, Jakarta lebih rendah dibandingkan daerah urban lainnya. Karakteristik atmosferik mikroplastik yang diperoleh didominasi oleh bentuk fiber dengan kisaran ukuran 300-500 μm dan memiliki jenis polimer PET. Karakteristik tersebut mengindikasikan sumber emisi mikroplastik atmosferik merupakan emisi lokal dari aktifitas penduduk dan lalu lintas di sekelilingnya.

III KARAKTERISTIK MIKROPLASTIK DI AIR DAN SEDIMEN DI MUARA SUNGAI TELUK JAKARTA

3.1 Pendahuluan

Sungai dan muaranya dinyatakan sebagai salah satu reservoir dan jalan mikroplastik untuk menuju lingkungan laut (Newbould *et al.* 2021; Emmerik *et al.* 2022). Jambeck *et al.* (2015) dan Lebreton *et al.* (2017) menyatakan bahwa sungai dan muara sungai sebagai sumber utama pencemaran plastik, baik berupa makro maupun mikro, bagi perairan laut. Kelimpahan mikroplastik di sungai dan muara sungai bervariasi (Moore *et al.* 2011), bergantung pada berbagai faktor alam, seperti topografi sungai, iklim, dan letak sumber pencemar (Hitchcock dan Mitrovic 2019). Selain itu, kepadatan penduduk dan perkembangan aktifitas penduduk pada bagian hulu juga menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi kelimpahan mikroplastik di sungai dan muaranya (Eriksen *et al.* 2013; Yonkos *et al.* 2014). Mikroplastik di perairan (termasuk muara sungai) terdistribusi secara vertikal, mulai dari permukaan air hingga sedimen. Namun kelimpahan mikroplastik terbanyak umumnya ditemukan di permukaan air dan sedimen dibandingkan kolom perairan (Maes *et al.* 2017; Lenaker *et al.* 2019).

Salah satu perairan yang juga rentan terkontaminasi mikroplastik adalah Teluk Jakarta. Mikroplastik di Teluk Jakarta perlu memperoleh perhatian dalam monitoringnya, karena perairan Teluk Jakarta yang digunakan pada hampir semua aspek kehidupan masyarakat. Ukuran mikroplastik yang kecil, melayang, dan berbentuk mirip seperti makanan (Guzzetti *et al.* 2018) mengakibatkan mikroplastik mudah termakan oleh organisme (Botterell *et al.* 2019; Efadeswarni *et al.* 2019; Barboza *et al.* 2020; Cordova *et al.* 2020; Bai *et al.* 2021). Adanya mikroplastik di Teluk Jakarta dapat berimbas pada aspek yang lebih luas. Mikroplastik di Teluk Jakarta telah dibuktikan keberadaannya pada penelitian sebelumnya, terutama di perairan dan sedimennya (Manalu *et al.* 2017; Rahmad *et al.* 2019; Takarina *et al.* 2022). Lebih dari itu, eksistensi mikroplastik atmosferik juga ditemukan di pesisir utara Jakarta (Purwiyanto *et al.* 2022). Hal ini menunjukkan tekanan pencemaran yang bertambah bagi Teluk Jakarta, mengingat laut menjadi tempat pembuangan akhir yang menampung mikroplastik dari berbagai sumber.

Teluk Jakarta memperoleh massa air dari sungai yang mengalir melewati pemukiman penduduk di Kota Jakarta. Sungai-sungai tersebut tidak hanya sebagai sumber air potensial yang digunakan oleh penduduk, namun juga menjadi tempat pembuangan sampah secara langsung. Hal ini diperkuat oleh Cordova and Nurhati (2019) yang memperoleh rata-rata $97,098 \pm 28,932$ unit atau 23 ± 7.10 t on makrodebris dari sungai kota yang masuk ke Teluk Jakarta setiap harinya. Keberadaan makrodebris di suatu perairan dapat menjadi awal kontaminasi mikroplastik mengingat salah satu sumber mikroplastik adalah hasil pecahan sampah makro berbahan polimer.

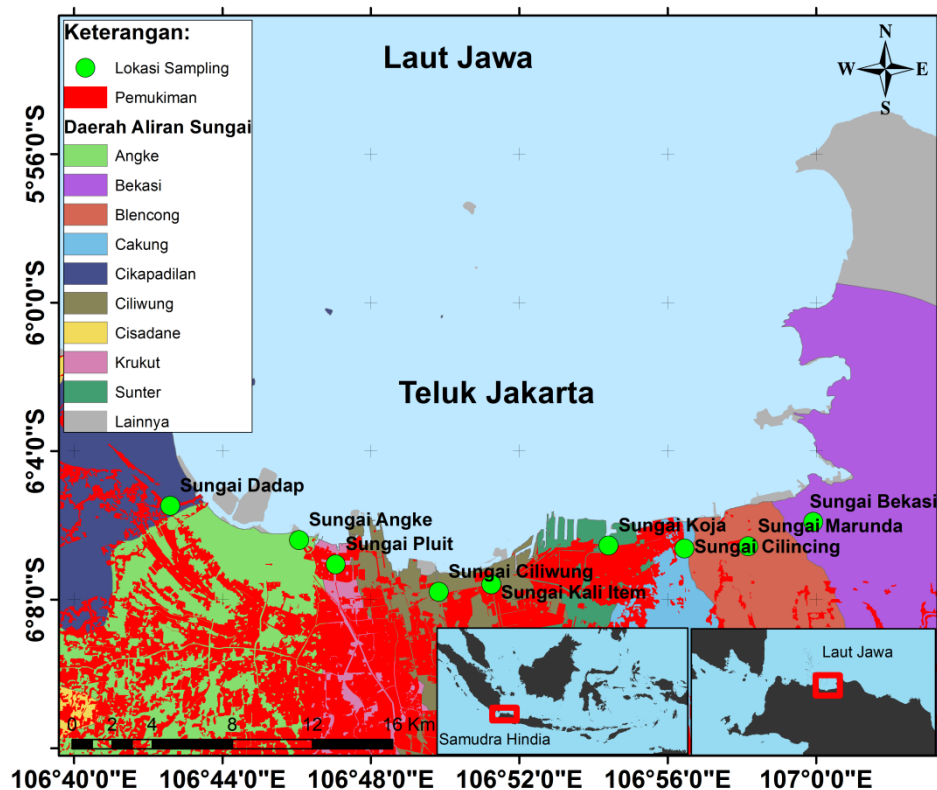
3.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan membuktikan kontribusi muara sungai di Teluk Jakarta sebagai sumber potensial mikroplastik bagi perairan Teluk Jakarta.

3.3 Metode Penelitian

3.3.1 Waktu dan Lokasi penelitian

Penelitian dilakukan pada puncak musim kemarau bulan Agustus 2020. Lokasi penelitian adalah sembilan muara sungai di Teluk Jakarta (Gambar 7). Pemilihan sembilan muara sungai ini dilakukan dengan mempertimbangkan besaran sumbangan sampah makro masing-masing muara ke Teluk Jakarta berdasarkan Cordova dan Nurhati (2019). Mikroplastik sebagai hasil lanjutan keberadaan makroplastik diduga akan memberikan kelimpahan yang sejalan antara keduanya. Selain itu, sembilan muara sungai yang menjadi fokus kajian merupakan muara yang memberikan masukan air tawar yang besar untuk Teluk Jakarta. Sampling dilakukan pada permukaan air dan sedimen sebanyak satu kali dengan tiga kali pengulangan pada masing-masing stasiun.



Gambar 7 Lokasi penelitian mikroplastik di muara sungai Teluk Jakarta. Daerah aliran sungai ditandai dengan warna berbeda dan ditumpangtindihkan dengan pemukiman penduduk (warna merah)

3.3.2 Teknik Sampling

Prosedur sampling yang dilakukan mengacu pada penelitian sebelumnya (McEachern *et al.* 2019; Herrera *et al.* 2020; Purwiyanto *et al.* 2020). Sampling permukaan air dilakukan dengan menggunakan *round net* (*mesh size* 330 μm , \O 50 cm, panjang 1,5 m). Net pada bagian tengah dilengkapi dengan *flow meter* (Hydro-Bios, model 438–115) untuk memperoleh volume air yang tersaring. Angka pada *flow meter* dicatat setiap kali *round net* diturunkan dan dinaikkan dari air. Selisih angka yang diperoleh nantinya akan dilakukan koreksi sebesar 0,3. *Round net* ditarik secara horizontal selama 15 menit dengan tiga kali ulangan. Pada akhir proses *towing* di setiap stasiun, bagian luar *round net* dicuci dengan menggunakan air pada masing-masing stasiun dan bagian dalam net dibilas menggunakan *Double Distillate Deionized Water* (DDDW). Air yang diperoleh di dalam *cod-end bucket* dikomposit dan ditampung dalam botol kaca bervolume 500 ml. *Screen cod-end bucket* disemprot menggunakan DDDW sebelum *round net* disimpan. Pembilasan menggunakan DDDW ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa tidak ada partikel mikroplastik yang tertinggal pada net maupun *screen cod-end bucket*. Air sampel yang diperoleh disimpan dengan suhu $4 \pm 2^\circ\text{C}$.

Sampel sedimen diambil menggunakan *Van Veen Grab stainless steel*. Pengambilan sampel dilakukan pada permukaan sedimen hingga kedalaman 5 cm di tiga titik yang berbeda pada masing-masing stasiun dan dikompositkan. Sampel sedimen yang digunakan adalah sampel yang berada di bagian yang tidak terkena dinding *grab*. Sampel dimasukkan ke dalam botol kaca yang telah disterilkan dan dibilas menggunakan DDDW. Botol sampel ditutup rapat untuk menghindari kontaminasi debu dan partikel-partikel lainnya.

3.3.3 Prosedur Laboratorium

Prosedur laboratorium mencakup proses ekstraksi dan identifikasi mikroplastik. Ekstraksi mikroplastik dilakukan dengan mengacu pada Miller *et al.* (2017).

3.3.3.1. Mikroplastik di Permukaan Air

Sampel air dibersihkan dari material non-plastik (daun) dan plastik berukuran besar (makro dan mesoplastik) menggunakan pinset *stainless steel*. Material-material tersebut dicuci menggunakan DDDW untuk mencegah kemungkinan partikel mikroplastik yang menempel dapat terbang. Sampel air yang telah bersih kemudian disaring menggunakan saringan *stainless steel* dengan ukuran bertingkat (*mesh size* 1000, 500, 300, dan 50 μm , \O 3 inc). Hasil saringan pada masing-masing ukuran disimpan dalam tabung kaca yang telah disterilkan dan dibilas menggunakan DDDW. Tabung kaca kemudian dioven pada suhu 50°C selama 24 h. Pada penelitian ini, tidak dilakukan proses destruksi material organik yang menempel pada plastik mikroplastik. Hal ini dilakukan karena sampel mikroplastik yang diperoleh dan teridentifikasi nantinya akan dilakukan pengujian lebih lanjut, sehingga kondisi partikel diusahakan sealami mungkin. Oleh karena itu, setelah dioven, sampel air langsung disaring menggunakan pompa vakum pada kertas filter steril (\O 47 mm, *mesh size* 0.45 μm , Whatman selulosa nitrat). Hasil ekstraksi kemudian dikeringkan pada oven 60°C selama 24 h.

Proses identifikasi dilakukan secara sensus pada seluruh partikel yang terdapat di kertas filter steril. Partikel mikroplastik diidentifikasi pada tiga kategori, yaitu bentuk, ukuran, dan jenis polimer. Identifikasi bentuk dan ukuran mikroplastik dilakukan menggunakan mikroskop stereo Nikon SMZ 745T. Bentuk dan ukuran mikroplastik diidentifikasi dengan mengacu pada syarat memiliki warna yang kontras dan tidak alami, bentuk tidak beraturan dan tidak runcing, tidak mudah patah, *glassy*, bentuk fiber tidak bercabang dan dapat dipegang menggunakan pinset, ketebalan partikel homogen (Nor dan Obbard 2014; Horton *et al.* 2017). Partikel dapat teridentifikasi sebagai mikroplastik bila paling tidak memiliki dua kriteria yang telah disebutkan (Horton *et al.* 2017). Bentuk mikroplastik dikategorikan menjadi fiber, *foam*, fragmen dan granula (Murphy *et al.* 2016; Purwiyanto *et al.* 2020). Ukuran mikroplastik dibagi menjadi $> 1000 \mu\text{m}$, $1000\text{-}500 \mu\text{m}$, $500\text{-}300 \mu\text{m}$, dan $< 300 \mu\text{m}$ (Cordova *et al.* 2019; Purwiyanto *et al.* 2020). Partikel mikroplastik yang teridentifikasi pada mikroskop diambil secara acak (166 sampel) untuk dilakukan uji polimer menggunakan FTIR *spectroscopy* (Nicolet™ iS5 FT-IR *spectrometer*) dan *Micro-Raman Spectroscopy* (*Bruker Senterra II Compact Raman Microscope*).

3.3.3.2. Mikroplastik di Permukaan Sedimen

Sampel sedimen basah yang diperoleh ditimbang dan dioven pada suhu 60°C selama 24 jam. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa sampel benar-benar kering untuk analisis lebih lanjut. Sampel kering kemudian ditimbang dan dimasukkan dalam botol kaca. Pemisahan mikroplastik dari sedimen dilakukan dengan mengadaptasi prosedur yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya (Hidalgo-Ruz *et al.* 2012; Nor dan Obbard 2014; Masura *et al.* 2015; Falahudin *et al.* 2020; Li *et al.* 2020). Ekstraksi mikroplastik dilakukan berdasarkan prinsip pemisahan densitas. Sampel sedimen (250 g berat kering) dicampur dengan larutan supersalin *sodium chloride* (NaCl, $\rho = 1.2 \text{ g ml}^{-1}$) pada gelas beker 1 L. NaCl paling banyak digunakan untuk pemisahan densitas karena ramah lingkungan, ketersediaan yang tinggi dan harga yang murah (Nuelle *et al.* 2014). Selain itu, penggunaan NaCl tidak berpotensi merubah kondisi alami partikel mikroplastik, sehingga partikel mikroplastik yang diperoleh dapat digunakan untuk pengujian lebih lanjut. Campuran kemudian diaduk dan didiamkan selama 2 jam agar terjadi pengendapan. Proses ekstraksi dengan pemisahan densitas pada setiap sampel diulang sebanyak tiga kali untuk meningkatkan perolehan mikroplastik. Pada proses ekstraksi, tidak dilakukan proses destruksi. Hal ini dimaksudkan untuk menjaga kondisi mikroplastik tetap natural guna analisis lebih lanjut. Sampel mikroplastik disaring dengan kertas saring Whatman steril (selulose nitrat, $0,45 \mu\text{m}$ *pore size*, $\varnothing 47 \text{ mm}$) dengan bantuan pompa vakum. Kertas saring kemudian dipindahkan ke steril *petri dish* dan dikering-ovenkan pada suhu 60°C selama 24 jam.

Identifikasi mikroplastik dilakukan secara dua tahap. Tahap pertama adalah menghitung jumlah dan mengidentifikasi bentuk serta ukuran mikroplastik secara visual dengan bantuan mikroskop stereo Nikon SMZ 745T. Mikroplastik yang diobservasi dibedakan berdasarkan bentuk menjadi granula, fragmen, fiber, dan *foam* (Falahudin *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020; Syakti *et al.*, 2018), sedangkan ukuran mikroplastik dikelompokkan menjadi $> 1000 \mu\text{m}$, $1000\text{-}500 \mu\text{m}$, $500\text{-}300 \mu\text{m}$, $300\text{-}50 \mu\text{m}$, dan $< 50 \mu\text{m}$. Tahap kedua adalah mengidentifikasi jenis polimer

dari partikel yang dipilih secara acak (5% dari total sampel). Jenis polimernya direkam menggunakan FTIR *spectroscopy* (Nicolet™ iS5 FT-IR *spectrometer*) dan *Micro-Raman Spectroscopy* (*Bruker Senterra II Compact Raman Microscope*).

3.3.4 Prosedur QA/QC (*Quality Assurance/Quality Control*)

QA/QC dilakukan pada keseluruhan prosedur, mulai dari pengambilan sampel lapangan hingga prosedur laboratorium. Pada penelitian ini, penanganan sampel selalu dilakukan dengan dilengkapi penggunaan sarung tangan berbahan *latex* dan jas laboratorium berbahan katun 100%. Hal ini dilakukan untuk menghindari kontaminasi polimer sintetis yang berada di pakaian. Selain itu, seluruh alat yang digunakan adalah alat-alat berbahan gelas yang telah dicuci dan disterilkan menggunakan DDDW. DDDW juga digunakan pada proses pengambilan sampel, yaitu untuk membilas peralatan sampling sebelum digunakan pada lokasi sampling yang berbeda. QA/QC juga dilakukan dengan menggunakan *blank control*, yaitu meletakkan beberapa kertas saring steril untuk mengetahui adanya jatuhnya mikroplastik dari udara selama prosedur laboratorium dilakukan.

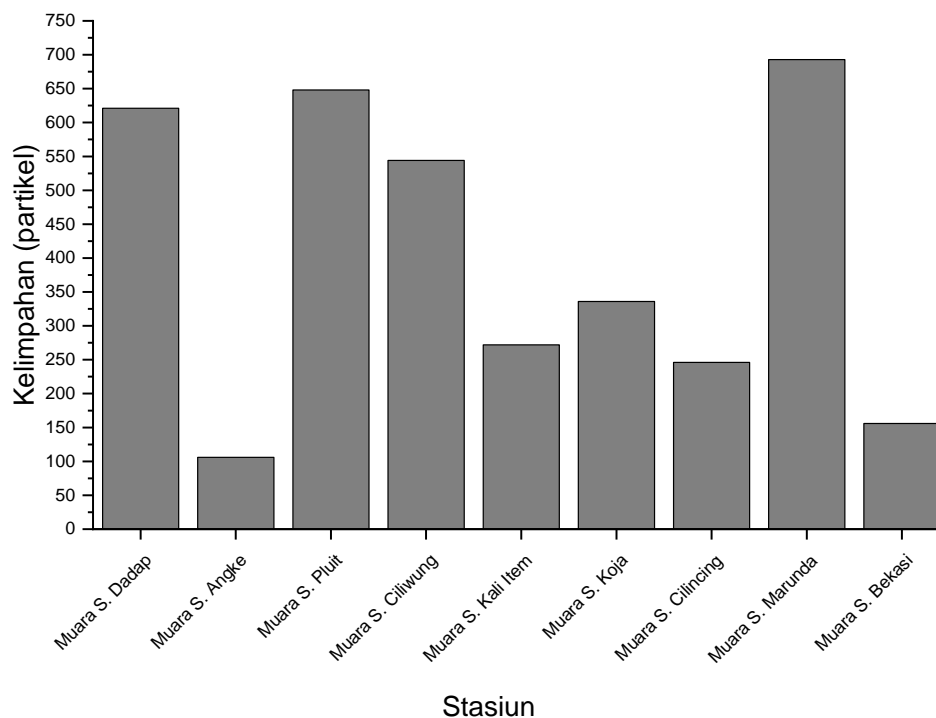
3.3.5 Analisis data

Uji statistik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PAST 4.03 dan Microsoft Excel. ANOVA Kruskal-Wallis digunakan untuk menguji kelimpahan mikroplastik permukaan air dan sedimen muara sungai selama periode sampling dengan selang kepercayaan 95%. Kelimpahan dan karakteristik mikroplastik disajikan dalam bentuk grafik.

3.4 Hasil

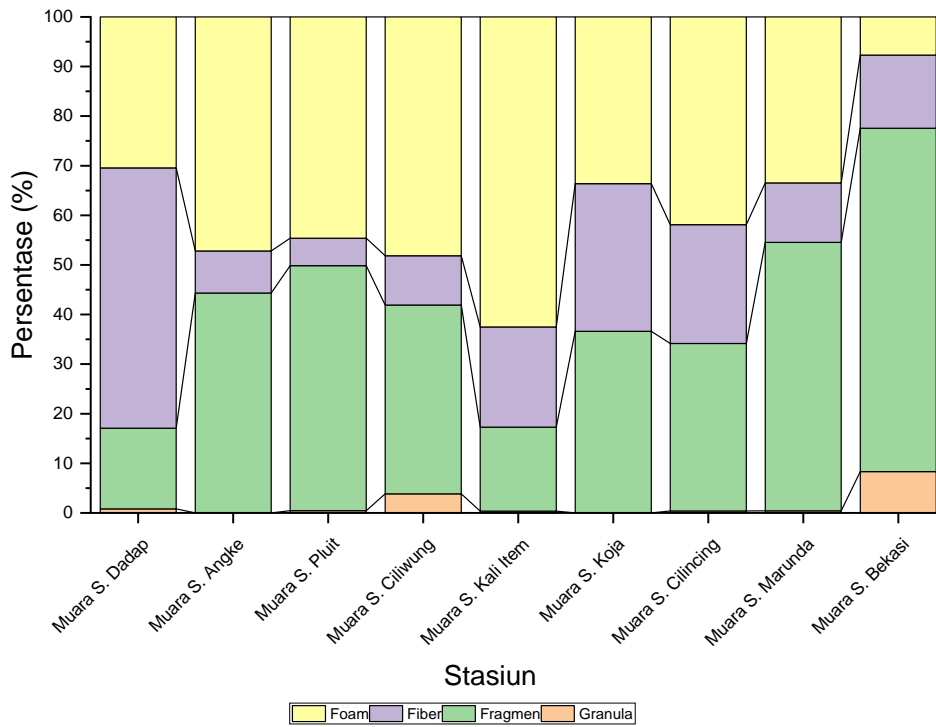
3.4.1 Mikroplastik di Permukaan Air

Mikroplastik ditemukan di seluruh muara sungai yang mengalir memasuki Teluk Jakarta. Kelimpahan mikroplastik di sembilan muara sungai di Teluk Jakarta berkisar 9,729 – 89,164 partikel/m³, dengan rata-rata $48,179 \pm 21,960$ partikel/m³. Kelimpahan mikroplastik tertinggi diperoleh di Sungai Dadap dan terendah pada Muara Sungai Angke (Gambar 8). Secara statistik, masing-masing sungai yang bermuara di Teluk Jakarta tidak memberikan perbedaan kelimpahan mikroplastik yang signifikan ($p > 0.05$). Muara sungai yang menjadi penelitian ini terletak di tiga wilayah administrasi, yaitu Tangerang (Sungai Dadap), Jakarta Utara (Sungai Angke, Pluit, Ciliwung, Kali Item, Koja, Cilincing, and Marunda), and Bekasi (Sungai Bekasi). Mikroplastik yang masuk dari wilayah Tangerang memiliki kelimpahan lebih besar ($67,777 \pm 5,656$ partikel/m³) dibandingkan Jakarta Utara ($47,715 \pm 4,207$ partikel/m³) dan Bekasi ($31,834 \pm 2,503$ partikel/m³).

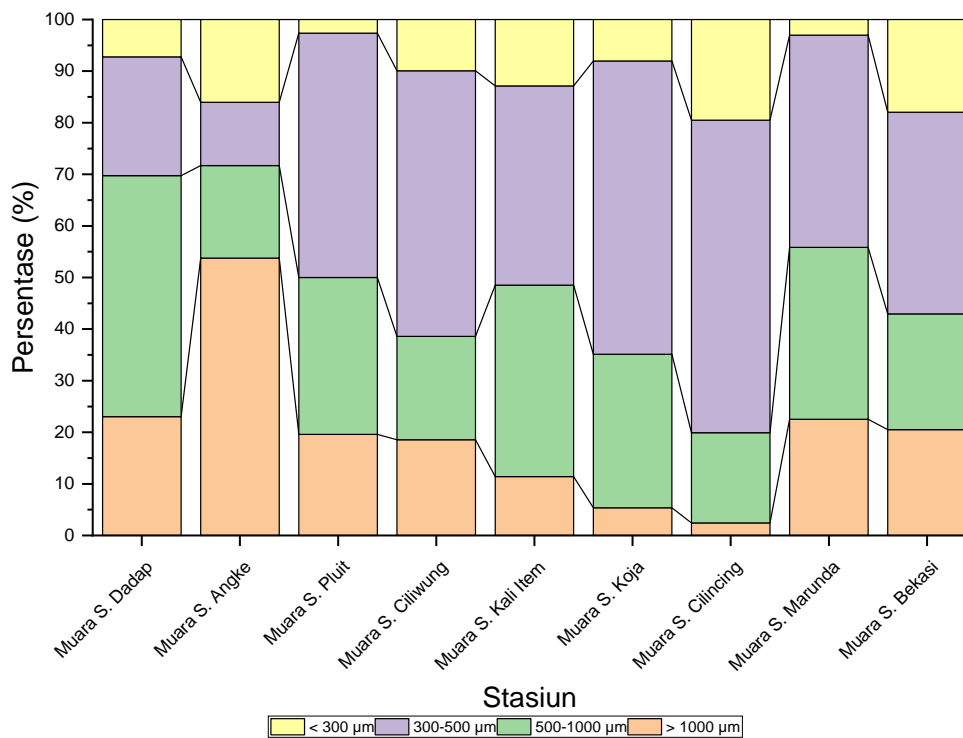


Gambar 8 Kelimpahan mikroplastik (partikel/m³) di sembilan perairan muara sungai di Teluk Jakarta

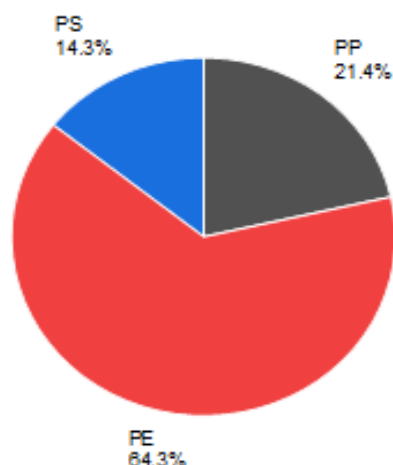
Mikroplastik di sembilan muara sungai Teluk Jakarta memiliki empat bentuk, yaitu granula, fragmen, fiber, dan *foam* (Gambar 9). Secara keseluruhan, bentuk fragmen mendominasi (43,45%) dibandingkan *foam* (28,11%), fiber (26,76%), dan granula (,68%). Bentuk fragmen, *foam*, dan fiber, ditemukan di seluruh stasiun, sedangkan bentuk granula hanya ditemukan pada tujuh stasiun. Tingginya persentase bentuk fragmen, diperoleh pada ketiga wilayah administrasi, yaitu Tangerang (60,11%), Jakarta Utara (41,16%) dan Bekasi (71,43%). Mikroplastik dengan bentuk granula paling banyak ditemukan di muara sungai Bekasi (8,60%) dibandingkan Jakarta Utara (1,03%) dan Tangerang (0,56%). Ukuran mikroplastik, mikroplastik berukuran 300 – 500 μm (43,13%) lebih tinggi dibandingkan ukuran 500 – 1000 μm (31,28%), > 1000 μm (17,57%), dan < 300 μm (8,02%) (Gambar 10). Pola distribusi persentase ukuran mikroplastik ini ditemukan baik pada muara sungai Tangerang, Jakarta utara, maupun Bekasi. Sampel mikroplastik yang diperoleh dipilih secara acak untuk dianalisis menggunakan FT-IR dan Raman. Sebanyak 166 sampel teridentifikasi jenis polimernya, yaitu *polypropylene*/PP (22%), *polyethylene*/PE (64%), dan *polystyrene*/PS (14%) (Gambar 11).



Gambar 9 Persentase distribusi bentuk mikroplastik di sembilan perairan muara sungai Teluk Jakarta



Gambar 10 Persentase distribusi ukuran mikroplastik di perairan muara sungai Teluk Jakarta

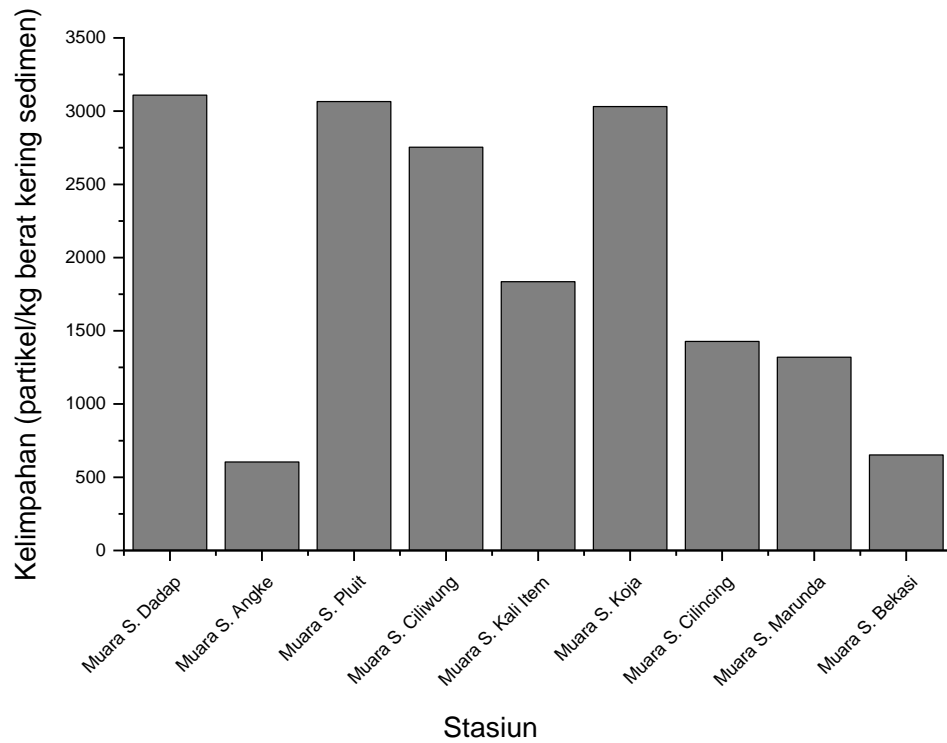


Gambar 11 Persentase polimer mikroplastik di sembilan perairan muara sungai Teluk Jakarta; *polypropylene* (PP), *polyethylene* (PE), dan *polystyrene* (PS)

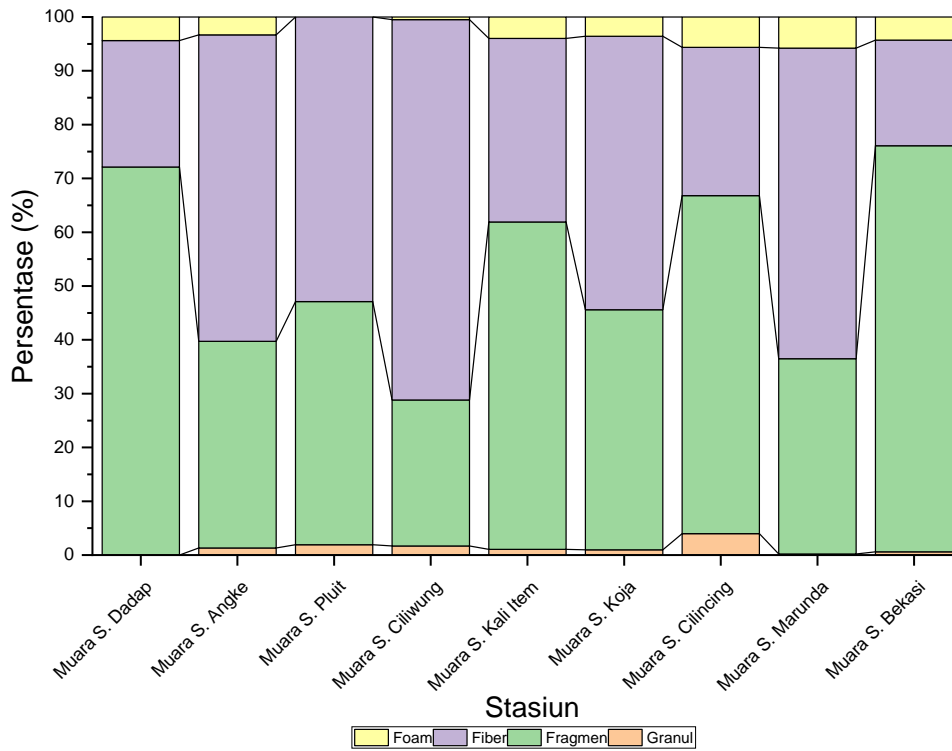
3.4.2 Mikroplastik di Permukaan Sedimen

Partikel mikroplastik pada sembilan muara sungai di Teluk Jakarta juga ditemukan di sedimen dengan kisaran kelimpahan 151-485 partikel dan rata-rata 345 partikel. Jumlah mikroplastik tertinggi ditemukan di Sungai Marunda dan terendah di Sungai Angke. Kelimpahan mikroplastik di sedimen berkisar antara 604-3108,97 partikel/kg berat kering sedimen, dengan rata-rata 1977,56 partikel/kg berat kering sedimen (Gambar 12). Kelimpahan tertinggi diperoleh di Sungai Dadap, dan terendah di Sungai Angke. Uji statistik menunjukkan bahwa kelimpahan setiap stasiun tidak berbeda secara nyata ($p > 0,05$). Secara berurutan, kelimpahan mikroplastik pada tiga wilayah administrasi muara sungai di Teluk Jakarta adalah Jakarta Utara (14037,20 partikel/kg berat kering sedimen) > Tangerang (3108,97 partikel/kg berat kering sedimen) > Bekasi (652 partikel/kg berat kering sedimen).

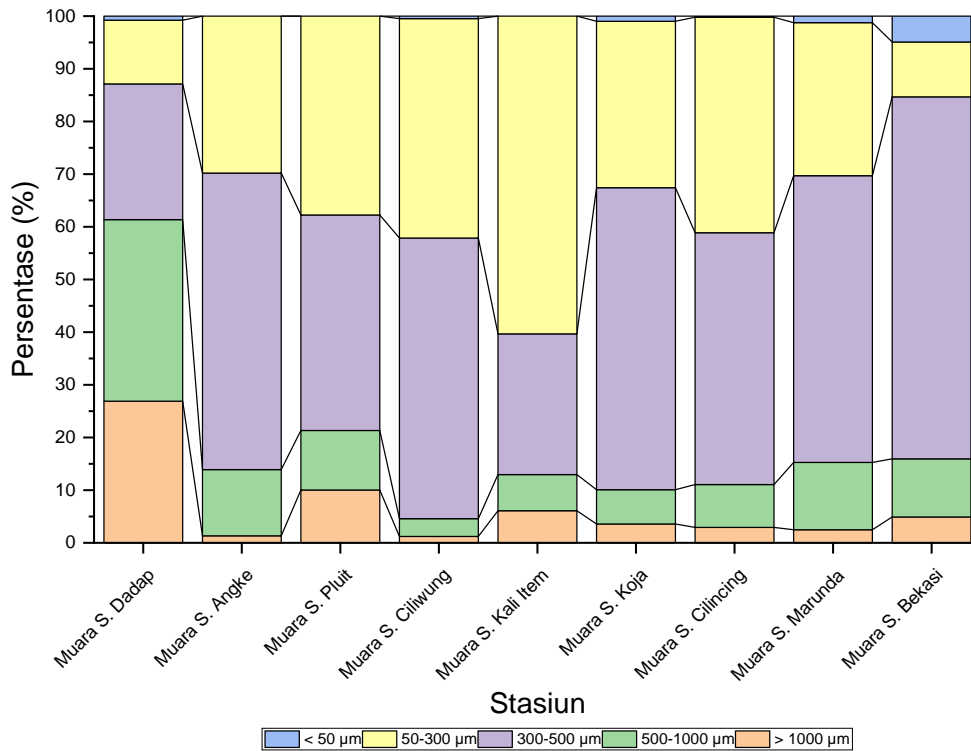
Mikroplastik di sedimen didominasi oleh bentuk fragmen (52,81%). Bentuk lainnya adalah fiber (42,75%), *foam* (3,13%), dan granula (1,31%) (Gambar 13) Bentuk fragmen dan fiber ditemukan di seluruh stasiun penelitian. Berbeda dengan granula yang tidak ditemukan di Sungai Dadap, dan *foam* di Sungai Pluit. Mikroplastik di sembilan muara sungai Teluk Jakarta dibagi menjadi lima kisaran ukuran yang persentasenya berbeda-beda. Mikroplastik ukuran > 1000 μm (6,60%), 500-1000 μm (11,90%), 300-500 μm (47,92%), 50-300 μm (32,63%), dan < 50 μm (0,95%) (Gambar 14). Hasil uji polimer menunjukkan bahwa mikroplastik yang ditemukan di sembilan muara sungai tersusun atas tiga jenis polimer, yaitu *polyethylene*/PE (60%), *polypropylene*/PP (30%), dan *polystyrene*/PS (10%) (Gambar 15).



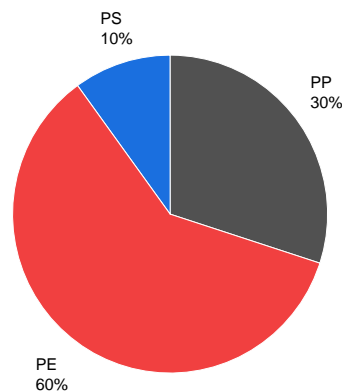
Gambar 12 Kelimpahan mikroplastik (partikel/kg berat kering sedimen) di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta



Gambar 13 Persentase distribusi bentuk mikroplastik di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta



Gambar 14 Persentase distribusi ukuran mikroplastik di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta



Gambar 15 Persentase polimer mikroplastik di sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta; *polypropylene* (PP), *polyethylene* (PE), dan *polystyrene* (PS)

3.5 Pembahasan

Pencemaran mikroplastik penting untuk menjadi salah satu kajian di Teluk Jakarta. Hal ini mengingat Teluk Jakarta menjadi muara dari sungai-sungai yang mengalami banyak tekanan dari aktifitas penduduk. Tercemarnya sungai-sungai dapat memberikan pengaruh terhadap kondisi Teluk Jakarta yang tidak hanya

digunakan sebagai jalur transportasi, tetapi juga *fishing ground* yang dikonsumsi oleh masyarakat lokal maupun non-lokal.

3.5.1 Mikroplastik di Permukaan Air

Kelimpahan mikroplastik di perairan tidak terlepas dari aktifitas penduduk. Semakin tinggi aktifitas penduduk, maka limbah mikroplastik yang dihasilkan juga akan semakin banyak (Yonkos *et al.* 2014; Hitchcock dan Mitrovic 2019). Begitu pula dengan perairan yang dekat dengan daerah pemukiman, akan mengalami tekanan mikroplastik (Eriksen *et al.* 2013; Frère *et al.* 2017). Kelimpahan mikroplastik tertinggi yang dihasilkan di Sungai Dadap-Tangerang, sejalan dengan jumlah makrodebris yang tinggi di perairan (Cordova dan Nurhati 2019). Berdasarkan karakteristik mikroplastik yang diperoleh dari sungai-sungai di sekitar Teluk Jakarta, mikroplastik ini diduga berasal dari limbah masyarakat setempat. Hal ini diperkuat oleh Phuong *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa mikroplastik pada sungai-sungai di Asia lebih didominasi berasal dari aktifitas domestik dibandingkan industri, perikanan, dan pertanian. Mikroplastik yang tertransportasi di perairan sungai sekitar Teluk Jakarta didominasi oleh bentuk fragmen, kisaran ukuran 300-500 μm , dan memiliki kandungan polimer *polyethylene* (PE). Ketiga karakter dominan ini menggambarkan mikroplastik hasil limbah domestik. Mikroplastik berukuran < 500 μm memerlukan waktu yang cukup lama untuk mengalami perpindahan tempat. Apalagi pada perairan yang tidak mengalami pengaruh pasang surut dan gelombang seperti perairan sungai. Hal ini dibuktikan oleh Z. Zhang *et al.* (2020), dimana mikroplastik berukuran 20-500 μm memerlukan waktu 1,32 bulan untuk tertransportasi sejauh 1 km dengan bantuan gelombang dan pasang surut. Apabila jarak dan waktu tempuh tersebut digunakan pada sungai-sungai di Teluk Jakarta, maka mikroplastik yang berasal dari bagian hulu akan memerlukan waktu lebih dari 17,16-120,45 bulan untuk mencapai wilayah muara. Hal ini karena panjang aliran sungai-sungai yang bermuara ke Teluk Jakarta berkisar antara 13-91,25 km (DaerahKita 2019).

PE merupakan salah satu polimer yang sangat umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari. PE banyak digunakan pada bahan kemasan makanan, obat, mainan, dan bahkan pipa (Akarsu *et al.* 2020). Schwarz *et al.* (2019) bahkan menyebutkan bahwa PE diperoleh 4-51% pada mikroplastik di alam. Fragmen merupakan bentuk mikroplastik sekunder (fragmentasi makroplastik) yang terbentuk akibat tumbukan mekanis dan paparan UV (Barnes *et al.* 2009), serta umumnya dihasilkan pada daerah urban atau tempat pembuangan akhir (TPA) (Kataoka *et al.* 2019). Makroplastik yang berada di lingkungan akan mengalami degradasi ukuran secara perlahan dalam waktu yang lama. Hal ini diperkuat oleh Song *et al.* (2017) yang menemukan bahwa memerlukan waktu 4,2 tahun untuk memperoleh fragmentasi mikroplastik berukuran 1000 μm menjadi 100 μm dengan jumlah partikel yang meningkat signifikan. Dominasi fragmen dan rentang ukuran tersebut mengindikasikan bahwa mikroplastik yang teremisi merupakan limbah plastik masyarakat setempat yang telah mengalami fragmentasi di perairan pada kurun waktu yang cukup lama. Meski demikian, hal ini memerlukan pengujian lebih jauh pada partikel mikroplastik yang diperoleh. Dominasi fragmen ini juga ditemukan di Muara sungai Jenebarang-Indonesia (Wicaksono *et al.* 2020) dan 29 sungai di Jepang (Kataoka *et al.* 2019).

Kelimpahan mikroplastik pada penelitian ini berbeda dengan hasil penelitian di perairan muara sungai lainnya (Tabel 1). Mikroplastik pada sembilan muara sungai di Teluk Jakarta lebih tinggi dibandingkan beberapa muara sungai lain, seperti Muara sungai Yangtze-China, Jenebarang dan Muara sungai Tallo-Indonesia, Muara sungai Sado-Portugal (Wicaksono *et al.* 2020; Li *et al.* 2020; Rodrigues *et al.* 2020). Namun kelimpahan tersebut jauh lebih rendah dibanding mikroplastik di Muara sungai Sungai Kuning-China, Sungai Los Angeles-USA, Sungai Qiantang-China, Esutari Yondingxinhe-China, Sungai Pearl,Guangzhou-China (Moore *et al.* 2011; Lin *et al.* 2018; Wu *et al.* 2019; Han *et al.* 2020; Zhao *et al.* 2020).

Perbedaan ini terjadi karena adanya perbedaan faktor penduduk yang mendiami dan beraktifitas di sepanjang sungai. Selain itu, perbedaan teknik sampling yang dilakukan juga dapat mempengaruhi kelimpahan mikroplastik yang diperoleh. Teknik sampling menggunakan *discrete device*, seperti *Van Dorn water sampler*, *Niskin bottle*, *bucket*, atau *rosette*, akan menghasilkan kelimpahan partikel mikroplastik yang lebih banyak dibanding *non-discrete device* (*manta net*, pompa, atau *plankton net*). Hal ini karena pada teknik menggunakan *discrete device*, seluruh ukuran (dari terkecil hingga besar), jenis, dan bentuk mikroplastik, akan tertangkap dalam alat sampling. Berbeda dengan *non-discrete device* yang akan menyaring ukuran mikroplastik tertentu sesuai dengan batas ukuran filter yang digunakan. Pembuktian perbedaan kelimpahan mikroplastik pada teknik sampling yang berbeda ini telah dikonfirmasi dalam penelitian sebelumnya (Barrows *et al.* 2017; McEachern *et al.* 2019; Cutroneo *et al.* 2020; Suteja *et al.* 2021).

3.5.1 Mikroplastik di Permukaan Sedimen

Kelimpahan mikroplastik di sedimen umumnya lebih tinggi dibandingkan yang ditemukan di air (Ding *et al.* 2019). Hal ini ditegaskan oleh Jorissen (2014) dan Amin *et al.* (2021) yang mengemukakan bahwa densitas mikroplastik yang umumnya lebih berat dibandingkan air mengakibatkan mikroplastik jatuh ke sedimen akibat gaya gravitasi. Densitas mikroplastik yang lebih ringan dibandingkan air pun dapat mengalami pengendapan jika mengalami proses biofouling, agregasi dengan material biogenik ataupun sedimen tersuspensi, atau terdepurasi oleh organisme (Fazey dan Ryan 2016; Michels *et al.* 2018; Li *et al.* 2019). Keterkaitan kelimpahan mikroplastik di sedimen dan air juga diperkuat secara statistik, yaitu terdapat korelasi antara keduanya ($r = 0,82$). Secara umum, semakin banyak mikroplastik di perairan maka semakin tinggi pula mikroplastik yang ditemukan di sedimen. Hal ini sejalan dengan penelitian Scherer *et al.* (2020) di Sungai Elbe-Republik Czechs.

Sungai Dadap-Tangerang memiliki kelimpahan mikroplastik tertinggi. Aliran sungai yang cenderung tenang (0,96 cm/s) dengan jumlah mikroplastik (469 partikel) di perairan yang tinggi juga mengakibatkan banyak partikel mikroplastik yang jatuh ke sedimen. Hal ini sesuai dengan Ding *et al.* (2019) dan Huang *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa penurunan debit air akan mendukung terjadinya pengendapan partikel mikroplastik. Vianello *et al.* (2013) mencatat bahwa perairan dengan arus yang kencang (>100 cm/s) akan

Tabel 1 Kelimpahan mikroplastik (partikel/m³) pada contoh air alat sampling yang digunakan dan ukuran di lokasi penelitian lain

Lokasi	Jenis Sampel	Metode Sampling		Kelimpahan (partikel/m ³)	Sumber
		Alat sampling	Ukuran (µm)		
Muara sungai Yangtze, China	Air permukaan	<i>Metal cylinder</i>	300	9.8 ± 12.22	(Li <i>et al.</i> 2020)
Muara sungai Sungai Jenebarang, Indonesia	Air permukaan	<i>Neuston net</i>	330	1.83 ± 0.17	(Wicaksono <i>et al.</i> 2020)
Muara sungai Sungai Tallo, Indonesia	Air permukaan	<i>Neuston net</i>	330	1.78 ± 0.25	(Wicaksono <i>et al.</i> 2021)
Muara sungai Sado, Portugal	Air permukaan	<i>Neuston trawl</i>	335	0.45 ± 0.52	(Rodrigues <i>et al.</i> 2020)
Muara sungai Sungai Kuning, China	Air permukaan	<i>Stainless steel bucket</i>	-	5.42 x 10 ⁵	(Han <i>et al.</i> 2020)
Sungai Loas Angeles, USA	Air permukaan	<i>Handnets</i> <i>Manta trawl</i> <i>Streambed</i> <i>Rectangular net</i>	500-800 333 333 333	12,932 3	(Moore <i>et al.</i> 2011)
Sungai Sungai Qiantang, China	Air permukaan	<i>Stainless steel bucket</i>	-	1183 ± 269	(Zhao <i>et al.</i> 2020)
Muara sungai Yondingxinhe, China	Air permukaan	<i>Teflon pump</i>	48	788.0 ± 464.2	(Wu <i>et al.</i> 2019)
Sungai Pearl, China	Air permukaan	<i>5L water sampler</i>	200	2724	(Lin <i>et al.</i> 2018)

memiliki kelimpahan mikroplastik yang lebih rendah dibandingkan perairan berarus lemah. Kelimpahan mikroplastik terendah ditemukan di Sungai Angke.

Rendahnya mikroplastik pada sedimen di stasiun ini, diduga akibat adanya kegiatan pengerukan yang dilakukan beberapa waktu sebelum pengambilan sampel. Pengerukan merupakan salah satu aktivitas yang sangat mempengaruhi keberadaan mikroplastik di sedimen. Berenjar *et al.* (2019) menjelaskan bahwa pengerukan yang dilakukan akan mengubah kondisi sedimen secara signifikan dan menyebabkan terjadinya resuspensi partikel mikroplastik ke kolom air. Selain itu, sebagian besar partikel mikroplastik terdeposisi pada sedimen muda yang terletak di bagian permukaan (Willis *et al.* 2017), sehingga pengerukan akan sangat berpotensi menghilangkan atau meresuspensi partikel mikroplastik. Pengaruh

pengerukan terhadap mikroplastik ini juga ditemukan di pantai dalam Rio de Janeiro-Brazil (Baptista Neto *et al.* 2019).

Kelimpahan mikroplastik (602-3108,97 partikel/kg berat kering sedimen) di sembilan muara sungai ini lebih tinggi dibandingkan kelimpahan di dalam Teluk Jakarta. Takarina *et al.* (2022) memperoleh 152,4-188,9 partikel mikroplastik/kg berat kering sedimen di duabelas titik stasiun di dalam Teluk Jakarta. Hal ini disebabkan semakin menjauhi sumber pencemar, maka kelimpahan mikroplastik juga akan semakin berkurang. Browne (2015) menyebutkan bahwa letak perairan yang sangat dekat dengan aktifitas penduduk akan memiliki mikroplastik lebih tinggi. Sungai yang menjadi sumber pencemaran utama plastik ke laut (Lebreton *et al.*, 2017), mengakibatkan mikroplastik akan menurun kelimpahannya semakin ke arah laut dan sebaliknya ke arah sungai (Falahudin *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020). Kelimpahan mikroplastik pada penelitian ini juga lebih tinggi dibandingkan daerah lain, yaitu Muara Jagir-Surabaya (92-590 partikel/kg berat kering) (Firdaus *et al.* 2020), Muara sungai Yangtze-China (10-60 partikel/kg berat kering) (Li *et al.* 2020), Muara sungai Changjiang-China (121 ± 9 partikel/berat kering) (Peng *et al.* 2017), Muara sungai Warnow-Jerman (46-100 partikel/kg berat kering) (Enders *et al.* 2019). Namun kelimpahan di sembilan muara sungai Teluk Jakarta ini lebih rendah dibandingkan daerah pantai Tambak Lorok-Semarang (8.000-49.000 partikel/kg berat kering) (Khoironi), Sungai Milwaukee-USA (32,9-6229 partikel/berat kering) (Lenaker *et al.* 2019), dan Guangdong-China (433,3-4166,3 partikel/kg berat kering) (Li *et al.* 2021).

Bentuk mikroplastik didominasi oleh fragmen (52,75%) dan ukuran terbanyak adalah 300-500 μm (47,92%). Dominasi bentuk dan ukuran pada sedimen ini sejalan dengan karakteristik mikroplastik pada perairan (fragmen 39,85%; ukuran 300-500 μm 41,15%). Hal ini mengindikasikan adanya kemungkinan mikroplastik di sedimen merupakan mikroplastik yang terendapkan dari perairan. Fragmen merupakan mikroplastik sekunder yang berasal dari pecahan makroplastik akibat proses fisik (tumbukan) dan cuaca (Barnes *et al.* 2009). Selain itu dominasi fragmen juga mengindikasikan bahwa sumber pencemar mikroplastik adalah aktifitas penduduk (Cordova dan Nurhati 2019). Dominasi fragmen ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, yaitu di sedimen Yanthze Estuary-China, Sungai Tame dan Sungai Thames-UK, Sungai Elbe, Mosel, Neckar, dan Rhine-Jerman, Sungai Tallo-Indonesia (Wagner *et al.* 2014; Horton *et al.* 2017; Tibbetts *et al.* 2018; Li *et al.* 2020; Wicaksono *et al.* 2021). Namun pada lokasi lain, dominasi bentuk mikroplastik yang ditemukan dapat berbeda. Mikroplastik di sedimen Sungai Elbe-Jerman didominasi oleh granula (Scherer *et al.* 2020). Dominasi fiber ditemukan di sedimen Sungai Wei, Sungai Fengsan dan Yangtze Estuary-China (Ding *et al.* 2019; Tien *et al.* 2020; Li *et al.* 2020). Perbedaan dominasi bentuk mikroplastik ini sangat dipengaruhi oleh aktifitas penduduk. Bentuk granula sebagai mikroplastik primer umumnya banyak ditemukan pada produk kesehatan pribadi, seperti sabun dan produk kecantikan (Tsang *et al.*, 2017), sedangkan fiber banyak dihasilkan pada aktifitas laundry maupun tekstil (Hernandez *et al.* 2017; Abidli *et al.* 2018). Polyethylene (PE) merupakan polimer yang paling banyak ditemukan (60%). Chen *et al.* (2020) mengemukakan bahwa PE merupakan jenis polimer yang paling banyak ditemukan, baik di negara maju (19-48%) dan negara berkembang (19-63,7%).

Hal ini karena PE merupakan polimer yang cakupan penggunaannya sangat luas dalam kehidupan sehari-hari.

3.6 Simpulan

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa sembilan muara sungai yang masuk ke Teluk Jakarta memberikan kontribusi pencemaran mikroplastik di Teluk Jakarta. Mikroplastik tersebut tidak hanya ditemukan di permukaan perairan, namun juga mengendap di permukaan sedimen yang berpotensi mengalami resuspensi ke kolom air. Kelimpahan mikroplastik di sedimen mencapai 20,5-62,1 kali lebih tinggi dibandingkan di perairan. Tujuh muara sungai yang berada di daerah administrasi Jakarta Utara memiliki kelimpahan tertinggi, baik untuk mikroplastik di sedimen maupun perairan. Daerah administrasi Bekasi memiliki kelimpahan yang terendah. Karakteristik mikroplastik di sedimen sejalan dengan mikroplastik di perairan, yaitu didominasi oleh bentuk fragmen, ukuran partikel 300-500 μm , dengan jenis polimer PE. Keberadaan mikroplastik di perairan dan sedimen ini membuktikan bahwa muara sungai yang mengalir ke Teluk Jakarta sangat berpotensi untuk memberikan sumbangan mikroplastik ke dalam teluk.

IV EMISI MIKROPLASTIK DI TELUK JAKARTA

4.1 Pendahuluan

Keberadaan mikroplastik di lingkungan telah banyak dikonfirmasi. Tamminga *et al.* (2022) menyatakan bahwa mikroplastik tidak hanya ditemukan di perairan, baik di air tawar maupun laut, namun juga di sedimen, lapisan es, organisme, dan bahkan di udara. Hal ini mengakibatkan fokus penelitian mikroplastik semakin mendalam, terutama pada resiko keberadaan mikroplastik. Guna memperoleh prediksi resiko tersebut, fluks mikroplastik di alam diperlukan. Bai *et al.* (2022) menjelaskan fluks ini nantinya bermanfaat dalam pengaturan dan manajemen pengelolaan plastik yang efektif. Berbagai faktor lingkungan diduga mempengaruhi fluks mikroplastik di suatu perairan, diantaranya adalah aktifitas penduduk, penggunaan lahan, presipitasi, debit air, masukkan dari pasang surut (Chubarenko *et al.* 2016; Li *et al.* 2016; Rios-Mendoza *et al.* 2021).

Boucher dan Friot (2017) menyebutkan bahwa 63,1% mikroplastik yang berada di lingkungan berasal dari tekstil sintetis (termasuk kegiatan pencucian baju), sedangkan sisanya berasal dari gesekan ban (28,3%), dan debu perkotaan (24,2%). Ketiga kegiatan tersebut menghasilkan mikroplastik sekunder yang mendominasi di perairan. Limbah tekstil yang menjadi sumber pertama mikroplastik, akan terbuang ke sungai sebelum akhirnya terbawa hingga ke perairan laut. Jalur transportasi mikroplastik ini telah ditegaskan pada penelitian-penelitian sebelumnya (Liro *et al.* 2020; Emmerik *et al.* 2022; Yuan *et al.* 2022).

Teluk Jakarta merupakan perairan yang menerima masukkan air dari sungai-sungai di sekitarnya. Hal ini mengakibatkan Teluk Jakarta berpotensi besar terkontaminasi mikroplastik. Keberadaan mikroplastik di atmosfer sekitar Teluk Jakarta juga mampu menambah kontaminasi mikroplastik di perairan Teluk. Sedangkan keberadaan mikroplastik di perairan dan sedimen pada Teluk Jakarta telah dibuktikan pada penelitian ini dan penelitian sebelumnya. Hal ini membuktikan bahwa sumber mikroplastik di Teluk Jakarta berasal dari tiga kompartemen lingkungan, yaitu atmosfer, aliran air sungai, dan sedimen.

Penelitian mengenai mikroplastik di Teluk Jakarta, sejauh ini masih melakukan analisis sebatas kelimpahan dan karakteristik mikroplastik. Hal ini mengakibatkan kajian dan informasi mikroplastik di Teluk Jakarta belum terurai secara lengkap. Besaran fluks dan kontribusi masing-masing kompartemen lingkungan Teluk Jakarta belum pernah dilakukan. Padahal informasi ini sangat penting dalam upaya monitoring dan menentukan langkah pengurangan tingkat pencemaran di Teluk Jakarta.

4.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi emisi dan fluks, serta waktu tinggal (*residence time*) mikroplastik di Teluk Jakarta yang berasal dari udara (mikroplastik atmosferik), permukaan air, dan sedimen sungai.

4.3 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan data yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya, meliputi :

- a. Data kelimpahan mikroplastik atmosferik di Teluk Jakarta
 - b. Data kelimpahan mikroplastik permukaan air dari sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta
 - c. Data kelimpahan mikroplastik permukaan sedimen dari sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta
- Analisis emisi dan neraca mikroplastik dilakukan dengan memperhitungkan data pendukung, meliputi:
- a. Data curah hujan harian pada rentang waktu Maret 2018-Februari 2019, yang diperoleh dari data Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) secara online pada <http://dataonline.bmkg.go.id/home>. Data yang digunakan merupakan rata-rata data hasil pengukuran pada stasiun Tanjung Priok dan Kemayoran (Jakarta), Citeko (Kabupaten Bogor), Kota Bogor, Tangerang dan Soekarno-Hatta (Tangerang), sebagai stasiun BMKG yang berkaitan dengan lokasi penelitian.
 - b. Data kecepatan angin harian pada rentang waktu Maret 2018-Februari 2019, yang diperoleh dari data stasiun Tanjung Priok dan Kemayoran (Jakarta), Citeko (Kabupaten Bogor), Kota Bogor, Tangerang dan Soekarno-Hatta (Tangerang), Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) secara online pada <http://dataonline.bmkg.go.id/home>.
 - c. Data debit air pada sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta yang diperoleh dari Cordova dan Nurhati (2019)
 - d. Data laju sedimentasi Teluk Jakarta pada bulan Agustus yang diperoleh dari hasil penelitian
 - e. Data jumlah penduduk DKI Jakarta berdasarkan wilayah DAS yang menjadi lokasi penelitian
 - f. Data sebaran salinitas Teluk Jakarta pada musim timur 2020 yang diperoleh dari Dinas Lingkungan Hidup Jakarta (2021)
 - g. Data laju evaporasi perairan Teluk Jakarta pada bulan Agustus 2020 yang diperoleh dari Copernicus (<https://climate.copernicus.eu/>)
 - h. Data kedalaman dan luas Teluk Jakarta yang diperoleh dari peta batimetri Deshidros (2012) dan Google Earth (2022)

Emisi mikroplastik dalam penelitian ini merupakan jumlah partikel mikroplastik yang masuk ke dalam Teluk Jakarta per satuan waktu. Emisi mikroplastik ini dihitung dengan memperhatikan luas daerah perairan muara di Teluk Jakarta. Penghitungan luas daerah muara dilakukan menggunakan perangkat lunak Google Earth dengan batas sedimentasi di luar muara sebagai batas domain. Hal ini dilakukan mengingat muara sungai sebagai merupakan daerah utama sebagai wilayah akumulasi sedimen di garis pantai (Schubel 1982). Emisi masing-masing mikroplastik diperoleh dengan persamaan:

- a. Emisi mikroplastik atmosferik:

$$E_{MA} = \frac{N \times L_{MT}}{t}$$

Keterangan : E_{MA} = emisi mikroplastik atmosferik (partikel/hari) ; N = rata-rata bulanan partikel mikroplastik atmosferik yang diperoleh per luasan *raingauge* (partikel/m²); L_{MT} = luas perairan muara di Teluk Jakarta (m²); t = waktu sampling (hari)

- b. Emisi mikroplastik permukaan air:

$$E_{MP} = N \times Q \times 86400$$

Keterangan : E_{MP} = emisi mikroplastik permukaan air (partikel/hari); N = kelimpahan mikroplastik (partikel/m³); Q = debit sungai (m³/s); 86400 = konversi waktu

- c. Emisi mikroplastik permukaan sedimen:

$$E_{MS} = N \times \text{laju sedimentasi} \times L_{MT}$$

Keterangan : E_{MS} = emisi mikroplastik permukaan sedimen (partikel/hari); N = kelimpahan mikroplastik (partikel/kg berat kering sedimen); *laju sedimentasi* (kg/m²/hari); L_{MT} = luas perairan muara di Teluk Jakarta (m²)

Fluks mikroplastik di Teluk Jakarta dihitung dengan menggunakan hasil perhitungan emisi mikroplastik masing-masing kompartemen, dengan pertimbangan:

- Tidak menerima masukan massa air dari perairan sekitar Teluk Jakarta
- Fluks yang diperhitungkan merupakan estimasi fluks yang terjadi pada bulan Agustus sebagai puncak musim timur
- Emisi mikroplastik yang diperoleh dari atmosfer dan permukaan air merupakan inputan mikroplastik di perairan Teluk Jakarta
- Emisi mikroplastik yang diperoleh dari permukaan sedimen sebagai output mikroplastik di Teluk Jakarta
- Fluks diperoleh dengan persamaan:

$$Fluks_{MPs} = \sum \text{input} - \sum \text{output}$$

Selain emisi dan fluks mikroplastik, pada penelitian ini juga dilakukan penghitungan waktu tinggal (*residence time*) partikel mikroplastik di perairan Teluk Jakarta dan waktu tinggal partikel alami perairan Teluk Jakarta. Waktu tinggal ini berfungsi untuk mengetahui berapa lama partikel mikroplastik berada di perairan Teluk Jakarta. Penghitungan waktu tinggal dilakukan dengan persamaan:

$$RT_{MPs} = \frac{V}{a}$$

Keterangan : RT_{MPs} : waktu tinggal partikel mikroplastik di Teluk Jakarta (hari); V = volume badan air sekitar muara Teluk Jakarta (m³); a = kapasitas asimilasi partikel mikroplastik (m³/hari).

Volume badan air Teluk Jakarta diperoleh dari :

$$V = L_{MT} \times D_{avm}$$

Keterangan : V = volume badan air Teluk Jakarta (m^3); L_{MT} = luas perairan daerah muara di Teluk Jakarta (m^2); D_{avm} = kedalaman rata-rata daerah muara di Teluk Jakarta (m)

Nilai a diperoleh melalui:

$$a = \frac{W}{C}$$

Keterangan : a : kapasitas asimilasi (m^3 /hari); W = total emisi mikroplastik (partikel/hari); C = rata-rata konsentrasi mikroplastik di badan air (partikel/ m^3)

Waktu tinggal partikel secara alami perairan Teluk Jakarta diperoleh dengan menggunakan kisaran salinitas Teluk Jakarta sebagai pendekatannya. Persamaan yang digunakan adalah (Mudge *et al.* 2008; Hosseini *et al.* 2016):

$$RT = \frac{S - S_i}{S_{av} \times E_{av} / D_{av}}$$

Keterangan: RT = waktu tinggal alami Teluk Jakarta (hari); S = salinitas di luar Teluk Jakarta (PSU); S_i = salinitasi di dalam Teluk Jakarta (PSU); S_{av} = salinitas rata-rata Teluk Jakarta (PSU); E_{av} = laju evaporasi rata-rata Teluk Jakarta pada bulan Agustus 2020 (m/hari); D_{av} = kedalaman rata-rata Teluk Jakarta (m)

Nilai data pendukung yang digunakan pada penghitungan di atas ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Nilai data pendukung analisis neraca dan *residence time*

No	Data pendukung	Sumber
1	Luas sekitar muara Teluk Jakarta (L_{TM}) = 92,58 km^2	Google Earth (2022)
2	Kedalaman rata-rata sekitar muara Teluk Jakarta (D_{av}) = 5 m	Deshidros (2012)
3	Laju sedimentasi = $2,96 \times 10^{-5}$ $kg/m^2/hari$	Hasil penelitian
4	Salinitas luar Teluk Jakarta (S) = 33,05 PSU	Dinas Lingkungan Hidup Jakarta (2021)
5	Salinitas dalam Teluk Jakarta (S_i) = 32,95 PSU	Dinas Lingkungan Hidup Jakarta (2021)
6	Salinitas rata-rata Teluk Jakarta (S_{av}) = 32,95 PSU	Dinas Lingkungan Hidup Jakarta (2021)
7	Laju evaporasi rata-rata bulan Agustus 2020 = 0,008 m/hari	Copernicus

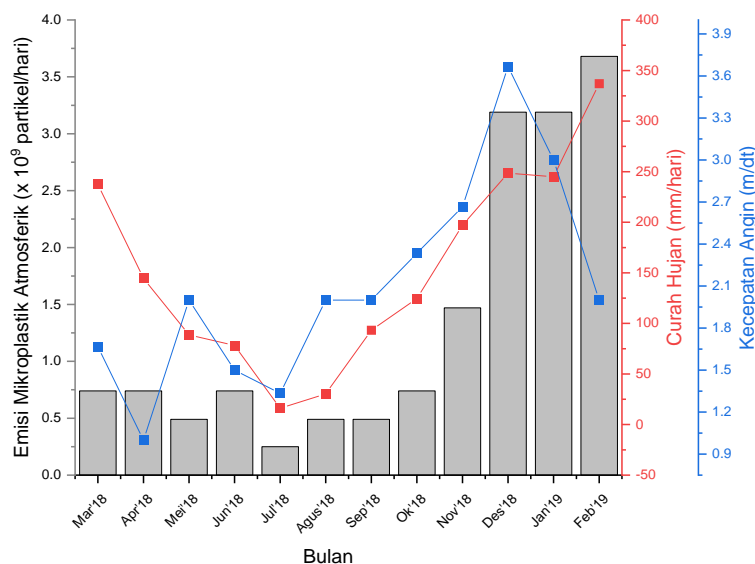
Nilai emisi masing-masing mikroplastik disajikan dalam bentuk grafik, sedangkan fluks mikroplastik di Teluk Jakarta disajikan dalam bentuk skema. Selain itu, uji statistik juga dilakukan. ANOVA Kruskal-Wallis untuk menyatakan perbedaan emisi pada setiap stasiun.

4.4 Hasil

4.4.1 Emisi Mikroplastik Atmosferik di Teluk Jakarta

Mikroplastik yang terdapat di udara di sekitar kita akan mengalami deposisi, baik karena gaya gravitasi maupun dipercepat dengan bantuan tetesan hujan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik ditemukan pada udara di sekitar Teluk Jakarta. Hal ini mengindikasikan bahwa mikroplastik atmosferik mengalami deposisi (Gambar 16). Emisi mikroplastik atmosferik tertinggi terjadi pada bulan Februari 2019 ($3,68 \times 10^9$ partikel/hari), dan terendah pada Juli 2018 ($0,25 \times 10^9$ partikel/hari). Rata-rata emisi setiap bulan adalah $1,35 \times 10^9 \pm 1,25 \times 10^9$ partikel/hari. Emisi mikroplastik atmosferik di lokasi penelitian secara statistik tidak menunjukkan adanya perbedaan signifikan setiap bulannya ($p > 0,05$).

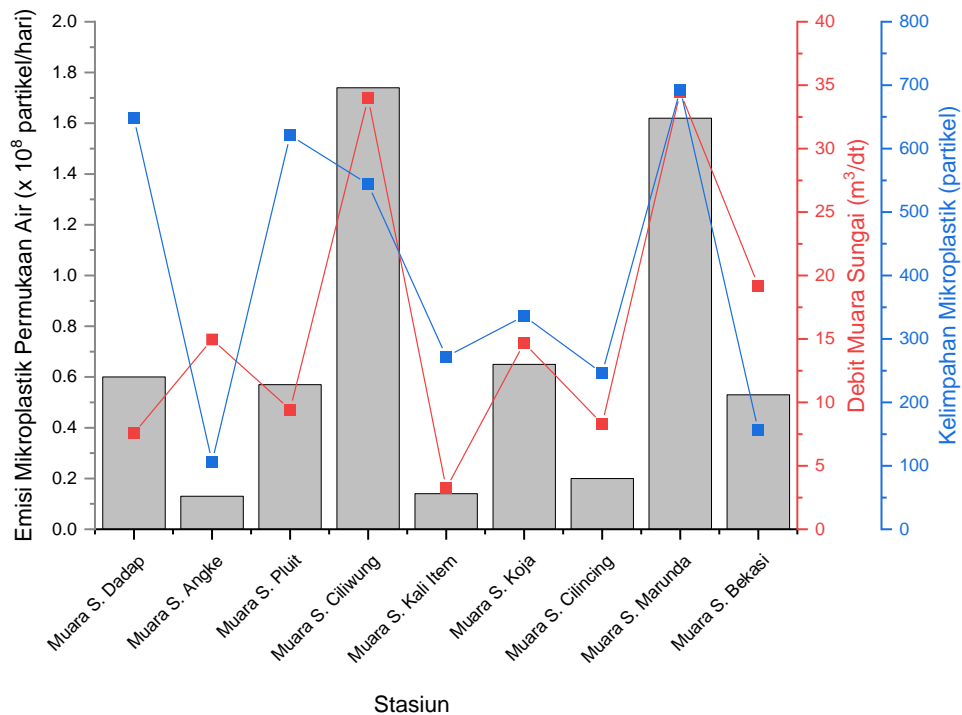
Emisi mikroplastik atmosferik yang terjadi dipengaruhi oleh kondisi meteorologi, yaitu curah hujan dan kecepatan angin. Uji statistik memperoleh bahwa kedua faktor meteorologi tersebut memiliki korelasi positif dengan nilai $r = 0,85$ untuk curah hujan, dan $r = 0,65$ untuk kecepatan angin. Curah hujan selama waktu penelitian berkisar antara 16,10-337,08 mm/hari. As-Syakur *et al.* (2011) menjelaskan bahwa musim di Indonesia terbagi menjadi 2, yaitu musim hujan pada bulan November-April, dan musim kemarau pada bulan Mei-Oktober. Total curah hujan yang tinggi (6838 mm/hari) terjadi pada musim hujan, yaitu bulan Maret-April 2018 dan November 2018-Februari 2019. Sedangkan musim kemarau (Mei-Oktober 2018) memiliki total curah hujan yang lebih rendah (1163 mm/hari). Kecepatan angin selama periode penelitian berkisar antara 1-3,67 m/s, dengan rata-rata $2,10 \pm 0,74$ m/s. Berdasarkan skala Beaufort, kecepatan angin pada lokasi penelitian termasuk pada kriteria tenang (skala 1) hingga sedikit angin bertiup (skala 2).



Gambar 16 Emisi mikroplastik atmosferik (grafik batang), curah hujan (grafik garis merah), dan kecepatan angin (grafik garis biru) selama dua belas bulan di sekitar Teluk Jakarta

4.4.2 Emisi Mikroplastik Permukaan Air Sembilan Muara Sungai di Teluk Jakarta

Permukaan air sungai-sungai yang berada di sekitar Teluk Jakarta terbukti memiliki kandungan mikroplastik. Aliran sungai yang merupakan salah satu jalur distribusi pencemaran pada akhirnya akan membawa mikroplastik masuk ke dalam Teluk Jakarta. Hasil penelitian memperoleh mikroplastik di sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta berkisar antara 89-616 partikel, dengan rata-rata $349,86 \pm 186,49$ partikel. Partikel terbanyak diperoleh di Sungai Marunda, dan terendah di Sungai Angke. Emisi mikroplastik dari sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta berkisar antara $0,13 \times 10^8 - 1,74 \times 10^8$ partikel/hari, dengan rata-rata $0,69 \times 10^8 \pm 0,57 \times 10^8$ partikel/hari (Gambar 17).



Gambar 17 Emisi mikroplastik permukaan air (grafik batang), debit air (grafik garis merah), dan kelimpahan mikroplastik (grafik garis biru) dari sembilan muara sungai Teluk Jakarta pada bulan Agustus 2020

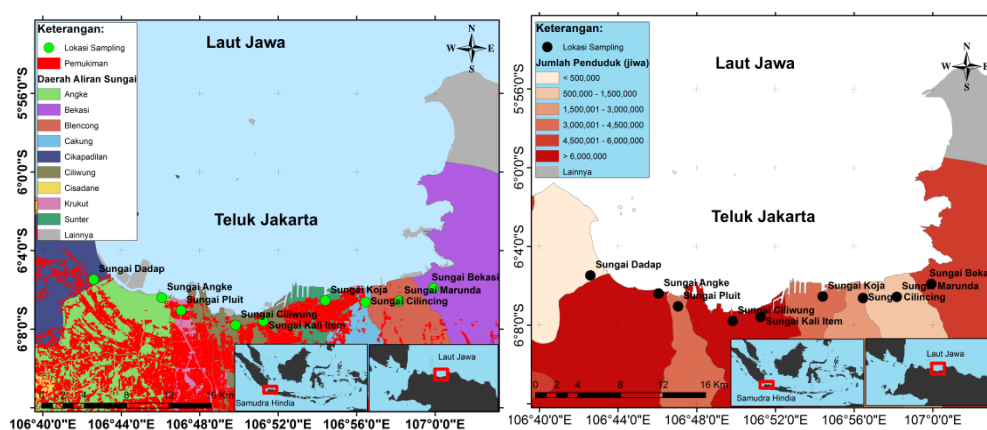
Emisi tertinggi berasal dari Sungai Ciliwung dan terendah dari Sungai Angke. Letak sembilan muara sungai terbagi ke dalam tiga daerah administrasi, yaitu Tangerang (Sungai Dadap), Jakarta Utara (Sungai Angke, Pluit, Ciliwung, Kali Item, Kojja, Cilincing dan Marunda), dan Bekasi (Sungai Bekasi). Berdasarkan daerah adminitrasinya, Jakarta Utara memberikan emisi mikroplastik tertinggi untuk Teluk Jakarta ($5,66 \times 10^8$ partikel/hari) dibandingkan Tangerang ($0,6 \times 10^8$ partikel/hari) dan Bekasi ($0,53 \times 10^8$ partikel/hari). Meski demikian, secara statistik emisi mikroplastik di perairan pada sembilan muara sungai maupun berdasarkan daerah adminitrasinya tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p > 0,05$).

Distribusi mikroplastik di perairan, salah satunya dipengaruhi oleh debit air. Debit air pada sembilan muara sungai berkisar antara 9,44-34,44 m³/s (Tabel 3). Debit air tertinggi adalah di Sungai Marunda, dan terendah di Sungai Kali Item. Keterkaitan antara debit air dan emisi mikroplastik yang dihasilkan diperkuat secara statistik, yaitu adanya korelasi positif yang kuat antara keduanya ($r = 0,97$). Emisi mikroplastik juga dipengaruhi oleh jumlah partikel mikroplastik yang terdapat di perairan. Gambar 17 menunjukkan bahwa secara umum, makin banyak partikel mikroplastik pada perairan, menghasilkan emisi yang juga tinggi. Secara statistik, hal ini diperkuat dengan adanya korelasi positif kuat dengan nilai $r = 0,67$.

Emisi mikroplastik yang dihasilkan oleh sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta tidak dipengaruhi oleh jumlah penduduk ($r = 0,26$). Muara sungai yang menjadi lokasi penelitian berada di Daerah Aliran Sungai (DAS) yang memiliki jumlah penduduk berbeda-beda (Gambar 18). Jumlah penduduk tertinggi (6,9 juta individu) berada pada DAS Ciliwung yang memiliki dua muara sungai (Sungai Ciliwung dan Sungai Kali Item). DAS Cikapadlan yang menjadi daerah muara Sungai Dadap, memiliki penduduk dengan jumlah terendah (429 ribu individu).

Tabel 3 Debit air sembilan muara sungai Teluk Jakarta pada Agustus 2020

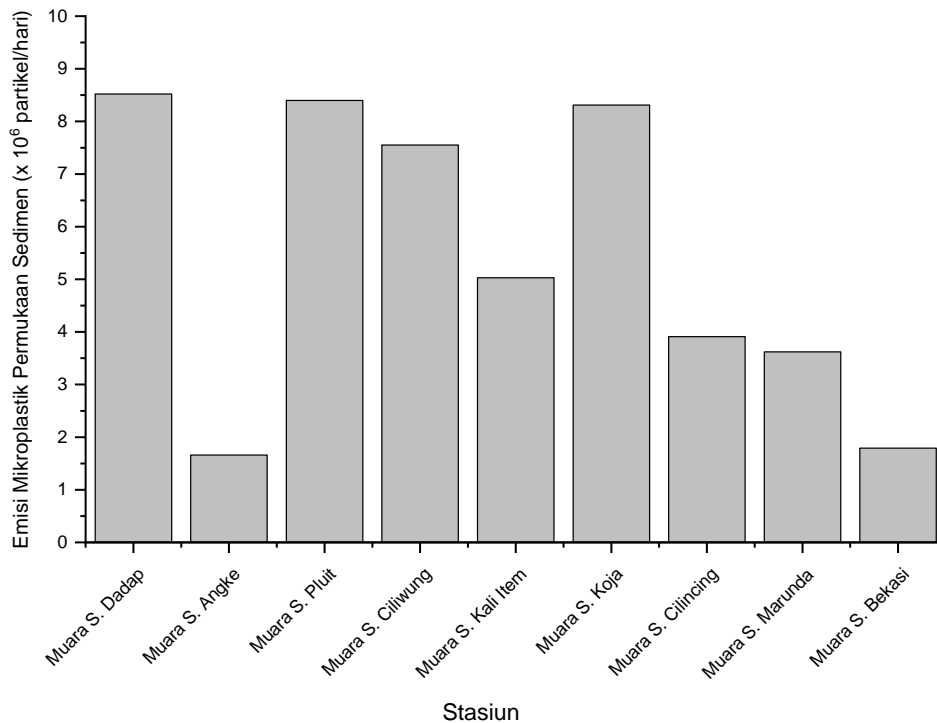
Stasiun	Muara	Debit air (m ³ /s)
1	Sungai Dadap	7.56
2	Sungai Angke	14.97
3	Sungai Pluit	9.44
4	Sungai Ciliwung	33.97
5	Sungai Kali Item	3.23
6	Sungai Koja	14.68
7	Sungai Cilincing	8.31
8	Sungai Marunda	34.44
9	Sungai Bekasi	19.20



Gambar 18 DAS muara sungai di sekitar Teluk Jakarta (kiri) dan jumlah penduduk (individu) di DAS muara sungai Teluk Jakarta (kanan)

4.4.3 Emisi Mikroplastik Permukaan Sedimen Sembilan Muara Sungai di Teluk Jakarta

Pada sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta, diperoleh sejumlah partikel mikroplastik di permukaan sedimen. Letak mikroplastik yang berada di lapisan paling atas sedimen, memungkinkan mikroplastik terlepas dan kembali ke kolom perairan. Pada akhirnya mikroplastik tersebut akan menjadi salah satu inputan mikroplastik di Teluk Jakarta. Hasil analisis memperoleh estimasi emisi mikroplastik di sembilan muara sungai berkisar antara $1,66 \times 10^6 - 8,52 \times 10^6$ partikel/hari, dengan rata-rata $5,42 \times 10^6 \pm 2,84 \times 10^6$ partikel/hari (Gambar 19). Anova Kruskal-Wallis menunjukkan bahwa emisi sedimen pada tiap stasiun tidak berbeda secara signifikan ($p > 0,05$). Laju sedimentasi yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil pemasangan sedimen trap selama satu bulan pada sisi barat Teluk Jakarta, yaitu $2,96 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{hari}$.



Gambar 19 Emisi mikroplastik pada sedimen (partikel/hari) di sembilan muara sungai Teluk Jakarta pada Agustus 2020

4.4.4 Fluks Mikroplastik Teluk Jakarta

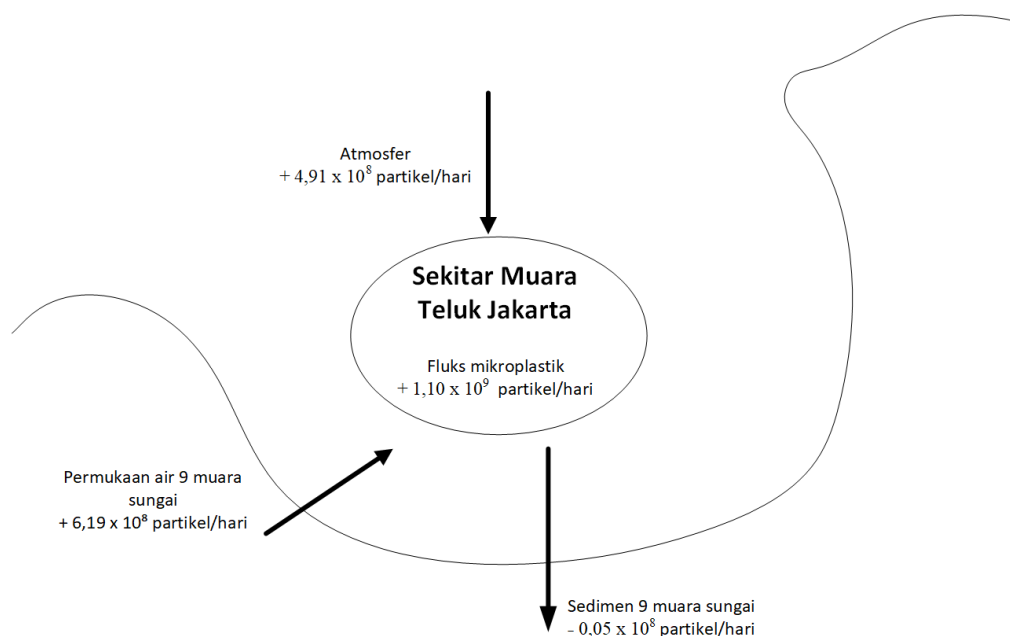
Emisi mikroplastik pada Agustus 2020 masing-masing kompartemen ditunjukkan pada

Tabel 4. Mikroplastik di Teluk Jakarta berasal dari atmosfer dan aliran permukaan air sembilan muara sungai, dengan kontribusi terbesar dari muara sungai sebesar 55,76%. Mikroplastik yang berada di sedimen menunjukkan akumulasi mikroplastik pada sedimen Teluk Jakarta. Akumulasi ini berpotensi untuk mengalami resuspensi bila terjadi pengadukan atau pun perubahan debit air yang signifikan.

Tabel 4 Emisi mikroplastik Teluk Jakarta pada Agustus 2020

No	Sumber mikroplastik	Emisi (partikel/hari)
1	Atmosfer	+ 4,91 x 10 ⁸
2	Permukaan air sembilan muara sungai	+ 6,19 x 10 ⁸
3	Permukaan sedimen	- 0,05 x 10 ⁸

Fluks mikroplastik Teluk Jakarta dapat dilihat pada skema (Gambar 20). Mikroplastik yang berasal dari atmosfer dan sungai merupakan inputan terhadap Teluk Jakarta, sedangkan mikroplastik yang berada di sedimen merupakan salah satu output mikroplastik. Hal ini karena mikroplastik yang berada di sedimen menunjukkan terjadi pengurangan kelimpahan mikroplastik di perairan Teluk Jakarta. Perhitungan fluks mikroplastik memperoleh angka sebesar + 1,10 x 10⁹ partikel/hari.



Gambar 20 Fluks mikroplastik (partikel/hari) di perairan sekitar muara sungai Teluk Jakarta pada Agustus 2020. Mikroplastik di atmosfer dan sungai berperan sebagai inputan, sedangkan yang berada di sedimen berperan sebagai output. Selisih antar inputan dan output merupakan mikroplastik yang tertinggal di perairan Teluk Jakarta.

4.4.5 Waktu Tinggal Mikroplastik dan Perairan Teluk Jakarta

Waktu tinggal mikroplastik menunjukkan waktu yang digunakan partikel mikroplastik untuk tersimpan pada suatu badan air. Waktu tinggal diperoleh dengan memperhitungkan kapasitas asimilasi (daya dukung) perairan dan rata-rata konsentrasi mikroplastik. Kapasitas asimilasi perairan di sekitar muara Teluk Jakarta terhadap partikel mikroplastik adalah sebesar 2,23 x 10⁷ m³/hari. Hal ini

berarti, wilayah perairan sekitar muara Teluk Jakarta mampu menampung mikroplastik sebesar $2,23 \times 10^7$ m³ mikroplastik setiap harinya. Hasil perhitungan waktu tinggal menunjukkan bahwa mikroplastik pada perairan akan bertahan selama 21 hari, dengan kondisi perairan yang tidak mengalami pergantian massa air (*flushing*). Waktu tinggal mikroplastik ini lima kali lebih lama bila dibandingkan dengan kondisi Teluk Jakarta bila mengalami *flushing* dari perairan sekitarnya, yaitu selama empat hari.

4.5 Pembahasan

4.5.1 Emisi Mikroplastik Teluk Jakarta

Teluk Jakarta mengalami paparan mikroplastik secara kompleks, yaitu berasal dari udara, aliran air sungai yang masuk ke dalam teluk, dan mikroplastik pada permukaan sedimen yang berpotensi mengalami resuspensi. Mikroplastik atmosferik mengalami deposisi akibat adanya tetesan air hujan (deposisi basah) dan gaya gravitasi (deposisi kering). Kedua deposisi ini berkaitan dengan curah hujan dan kecepatan angin. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkonfirmasi pengaruh hujan dan es yang mempengaruhi deposisi mikroplastik atmosferik (Dris *et al.* 2016; Allen *et al.* 2019; Ganguly dan Ariya 2019). Mikroplastik atmosferik diduga menempel pada tetesan air hujan dan ikut terdeposisi. Hal ini menyebabkan semakin tinggi curah hujan yang terjadi, akan makin banyak pula mikroplastik yang jatuh. Data meteorologi menunjukkan bahwa total curah hujan pada musim hujan enam kali lebih tinggi dibandingkan musim kemarau. Kondisi ini mengakibatkan laju deposisi mikroplastik atmosferik pada musim hujan empat kali lebih banyak dibandingkan musim kemarau. Fakta ini mengindikasikan bahwa curah hujan akan mempengaruhi laju deposisi basah mikroplastik atmosferik. Hal ini diperkuat oleh Abbasi (2021) yang menyatakan bahwa hujan mampu mengurangi jumlah mikroplastik di atmosfer secara drastis. Deposisi basah yang terjadi pada mikroplastik atmosferik yang berlangsung selama lima jam setara dengan deposisi kering yang terjadi selama satu bulan (Abbasi dan Turner 2021).

Emisi mikroplastik atmosferik di Jakarta lebih rendah dibandingkan daerah urban lain, seperti Paris-Perancis (110 ± 96 partikel/m²/hari), Dongguan-China (36 ± 7 partikel/m²/hari), Hamburg-Jerman (275 partikel/m²/hari) dan London-UK (771 ± 167 partikel/m²/hari) (Dris *et al.* 2016; Cai *et al.* 2017; Klein dan Fischer 2019; Wright *et al.* 2020). Hal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan aktifitas penduduk, dan jarak sumber emisi. Pada penelitian ini, pengambilan sampel dilakukan di Ancol (bagian paling utara Jakarta) jumlah penduduk yang lebih sedikit (99 jiwa/km²) (BPS DKI Jakarta 2021) dan aktifitas penduduk terbanyak adalah wisata bahari. Sedangkan penelitian sebelumnya dilakukan di pusat kota dengan kepadatan dan aktifitas penduduk yang lebih bervariasi dan lebih tinggi. Paris memiliki kepadatan penduduk 7900 jiwa/km², China sebanyak 3373 jiwa/km², Jerman dengan rata-rata kepadatan penduduk 1487 jiwa/km², dan London 5701 jiwa/km² (Cai *et al.* 2017; Klein dan Fischer 2019; Office for National Statistics [ONS] 2021). Hal ini diduga mengakibatkan perbedaan jumlah emisi yang dihasilkan ke atmosfer. K. Liu, Wang, *et al.* (2019) menegaskan bahwa penurunan aktifitas penduduk akan berkaitan linier dengan penurunan mikroplastik atmosferik yang dihasilkan. Kepadatan dan aktifitas

penduduk merupakan salah satu sumber emisi mikroplastik atmosferik, seperti aktifitas lalu lintas, laundry, dan industri (Dris *et al.* 2016; Boucher dan Friot 2017; Dris *et al.* 2017; Prata 2018). Lebih jauh penelitian González-Pleiter *et al.* (2021) membuktikan bahwa kepadatan penduduk merupakan sumber penting dan signifikan untuk mikroplastik atmosferik, dan urutan kelimpahan mikroplastik di atmosfer adalah daerah rural < urban dengan kepadatan penduduk rendah < urban dengan kepadatan penduduk tinggi. Letak dan penggunaan kawasan Ancol yang dekat dengan pantai juga mengakibatkan emisi mikroplastik tidak sebanyak wilayah pusat kota. Hal yang sama juga diperoleh di Shanghai-China, dimana semakin mendekati garis pantai semakin sedikit deposisi mikroplastik atmosferik kibat adanya pengaruh udara laut dan menurunnya aktivitas penduduk (K. Liu, Wang, *et al.* 2019). Faktor emisi lokal (aktifitas penduduk, industri) merupakan salah satu penyebab perbedaan tingkat deposisi mikroplastik atmosferik pada setiap daerah (Wright *et al.* 2020; Y. Zhang *et al.* 2020).

Selain mendapat masukkan mikroplastik dari udara, Teluk Jakarta juga memperoleh inputan mikroplastik dari air sungai dan sedimen. Hasil penelitian membuktikan bahwa sungai-sungai yang berada di sekitar Teluk Jakarta memberikan kontribusi terhadap mikroplastik di Teluk Jakarta. Berdasarkan daerah administrasinya, emisi mikroplastik dari tujuh muara sungai di Jakarta Utara > Tangerang > Bekasi. Emisi mikroplastik ini sangat dipengaruhi oleh besaran debit air dan jumlah partikel mikroplastik pada masing-masing sungai. Keterkaitan pengaruh debit dan jumlah partikel juga diperoleh oleh Wagner *et al.* (2019) yang menjelaskan bahwa pengaruh debit air ditunjukkan pada emisi plastik di perairan perkotaan, namun tidak dengan perairan yang melewati pedesaan. Hal ini diduga karena limbah plastik di perkotaan lebih tinggi, sehingga konsentrasi plastik di perairan turut berpengaruh terhadap emisi yang dihasilkan.

Emisi mikroplastik yang diterima oleh Teluk Jakarta lebih kecil dibandingkan Laut Cina Selatan. Salah satu muara yang memberikan masukkan mikroplastik ke Laut Cina Selatan adalah Muara Changjiang, yaitu $4,38 \times 10^9$ – $5,48 \times 10^9$ partikel/hari (Zhao *et al.* 2019). Hal ini karena debit air Muara Changjiang 105 kali lebih besar dibanding kesembilan muara sungai yang masuk ke Teluk Jakarta. Pengaruh debit air terhadap emisi mikroplastik juga tampak pada mikroplastik yang dihasilkan pada musim yang berbeda. Penelitian ini dilakukan pada puncak musim kemarau (Agustus) yang memiliki debit air minimal akibat curah hujan yang rendah. Namun, hasil yang berbeda diperoleh pada saat musim hujan. Emisi mikroplastik yang dihasilkan masing-masing sungai akan lebih tinggi pada saat musim hujan, mengingat curah hujan yang juga akan lebih besar. Curah hujan secara langsung mempengaruhi debit air sungai, bahkan kedua variabel tersebut memiliki korelasi positif yang sangat tinggi ($r = 0,99$) (Sutrisno *et al.* 2020). Pada penelitian Manalu (2017), emisi mikroplastik pada puncak musim hujan (Februari) dari Sungai Pluit dan Sungai Cilwung adalah sebesar 6×10^9 partikel/hari dan 14×10^9 partikel/hari. Emisi tersebut 83 dan 86 kali lebih besar dibanding emisi Sungai Pluit dan Sungai Ciliwung pada penelitian ini.

Pengaruh jumlah partikel mikroplastik dibuktikan dengan perbandingan emisi yang dihasilkan pada Sungai Dafeng-Cina ($3,4 \times 10^6$ partikel/hari) (Liu *et al.* 2021). Nilai emisi tersebut lebih kecil dibandingkan rata-rata emisi pada sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta ($6,72 \times 10^7$ partikel/hari), meski

debit air Sungai Dafeng-Cina (118,96 m³/dt) (Liu *et al.* 2021) lebih besar. Perbedaan ini disebabkan karena jumlah partikel mikroplastik pada perairan Sungai Dafeng-Cina (2,76 partikel) (Liu *et al.* 2021) lebih kecil.

Keberadaan mikroplastik pada sedimen terjadi karena adanya proses penenggelaman partikel maupun agregasi yang membuat partikel mikroplastik menjadi lebih berat. Kaiser *et al.* (2017) menjelaskan ketika mikroplastik masuk ke dalam perairan, partikel yang memiliki densitas lebih berat dibanding air akan mengalami penenggelaman dan jatuh ke sedimen. Hal ini sangat tampak terlihat pada sungai yang memiliki arus lemah dengan kedalaman yang besar (Yan *et al.* 2021). Mikroplastik yang diperoleh di sedimen merupakan mikroplastik yang berpotensi mengalami resuspensi ke kolom perairan. Hal ini karena mikroplastik yang menempel pada permukaan sedimen akan terlepas saat terjadi gangguan pada kondisi hidrodinamika perairan, misalnya banjir. Xia *et al.* (2021) mengemukakan bahwa mikroplastik pada sedimen yang berukuran kecil (50-500 µm) lebih mudah mengalami resuspensi. Semakin kecil ukurannya, semakin mudah teresuspensi karena sifat penempelannya yang lebih lemah. Emisi mikroplastik pada sedimen bergantung pada laju sedimentasi sebagai faktor pengali. Namun, pada penelitian ini laju sedimentasi menjadi salah satu kendala dalam estimasi emisi mikroplastik. Hal ini karena laju sedimentasi yang digunakan tidak spesifik terjadi pada masing-masing muara sungai.

4.5.2 Fluks Mikroplastik Teluk Jakarta

Keberadaan mikroplastik sebagai emisi dari udara, permukaan sungai, dan sedimen, dapat diidentifikasi dari karakteristik partikel yang diperoleh (Tabel 5). Perairan muara sungai memberikan emisi mikroplastik terbesar dibandingkan atmosferik. Hal ini sejalan dengan perbedaan dominasi bentuk dan jenis polimer pada perairan dan atmosferik. Pada perairan, diperoleh dominasi fragmen dan polimer PE. Karakter mikroplastik yang sama dengan yang ditemukan di sedimen. Namun pada mikroplastik atmosferik, diperoleh fiber dan PET sebagai karakter dominan. Dominasi karakteristik yang sama antara mikroplastik di permukaan air dan sedimen mengindikasikan bahwa partikel mikroplastik yang mengendap di sedimen memang hasil agregasi partikel permukaan air, meskipun pembuktian hipotesis ini memerlukan penelitian lebih dalam.

Indikasi rendahnya kontribusi mikroplastik atmosferik juga terlihat dari hasil penelitian Takarina *et al.* (2022). Bentuk mikroplastik pada permukaan di tengah perairan Teluk Jakarta didominasi oleh bentuk film dengan polimer PE (Takarina *et al.* 2022). Dominasi tersebut berbeda dengan hasil deposisi dari atmosfer. Apabila dibandingkan dengan dominasi pada permukaan air dan sedimen, jenis polimer pada penelitian ini dan Takarina *et al.* (2022) menunjukkan kesesuaian dominasi. Namun, bentuk yang berbeda memerlukan kajian lebih dalam pada proses identifikasi dan pengkategorian. Pada penelitian ini, bentuk film dan fragmen dikategorikan dalam satu kelompok bentuk, mengingat kedua bentuk ini cenderung sulit untuk dibedakan. Free *et al.* (2014) menjelaskan bahwa film dan fragmen memiliki visual yang serupa namun berbeda pada tingkat ketebalan. Bentuk film umumnya lebih tipis dan mudah patah bila dibandingkan fragmen. Hal ini mengakibatkan pada beberapa penelitian akan menggabungkan kategori kedua bentuk tersebut.

Perhitungan fluks mikroplastik di Teluk Jakarta menunjukkan tanda positif yang berarti pada puncak musim timur (bulan Agustus), jumlah mikroplastik yang masuk ke perairan lebih tinggi dibandingkan mikroplastik yang mengalami pengendapan. Tanpa adanya masukan massa air dari perairan sekelilingnya, perairan Teluk Jakarta mengakumulasi mikroplastik hingga $+ 1,10 \times 10^9$ partikel setiap harinya. Jumlah ini jauh lebih tinggi dibandingkan perairan Tollense-Jerman sebesar $-35,5 \times 10^6$ partikel/hari (Tamminga *et al.* 2022). Debit air perairan Tollense-Jerman yang jauh lebih kecil ($0-6 \text{ m}^3/\text{s}$) (Tamminga *et al.* 2022) mengakibatkan mikroplastik yang masuk ke perairan mengalami pengendapan, sehingga nilai fluks menunjukkan tanda negatif.

Tabel 5 Perbandingan dominasi karakteristik mikroplastik di Teluk Jakarta

Sumber inputan	Dominasi Karakteristik			Emisi (partikel/hari)
	Bentuk	Kisaran ukuran (μm)	Jenis polimer	
Atmosfer	Fiber	300-500	PET	$4,91 \times 10^8$
Permukaan air muara sungai	Fragmen	300-500	PE	$6,19 \times 10^8$
Sedimen muara sungai	Fragmen	300-500	PE	$0,0054 \times 10^8$

4.5.3 Waktu Tinggal Mikroplastik dan Perairan Teluk Jakarta

Mikroplastik tidak selamanya akan menetap di suatu perairan. Setelah beberapa waktu, partikel tersebut akan mengalami penenggelaman atau pun pencucian akibat adanya hidrodinamika perairan. Hal ini juga berlaku di Teluk Jakarta. Secara alami, apabila tidak ada masukan massa air dari perairan sekitar (*flushing*), Teluk Jakarta memerlukan waktu 21 hari untuk mengendapkan mikroplastik di perairan. Hal ini karena proses pengendapan yang terjadi hanya mengandalkan proses fisika kimia dan biologi yang terjadi di perairan, tanpa adanya pencucian dari massa air lain. Waktu 21 hari tersebut jauh lebih lama apabila dibandingkan dengan perairan yang mengalami pencucian dari massa air lain. Hal ini dibuktikan dari hasil penelitian Schernewski *et al.* (2020) yang memperoleh waktu tinggal selama 13-14 hari untuk mikroplastik yang masuk ke perairan Laut Baltic.

Selain faktor masukan massa air dari perairan lain, karakteristik mikroplastik (ukuran partikel, densitas polimer, hidrofobik permukaan partikel), biofouling, suhu perairan dan turbulen, juga mempengaruhi waktu tinggal partikel. Nelms *et al.* (2018) mengungkapkan bahwa faktor-faktor tersebut ditambah dengan inputan mikroplastik yang besar ke suatu perairan akan mendukung kemungkinan mikroplastik masuk ke dalam jaring makanan melalui proses ingesti. Sedangkan waktu pengendapan mikroplastik sangat dipengaruhi oleh densitas dan ukuran mikroplastik (Elagami *et al.* 2022).

Waktu tinggal mikroplastik di Teluk Jakarta jauh lebih lama apabila dibandingkan dengan waktu tinggal alami perairan Teluk Jakarta. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa di bulan Agustus, Teluk Jakarta hanya memerlukan waktu empat hari untuk membersihkan massa airnya. Hal ini terjadi

karena pada kenyataannya, Teluk Jakarta memperoleh masukkan massa air dari perairan sekitarnya. Massa air lain yang masuk ke Teluk Jakarta membawa material ke dalam teluk. Namun secara alami juga akan keluar dengan membawa material yang terdapat di Teluk Jakarta, termasuk mikroplastik. Masukkan massa air ini dibuktikan dengan adanya perbedaan salinitas di dalam dan luar teluk. Oleh karena itu, estimasi waktu tinggal mikroplastik di Teluk Jakarta yang sesungguhnya masih memerlukan analisis lebih lanjut dengan memperhitungkan massa air sekitarnya.

4.6 Simpulan

Mikroplastik yang masuk ke Teluk Jakarta berasal dari deposisi partikel di atmosfer, transpor partikel di permukaan air sungai yang masuk ke Teluk Jakarta, dan partikel di sedimen yang berpotensi mengalami resuspensi. Emisi mikroplastik dari atmosfer pada musim hujan lebih tinggi dibandingkan musim kemarau dan berkorelasi erat dengan curah hujan dan kecepatan angin. Emisi mikroplastik dari permukaan air dihasilkan tertinggi oleh Sungai Dadap, dan terendah dari Sungai Angke. Emisi sungai-sungai di Jakarta Utara > Tangerang > Bekasi. Pola emisi mikroplastik dari sedimen linier dengan emisi dari perairan air, dengan emisi tertinggi dari Sungai Dadap dan terendah dari Sungai Angke. Emisi sedimen sungai Jakarta Utara > Tangerang > Bekasi.

Emisi mikroplastik yang berasal dari permukaan air > atmosferi > sedimen. Hal ini menegaskan bahwa distribusi mikroplastik melalui aliran permukaan air muara sungai lebih tinggi dibandingkan atmosfer. Meski demikian, hasil penelitian juga menunjukkan dinamika mikroplastik di Teluk Jakarta, dimana dominasi bentuk dan jenis polimer menunjukkan kesesuaian antara mikroplastik pada permukaan air dan sedimen dari sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta dengan mikroplastik di dalam Teluk Jakarta. Namun, dominasi kedua karakteristik tidak sesuai dengan mikroplastik hasil deposisi atmosfer. Hal ini mengindikasikan adanya proses transport horizontal yang lebih mempengaruhi distribusi mikroplastik yang berasal dari atmosfer.

Estimasi fluks mikroplastik di Teluk Jakarta menunjukkan tanda positif, yang berarti masukkan mikroplastik lebih tinggi dibandingkan mikroplastik yang mengendap. Hal ini menunjukkan bahwa pada bulan Agustus tanpa adanya pergantian massa air, terjadi akumulasi mikroplastik di perairan Teluk Jakarta. Mikroplastik di Teluk Jakarta memerlukan waktu 21 hari untuk mengendap ke sedimen. Waktu tersebut jauh lebih lama bila dibandingkan kemampuan Teluk Jakarta untuk meregenerasikan diri dengan bantuan masukkan massa air sekitarnya, yaitu empat hari.

V KANDUNGAN ZAT ADDITIF (*PHTHALATE*) PADA MIKROPLASTIK DI TELUK JAKARTA

5.1 Pendahuluan

Isu pencemaran mikroplastik saat ini tidak hanya menarik perhatian publik terkait dengan eksistensinya di lingkungan, namun juga terkait isu bahan kimia yang berasal atau menempel pada mikroplastik. Mikroplastik mengandung bahan kimia yang berasal dari eksogen atau endogen. Zat endogen ini secara inheren terkandung dalam produksi plastik, misalnya zat aditif (Bridson *et al.* 2021). Zat aditif ini sengaja ditambahkan dalam proses produksi agar plastik yang dihasilkan memiliki sifat dan fungsi yang sesuai dengan keinginan (Hahladakis *et al.* 2018; Carmen 2021). Sebagai contoh, plastik yang ditujukan untuk penggunaan diluar ruangan (kontruksi) akan ditambahkan stabilisator ultraviolet, sedangkan material plastik yang ditujukan untuk perangkat elektronik akan ditambahkan zat untuk penghambat api.

Phthalate adalah salah satu bahan aditif yang sering ditambahkan pada plastik karena memiliki harga yang murah, daya tahan tinggi (persisten), menambah elastisitas, dan memiliki volatilitas rendah (Chakraborty *et al.* 2019). *Phthalate* pada umumnya diaplikasikan pada plastik yang berbasis ester selulosa dan memiliki ikatan nonkovalen dengan plastik (Liang *et al.* 2008). *Phthalate* sebenarnya lepas ke lingkungan dalam waktu yang lama (minimum 100 hari) (Staples *et al.* 1997). Proses pelepasan ini dapat disebabkan oleh aktifitas fotolisis akuatik maupun degradasi oleh bakteri atau jamur dalam kondisi aerobik dan anaerobik (Liang *et al.* 2008; Gao dan Wen 2016).

Mikroplastik telah dilaporkan berbagai penelitian sebagai salah satu sumber pencemaran zat-zat kimia, termasuk *phthalate* di perairan (Zhang *et al.* 2018; Gugliandolo *et al.* 2020). Tingginya mikroplastik dianggap sebagai *tracer* bagi tingginya *phthalate* yang terdapat di perairan (Gugliandolo *et al.* 2020). Hal ini karena *phthalate* yang digunakan dalam produk plastik tidak memiliki ikatan kimia yang kuat, sehingga mudah untuk terlepas dari polimer plastik (Paluselli *et al.* 2019) dan meningkatkan konsentrasi zat ini di lingkungan dan berpotensi terakumulasi di organisme melalui rantai makanan. Keberadaan *phthalate* di perairan sangat berbahaya, mengingat *phthalate* dalam konsentrasi yang sangat rendah sekalipun memiliki toksisitas tinggi yang menyebabkan mutagen, karsinogen, berbahaya bagi reproduksi (Gugliandolo *et al.* 2020).

Adanya kandungan *phthalate* dalam mikroplastik mengakibatkan monitoring pencemaran mikroplastik harus diperluas pada komponen lainnya. Hal ini juga berlaku di Teluk Jakarta, mengingat Teluk Jakarta terkonfirmasi mendapat inputan mikroplastik. Terlebih lagi, informasi mengenai kontaminasi *phthalate* di Teluk Jakarta maupun perairan sekitarnya, masih sangat minim. Sifat *phthalate* yang menempel pada pertikel mikroplastik menimbulkan dugaan bahwa besar kemungkinan *phthalate* secara alami akan ikut mengkontaminasi perairan yang menjadi jalur transpor mikroplastik.

5.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi ada/tidaknya zat aditif (*phthalate*) pada partikel mikroplastik yang berada di alam.

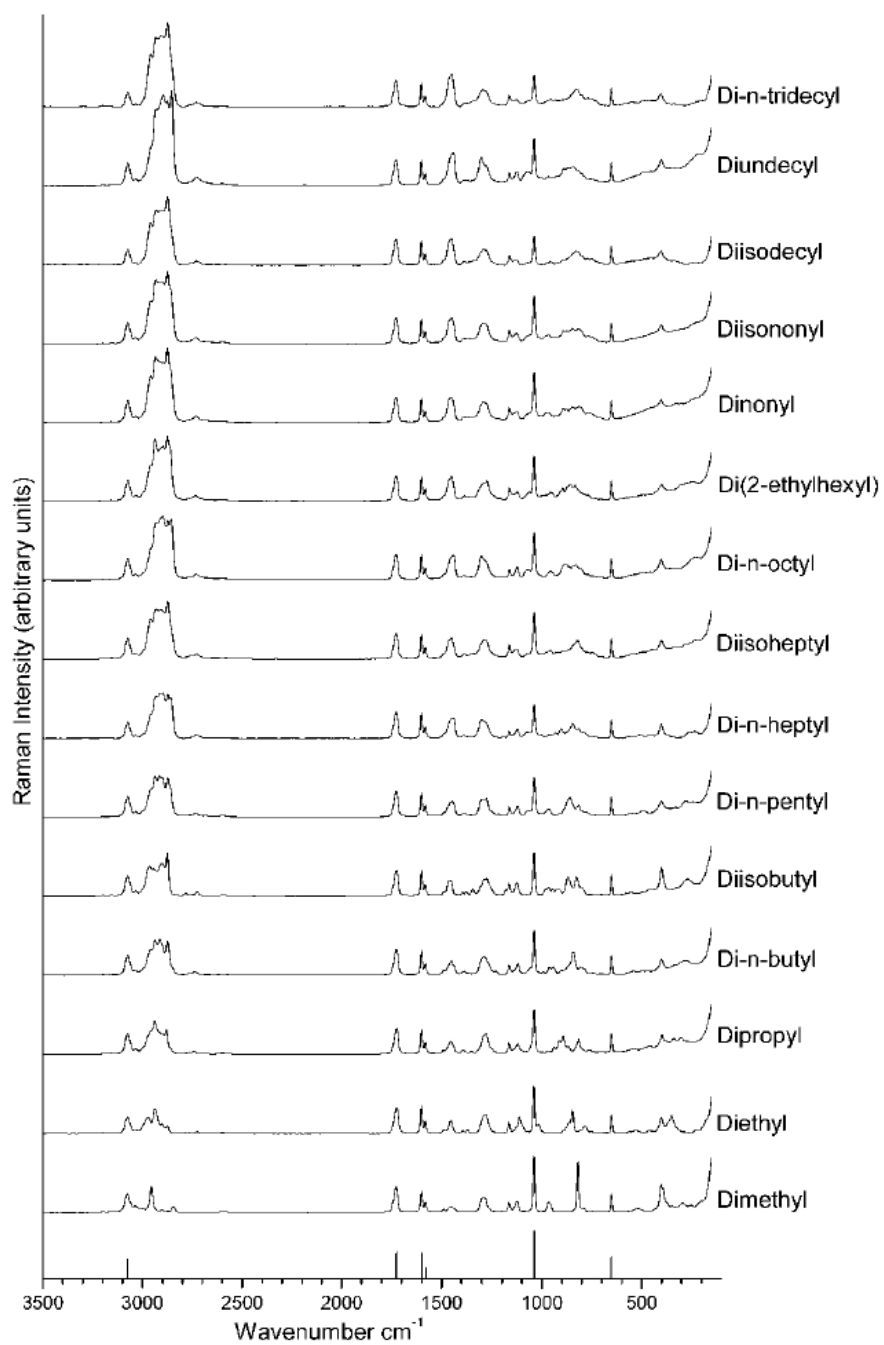
5.3 Metode Penelitian

Sampel mikroplastik yang digunakan dalam penelitian ini merupakan mikroplastik pada permukaan air dan sedimen yang diperoleh pada tahap sebelumnya. Partikel mikroplastik hasil analisis atmosferik tidak digunakan dalam uji ini, mengingat proses ekstraksi mikroplastik atmosferik menggunakan H_2O_2 dan $FeSO_4$ yang berpotensi meluruhkan seluruh bahan organik dan zat lain yang menempel pada partikel. Partikel yang telah diidentifikasi kebenarannya sebagai mikroplastik, diambil secara acak (25 sampel) untuk dilakukan pengujian terhadap *phthalate*. Uji zat aditif ini dilakukan dengan menggunakan *Micro-Raman Spectroscopic (Senterra II Compact Raman Microscope)*. Mikroplastik yang digunakan dalam uji ini adalah partikel yang memiliki ukuran $>300 \mu m$ dan mudah diambil menggunakan pinset steril. Hal ini karena mikroplastik yang berukuran $<300 \mu m$ cenderung lebih sulit untuk diambil dari kertas saring steril. Hasil uji Raman tersaji dalam bentuk grafik spektrum. Zat aditif *phthalate* diidentifikasi dengan melihat ciri puncak gelombang pada spektrum tertentu (Nørbygaard dan Berg 2004; Aggarwal *et al.* 2013) (Tabel 6). Spektrum Raman yang menjadi ciri *phthalate* dapat dilihat pada Gambar 21.

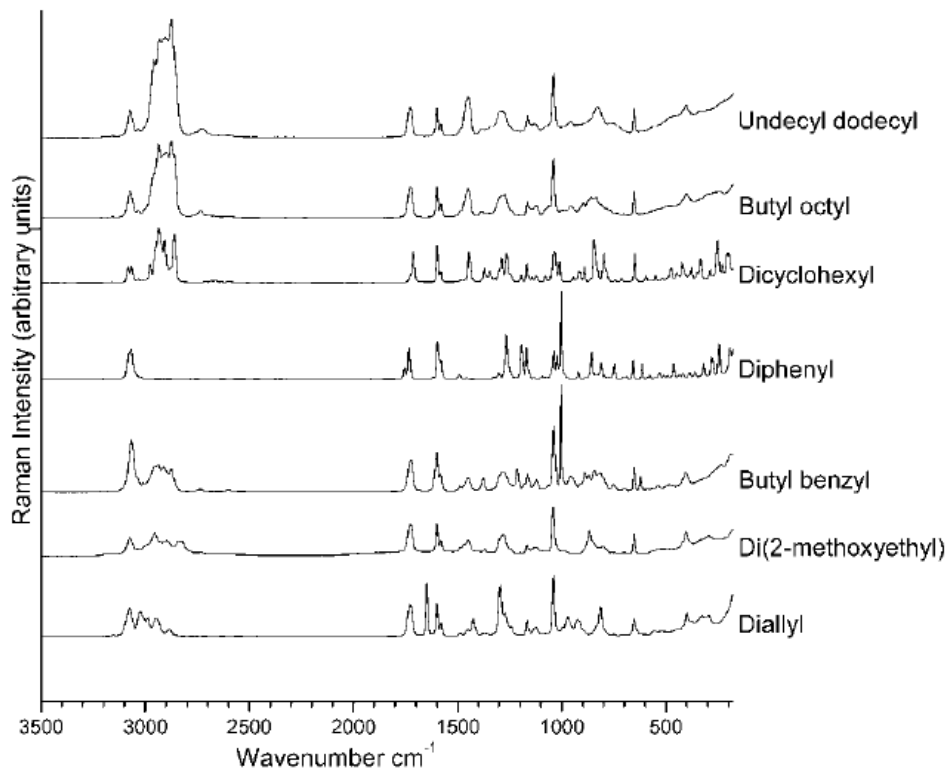
Pada spektra Raman, *phthalate* ditunjukkan dengan adanya puncak gelombang pada panjang gelombang tertentu dan dengan intensitas yang tertentu pula. Aggarwal *et al.* (2013) menjelaskan puncak gelombang spektrum dilihat pada panjang gelombang 3074, 1726, 1600, 1580, 1040, dan 652 cm^{-1} . Masing-masing panjang gelombang memiliki tingkat intensitas yang berbeda. Intensitas gelombang merupakan tinggi masing-masing puncak gelombang. Pada zat *phthalate*, intensitas paling kuat pada panjang gelombang 1040 cm^{-1} . Hal ini menyebabkan pada panjang gelombang tersebut, puncak gelombang yang terjadi adalah yang paling tinggi. Puncak gelombang kedua pada panjang gelombang 1726 cm^{-1} , dan puncak gelombang terendah muncul pada panjang gelombang 1580 cm^{-1} . Apabila partikel mikroplastik masih mengandung zat *phthalate*, maka pada enam panjang gelombang tersebut harus menunjukkan puncak gelombang dengan tinggi puncak sesuai intensitas masing-masing.

Tabel 6 Karakteristik spektrum Raman untuk *phthalate* (Aggarwal *et al.* 2013)

Panjang gelombang (cm^{-1})	3074	1726	1600	1580	1040	652
Intensitas relatif	0,4	0,55	0,4	0,2	1	0,35



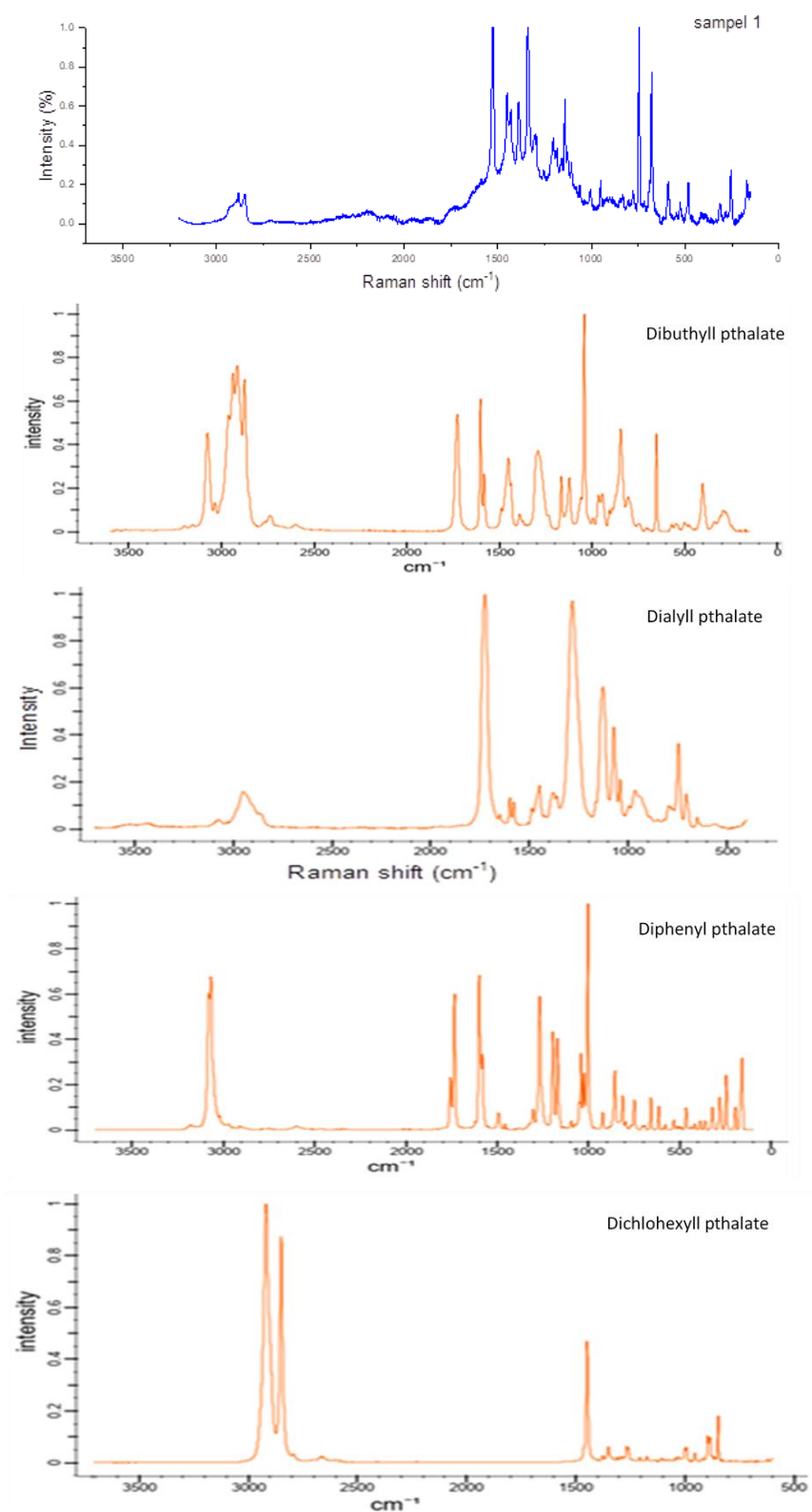
Gambar 21 Spektrum Raman yang mencirikan 15 *dialkyl ester phthalate* dan tujuh jenis *phthalate* (Nørbygaard dan Berg 2004)



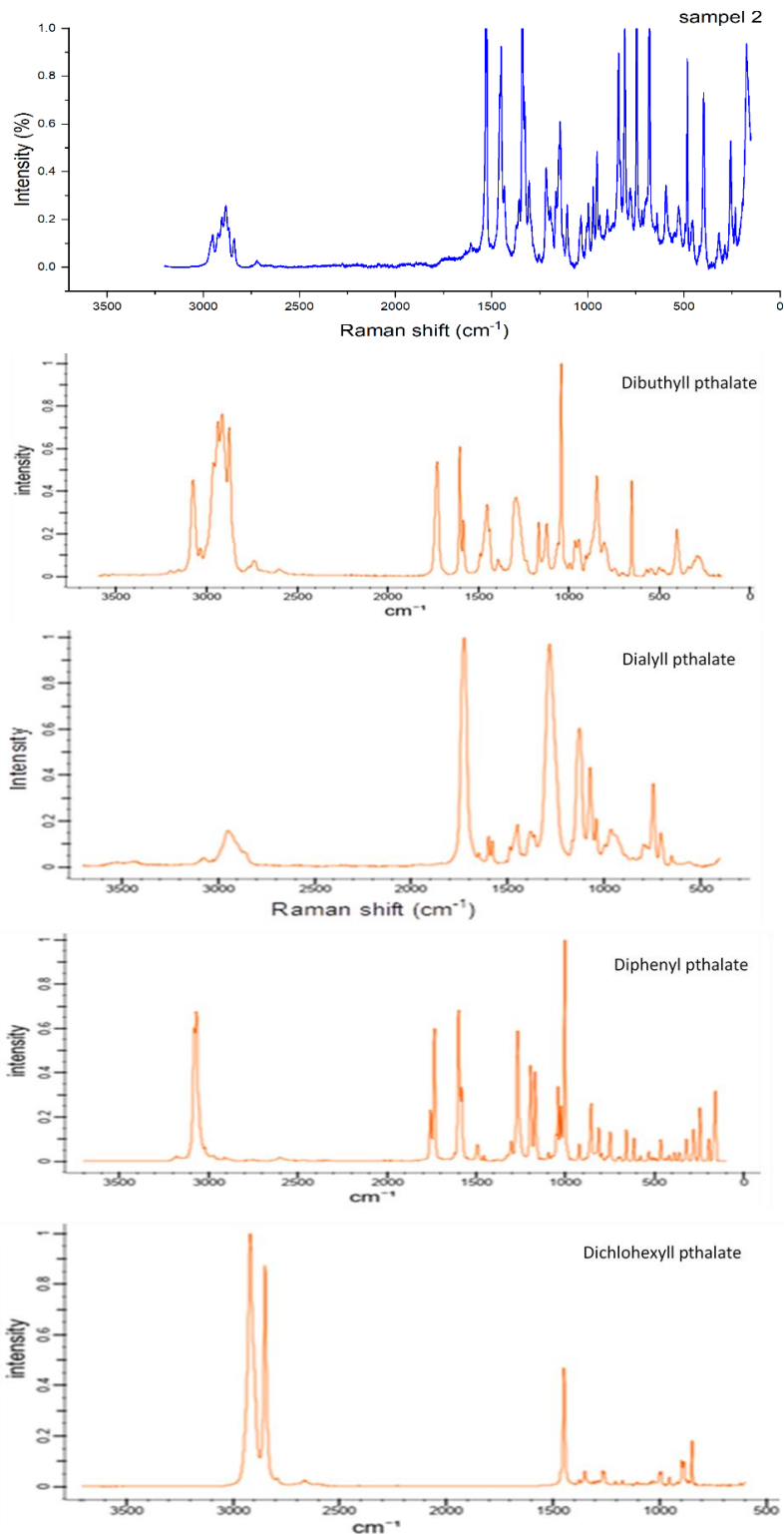
Gambar 21. Spektrum Raman yang mencirikan 15 *dialkyl ester phthalate* dan tujuh jenis *phthalate* (Lanjutan)

5.4 Hasil

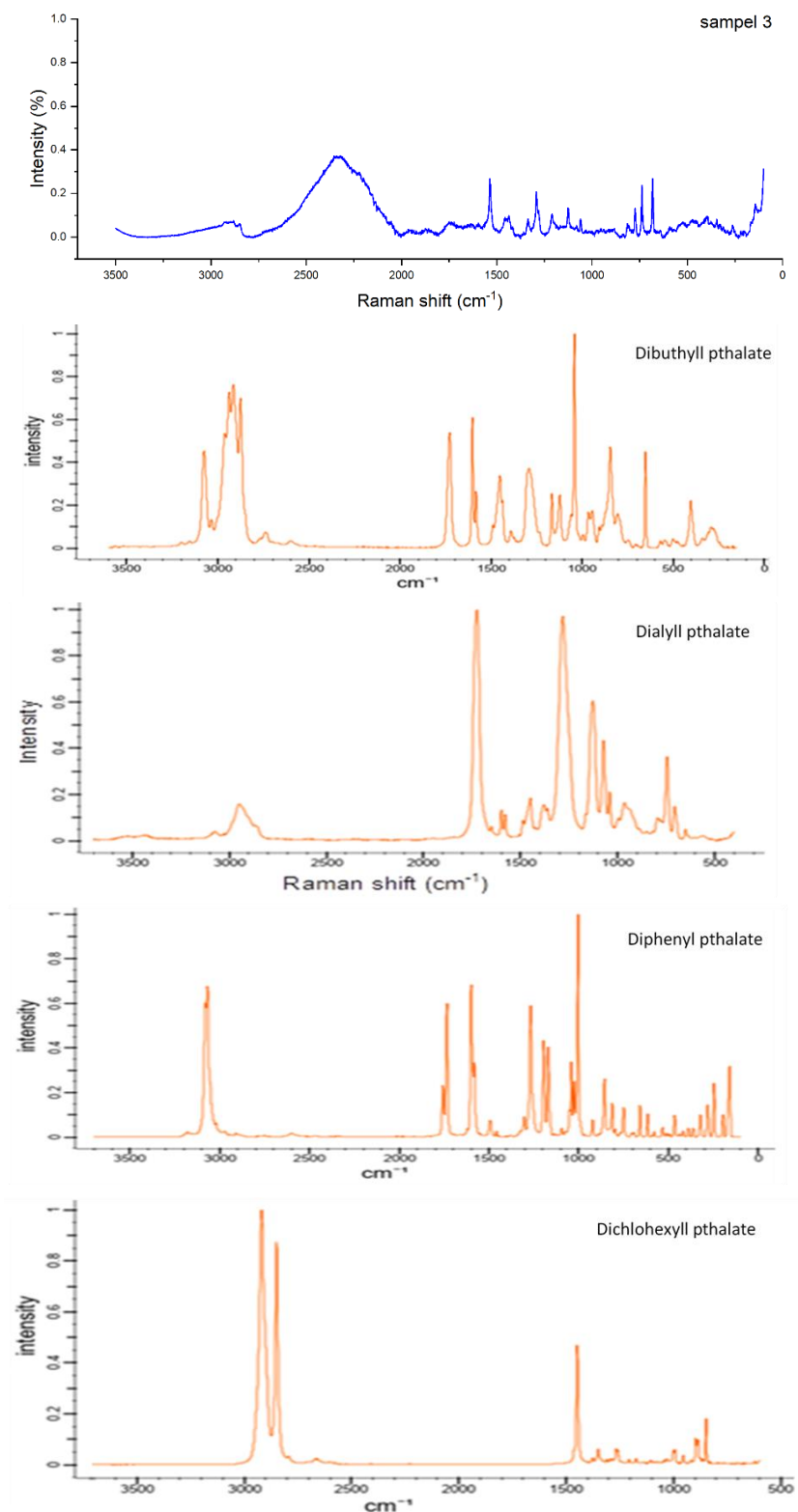
Berdasarkan spektrum Raman yang dihasilkan, pada 25 sampel partikel mikroplastik yang diuji tidak ditemukan adanya kandungan *phthalate* yang masih tertinggal pada partikel. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya puncak gelombang pada spektrum-spektrum yang menjadi ciri *phthalate* (Gambar 22). Spektrum 3074 cm^{-1} merupakan spektrum yang menunjukkan gugus fenil secara umum, spektrum 1726 cm^{-1} menunjukkan gugus karbonil (C=O) pada grup ester, sedangkan spektrum 1600 , 1580 , 1040 , dan 652 cm^{-1} menunjukkan variasi pada grup orto-fenil (Nørbygaard dan Berg 2004; Zakharenko dan Golokhvast 2019).



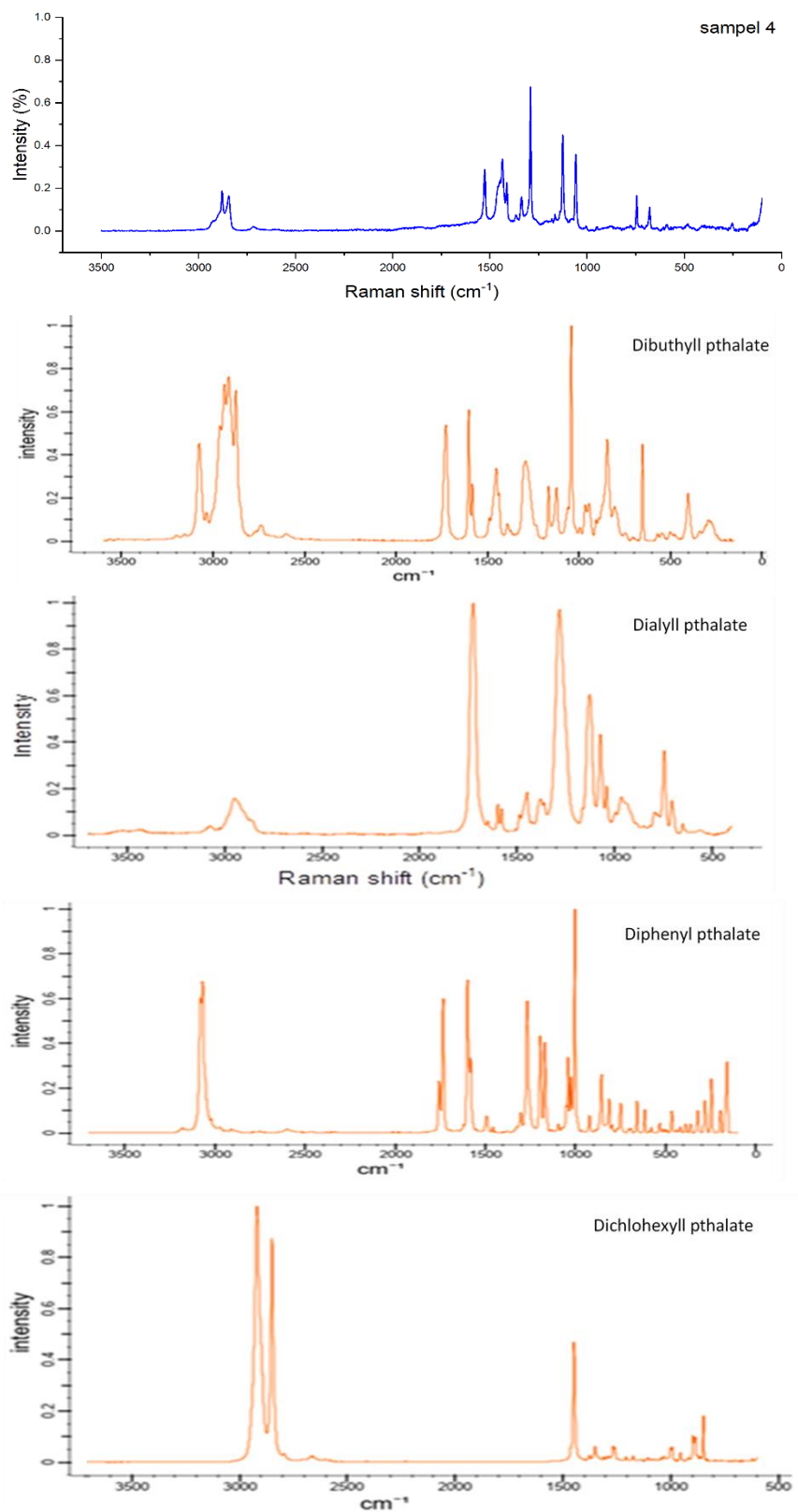
Gambar 22 Spektrum Raman sampel mikroplastik permukaan air dan sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta (spektrum sampel : warna biru; spektrum *phthalate* : warna merah)



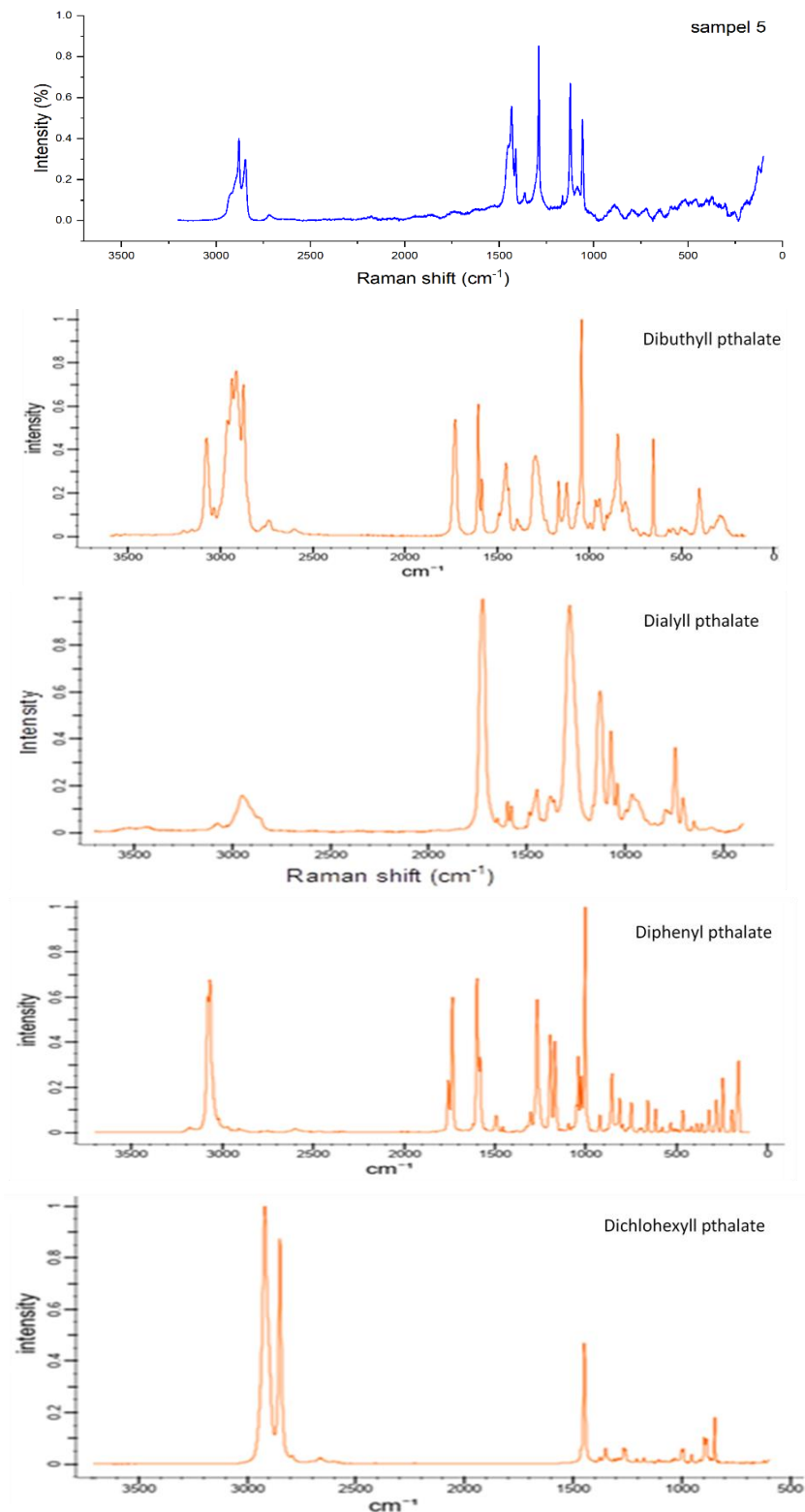
Gambar 22. Spektrum Raman sampel mikroplastik permukaan air dan sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta (spektrum sampel : warna biru; spektrum *phthalate* : warna merah) (Lanjutan)



Gambar 22. Spektrum Raman sampel mikroplastik permukaan air dan sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta (spektrum sampel : warna biru; spektrum *phthalate* : warna merah) (Lanjutan)



Gambar 22. Spektrum Raman sampel mikroplastik permukaan air dan sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta (spektrum sampel : warna biru; spektrum *phthalate* : warna merah) (Lanjutan)



Gambar 22. Spektrum Raman sampel mikroplastik permukaan air dan sedimen sembilan muara sungai Teluk Jakarta (spektrum sampel : warna biru; spektrum *phthalate* : warna merah) (Lanjutan)

5.5 Pembahasan

Phthalate sebagai zat aditif yang umum digunakan dalam produk plastik agar lebih lunak dan fleksibel. Hasil uji Raman belum bias adanya kandungan *phthalate* yang ditemukan pada permukaan sampel. Hal ini mengindikasikan bahwa ada kemungkinan *phthalate* mengalami peluruhan selama keberadaan mikroplastik di alam. Cao *et al.* (2022) bahkan memperoleh peluruhan 15 jenis ester *phthalate* dari berbagai produk berbahan plastik yang terjadi setelah inkubasi selama 14 hari. Peluruhan tersebut mengakibatkan terjadinya perpindahan *phthalate* dari partikel plastik ke alam, sehingga makin tinggi kelimpahan mikroplastik dapat mengakibatkan makin tinggi pula konsentrasi *phthalate* pada perairan atau sedimen. Korelasi tersebut ditegaskan oleh Benson dan Fred-Ahmadu (2020) dan Ajay *et al.* (2021) yang menemukan korelasi positif antara konsentrasi *phthalate* dan kelimpahan mikroplastik di perairan dan sedimen.

Paluselli *et al.* (2019) juga menjelaskan bahwa pelepasan kandungan *phthalate* pada plastik, tidak hanya terjadi ketika plastik telah dibuang ke alam. Namun selama masa pemakaian produk plastik tersebut juga dapat terjadi pelepasan *phthalate*. Hal tersebut dipengaruhi oleh struktur polimer dan ukuran diameter pori yang menjadi tempat menempelnya *phthalate* (Teuten *et al.* 2009). Penjelasan tersebut mengarahkan adanya indikasi bahwa *phthalate* dapat saja berkurang kandungannya sebelum terjadi degradasi makroplastik menjadi mikroplastik. Perubahan ukuran partikel menjadi mikroplastik di alam, pada akhirnya akan memicu pelepasan *phthalate* lebih cepat dari sebelumnya. Mikroplastik yang berbentuk kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan makroplastik, sehingga ketika partikel berinteraksi dengan molekul air akan semakin banyak dan cepat *phthalate* yang menempel pada partikel terlepas (Ye *et al.* 2020). Hal ini karena ketika proses degradasi berlangsung, struktur eksternal pada partikel akan mengalami banyak kerusakan yang mempermudah terlepasnya *phthalate* (Rani *et al.* 2017).

Penjelasan di atas mengarahkan hipotesis bahwa belum ditemukannya kandungan *phthalate* pada sampel mikroplastik di muara sungai sekitar Teluk Jakarta disebabkan karena zat tersebut telah sepenuhnya terlepas dari partikel mikroplastik. Hal ini memungkinkan adanya kandungan *phthalate* pada perairan ataupun sedimen di muara sungai sekitar Teluk Jakarta. Namun hipotesis tersebut masih memerlukan penelitian lebih jauh mengingat kandungan *phthalate* di Teluk Jakarta belum pernah dikaji secara mendalam. Meski demikian, Herdiana (2012) mengungkapkan bahwa pada aliran sungai pada DAS Citarum telah terindikasi terkontaminasi *phthalate*.

5.6 Simpulan

Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa kandungan aditif *phthalate* yang umum digunakan dalam produk plastik belum ditemukan menempel pada partikel mikroplastik yang langsung diambil dari alam. Gugus fenil, karbonil, dan orto-fenil yang menjadi ciri kandungan *phthalate* tidak ditemukan pada seluruh sampel yang diuji menggunakan *Micro-Raman Spectroscopic*.

VI PEMBAHASAN UMUM

Mikroplastik sebagai partikel dengan kisaran ukuran 1-5000 μm merupakan salah satu pencemar yang telah terkonfirmasi keberadaan dan distribusinya, termasuk di Teluk Jakarta. Banyak penelitian yang membuktikan bahwa mikroplastik ditemukan di perairan, sedimen, dan bahkan organisme yang berada di Teluk Jakarta (Manalu *et al.* 2017; Efadeswarni *et al.* 2019; Cordova *et al.* 2020; Takarina *et al.* 2022). Sumber-sumber mikroplastik di Teluk Jakarta pun telah diduga berasal dari limbah aktifitas penduduk. Meski demikian, penelaah dan analisis yang dilakukan pada tiap penelitian belum dilakukan secara menyeluruh, sehingga informasi-informasi tersebut masih sebagai data awal pencemaran mikroplastik di Teluk Jakarta. Mikroplastik yang berada di perairan laut merupakan hasil akumulasi partikel yang berasal dari berbagai kompartemen alam, yaitu atmosfer, aliran air, dan sedimen.

Allen *et al.* (2019), K. Liu *et al.* (2019), X. Wang *et al.* (2019) dan Liss (2020b) menyatakan bahwa atmosfer merupakan salah satu jalur transpor mikroplastik yang mampu mendistribusikan mikroplastik, bahkan ke daerah yang lebih jauh. Kontribusi atmosfer ini dibuktikan dalam penelitian ini dengan diperolehnya partikel mikroplastik di pesisir utara Jakarta (Ancol) hingga mencapai rata-rata 1,83 partikel. Mikroplastik yang diperoleh ini merupakan mikroplastik yang jatuh ke pesisir utara Jakarta, namun bukan berarti bahwa rata-rata kelimpahan mikroplastik di udara hanya 1,83 partikel saja. Hal ini karena pada kenyataannya tidak semua mikroplastik di udara akan terjatuh pada satu lokasi saja. Perbedaan berat partikel dan faktor meteorologi berperan penting dalam proses deposisi mikroplastik atmosferik. Brahney *et al.* (2020) menjelaskan bahwa mikroplastik yang terakumulasi lebih lama di atmosfer akan berpotensi untuk terbawa ke daerah yang lebih jauh dan terdeposisi pada berbagai kemungkinan kondisi alam. Hal ini menjadi salah satu tantangan untuk mengukur kelimpahan dan komposisi mikroplastik pada udara Jakarta dan berapa persen yang terdeposisi di perairan.

Rata-rata kelimpahan mikroplastik atmosferik yang diperoleh di Ancol-Jakarta lebih rendah dibandingkan di Hamburg-Jerman, Surabaya-Indonesia, dan Dongguan-China (Cai *et al.* 2017; Klein dan Fischer 2019; Syafei *et al.* 2019). Mikroplastik atmosferik yang diperoleh pada musim hujan (November-April) lebih tinggi dibandingkan musim kemarau (Mei-Oktober). Hal ini diduga berkaitan dengan intensitas matahari dan kecepatan angin pada kedua musim. Intensitas matahari mempengaruhi proses fragmentasi makroplastik menjadi mikroplastik, sedangkan kecepatan angin mempengaruhi daerah distribusi mikroplastik melalui udara. Bentuk mikroplastik atmosferik didominasi oleh fiber (86.36%), kisaran ukuran 300-500 μm (87.88%), dan polimer PET (81.82%). Keseluruhan karakteristik tersebut ditemukan pada sampel yang diperoleh setiap bulan dan mengindikasikan sumber mikroplastik adalah dari emisi penduduk lokal. Keberadaan fiber umumnya berasal dari industri garmen, laundry, dan industri *flock* (Atis *et al.* 2005; Liebezeit dan Liebezeit 2015; Dris *et al.* 2016; Prata 2018). PET merupakan polimer utama dalam produksi tekstil (Carmichael 2015) sehingga penggunaannya dalam industri dan kehidupan sehari-hari sangat tinggi. Aktifitas-aktifitas tersebut umum dilakukan di daerah urban. Wright *et al.*

(2020) juga mengemukakan bahwa mikroplastik dengan rentang ukuran 400-500 μm mampu terbawa angin hingga jarak 12-60 km dengan kecepatan angin 5 m/s. Hal ini menegaskan indikasi sumber mikroplastik atmosferik dari emisi penduduk di sekitar wilayah Ancol.

Mikroplastik di Teluk Jakarta juga masuk dari aliran air dan sedimen sungai-sungai yang ada di sekitarnya. Sembilan muara sungai pada tiga daerah administrasi (Tangerang: Sungai Dadap, Jakarta Utara: Sungai Angke, Pluit, Cilincing, Kali Item, Koja, Ciliwung, Marunda, dan Bekasi: Sungai Bekasi) terbukti terkontaminasi mikroplastik. Rata-rata kelimpahan mikroplastik di sembilan muara sungai di Teluk Jakarta $48,179 \pm 21,960$ partikel/ m^3 . Kelimpahan mikroplastik tertinggi diperoleh di Sungai Dadap, dan terendah pada Muara Sungai Angke. Mikroplastik yang masuk dari wilayah Tangerang > Jakarta Utara > Bekasi. Kelimpahan mikroplastik tertinggi yang dihasilkan oleh permukaan air Sungai Dadap-Tangerang, sejalan dengan jumlah makrodebris yang tinggi di perairan. Meski demikian, kelimpahan mikroplastik pada sembilan muara sungai tidak berkorelasi dengan kepadatan penduduk yang berbeda. Kelimpahan mikroplastik pada sembilan muara sungai di Teluk Jakarta lebih tinggi dibandingkan beberapa muara sungai lain, seperti Muara sungai Yangtze-China, Jenebarang dan Muara sungai Tallo-Indonesia, Muara sungai Sado-Portugal (Wicaksono *et al.* 2020; Li *et al.* 2020; Rodrigues *et al.* 2020). Namun kelimpahan tersebut jauh lebih rendah dibanding mikroplastik di Muara sungai Sungai Kuning-China, Sungai Los Angeles-USA, Sungai Qiantang-China, Esutari Yondingxinhe-China, Sungai Pearl,Guangzhou-China (Moore *et al.* 2011; Lin *et al.* 2018; Wu *et al.* 2019; Han *et al.* 2020; Zhao *et al.* 2020). Perbedaan ini terjadi karena perbedaan faktor penduduk yang mendiami dan beraktifitas di sepanjang sungai, serta perbedaan teknik sampling yang dilakukan. Mikroplastik yang tertransportasi di perairan sembilan muara sungai sekitar Teluk Jakarta didominasi oleh bentuk fragmen, kisaran ukuran 300-500 μm , dan kandungan polimer polietilen (PE). Ketiga karakteristik dominan ini menggambarkan mikroplastik domestik. PE merupakan salah satu polimer yang sangat umum digunakan pada bahan kemasan makanan, obat, mainan, dan bahkan pipa (Akarsu *et al.* 2020). Fragmen merupakan bentuk mikroplastik sekunder (fragmentasi makroplastik) yang terbentuk akibat tumbukan mekanis dan paparan UV (Barnes *et al.* 2009), serta umumnya dihasilkan pada daerah urban atau tempat pembuangan akhir (TPA) (Kataoka *et al.* 2019). Makroplastik yang berada di lingkungan akan mengalami degradasi ukuran secara perlahan dalam waktu yang lama. Song *et al.* (2017) membutuhkan waktu 4,2 tahun untuk memperoleh fragmentasi mikroplastik berukuran 1000 μm menjadi 100 μm dengan jumlah partikel yang meningkat signifikan. Dominasi fragmen dan rentang ukuran tersebut mengindikasikan bahwa mikroplastik yang teremisi merupakan limbah plastik masyarakat setempat yang telah mengalami fragmentasi di perairan pada kurun waktu yang cukup lama. Meski demikian, hal ini memerlukan pengujian lebih jauh pada partikel mikroplastik yang diperoleh.

Kelimpahan mikroplastik di sedimen umumnya lebih tinggi dibandingkan yang ditemukan di air (Ding *et al.* 2019). Hal ini ditegaskan oleh Jorissen (2014) dan Amin *et al.* (2021) yang mengemukakan bahwa densitas mikroplastik yang umumnya lebih berat dibandingkan air mengakibatkan mikroplastik jatuh ke sedimen akibat gaya gravitasi. Keterkaitan kelimpahan mikroplastik di sedimen

dan air juga diperkuat secara statistik, yaitu terdapat korelasi antara keduanya ($r = 0,82$). Rata-rata kelimpahan mikroplastik pada sedimen di sembilan muara sungai sekitar Teluk Jakarta sebesar 1977,56 partikel/kg berat kering sedimen. Sungai Dadap memiliki kelimpahan mikroplastik tertinggi, dan terendah di Sungai Angke. Sungai Dadap memiliki aliran sungai yang cenderung tenang (0,96 cm/s) dengan jumlah mikroplastik (469 partikel) di perairan yang tinggi juga mengakibatkan banyak partikel mikroplastik yang jatuh ke sedimen. Hal ini sesuai dengan Ding *et al.* (2019) dan Huang *et al.* (2021). Rendahnya mikroplastik pada sedimen di Sungai Angke, diduga akibat adanya kegiatan pengerukan yang dilakukan. Pengerukan merupakan salah satu aktivitas yang sangat mempengaruhi keberadaan mikroplastik di sedimen (Willis *et al.* 2017; Baptista Neto *et al.* 2019; Berenjkar *et al.* 2019). Kelimpahan mikroplastik pada penelitian ini juga lebih tinggi dibandingkan daerah lain, yaitu Muara Jagir-Surabaya (Firdaus *et al.* 2020), Muara sungai Yangtze-China (Li *et al.* 2020), Muara sungai Changjiang-China (Peng *et al.* 2017), Muara sungai Warnow-Jerman (Enders *et al.* 2019). Namun kelimpahan di sembilan muara sungai Teluk Jakarta ini lebih rendah Sungai Milwaukee-USA (Lenaker *et al.* 2019), dan Guangdong-China (Li *et al.* 2021). Bentuk mikroplastik didominasi oleh fragmen (52,75%) dan ukuran terbanyak adalah 300-500 μm (47,92%). Dominasi bentuk dan ukuran pada sedimen ini sejalan dengan karakteristik mikroplastik pada perairan (fragmen 39,85%; ukuran 300-500 μm 41,15%). Hal ini mengindikasikan bahwa mikroplastik di sedimen merupakan mikroplastik yang terendapkan dari perairan. *Polyethylene* (PE) merupakan polimer yang paling banyak ditemukan (60%). Chen *et al.* (2020) mengemukakan bahwa PE merupakan jenis polimer yang paling banyak ditemukan, baik di negara maju (19-48%) dan negara berkembang (19-63,7%). Hal ini karena PE merupakan polimer yang cakupan penggunaannya sangat luas dalam kehidupan sehari-hari.

Berdasarkan kelimpahan dan karakteristik mikroplastik yang diperoleh, emisi mikroplastik di Teluk Jakarta dapat diestimasi. Emisi mikroplastik atmosferik yang diperoleh memberikan nilai rata-rata sebesar $1,35 \times 10^9 \pm 1,25 \times 10^9$ partikel/hari. Emisi ini lebih rendah dibandingkan daerah urban lain, seperti Paris-Perancis, Dongguan-China, Hamburg-Jerman dan London-UK (Dris *et al.* 2016; Cai *et al.* 2017; Klein dan Fischer 2019; Wright *et al.* 2020). Hal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan aktifitas penduduk, dan jarak sumber emisi. K. Liu *et al.* (2019) menegaskan bahwa penurunan aktifitas penduduk akan berkaitan linier dengan penurunan mikroplastik atmosferik yang dihasilkan.

Teluk Jakarta juga memperoleh inputan mikroplastik dari air sungai dan sedimen. Berdasarkan daerah administrasinya, emisi mikroplastik dari tujuh muara sungai di Jakarta Utara ($47,89 \times 10^7$ partikel/hari) > Tangerang ($7,27 \times 10^7$ partikel/hari) > Bekasi ($5,28 \times 10^7$ partikel/hari). Emisi mikroplastik dari perairan Teluk Jakarta dipengaruhi oleh besaran debit air dan jumlah partikel mikroplastik pada masing-masing sungai. Keterkaitan pengaruh debit dan jumlah partikel juga diperoleh oleh Wagner *et al.* (2019). Emisi mikroplastik yang diterima oleh Teluk Jakarta lebih kecil dibandingkan Laut Cina Selatan. Salah satu muara yang memberikan masukkan mikroplastik ke Laut Cina Selatan adalah Muara Changjiang (Zhao *et al.* 2019) yang memiliki debit air 10^5 kali lebih besar dibanding kesembilan muara sungai yang masuk ke Teluk Jakarta. Pengaruh jumlah partikel mikroplastik dibuktikan dengan perbandingan yang dihasilkan

pada Sungai Dafeng-Cina yang lebih kecil meski debit airnya lebih besar (Liu *et al.* 2021). Perbedaan emisi ini disebabkan karena jumlah partikel mikroplastik pada perairan Sungai Dafeng-Cina lebih kecil (Liu *et al.* 2021).

Selain aliran air, mikroplastik yang mengendap di sedimen juga berpotensi memberikan kontribusi di Teluk Jakarta. Mikroplastik di sedimen merupakan mikroplastik yang berpotensi mengalami resuspensi ke kolom perairan. Hal ini karena mikroplastik yang menempel pada permukaan sedimen akan mudah terlepas saat terjadi gangguan pada kondisi hidrodinamika perairan, misalnya banjir.

Menilik dari emisi dan faktor lingkungan, mikroplastik terbesar untuk Teluk Jakarta berasal dari aliran permukaan air muara sungai. Sembilan muara sungai di sekitar Teluk Jakarta memberikan sumbangan hingga 55,76% dari total masukkan mikroplastik di puncak musim timur (bulan Agustus). Tanpa adanya masukkan massa air dari perairan sekitarnya, Teluk Jakarta dinyatakan mengakumulasi mikroplastik di kolom perairan. Hal ini karena nilai keseimbangan (fluks) yang dihasilkan menunjukkan nilai positif. Akumulasi mikroplastik ini juga didukung dengan waktu tinggal mikroplastik yang cukup lama di perairan Teluk Jakarta (21 hari). Waktu tinggal tersebut 5 kali lebih lama dibandingkan waktu tinggal pencemar alami di Teluk Jakarta bila perairan menerima *flushing* dari perairan sekitarnya.

Berdasarkan dominasi bentuk dan jenis polimer, fiber sebagai bentuk terbanyak dari udara memiliki persentase yang rendah di perairan. Bahkan polimer jenis PET tidak ditemukan di permukaan air maupun sedimen. Hal ini menimbulkan dugaan bahwa deposisi atmosferik memang memberikan kontribusi yang rendah terhadap mikroplastik di perairan Teluk Jakarta. Hal ini diduga terdapat proses alami dan transport yang belum diketahui dan memerlukan penelitian lebih mendalam. Berbeda dengan kesamaan dominasi karakteristik antara mikroplastik di permukaan air dan sedimen. Indikasi rendahnya kontribusi mikroplastik atmosferik juga terlihat dari hasil penelitian Takarina *et al.* (2022). Bentuk mikroplastik pada permukaan di tengah perairan Teluk Jakarta didominasi oleh bentuk film dengan polimer PE (Takarina *et al.* 2022). Dominasi karakteristik antara mikroplastik di permukaan air sama dengan sedimen. Hal ini mengindikasikan bahwa ada kemungkinan partikel mikroplastik di perairan dan sedimen merupakan partikel yang mengendap atau teresuspensi, meski pun pembuktian ini memerlukan penelitian lebih dalam.

Tingginya mikroplastik di perairan dapat digunakan sebagai indikator tingginya pencemar zat kimia lain di perairan, terutama zat aditif yang memang digunakan dalam produk plastik. Salah satu zat tersebut adalah *phthalate*. *Phthalate* umum digunakan agar plastik lebih lunak dan fleksibel. Pada seluruh sampel yang diuji menunjukkan tidak ada kandungan *phthalate* yang ditemukan pada permukaan sampel. Hal ini mengindikasikan bahwa *phthalate* mengalami peluruhan selama keberadaan mikroplastik di alam. Cao *et al.* (2022) bahkan memperoleh peluruhan 15 jenis ester *phthalate* dari berbagai produk berbahan plastik yang terjadi setelah inkubasi selama 14 hari. Benson dan Fred-Ahmadu (2020) dan Ajay *et al.* (2021) menemukan korelasi positif antara konsentrasi *phthalate* dan kelimpahan mikroplastik di perairan dan sedimen. Hal tersebut mengarahkan hipotesis bahwa tidak ditemukannya kandungan *phthalate* pada sampel mikroplastik di muara sungai sekitar Teluk Jakarta disebabkan karena zat

tersebut telah sepenuhnya terlepas dari partikel mikroplastik. Namun hipotesis tersebut masih memerlukan penelitian lebih jauh mengingat kandungan *phthalate* di Teluk Jakarta belum pernah dikaji secara mendalam.

Keberadaan mikroplastik di Teluk Jakarta secara langsung maupun tidak langsung akan sangat mempengaruhi kehidupan organisme di Teluk Jakarta. Ukuran mikroplastik yang kecil dan menyerupai plankton mengakibatkan partikel mikroplastik sangat mudah dikonsumsi oleh organisme (Jiang *et al.* 2022). Maity *et al.* (2021) mengemukakan pada umumnya mikroplastik yang dikonsumsi oleh organisme adalah jenis fiber dengan ukuran < 500 μm . Selain tanpa sengaja tertelan dan masuk ke saluran pencernaan, mikroplastik juga dapat masuk ke tubuh organisme melalui sistem respirasi (melalui insang), dan adsorpsi kulit (Prokić *et al.* 2019). Mikroplastik memiliki kemungkinan terakumulasi dalam tubuh organisme, bergantung dari jenis polimer, keberadaan biofilm yang menempel pada mikroplastik, ukuran mikroplastik dan bukaan mulut organisme, bentuk mikroplastik, dan warna partikel mikroplastik (Maity *et al.* 2021). Mikroplastik akan terakumulasi dan mempengaruhi fisiologi organisme. Jaafar *et al.* (2021) dan Rahmayanti *et al.* (2022) menjelaskan bahwa mikroplastik ditemukan pada organisme secara bertingkat, mulai dari zooplankton, benthos, hingga ikan, dengan kelimpahan mikroplastik pada saluran pencernaan cenderung lebih kecil dibandingkan organ tubuh lainnya. Hal ini mengindikasikan adanya kemungkinan bahwa mikroplastik akan mengalami transfer pada jaring-jaring makanan, dari tubuh mangsa ke predator. Pengaruh mikroplastik dalam tubuh organisme juga telah dilaporkan, yaitu adanya gangguan pada pergerakan organisme, pertumbuhan, reproduksi, neurotoksisitas, hingga perubahan tingkat DNA. Hal ini karena mikroplastik memiliki kemampuan untuk berikatan dengan zat-zat lain yang ada di lingkungan, seperti logam berat atau pun bahan organik/inorganik lainnya. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa terdapat korelasi positif yang cukup erat antara mikroplastik dan zat pencemar organik/inorganik lainnya pada tubuh organisme, diantaranya mikroplastik-*polychlorinated biphenyls* (PCBs) dan *organochlorine* (OC) (Ryan *et al.* 1988), mikroplastik-PAH (Tien *et al.* 2020), dan mikroplastik-*polybrominated diphenyl ethers* (PBDE) (Tanaka *et al.* 2013). Keberadaan zat-zat tambahan tersebut akan semakin meningkatkan potensi kerusakan yang mungkin terjadi pada tubuh organisme.

Teluk Jakarta yang juga menjadi daerah penangkapan ikan dan budidaya juga berpotensi untuk mengalami tingkat bahaya yang sama akibat adanya kontaminasi mikroplastik. Apalagi hasil penangkapan budidaya tersebut didistribusikan tidak hanya di sekitar daerah Teluk Jakarta, namun juga diekspor hingga ke luar negeri. Hal ini mengakibatkan keamanan pangan laut hasil sumber daya perikanan Teluk Jakarta harus dijaga dan diawasi dengan baik. Kontaminasi mikroplastik dan zat tambahan lain yang berikatan dengan mikroplastik, dapat menurunkan keamanan pangan, sehingga kualitas produk perikanan yang dihasilkan juga menurun. Hal ini tentu saja akan berimbas lebih lanjut pada perekonomian masyarakat, terutama nelayan.

VII SIMPULAN DAN SARAN

7.1 Simpulan

Penelitian ini berhasil mengkonfirmasi keberadaan mikroplastik, baik di udara, permukaan air, maupun sedimen di Teluk Jakarta. Kelimpahan mikroplastik atmosferik bervariasi setiap bulannya, dengan musim hujan memiliki kelimpahan lebih tinggi dibandingkan musim kemarau. Hal ini berkaitan dengan deposisi mikroplastik yang dipengaruhi oleh curah hujan dan kecepatan angin. Partikel mikroplastik juga berhasil dikonfirmasi pada permukaan air dan sedimen sembilan muara sungai di Teluk Jakarta yang berada pada tiga daerah administratif (Tangerang, Jakarta Utara, dan Bekasi). Kelimpahan mikroplastik, baik di permukaan air dan sedimen, menunjukkan bahwa kelimpahan mikroplastik di Jakarta Utara > Tangerang > Bekasi. Karakteristik mikroplastik atmosferik berbeda dengan mikroplastik pada muara sungai. Mikroplastik atmosferik didominasi oleh bentuk fiber dengan kisaran ukuran 300-500 μm dan memiliki jenis polimer PET. Sedangkan mikroplastik pada permukaan air dan sedimen muara sungai didominasi oleh bentuk fragmen, ukuran partikel 300-500 μm , dengan jenis polimer PE. Meski demikian, baik karakteristik pada mikroplastik atmosferik maupun muara sungai, menunjukkan bahwa mikroplastik tersebut merupakan emisi dari aktifitas penduduk lokal. Letak sembilan muara sungai yang berada pada DAS yang berbeda dengan jumlah penduduk yang berbeda pula, ternyata tidak memberikan pengaruh (korelasi rendah) secara statistik terhadap kelimpahan mikroplastik. Hal ini berbeda dengan mikroplastik di lokasi lain, seperti China dan Perancis, yang justru berkorelasi kuat dengan kepadatan penduduk.

Mikroplastik yang berasal dari atmosfer, permukaan air, dan sedimen, menjadi sumber mikroplastik di Teluk Jakarta. Emisi mikroplastik yang berasal dari permukaan air > sedimen, sedangkan mikroplastik di sedimen berpotensi untuk mengalami resuspensi. Pada puncak musim timur (bulan Agustus), Teluk Jakarta memiliki nilai fluks positif atau mengakumulasi mikroplastik yang berasal dari atmosfer dan permukaan air.

Keberadaan mikroplastik dapat digunakan sebagai *tracer* zat aditif yang menempel pada mikroplastik, salah satunya adalah *phthalate*. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi bahwa *phthalate* yang umum terdapat pada produk-produk plastik ternyata belum ditemukan pada hasil fragmentasi produk tersebut. Hal ini ditunjukkan oleh tidak adanya puncak yang terbentuk pada panjang gelombang yang menyatakan gugus fenil, karbonil, dan orto-fenil yang menjadi ciri kandungan *phthalate*.

7.2 Saran

Meski berhasil memperoleh detail kondisi mikroplastik di Teluk Jakarta, namun penelitian ini dilakukan pada sembilan muara sungai besar dan hanya pada salah satu puncak musim saja. Agar estimasi dan dinamika yang diperoleh lebih detail, diperlukan penelitian lebih jauh dengan mengambil muara-muara sungai lain dan pada musim yang berbeda. Demikian pula untuk mikroplastik atmosferik. Persentase mikroplastik yang terdeposisi tepat di Teluk Jakarta dapat diperoleh apabila pergerakan mikroplastik di udara diketahui. Hal ini dapat dilakukan

dengan bantuan pemodelan atmosfer (misalnya HYSPLIT). Perkiraan dinamika mikroplastik di Teluk Jakarta juga memerlukan data yang lebih lengkap, terutama masukkan mikroplastik dari arah laut. Perolehan data mikroplastik yang berasal dari laut dapat dilakukan dengan penelitian lanjutan pada lokasi sampling, baik di daerah Kepulauan Seribu maupun di perairan luar Teluk Jakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi S. 2021. Microplastics washout from the atmosphere during a monsoon rain event. *J. Hazard. Mater. Adv.* 4.doi:10.1016/j.hazadv.2021.100035.
- Abbasi S, Turner A. 2021. Dry and wet deposition of microplastics in a semi-arid region (Shiraz, Iran). *Sci. Total Environ.* 786.doi:10.1016/j.scitotenv.2021.147358.
- Abidli S, Antunes JC, Ferreira JL, Lahbib Y, Sobral P, Trigui El Menif N. 2018. Microplastics in sediments from the littoral zone of the north Tunisian coast (Mediterranean Sea). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 205:1–9.doi:10.1016/j.ecss.2018.03.006.
- Aggarwal R, Farrar LW, Saar B, Jeys T, Goodman RB. 2013. Measurement of the Absolute Raman Cross Sections of Diethyl Phthalate, Dimethyl Phthalate, Ethyl Cinnamate, Propylene Carbonate, Tripropyl Phosphate, 1,3-Cyclohexanedione, 3'-Am. *Chemistry (Easton)*.doi:DOI:10.21236/ada591110.
- Agustine I, Yulinawati H, Suswantoro E, Gunawan D. 2017. Application of Open Air Model (R Package) To Analyze Air Pollution Data. *Indones. J. Urban Environ. Technol.* 1(1):94.doi:10.25105/urbanenvirotech.v1i1.2430.
- Ajay K, Behera D, Bhattacharya S, Mishra PK, Ankit Y, Anoop A. 2021. Distribution and characteristics of microplastics and phthalate esters from a freshwater lake system in Lesser Himalayas. *Chemosphere.* 283.doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131132.
- Akarsu C, Kumbur H, Gökdağ K, Kıdeyş AE, Sanchez-Vidal A. 2020. Microplastics composition and load from three wastewater treatment plants discharging into Mersin Bay, north eastern Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.*.doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110776.
- Allen S, Allen D, Phoenix VR, Le Roux G, Durántez Jiménez P, Simonneau A, Binet S, Galop D. 2019. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nat. Geosci.* 12(5):339–344.doi:10.1038/s41561-019-0335-5.
- Amin B, Febriani IS, Nurrachmi I, Fauzi M. 2021. The Occurrence and Distribution of Microplastic in Sediment of the Coastal Waters of Bengkalis Island Riau Province. Di dalam: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 695.
- Anderson JC, Park BJ, Palace VP. 2016. Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems. *Environ. Pollut.* 218:269–280.doi:10.1016/j.envpol.2016.06.074.
- Andrady AL. 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62(8):1596–1605.doi:10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.

- As-Syakur AR, Tanaka T, Prasetia R, Swardika IK, Kasa IW. 2011. Comparison of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) products and daily-monthly gauge data over Bali. *Int. J. Remote Sens.* 32(24):8969–8982.doi:10.1080/01431161.2010.531784.
- Atis S, Tutluoglu B, Levent E, Ozturk C, Tunaci A, Sahin K, Saral A, Oktay I, Kanik A, Nemery B. 2005. The respiratory effects of occupational polypropylene flock exposure. *Eur. Respir. J.* 25(1):110–117.doi:10.1183/09031936.04.00138403.
- Bai M, Lin Y, Hurley RR, Zhu L, Li D. 2022. Controlling Factors of Microplastic Riverine Flux and Implications for Reliable Monitoring Strategy. *Environ. Sci. Technol.* 56(1).doi:10.1021/acs.est.1c04957.
- Bai Z, Wang N, Wang M. 2021. Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*.doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112243.
- Bappeda DKI Jakarta. 2018. RPJMD Provinsi DKI Jakarta Tahun 2017-2022.
- Baptista Neto JA, de Carvalho DG, Medeiros K, Drabinski TL, de Melo GV, Silva RCO, Silva DCP, de Sousa Batista L, Dias GTM, da Fonseca EM, *et al.* 2019. The impact of sediment dumping sites on the concentrations of microplastic in the inner continental shelf of Rio de Janeiro/Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 149.doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110558.
- Barboza LGA, Lopes C, Oliveira P, Bessa F, Otero V, Henriques B, Raimundo J, Caetano M, Vale C, Guilhermino L. 2020. Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. *Sci. Total Environ.*.doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134625.
- Barnes DKA, Galgani F, Thompson RC, Barlaz M. 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*.doi:10.1098/rstb.2008.0205.
- Barrows APW, Neumann CA, Berger ML, Shaw SD. 2017. Grab: Vs. neuston tow net: A microplastic sampling performance comparison and possible advances in the field. *Anal. Methods.*.doi:10.1039/c6ay02387h.
- Benson NU, Fred-Ahmadu OH. 2020. Occurrence and distribution of microplastics-sorbed phthalic acid esters (PAEs) in coastal psammitic sediments of tropical Atlantic Ocean, Gulf of Guinea. *Sci. Total Environ.* 730.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139013.
- Berenjkar P, Saeedi M, Yuan Q. 2019. Assessment of heavy metal release from dredged materials for different disposal scenarios: Study of Anzali international wetland, Iran. *Process Saf. Environ. Prot.* 132.doi:10.1016/j.psep.2019.10.008.
- Bogusz A, Oleszczuk P. 2017. Microplastics in the environment: characteristic, identification and potential risk. *Ann. Univ. Mariae Curie-Sklodowska,*

Sect. AA – Chem. 71(2):97.doi:10.17951/aa.2016.71.2.97.

- Botterell ZLR, Beaumont N, Dorrington T, Steinke M, Thompson RC, Lindeque PK. 2019. Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: A review. *Environ. Pollut.*.doi:10.1016/j.envpol.2018.10.065.
- Boucher J, Friot D. 2017. *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources.*
- BPS DKI Jakarta. 2021. Provinsi DKI Jakarta Dalam Angka 2021. *Provinsi DKI Jakarta Dalam Angka 2021.*
- Brahney J, Hallerud M, Heim E, Hahnenberger M, Sukumaran S. 2020. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science (80-)*. 368(6496):1257–1260.doi:10.1126/science.aaz5819.
- Brennecke D, Duarte B, Paiva F, Caçador I, Canning-Clode J. 2016. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 178:189–195.doi:10.1016/j.ecss.2015.12.003.
- Bridson JH, Gaugler EC, Smith DA, Northcott GL, Gaw S. 2021. Leaching and extraction of additives from plastic pollution to inform environmental risk: A multidisciplinary review of analytical approaches. *J. Hazard. Mater.* 414.doi:10.1016/j.jhazmat.2021.125571.
- Browne MA. 2015. Sources and pathways of microplastics to habitats. Di dalam: *Marine Anthropogenic Litter.*
- Bruggeman A. 2001. Rainfall Measurement and Analysis. Di dalam: *Advanced Short Course: Water Saving and Increasing Water Productivity: Challenges and Options.* Amman (Jordan): CIHEAM-IAMB. hlm. b1.1--b11.
- Bukit NT, Yusuf I a. 2002. Beban Pencemaran Limbah Industri Dan Status Kualitas Air Sungai Citarum. *J. Teknol. Lingkung.* 3(2):98–106.doi:https://doi.org/10.29122/jtl.v3i2.242.
- Cai L, Wang J, Peng J, Tan Z, Zhan Z, Tan X, Chen Q. 2017. Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24(32):24928–24935.doi:10.1007/s11356-017-0116-x.
- Cao Y, Lin H, Zhang K, Xu S, Yan M, Leung KMY, Lam PKS. 2022. Microplastics: A major source of phthalate esters in aquatic environments. *J. Hazard. Mater.* 432.doi:10.1016/j.jhazmat.2022.128731.
- Carmen S. 2021. Microbial capability for the degradation of chemical additives present in petroleum-based plastic products: A review on current status and perspectives. *J. Hazard. Mater.* 402.doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123534.
- Carmichael A. 2015. Man-made fibers continue to grow. *Text. World.* 2015(JAN-

FEB).

- Chakraborty P, Sampath S, Mukhopadhyay M, Selvaraj S, Bharat GK, Nizzetto L. 2019. Baseline investigation on plasticizers, bisphenol A, polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the surface soil of the informal electronic waste recycling workshops and nearby open dumpsites in Indian metropolitan cities. Di dalam: *Environmental Pollution*. Vol. 248.
- Chen H, Qin Y, Huang H, Xu W. 2020. A regional difference analysis of microplastic pollution in global freshwater bodies based on a regression model. *Water (Switzerland)*. 12(7).doi:10.3390/w12071889.
- Chubarenko I, Bagaev A, Zobkov M, Esiukova E. 2016. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 108(1–2).doi:10.1016/j.marpolbul.2016.04.048.
- Cole M, Lindeque P, Fileman E, Halsband C, Goodhead R, Moger J, Galloway TS. 2013. Microplastic ingestion by zooplankton. *Environ. Sci. Technol.* 47(12):6646–6655.doi:10.1021/es400663f.
- Constant M, Ludwig W, Kerhervé P, Sola J, Charrière B, Sanchez-Vidal A, Canals M, Heussner S. 2020. Microplastic fluxes in a large and a small Mediterranean river catchments: The Têt and the Rhône, Northwestern Mediterranean Sea. *Sci. Total Environ.* 716:136984.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136984.
- Cordova MR. 2018. COREMAP Phase III 2018: Marine Debris and Pollution Research. Jakarta.
- Cordova MR, Nurhati IS. 2019. Major sources and monthly variations in the release of land-derived marine debris from the Greater Jakarta area, Indonesia. *Sci. Rep.*.doi:10.1038/s41598-019-55065-2.
- Cordova MR, Purwiyanto AIS, Suteja Y. 2019. Abundance and characteristics of microplastics in the northern coastal waters of Surabaya, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 142.doi:10.1016/j.marpolbul.2019.03.040.
- Cordova MR, Riani E, Shiimoto A. 2020. Microplastics ingestion by blue panchax fish (*Aplocheilus* sp.) from Ciliwung Estuary, Jakarta, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.*.doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111763.
- Corradini F, Meza P, Eguiluz R, Casado F, Huerta-Lwanga E, Geissen V. 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Sci. Total Environ.* 671:411–420.doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.368.
- Cutroneo L, Reboa A, Besio G, Borgogno F, Canesi L, Canuto S, Dara M, Enrile F, Forioso I, Greco G, *et al.* 2020. Correction to: Microplastics in seawater: sampling strategies, laboratory methodologies, and identification techniques applied to port environment (*Environmental Science and Pollution Research*, (2020), 27, 9, (8938-8952), 10.1007/s11356-020-

- 07783-8). *Environ. Sci. Pollut. Res.*.doi:10.1007/s11356-020-08704-5.
- DaerahKita. 2019. 13 Sungai Yang Membelah Kota Jakarta. *Drh. Kita Sajian Ringan Informatif Nusant.*
- Desforges JPW, Galbraith M, Ross PS. 2015. Ingestion of Microplastics by Zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 69(3).doi:10.1007/s00244-015-0172-5.
- Dinas Lingkunga Hidup. 2020. Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) Tahun 2019.
- Dinas Lingkungan Hidup Jakarta. 2021. *Laporan akhir pemantauan kualitas lingkungan perairan laut dan muara teluk Jakarta.*
- Ding L, Mao R fan, Guo X, Yang X, Zhang Q, Yang C. 2019. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China. *Sci. Total Environ.* 667.doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.332.
- Dris R, Gasperi J, Mirande C, Mandin C, Guerrouache M, Langlois V, Tassin B. 2017. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environ. Pollut.* 221:453–458.doi:10.1016/j.envpol.2016.12.013.
- Dris R, Gasperi J, Saad M, Mirande C, Tassin B. 2016. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Mar. Pollut. Bull.* 104(1–2):290–293.doi:10.1016/j.marpolbul.2016.01.006.
- Efadeswarni, Andriantoro, Azizah N, Saragih GS. 2019. Microplastics in digestive tracts of fishes from Jakarta Bay. Di dalam: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.*
- Elagami H, Ahmadi P, Fleckenstein JH, Frei S, Obst M, Agarwal S, Gilfedder BS. 2022. Measurement of microplastic settling velocities and implications for residence times in thermally stratified lakes. *Limnol. Oceanogr.* 67(4):934–945.doi:10.1002/lno.12046.
- Emmerik T Van, Mellink Y, Hauk R, Waldschläger K, Schreyers L. 2022. Rivers as Plastic Reservoirs. *Front. Water.* 3(January):1–8.doi:10.3389/frwa.2021.786936.
- Enders K, Käßler A, Biniash O, Feldens P, Stollberg N, Lange X, Fischer D, Eichhorn KJ, Pollehne F, Oberbeckmann S, *et al.* 2019. Tracing microplastics in aquatic environments based on sediment analogies. *Sci. Rep.* 9(1).doi:10.1038/s41598-019-50508-2.
- Enyoh CE, Verla AW, Verla EN, Ibe FC, Amaobi CE. 2019. Airborne microplastics: a review study on method for analysis, occurrence, movement and risks. *Environ. Monit. Assess.* 191(11):1–26.doi:10.1007/s10661-019-7842-0.
- Eriksen M, Mason S, Wilson S, Box C, Zellers A, Edwards W, Farley H, Amato S.

2013. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Mar. Pollut. Bull.*.doi:10.1016/j.marpolbul.2013.10.007.
- Evangelidou N, Grythe H, Klimont Z, Heyes C, Eckhardt S, Lopez-Aparicio S, Stohl A. 2020. Atmospheric transport, a major pathway of microplastics to remote regions. *Preprints.*(March):1–32.doi:10.20944/preprints202003.0385.v1.
- Falahudin D, Cordova MR, Sun X, Yogaswara D, Wulandari I, Hindarti D, Arifin Z. 2020. The first occurrence, spatial distribution and characteristics of microplastic particles in sediments from Banten Bay, Indonesia. *Sci. Total Environ.* 705.doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135304.
- Fazey FMC, Ryan PG. 2016. Biofouling on buoyant marine plastics: An experimental study into the effect of size on surface longevity. *Environ. Pollut.* 210.doi:10.1016/j.envpol.2016.01.026.
- Firdaus M, Trihadiningrum Y, Lestari P. 2020. Microplastic pollution in the sediment of Jagir Estuary, Surabaya City, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 150.doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110790.
- Foshtomi MY, Oryan S, Taheri M, Darvish Bastami K, Zahed MA. 2019. Composition and abundance of microplastics in surface sediments and their interaction with sedimentary heavy metals, PAHs and TPH (total petroleum hydrocarbons). *Mar. Pollut. Bull.*.doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110655.
- Free CM, Jensen OP, Mason SA, Eriksen M, Williamson NJ, Boldgiv B. 2014. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Mar. Pollut. Bull.* 85(1).doi:10.1016/j.marpolbul.2014.06.001.
- Frère L, Paul-Pont I, Rinnert E, Petton S, Jaffré J, Bihannic I, Soudant P, Lambert C, Huvet A. 2017. Influence of environmental and anthropogenic factors on the composition, concentration and spatial distribution of microplastics: A case study of the Bay of Brest (Brittany, France). *Environ. Pollut.*.doi:10.1016/j.envpol.2017.03.023.
- Frias JPGL, Nash R. 2019. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar. Pollut. Bull.* 138(November 2018):145–147.doi:10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.
- Fries E, Dekiff JH, Willmeyer J, Nuelle MT, Ebert M, Remy D. 2013. Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environ. Sci. Process. Impacts.* 15(10):1949–1956.doi:10.1039/c3em00214d.
- Ganguly M, Ariya PA. 2019. Ice Nucleation of Model Nanoplastics and Microplastics: A Novel Synthetic Protocol and the Influence of Particle Capping at Diverse Atmospheric Environments. *ACS Earth Sp. Chem.* 3(9):1729–1739.doi:10.1021/acsearthspacechem.9b00132.

- Gao DW, Wen ZD. 2016. Phthalate esters in the environment: A critical review of their occurrence, biodegradation, and removal during wastewater treatment processes. *Sci. Total Environ.* 541.doi:10.1016/j.scitotenv.2015.09.148.
- GESAMP. 2015. Sources, fate and effects of MP in the marine environment. *J. Ser. GESAMP Reports Stud.* 90:98.
- González-Pleiter M, Edo C, Aguilera Á, Viúdez-Moreiras D, Pulido-Reyes G, González-Toril E, Osuna S, de Diego-Castilla G, Leganés F, Fernández-Piñas F, *et al.* 2021. Occurrence and transport of microplastics sampled within and above the planetary boundary layer. *Sci. Total Environ.* 761.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143213.
- Gugliandolo E, Licata P, Crupi R, Albergamo A, Jebara A, Lo Turco V, Potortì AG, Mansour H Ben, Cuzzocrea S, Di Bella G. 2020. Plasticizers as Microplastics Tracers in Tunisian Marine Environment. *Front. Mar. Sci.* 7.doi:10.3389/fmars.2020.589398.
- Guzzetti E, Sureda A, Tejada S, Faggio C. 2018. Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*doi:10.1016/j.etap.2018.10.009.
- Hahladakis JN, Velis CA, Weber R, Iacovidou E, Purnell P. 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J. Hazard. Mater.* 344:179–199.doi:10.1016/j.jhazmat.2017.10.014.
- Han M, Niu X, Tang M, Zhang BT, Wang G, Yue W, Kong X, Zhu J. 2020. Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary. *Sci. Total Environ.*doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135601.
- Hartmann NB, Hüffer T, Thompson RC, Hassellöv M, Verschoor A, Daugaard AE, Rist S, Karlsson T, Brennholt N, Cole M, *et al.* 2019. Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environ. Sci. Technol.*doi:10.1021/acs.est.8b05297.
- Hendrawan D. 2010. Kualitas Air Sungai dan Situ di DKI Jakarta. *MAKARA Technol. Ser.*doi:10.7454/mst.v9i1.315.
- Herdiana I. 2012. Curug Jompong & Teluk Jambe mengandung zat berbahaya. *Sindonews.com*.
- Hernandez E, Nowack B, Mitrano DM. 2017. Polyester Textiles as a Source of Microplastics from Households: A Mechanistic Study to Understand Microfiber Release during Washing. *Environ. Sci. Technol.* 51(12):7036–7046.doi:10.1021/acs.est.7b01750.
- Herrera A, Raymond E, Martínez I, Álvarez S, Canning-Clode J, Gestoso I, Pham CK, Ríos N, Rodríguez Y, Gómez M. 2020. First evaluation of neustonic microplastics in the Macaronesian region, NE Atlantic. *Mar. Pollut. Bull.*

153.doi:10.1016/j.marpolbul.2020.110999.

- Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson RC, Thiel M. 2012. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci. Technol.* 46(6):3060–3075.doi:10.1021/es2031505.
- Hitchcock JN, Mitrovic SM. 2019. Microplastic pollution in estuaries across a gradient of human impact. *Environ. Pollut.* 247:457–466.doi:10.1016/j.envpol.2019.01.069.
- Horton AA, Svendsen C, Williams RJ, Spurgeon DJ, Lahive E. 2017. Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK – Abundance, sources and methods for effective quantification. *Mar. Pollut. Bull.* 114(1).doi:10.1016/j.marpolbul.2016.09.004.
- Hosseini ST, Chegini V, Sadrinassab M, Mostafa S. 2016. Residence Times in a Hypersaline Creek : Using Salinity as a Tracer. (September).doi:10.18869/acadpub.ijmt.6.11.
- Huang D, Li X, Ouyang Z, Zhao X, Wu R, Zhang C, Lin C, Li Y, Guo X. 2021. The occurrence and abundance of microplastics in surface water and sediment of the West River downstream, in the south of China. *Sci. Total Environ.* 756.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143857.
- Jaafar N, Azfaralariff A, Musa SM, Mohamed M, Yusoff AH, Lazim AM. 2021. Occurrence, distribution and characteristics of microplastics in gastrointestinal tract and gills of commercial marine fish from Malaysia. *Sci. Total Environ.* 799.doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149457.
- Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science (80-.).* 347(6223):768–771.doi:10.1126/science.1260352.
- Jayani DH. 2020. Seberapa Padat Penduduk DKI Jakarta 2019? Retrieved from databoks.
- Jiang Y, Yang F, Hassan Kazmi SSU, Zhao Y, Chen M, Wang J. 2022. A review of microplastic pollution in seawater, sediments and organisms of the Chinese coastal and marginal seas. *Chemosphere.* 286.doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131677.
- Jorissen FJ. 2014. Colonization by the benthic foraminifer *Rosalina* (*Tretomphalus*) *concinna* of Mediterranean drifting plastics. *CIESM Work. Monogr.*(46).
- Jovanović B. 2017. Ingestion of microplastics by fish and its potential consequences from a physical perspective. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 13(3):510–515.doi:10.1002/ieam.1913.
- Kaiser D, Kowalski N, Waniek JJ. 2017. Effects of biofouling on the sinking

- behavior of microplastics. *Environ. Res. Lett.* 12(12).doi:10.1088/1748-9326/aa8e8b.
- Käppler A, Windrich F, Löder MGJ, Malanin M, Fischer D, Labrenz M, Eichhorn KJ, Voit B. 2015. Identification of microplastics by FTIR and Raman microscopy: a novel silicon filter substrate opens the important spectral range below 1300 cm⁻¹ for FTIR transmission measurements. *Anal. Bioanal. Chem.* 407(22).doi:10.1007/s00216-015-8850-8.
- Kataoka T, Nihei Y, Kudou K, Hinata H. 2019. Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan. *Environ. Pollut.*.doi:10.1016/j.envpol.2018.10.111.
- Kawecki D, Nowack B. 2019. Polymer-Specific Modeling of the Environmental Emissions of Seven Commodity Plastics As Macro- and Microplastics. *Environ. Sci. Technol.* 53(16):9664–9676.doi:10.1021/acs.est.9b02900.
- Kaya AT, Yurtsever M, Bayraktar SÇ. 2018. Ubiquitous exposure to microfiber pollution in the air. *Eur. Phys. J. Plus.* 133(11).doi:10.1140/epjp/i2018-12372-7.
- Klein M, Fischer EK. 2019. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany. *Sci. Total Environ.* 685:96–103.doi:10.1016/j.scitotenv.2019.05.405.
- Lebreton LCM, Van Der Zwet J, Damsteeg JW, Slat B, Andrady A, Reisser J. 2017. River plastic emissions to the world's oceans. *Nat. Commun.* 8(15611):1–10.doi:10.1038/ncomms15611.
- Lenaker PL, Baldwin AK, Corsi SR, Mason SA, Reneau PC, Scott JW. 2019. Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column and Surficial Sediment from the Milwaukee River Basin to Lake Michigan. *Environ. Sci. Technol.* 53(21).doi:10.1021/acs.est.9b03850.
- Leslie HA. 2014. Review of Microplastics in Cosmetics. *IVM Inst. Environ. Stud.* 476(July):33.
- Li WC, Tse HF, Fok L. 2016. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Sci. Total Environ.* 566–567.doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.084.
- Li Y, Lu Z, Zheng H, Wang J, Chen C. 2020. Microplastics in surface water and sediments of Chongming Island in the Yangtze Estuary, China. *Environ. Sci. Eur.*.doi:10.1186/s12302-020-0297-7.
- Li Y, Wang X, Fu W, Xia X, Liu C, Min J, Zhang W, Crittenden JC. 2019. Interactions between nano/micro plastics and suspended sediment in water: Implications on aggregation and settling. *Water Res.* 161.doi:10.1016/j.watres.2019.06.018.
- Li Y, Zhang Y, Chen G, Xu K, Gong H, Huang K, Yan M, Wang J. 2021.

- Microplastics in surface waters and sediments from Guangdong coastal areas, South China. *Sustain.* 13(5).doi:10.3390/su13052691.
- Liang DW, Zhang T, Fang HHP, He J. 2008. Phthalates biodegradation in the environment. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 80(2).doi:10.1007/s00253-008-1548-5.
- Liebezeit G, Liebezeit E. 2015. Origin of synthetic particles in honeys. *Polish J. Food Nutr. Sci.* 65(2):143–147.doi:10.1515/pjfn-2015-0025.
- Lin L, Zuo LZ, Peng JP, Cai LQ, Fok L, Yan Y, Li HX, Xu XR. 2018. Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: A case study in the Pearl River along Guangzhou City, China. *Sci. Total Environ.*.doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.327.
- Liro M, van Emmerik T, Wyzga B, Liro J, Mikus P. 2020. Macroplastic storage and remobilization in rivers. *Water (Switzerland)*. 12(7).doi:10.3390/w12072055.
- Liss PS. 2020. Microplastics: All up in the air? *Mar. Pollut. Bull.* 153(February):110952.doi:10.1016/j.marpolbul.2020.110952.
- Liu C, Li J, Zhang Y, Wang L, Deng J, Gao Y, Yu L, Zhang J, Sun H. 2019. Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure. *Environ. Int.* 128:116–124.doi:10.1016/j.envint.2019.04.024.
- Liu K, Wang X, Fang T, Xu P, Zhu L, Li D. 2019. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Sci. Total Environ.*.doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.110.
- Liu K, Wu T, Wang X, Song Z, Zong C, Wei N, Li D. 2019. Consistent Transport of Terrestrial Microplastics to the Ocean through Atmosphere. *Environ. Sci. Technol.* 53(18):10612–10619.doi:10.1021/acs.est.9b03427.
- Liu S, Chen H, Wang J, Su L, Wang X, Zhu J, Lan W. 2021. The distribution of microplastics in water, sediment, and fish of the Dafeng River, a remote river in China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 228.doi:10.1016/j.ecoenv.2021.113009.
- Löder MGJ, Gerdts G. 2015. Methodology used for the detection and identification of microplastics—a critical appraisal. Di dalam: *Marine Anthropogenic Litter*. hlm. 201–227.
- Longhin EM, Mantecca P, Gualtieri M. 2020. Fifteen years of airborne particulates in vitro toxicology in milano: Lessons and perspectives learned. *Int. J. Mol. Sci.* 21(7).doi:10.3390/ijms21072489.
- Lusher A, Hollman P, Mandoza-Hill J. J. 2017. *Microplastics in fisheries and aquaculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of The United Nations.

- Ma B, Xue W, Hu C, Liu H, Qu J, Li L. 2019. Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chem. Eng. J.* 359:159–167.doi:10.1016/j.cej.2018.11.155.
- Maes T, Van der Meulen MD, Devriese LI, Leslie HA, Huvet A, Frère L, Robbens J, Vethaak AD. 2017. Microplastics baseline surveys at the water surface and in sediments of the North-East Atlantic. *Front. Mar. Sci.* 4(MAY).doi:10.3389/fmars.2017.00135.
- Maity S, Guchhait R, Chatterjee A, Pramanick K. 2021. Co-occurrence of co-contaminants: Cyanotoxins and microplastics, in soil system and their health impacts on plant – A comprehensive review. *Sci. Total Environ.* 794.doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148752.
- Manalu AA. 2017. Kelimpahan Mikroplastik Di Teluk Jakarta. *Tesis*.
- Manalu AA, Hariyadi S, Wardiatno Y. 2017. Microplastics abundance in coastal sediments of Jakarta Bay, Indonesia. *AAAL Bioflux.* 10(5):1164–1173.
- Masura J, Baker J, Foster G, Arthur Courtney. 2015. *Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment*. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.
- Masura J, Baker J, Foster G, Arthur Coutney. 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.
- McEachern K, Alegria H, Kalagher AL, Hansen C, Morrison S, Hastings D. 2019. Microplastics in Tampa Bay, Florida: Abundance and variability in estuarine waters and sediments. *Mar. Pollut. Bull.*.doi:10.1016/j.marpolbul.2019.07.068.
- Michels J, Stippkugel A, Lenz M, Wirtz K, Engel A. 2018. Rapid aggregation of biofilm-covered microplastics with marine biogenic particles. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 285(1885).doi:10.1098/rspb.2018.1203.
- Miller ME, Kroon FJ, Motti CA. 2017. Recovering microplastics from marine samples: A review of current practices. *Mar. Pollut. Bull.* 123(1–2).doi:10.1016/j.marpolbul.2017.08.058.
- Miller S. 1994. *Handbook for Agrohydrology*. UK: Natural Resources Institute (NRI).
- Moore CJ, Lattin GL, Zellers AF. 2011. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California. *Rev. Gestão Costeira Integr.*.doi:10.5894/rgci194.
- Mudge SM, Icely JD, Newton A. 2008. Residence times in a hypersaline lagoon : Using salinity as a tracer. (February 2019).doi:10.1016/j.ecss.2007.09.032.
- Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, Quinn B. 2016. Wastewater Treatment Works

- (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environ. Sci. Technol.* 50(11).doi:10.1021/acs.est.5b05416.
- Napper IE, Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC. 2015. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Mar. Pollut. Bull.* 99(1–2):178–185.doi:10.1016/j.marpolbul.2015.07.029.
- Nelms SE, Galloway TS, Godley BJ, Jarvis DS, Lindeque PK. 2018. Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environ. Pollut.* 238.doi:10.1016/j.envpol.2018.02.016.
- Newbould RA, Powell DM, Whelan MJ. 2021. Macroplastic Debris Transfer in Rivers: A Travel Distance Approach. *Front. Water.* 3(September):1–14.doi:10.3389/frwa.2021.724596.
- Noik VJ, Noik VJ, Tuah PM, Seng L, Sakari M. 2015. Fingerprinting and quantification of selected heavy metals in meso- and microplastics sampled from Santubong and Trombol Beach. *2nd Int. Conf. Agric. Environmaent Biol. Sci.*(March):3–9.doi:10.17758/IAAST.A0715062.
- Nor NHM, Obbard JP. 2014. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems. *Mar. Pollut. Bull.* 79(1–2).doi:10.1016/j.marpolbul.2013.11.025.
- Nørbygaard T, Berg RW. 2004. Analysis of phthalate ester content in poly(vinyl chloride) plastics by means of fourier transform Raman spectroscopy. *Appl. Spectrosc.* 58(4).doi:10.1366/000370204773580248.
- Nuelle MT, Dekiff JH, Remy D, Fries E. 2014. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environ. Pollut.* 184:161–169.doi:10.1016/j.envpol.2013.07.027.
- Office for National Statistics [ONS]. 2021. Population estimates for the UK, England and Wales, Scotland and Northern Ireland: Mid-2020. *Stat. Bull.*(July, 25).
- OSPAR C. 2017. Assessment document of land-based inputs of microplastics in the marine environment. Volume ke-7.
- Oz N, Kadizade G, Yurtsever M. 2019. Investigation of heavy metal adsorption on microplastics. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 17(4):7301–7310.doi:10.15666/aeer/1704_73017310.
- Paluselli A, Fauvelle V, Galgani F, Sempéré R. 2019. Phthalate Release from Plastic Fragments and Degradation in Seawater. *Environ. Sci. Technol.*.doi:10.1021/acs.est.8b05083.
- Peng G, Zhu B, Yang D, Su L, Shi H, Li D. 2017. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China. *Environ. Pollut.* 225.doi:10.1016/j.envpol.2016.12.064.
- Perez L, Tobías A, Querol X, Pey J, Alastuey A, Díaz J, Sunyer J. 2012. Saharan

- dust, particulate matter and cause-specific mortality: A case-crossover study in Barcelona (Spain). *Environ. Int.* 48.doi:10.1016/j.envint.2012.07.001.
- Phuong NN, Duong TT, Le TPQ, Hoang TK, Ngo HM, Phuong NA, Pham QT, Doan TO, Ho TC, Da Le N, *et al.* 2022. Microplastics in Asian freshwater ecosystems: Current knowledge and perspectives. *Sci. Total Environ.* 808.doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151989.
- Prata JC. 2018. Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environ. Pollut.* 234:115–126.doi:10.1016/j.envpol.2017.11.043.
- Pravettoni R. 2018. Pathways and fluxes of plastics into the oceans.
- Priscilla V, Sedayu A, Patria MP. 2019. Microplastic abundance in the water, seagrass, and sea hare *Dolabella auricularia* in Pramuka Island, Seribu Islands, Jakarta Bay, Indonesia. Di dalam: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1402.
- Prokić MD, Radovanović TB, Gavrić JP, Faggio C. 2019. Ecotoxicological effects of microplastics: Examination of biomarkers, current state and future perspectives. *TrAC - Trends Anal. Chem.* 111.doi:10.1016/j.trac.2018.12.001.
- Purwiyanto AIS, Prartono T, Riani E, Naulita Y, Cordova MR, Koropitan AF. 2022. The deposition of atmospheric microplastics in Jakarta-Indonesia: The coastal urban area. *Mar. Pollut. Bull.* 174.doi:10.1016/j.marpolbul.2021.113195.
- Purwiyanto AIS, Suteja Y, Trisno, Ningrum PS, Putri WAE, Rozirwan, Agustriani F, Fauziyah, Cordova MR, Koropitan AF. 2020. Concentration and adsorption of Pb and Cu in microplastics: Case study in aquatic environment. *Mar. Pollut. Bull.* 158.doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111380.
- Putra I. 2021. Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) Selama Masa PSBB di DKI Jakarta. *Portal Stat. Sekt. Provinsi DKI Jakarta*.
- Rahmad S, Purba N, Agung M, Yuliadi L. 2019. Karakteristik sampah mikroplastik di Muara Sungai DKI Jakarta. *DEPIK*.doi:10.13170/depik.8.1.12156.
- Rahmayanti R, Adji BK, Nugroho AP. 2022. Microplastic Pollution in the Inlet and Outlet Networks of Rawa Jombor Reservoir: Accumulation in Aquatic Fauna, Interactions with Heavy Metals, and Health Risk Assessment. *Environ. Nat. Resour. J.* 20(2).doi:10.32526/ennrj/20/202100200.
- Rani M, Shim WJ, Jang M, Han GM, Hong SH. 2017. Releasing of hexabromocyclododecanes from expanded polystyrenes in seawater -field and laboratory experiments. *Chemosphere.* 185.doi:10.1016/j.chemosphere.2017.07.042.

- Rios-Mendoza LM, Ontiveros-Cuadras JF, Leon-Vargas D, Ruiz-Fernández AC, Rangel-García M, Pérez-Bernal LH, Sanchez-Cabeza JA. 2021. Microplastic contamination and fluxes in a touristic area at the SE Gulf of California. *Mar. Pollut. Bull.* 170.doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112638.
- Rodrigues D, Antunes J, Otero V, Sobral P, Costa MH. 2020. Distribution Patterns of Microplastics in Seawater Surface at a Portuguese Estuary and Marine Park. *Front. Environ. Sci.*.doi:10.3389/fenvs.2020.582217.
- Ryan PG, Connell AD, Gardner BD. 1988. Plastic ingestion and PCBs in seabirds: Is there a relationship? *Mar. Pollut. Bull.* 19(4).doi:10.1016/0025-326X(88)90674-1.
- Sachoemar SI, Wahjono HD. 2018. Kondisi Pencemaran Lingkungan Perairan Di Teluk Jakarta. *J. Air Indones.* 3(1).doi:10.29122/jai.v3i1.2313.
- Scherer C, Weber A, Stock F, Vurusic S, Egerci H, Kochleus C, Arendt N, Foeldi C, Dierkes G, Wagner M, *et al.* 2020. Comparative assessment of microplastics in water and sediment of a large European river. *Sci. Total Environ.* 738.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139866.
- Schernewski G, Radtke H, Hauk R, Baresel C, Olshammar M, Osinski R, Oberbeckmann S. 2020. Transport and Behavior of Microplastics Emissions From Urban Sources in the Baltic Sea. *Front. Environ. Sci.* 8.doi:10.3389/fenvs.2020.579361.
- Schubel JR. 1982. Estuarine sedimentation. Di dalam: *Beaches and Coastal Geology*. New York: Springer. hlm. 400–402.
- Schwarz AE, Ligthart TN, Boukris E, van Harmelen T. 2019. Sources, transport, and accumulation of different types of plastic litter in aquatic environments: A review study. *Mar. Pollut. Bull.* 143.doi:10.1016/j.marpolbul.2019.04.029.
- Song YK, Hong SH, Jang M, Han GM, Jung SW, Shim WJ. 2017. Combined Effects of UV Exposure Duration and Mechanical Abrasion on Microplastic Fragmentation by Polymer Type. *Environ. Sci. Technol.* 51(8).doi:10.1021/acs.est.6b06155.
- Staples CA, Peterson DR, Parkerton TF, Adams WJ. 1997. The environmental fate of phthalate esters: A literature review. *Chemosphere.* 35(4).doi:10.1016/S0045-6535(97)00195-1.
- Steer M, Cole M, Thompson RC, Lindeque PK. 2017. Microplastic ingestion in fish larvae in the western English Channel. *Environ. Pollut.* 226:250–259.doi:10.1016/j.envpol.2017.03.062.
- Su L, Nan B, Craig NJ, Pettigrove V. 2020. Temporal and spatial variations of microplastics in roadside dust from rural and urban Victoria, Australia: Implications for diffuse pollution. *Chemosphere.* 252.doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126567.

- Suaria G, Avio CG, Lattin G, Regoli F, Aliani S. 2017. Floating Microplastics in the South Adriatic Sea. Di dalam: *Fate and Impact of Microplastics in Marine Ecosystems*. hlm. 51–52.
- Sun X, Liang J, Zhu M, Zhao Y, Zhang B. 2018. Microplastics in seawater and zooplankton from the Yellow Sea. *Environ. Pollut.* 242:585–595.doi:10.1016/j.envpol.2018.07.014.
- Suteja Y, Atmadipoera AS, Riani E, Nurjaya IW, Nugroho D, Cordova MR. 2021. Spatial and temporal distribution of microplastic in surface water of tropical estuary: Case study in Benoa Bay, Bali, Indonesia. *Mar. Pollut. Bull.* 163.doi:10.1016/j.marpolbul.2021.111979.
- Sutrisno AJ, Kaswanto, Hadi Susilo. 2020. Analisis Prediksi dan Hubungan antara Debit Air dan Curah Hujan pada Sungai Ciliwung di Kota Bogor. *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkungan. (Journal Nat. Resour. Environ. Manag.* 10(1).doi:10.29244/jpsl.10.1.25-33.
- Syafei AD, Nurasrin NR, Assomadi AF, Boedisantoso R. 2019. Microplastic Pollution in the Ambient Air of Surabaya, Indonesia. *Curr. World Environ.* 14(2):290–298.doi:10.12944/cwe.14.2.13.
- Takarina ND, Purwiyanto AIS, Rasud AA, Arifin AA, Suteja Y. 2022. Microplastic abundance and distribution in surface water and sediment collected from the coastal area. *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* 8(2):183–196.doi:10.22034/gjesm.2022.02.03.
- Tammaing M, Hengstmann E, Deuke A-K, Fischer EK. 2022. Microplastic concentrations, characteristics, and fluxes in water bodies of the Tollense catchment, Germany, with regard to different sampling systems. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29::11345–11358.doi:10.1007/s11356-021-16106-4/Published.
- Tanaka K, Takada H, Yamashita R, Mizukawa K, Fukuwaka M aki, Watanuki Y. 2013. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Mar. Pollut. Bull.* 69(1–2).doi:10.1016/j.marpolbul.2012.12.010.
- Teuten EL, Saquing JM, Knappe DRU, Barlaz MA, Jonsson S, Björn A, Rowland SJ, Thompson RC, Galloway TS, Yamashita R, *et al.* 2009. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364(1526).doi:10.1098/rstb.2008.0284.
- Tibbetts J, Krause S, Lynch I, Smith GHS. 2018. Abundance, distribution, and drivers of microplastic contamination in urban river environments. *Water (Switzerland)*. 10(11).doi:10.3390/w10111597.
- Tien CJ, Wang ZX, Chen CS. 2020. Microplastics in water, sediment and fish from the Fengshan River system: Relationship to aquatic factors and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fish. *Environ. Pollut.* 265.doi:10.1016/j.envpol.2020.114962.

- TomTom International. 2020. Traffic Index Ranking.
- Vandermeersch G, Van Cauwenberghe L, Janssen CR, Marques A, Granby K, Fait G, Kotterman MJJ, Diogène J, Bekaert K, Robbens J, *et al.* 2015. A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms. *Environ. Res.* 143:46–55.doi:10.1016/j.envres.2015.07.016.
- Verschoor A, de Poorter L, Dröge R, Kuenen J, de Valk E. 2016. Emission of microplastics and potential mitigation measures.
- Vianello A, Boldrin A, Guerriero P, Moschino V, Rella R, Sturaro A, Da Ros L. 2013. Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 130.doi:10.1016/j.ecss.2013.03.022.
- Vogelsang C, Lusher AL, Dadkhah ME, Sundvor I, Umar M, Ranneklev SB, Eidsvoll D, Meland S. 2019. *Microplastics in road dust – characteristics, pathways and measures.*
- Wagner M, Scherer C, Alvarez-Muñoz D, Brennholt N, Bourrain X, Buchinger S, Fries E, Grosbois C, Klasmeier J, Marti T, *et al.* 2014. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environ. Sci. Eur.* 26(1).doi:10.1186/s12302-014-0012-7.
- Wagner S, Klöckner P, Stier B, Römer M, Seiwert B, Reemtsma T, Schmidt C. 2019. Relationship between Discharge and River Plastic Concentrations in a Rural and an Urban Catchment. *Environ. Sci. Technol.* 53(17).doi:10.1021/acs.est.9b03048.
- Wang T, Li B, Zou X, Wang Y, Li Y, Xu Y, Mao L, Zhang C, Yu W. 2019. Emission of primary microplastics in mainland China: Invisible but not negligible. *Water Res.* 162:214–224.doi:10.1016/j.watres.2019.06.042.
- Wang X, Li C, Liu K, Zhu L, Song Z, Li D. 2019. Atmospheric microplastic over the South China Sea and East Indian Ocean: abundance, distribution and source. *J. Hazard. Mater.*:121846.doi:10.1016/j.jhazmat.2019.121846.
- Wicaksono EA, Tahir A, Werorilangi S. 2020. Preliminary study on microplastic pollution in surface-water at Tallo and Jeneberang Estuary, Makassar, Indonesia. *AAFL Bioflux.* 13(2):902–909.
- Wicaksono EA, Werorilangi S, Galloway TS, Tahir A. 2021. Distribution and seasonal variation of microplastics in tallo river, makassar, eastern indonesia. *Toxics.* 9(6).doi:10.3390/toxics9060129.
- Willis KA, Eriksen R, Wilcox C, Hardesty BD. 2017. Microplastic distribution at different sediment depths in an urban estuary. *Front. Mar. Sci.* 4(DEC).doi:10.3389/fmars.2017.00419.
- Wright SL, Ulke J, Font A, Chan KLA, Kelly FJ. 2020. Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport.

- Environ. Int.* 136:105411.doi:10.1016/j.envint.2019.105411.
- Wu N, Zhang Y, Zhang X, Zhao Z, He J, Li W, Ma Y, Niu Z. 2019. Occurrence and distribution of microplastics in the surface water and sediment of two typical estuaries in Bohai Bay, China. *Environ. Sci. Process. Impacts*..doi:10.1039/c9em00148d.
- Xia F, Yao Q, Zhang J, Wang D. 2021. Effects of seasonal variation and resuspension on microplastics in river sediments. *Environ. Pollut.* 286.doi:10.1016/j.envpol.2021.117403.
- Xu Q, Xing R, Sun M, Gao Y, An L. 2020. Microplastics in sediments from an interconnected river-estuary region. *Sci. Total Environ.* 729.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139025.
- Yan M, Wang L, Dai Y, Sun H, Liu C. 2021. Behavior of Microplastics in Inland Waters: Aggregation, Settlement, and Transport. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 107(4).doi:10.1007/s00128-020-03087-2.
- Ye X, Wang P, Wu Y, Zhou Y, Sheng Y, Lao K. 2020. Microplastic acts as a vector for contaminants: the release behavior of dibutyl phthalate from polyvinyl chloride pipe fragments in water phase. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27(33).doi:10.1007/s11356-020-10136-0.
- Yonkos LT, Friedel EA, Perez-Reyes AC, Ghosal S, Arthur CD. 2014. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, U.S.A. *Environ. Sci. Technol.* 48(24):14195–14202.doi:10.1021/es5036317.
- Yu F, Yang C, Zhu Z, Bai X, Ma J. 2019. Adsorption behavior of organic pollutants and metals on micro/nanoplastics in the aquatic environment. *Sci. Total Environ.* 694:133643.doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133643.
- Yuan Z, Nag R, Cummins E. 2022. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment - From marine to food systems. *Sci. Total Environ.* 823:153730.doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153730.
- Yudo S. 2007. Kondisi Pencemaran Perairan Teluk Jakarta. *J.Hidrosfir.* 2(3):115–124.
- Yudo S. 2010. Kondisi Kualitas Air Sungai Ciliwung Di Wilayah DKI Jakarta Ditinjau Dari Parameter Organik, Amoniak, Fosfat, Deterjen Dan Bakteri Coli. *J. Air Indones.* 6(1):34–42.doi:https://doi.org/10.29122/jai.v6i1.2452.
- Zakharenko AM, Golokhvast KS. 2019. Analysis of phthalate ester content in polyvinylchloride construction plastics by Raman spectroscopy. Di dalam: *Key Engineering Materials*. Vol. 806 KEM.
- Zhang GS, Liu YF. 2018. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Sci. Total Environ.* 642:12–20.doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.004.
- Zhang K, Gong W, Lv J, Xiong X, Wu C. 2015. Accumulation of floating

- microplastics behind the Three Gorges Dam. *Environ. Pollut.* 204:117–123.doi:10.1016/j.envpol.2015.04.023.
- Zhang Y, Gao T, Kang S, Sillanpää M. 2019. Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas. *Environ. Pollut.* 254:112953.doi:10.1016/j.envpol.2019.07.121.
- Zhang Y, Kang S, Allen S, Allen D, Gao T, Sillanpää M. 2020. Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth-Science Rev.* 203:103118.doi:10.1016/j.earscirev.2020.103118.
- Zhang Z, Wu H, Peng G, Xu P, Li D. 2020. Coastal ocean dynamics reduce the export of microplastics to the open ocean. *Sci. Total Environ.* 713.doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136634.
- Zhang ZM, Zhang HH, Zou YW, Yang GP. 2018. Distribution and ecotoxicological state of phthalate esters in the sea-surface microlayer, seawater and sediment of the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Environ. Pollut.* 240.doi:10.1016/j.envpol.2018.04.056.
- Zhao S, Wang T, Zhu L, Xu P, Wang X, Gao L, Li D. 2019. Analysis of suspended microplastics in the Changjiang Estuary: Implications for riverine plastic load to the ocean. *Water Res.* 161.doi:10.1016/j.watres.2019.06.019.
- Zhao W, Huang W, Yin M, Huang P, Ding Y, Ni X, Xia H, Liu H, Wang G, Zheng H, *et al.* 2020. Tributary inflows enhance the microplastic load in the estuary: A case from the Qiantang River. *Mar. Pollut. Bull.*.doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111152.
- Zhou Q, Tian C, Luo Y. 2017. Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere. *Kexue Tongbao/Chinese Sci. Bull.* 62(33):3902–3909.doi:10.1360/N972017-00956.

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Waingapu – Nusa Tenggara Timur pada tanggal 12 Maret 1983 sebagai anak bungsu (ketiga) dari pasangan bapak Sunaryo Purwiyanto dan ibu Farida Hanim. Penulis menempuh pendidikan sarjana di Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro - Semarang, dan lulus pada tahun 2005. Pada saat wisuda, penulis dianugerahi sebagai lulusan cumlaude dengan IPK 3,56. Tahun 2009, penulis diterima sebagai mahasiswa program magister (S-2) di Program Studi Ilmu Kelautan pada Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor dan menamatkannya pada tahun 2011. Pada tahun 2019 penulis diberikan kesempatan untuk melanjutkan studi ke program doktor pada program studi Ilmu Kelautan Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor dengan skema Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN) yang diperoleh dari Kementrian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi (RISTEKDIKTI) yang sekarang berubah menjadi Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan (KEMENDIKBUD). Penulis bekerja sebagai tenaga pendidik di Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya - Palembang sejak tahun 2006-seakrang.

Selama mengikuti program S-3, Penulis aktif mempublikasikan berbagai karya ilmiah baik di jurnal ilmiah maupun artikel populer pada media cetak elektronik. Karya ilmiah berjudul *The Deposition of Atmospheric Microplastics in Jakarta-Indonesia: The Coastal Urban* yang dipublikasi di jurnal *Marine Pollution Bulletin* (Q1; SJR 1,55; H Indek 179) tahun 2021. Tahun 2002, jurnal tersebut berhasil penulis sajikan dalam bentuk artikel populer di pada media Kumparan dan Gatra. Pada tahun yang sama, Penulis mempublikasikan tulisan kedua di *Marine Pollution Bulletin* dengan judul *The contribution of muara sungaies to the abundance of microplastics in Jakarta Bay, Indonesia*. Karya-karya ilmiah tersebut merupakan bagian dari program S-3 penulis.