
**Identifikasi Mikroplastik Udara Ambien 18 Kabupaten/Kota
di Indonesia pada Mei-Juli 2025**

Rafika Aprilianti^{1✉}, Prigi Arisandi¹, Joni Aswira Putra^{2,3}, Noura Arifin²,
& Khusnatul Khomsah¹

¹Ecoton Foundation

²Society of Indonesian Environmental Journalists

³Universitas Indonesia

ABSTRAK

Mikroplastik telah menjadi ancaman baru bagi kualitas udara di Indonesia seiring meningkatnya aktivitas manusia dan penggunaan plastik sekali pakai. Partikel ini berukuran sangat kecil dan dapat terhirup hingga ke saluran pernapasan manusia. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik mikroplastik udara di berbagai kota di Indonesia. Metode yang digunakan adalah deposisi pasif menggunakan cawan petri pada ketinggian setara pernapasan dengan analisis laboratorium berbasis mikroskopi dan FTIR. Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk menentukan variasi jenis, ukuran, warna, dan polimer mikroplastik. Hasil menunjukkan variasi kelimpahan antar wilayah dengan dominasi fragmen berwarna hitam dan polimer seperti PTFE, nylon, dan polyester yang berasal dari pembakaran sampah, transportasi, serta tekstil. Sehingga sangat dibutuhkan adanya pembatasan plastik sekali pakai dan penguatan ruang hijau untuk menekan pencemaran mikroplastik udara.

Kata kunci: Mikroplastik, Polimer, FTIR, Urban, Inhalasi

**Identification of Ambient Airborne Microplastics in 18 Regencies/Cities
in Indonesia during May–July 2025**

ABSTRACT

Microplastics have emerged as a new threat to air quality in Indonesia, driven by increasing human activities and the widespread use of single-use plastics. These particles are extremely small and can be inhaled into the human respiratory tract. This study aims to identify the characteristics of airborne microplastics in various Indonesian cities. The method used was passive deposition using petri dishes placed at breathing height, followed by laboratory analysis with microscopy and FTIR. Data were analyzed descriptively and quantitatively to determine the variations in type, size, color, and polymer composition of microplastics. The results revealed spatial variation in abundance, with black fragments dominating and polymers such as PTFE, nylon, and polyester originating from open waste burning, transportation, and textile activities. Therefore, restricting single-use plastics and strengthening urban green spaces are essential to reduce airborne microplastic pollution.

Keywords: microplastic, polymer, FTIR, urban, inhalation

PENDAHULUAN

Indonesia kini menghadapi tantangan besar dalam menjaga kualitas udaranya. Konsentrasi partikel halus PM 2.5 yakni partikel berukuran sangat kecil ukuran 2.5 mm yang bisa masuk hingga ke paru-paru terus meningkat dan melebihi batas aman yang ditetapkan WHO yaitu $\leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Data IQAir menunjukkan bahwa kualitas udara di Indonesia mengkhawatirkan dalam dua tahun terakhir. Rata-rata tahunan PM 2.5 untuk Jakarta tercatat $43,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 2023 dan $41,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 2024, di kedua tahun ini, kadar rata-rata PM 2.5 Jakarta 8-9 kali lipat dari batas

✉ Corresponding author
Address : Lumajang, Jawa Timur
Email : rafikaprilianti99@gmail.com

aman $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Di tingkat nasional, Indonesia mencatat rata-rata tahunan PM $2.5 \approx 37,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 2023 dan $\approx 35,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada 2024, menjadikan Indonesia peringkat ke-15 negara dengan kualitas udara terburuk pada 2024 (Hasan, 2025). Pada Mei 2025, situasi ini mencapai titik mengkhawatirkan ketika indeks kualitas udara (AQI) Jakarta menembus angka 154, masuk kategori tidak sehat, dengan konsentrasi PM 2.5 sekitar $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Selain emisi yang berasal dari sektor transportasi dan industri yang menjadi perhatian utama, salah satu sumber pencemaran udara yang sering diabaikan di Indonesia ialah pembakaran sampah plastik secara terbuka. Praktik tersebut masih banyak dilakukan di berbagai daerah karena dianggap sebagai cara yang mudah dan cepat untuk mengurangi timbunan sampah. 57% rumah tangga di Indonesia masih membakar sampah secara terbuka (Ahdiat, 2024). Proses ini menghasilkan emisi partikulat halus (PM 2.5), karbon hitam (*black carbon*), serta senyawa toksik seperti dioksin, furan, dan *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAH) yang bersifat karsinogenik (Ramadan et al., 2023; Zubair & Adrees, 2019). Selain itu, pembakaran plastik juga menimbulkan mikroplastik yang dapat terdispersi ke atmosfer dan berpotensi terhirup oleh manusia dan dapat mengganggu kesehatan manusia, termasuk gangguan pernapasan dan peningkatan risiko penyakit kronis (Hess et al., 2025; Pathak et al., 2023). Kondisi tersebut diperburuk oleh keterbatasan fasilitas pengelolaan sampah serta infrastruktur pengolahan limbah di Indonesia, sehingga praktik pembakaran terbuka masih menjadi kebiasaan umum di permukiman dan daerah pinggiran kota.

Dalam konteks pencemaran udara, mikroplastik kini diidentifikasi sebagai komponen baru yang turut memperburuk kualitas udara perkotaan. Partikel berukuran kurang dari 5 milimeter ini telah ditemukan melayang di atmosfer dalam berbagai bentuk, seperti serat, fragmen, dan busa, dengan

polimer antara lain poliester (PES), polietilena (PE), dan polistirena (PS) (Le et al., 2023). Hasil pemantauan menunjukkan bahwa mikroplastik dapat terakumulasi dalam fraksi PM 2.5 dengan konsentrasi hingga 1,4 partikel per meter kubik, menandakan potensi kontribusinya terhadap pencemar udara halus (Rao et al., 2025).

Secara fisik, paparan mikroplastik melalui inhalasi terbukti menimbulkan respons inflamasi, stres oksidatif, dan kerusakan jaringan paru, serta berpotensi menyebar ke organ lain seperti hati dan sistem imun (Prata, 2018; Y.-L. Wang et al., 2025). Bukti ilmiah ini menunjukkan bahwa mikroplastik telah menjadi kontaminan atmosferik yang bersifat biologis reaktif, dengan implikasi serius bagi kesehatan manusia. Oleh karena itu, pengendalian sumber mikroplastik di udara perlu mendapat perhatian seimbang dengan upaya pengurangan partikulat halus dan emisi kimia berbahaya lainnya.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik telah menjadi komponen signifikan dalam udara ambien di berbagai wilayah dengan variasi konsentrasi yang mencolok. Studi di Dataran Tinggi Tibet melaporkan konsentrasi rata-rata $4,07 \pm 2,37$ partikel/ m^3 , didominasi fragmen berukuran $< 50 \mu\text{m}$ (Luo et al., 2025), sedangkan di Taiwan nilai tertinggi mencapai 0,26 partikel/ m^3 pada area lalu lintas padat (Hsu et al., 2025). Pengamatan di lokasi pegunungan Jepang juga menemukan mikroplastik dalam air awan di ketinggian 1 300–3 776 m dengan polimer utama PE, PP, dan PET (Y. Wang et al., 2023). Secara global, konsentrasi mikroplastik di udara dilaporkan berkisar < 1 hingga $> 1\,000$ partikel/ m^3 , dengan deposisi mencapai 1 357 partikel/ m^2 /hari di wilayah perkotaan padat (Han et al., 2024; O'Brien et al., 2023). Secara keseluruhan, temuan-temuan ini menegaskan bahwa mikroplastik telah tersebar luas di udara, dengan dominasi bentuk serat dan fragmen berukuran mikron yang berpotensi berperan sebagai

pencemar udara global baru.

Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi mikroplastik yang ada di udara ambien di 18 kota di Indonesia, meliputi karakterisasi jenis, warna, polimer penyusunnya, dan aktivitas manusia penyebabnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai paparan mikroplastik di udara perkotaan Indonesia dan menjadi dasar bagi kebijakan pengendalian pencemaran udara berbasis bukti ilmiah.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan diambil pada Bulan Mei-Juli 2025. Pemilihan periode Mei-Juli sebagai waktu pengambilan sampel dilakukan karena pada rentang bulan tersebut Indonesia umumnya berada pada masa peralihan menuju atau berada dalam musim kemarau, di mana curah hujan relatif rendah dan kondisi atmosfer cenderung lebih stabil. Hal ini memungkinkan partikel mikroplastik di udara bertahan lebih lama tanpa terlarut atau terendapkan oleh hujan, sehingga konsentrasi di udara ambien dapat terukur dengan lebih representatif. Selain itu, aktivitas manusia di luar ruangan, seperti transportasi, industri, dan pembakaran terbuka, biasanya meningkat pada periode ini, yang berpotensi berkontribusi terhadap mikroplastik di udara. Dengan demikian, pemilihan waktu tersebut dianggap ideal untuk

memperoleh gambaran yang jelas mengenai tingkat paparan mikroplastik di udara ambien.

Penelitian dilakukan di 14 provinsi dan 5 pulau di Indonesia, dengan memperhatikan variasi tipologi wilayah yakni urban padat, semi-perkotaan, pinggiran kota, dan lingkungan pendidikan yang digambarkan di Gambar 1. Setiap provinsi dipilih 1-3 kabupaten/kota sebagai lokasi pengambilan sampel. Setiap lokasi dilakukan 3 kali pengulangan dengan titik yang berbeda. Lokasi pengambilan sampel diantaranya adalah Kabupaten Aceh Utara, Kota Palembang, Kota Jambi, Jakarta Pusat, Jakarta Selatan, Kota Bandung, Kota Semarang, Kota Surakarta/Solo, Kota Surabaya, Kabupaten Sidoarjo, Kota Malang, Kota Denpasar, Kabupaten Gianyar, Kota Kupang, Kota Sumbawa, Kota Pontianak, Kota Palu, dan Kabupaten Bulukumba.

Pengambilan sampel dilakukan dengan berbasis deposisi pasif dengan cara sebagai berikut: 1) menentukan lokasi representatif di tiap kota berdasarkan lalu lintas, aktivitas manusia, dan sumber polusi plastik, 2) meletakkan cawan petri kaca di ketinggian 1-1,5 m (zona pernapasan manusia), terlindung dari gangguan langsung, 3) memasang kertas Whatman yang dibasahi aquades steril di dalam cawan petri, 4) membiarkan cawan terbuka selama 2 jam untuk menangkap partikel mikroplastik melalui deposisi alami, 5) menutup dan mengemas cawan



Sumber: Data Primer Diolah, (2025)

Gambar 1
Peta Lokasi Penelitian

secara steril untuk mencegah kontaminasi, dan 6) mengulang langkah 1-5 untuk 2 titik pengulangan lainnya.

Seluruh pengambilan sampel dilakukan pada ketinggian $\pm 1-1,5$ meter dari permukaan tanah, setara dengan tinggi saluran pernapasan rata-rata orang dewasa di Indonesia. Penempatan ini sangat penting secara ilmiah karena memungkinkan pengukuran konsentrasi mikroplastik yang benar-benar relevan dengan paparan manusia sehari-hari. Partikel mikroplastik yang berukuran $<100 \mu\text{m}$ berpotensi masuk ke saluran pernapasan, dan partikel yang lebih kecil ($<10 \mu\text{m}$) dapat mencapai alveoli paru-paru. Pada ketinggian ini, udara mengandung partikel yang dilepaskan langsung dari sumber seperti lalu lintas, aktivitas manusia, pembakaran terbuka, dan degradasi material plastik di lingkungan. Pemilihan ketinggian ini mengikuti prinsip monitoring kualitas udara yang digunakan pada pengukuran PM_{2.5} dan PM₁₀ oleh WHO dan berbagai badan lingkungan internasional.

Kemudian setiap sampel dianalisis di laboratorium ECOTON guna identifikasi jenis mikroplastik yang ditemukan menggunakan mikroskop stereo. Jumlah mikroplastik yang didapatkan dihitung dari penjumlahan perolehan mikroplastik dari 3 stasiun pada tiap lokasi. Dalam penelitian ini, media penangkap berupa kertas filter Whatman yang dipasang dalam cawan petri berdiameter 9 cm digunakan untuk mengumpulkan partikel dari udara bebas secara pasif. Luas penampang efektif dihitung berdasarkan rumus luas lingkaran sebagai berikut:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (1)$$

Dimana A adalah luas lingkaran, π adalah rasio antara keliling lingkaran dengan diameter yang dimiliki, serta r adalah jari-jari lingkaran yang menghasilkan luas area sekitar $0,00636 \text{ m}^2$. Seluruh pengambilan sampel dilakukan selama 2 jam tiap stasiun pada tiap lokasi, dan perolehan nilai dinyatakan dalam satuan partikel.

Protokol kendali mutu diterapkan

ketat untuk mencegah kontaminasi silang. Seluruh alat yang bersentuhan dengan sampel disterilisasi menggunakan aquades steril dan disimpan tertutup. Kontrol blanko disiapkan sebelum analisis, dan hanya sampel dengan blanko nol yang dianalisis. Identifikasi awal dilakukan secara mikroskopik berdasarkan warna, bentuk, panjang, dan kilap, lalu dikonfirmasi dengan FTIR. Semua sampel diperiksa silang oleh dua analis independen, dan hanya partikel dengan kesesuaian identifikasi $>90\%$ yang dihitung, memastikan partikel tersebut benar-benar mikroplastik.

Setelah itu, data dianalisis secara deskriptif kuantitatif menggambarkan karakteristik mikroplastik yang ditemukan, meliputi jumlah partikel, jenis, warna dan jenis polimer pada setiap lokasi pengambilan sampel. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi variasi antar kota, serta mengaitkannya dengan faktor lingkungan dan aktivitas manusia di wilayah tersebut. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi serta memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai kondisi pencemaran mikroplastik di udara ambien Indonesia.

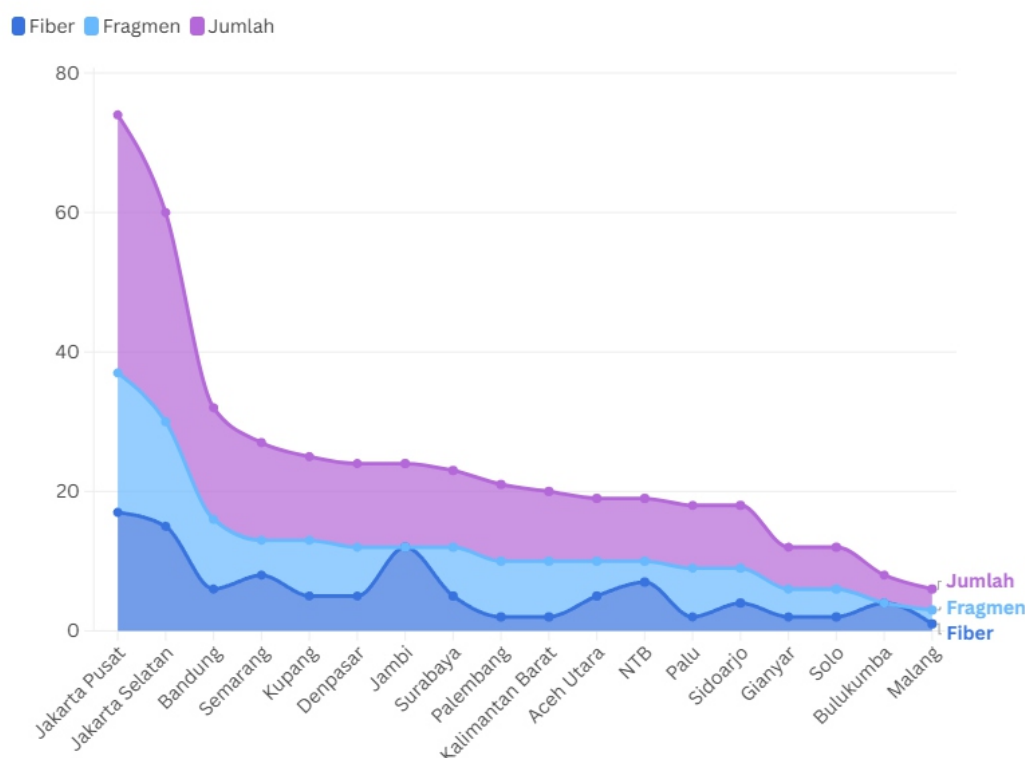
HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Ukuran, Jenis, dan Jumlah Mikroplastik

Berdasarkan hasil analisis data jumlah mikroplastik udara yang dikumpulkan pada periode Mei-Juli 2025 dari berbagai provinsi di Indonesia, terlihat variasi yang signifikan antar lokasi, baik dari segi jumlah partikel, jenis mikroplastik, maupun faktor lingkungan yang memengaruhi distribusinya. Pengukuran ini menggunakan satuan partikel, yang menunjukkan seberapa banyak partikel melewati area tertentu setiap jamnya seperti yang digambarkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, rentang ukuran mikroplastik yang ditemukan secara keseluruhan adalah $0.02-1.72 \text{ mm}$. Jumlah mikroplastik tertinggi

Temuan Mikroplastik di Udara Indonesia pada Mei-Juli 2025



Sumber: Data Primer Diolah, (2025)

Gambar 2

Grafik Jenis dan Jumlah Mikroplastik Udara di Indonesia

ditemukan di Jakarta Pusat dengan nilai 37 partikel dalam 2 jam. Nilai ini dihitung dari jumlah partikel yang tertangkap oleh alat penangkap udara pasif. Titik-titik sampling di lokasi ini mencakup Pasar Tanah Abang, Jalan Katedral Sawah Besar, dan Kawasan Ragunan. Pasar Tanah Abang adalah pusat perdagangan tekstil terbesar di Asia Tenggara, dengan intensitas lalu lintas kendaraan bermotor yang luar biasa tinggi, baik kendaraan pribadi, angkutan umum, maupun kendaraan logistik. Aktivitas bongkar muat barang, penggunaan plastik sekali pakai dalam kemasan, dan interaksi ribuan orang setiap hari menciptakan kondisi ideal untuk pelepasan mikroplastik ke udara. Fragmen plastik dapat berasal dari kantong belanja, pembungkus barang, maupun sisa material kemasan, sedangkan fiber dilepaskan dari pakaian berbahan sintetis yang didistribusikan dan dipajang di pasar. Jalan Katedral, meskipun lebih tenang dibanding Tanah Abang, tetap

memiliki lalu lintas padat dan aktivitas wisata ke ikon ibadah besar yang menambah sumber partikel dari gesekan ban dan rem. Jumlah rata-rata mikroplastik tertinggi kedua ditemukan di Jakarta Selatan, dengan konsentrasi 30 partikel dalam 2 jam pengambilan sampel. Titik sampling berada di Stasiun KRL Manggarai, Stasiun KRL Tanjung Barat, dan Pasar Kebayoran tiga kawasan dengan mobilitas tinggi, lalu lintas padat, dan aktivitas ekonomi yang berlangsung sepanjang hari. Manggarai merupakan simpul transportasi utama dengan kepadatan penumpang dan aktivitas konstruksi yang memicu pelepasan mikroplastik dari gesekan rem, ban, serta komponen plastik infrastruktur. Tanjung Barat berada di koridor padat kendaraan dan permukiman, di mana emisi lalu lintas serta abrasi bahan sintetis dari pakaian dan plastik rumah tangga memperkaya mikroplastik udara. Sementara Pasar Kebayoran, sebagai pusat niaga tradisional, berpotensi menyumbang

menyumbang mikroplastik dari proses degradasi kemasan plastik, debu jalanan, dan pembakaran sampah terbuka.

Sebaliknya, Jumlah terendah dicatat di Kota Malang dengan 2 partikel dalam 2 jam pengambilan. Lokasi sampling meliputi Dusun Lowok, Dusun Jatirejo, dan Kelurahan Kiduldalem. Dusun Lowok berada di area pedesaan dengan dominasi sawah, kebun tebu, dan vegetasi alami. Lalu lintas sangat minim, dan tidak ada aktivitas pembakaran sampah di sekitar titik sampling. Dusun Jatirejo memiliki pola penggunaan lahan serupa, dengan vegetasi rimbun yang berfungsi sebagai penangkap partikel mikroplastik. Kelurahan Kiduldalem, meskipun berada di area permukiman, memiliki aktivitas industri yang nyaris tidak ada, sehingga sumber emisi mikroplastik sangat terbatas.

Jumlah mikroplastik terendah kedua ditemukan di Kabupaten Bulukumba Sulawesi Selatan dengan 2 partikel dalam 2 jam. Pengambilan sampel dilakukan di Bulukumba Desa Batu Karopa, Bulukumba Anrang, dan Bundaran Pinisi. Area ini didominasi aktivitas nelayan dan rumah tangga, dengan sumber mikroplastik utama berasal dari degradasi jaring dan tali kapal. Lalu lintas kendaraan rendah dan jarak yang jauh dari industri besar mengurangi jumlah partikel di udara. Selain itu, angin laut yang kencang cenderung membawa partikel menjauh dari lokasi sampling sebelum terdeteksi.

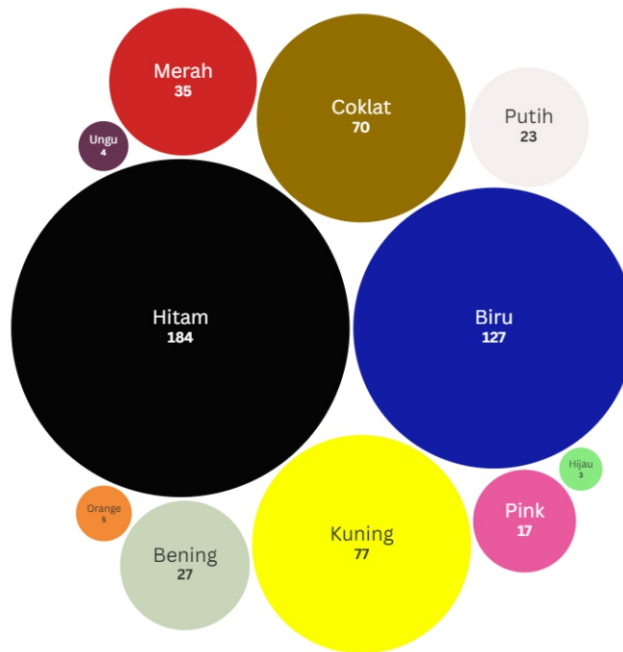
Jika diasumsikan seseorang menghirup sekitar 500 liter udara per jam saat beraktivitas ringan, maka dalam waktu 2 jam volume udara yang masuk ke saluran pernapasan mencapai 1.000 liter atau 1 m³. Berdasarkan hasil pengukuran di kota besar seperti Jakarta, tingkat paparan mikroplastik di udara mencapai sekitar 37 partikel per m³. Artinya, seseorang berpotensi terpapar jumlah yang sama dengan setiap 2 jam bernapas di lingkungan terbuka. Dengan perkiraan konservatif bahwa 0,5–1% partikel di udara ambien dapat terhirup dan bertahan dalam saluran napas, maka

jumlah mikroplastik yang mungkin masuk ke tubuh manusia berkisar antara 0,2 hingga 0,4 partikel setiap 2 jam, atau sekitar 2–5 partikel per hari bagi individu yang beraktivitas di luar ruangan selama 10 jam.

Jika diasumsikan seseorang bernapas sekitar 500 liter udara per jam saat beraktivitas ringan, maka di Kota Malang dengan tingkat paparan mikroplastik sebesar 8 partikel/m³ udara yang dihirup mengandung sekitar 4 partikel mikroplastik setiap jamnya. Dengan mempertimbangkan bahwa hanya 0,5–1% partikel di udara yang benar-benar masuk dan terdeposit di saluran pernapasan, maka jumlah mikroplastik yang dapat mencapai saluran napas diperkirakan sekitar 0,02–0,04 partikel per jam, atau sekitar 0,16–0,32 partikel per hari jika seseorang beraktivitas selama 8 jam.

Meskipun mikroplastik saat ini belum ada baku mutu secara nasional, namun terdapat penelitian oleh Mehinto et al., (2022) toksisitas mikroplastik yang membuktikan bahwa di angka 0.5 to 35 particles/L menyebabkan pengurangan asupan nutrisi, pertumbuhan terhambat, dan penurunan kondisi fisiologis. Sincihu et al., (2022) juga membuktikan bahwa 45 partikel mikroplastik dalam 1 cc darah menyebabkan kerusakan DNA. Dari seluruh lokasi, fragmen menjadi bentuk paling dominan (57,67%), diikuti fiber (50,09%), dan film (0,36%). Fragmen umumnya berasal dari degradasi plastik keras seperti botol minuman, peralatan rumah tangga, material konstruksi, serta komponen kendaraan. Fiber banyak ditemukan di area perdagangan tekstil, permukiman padat, dan kawasan pesisir yang menggunakan jaring atau tali sintetis. Sementara film berasal dari plastik tipis sekali pakai seperti kantong belanja dan pembungkus makanan, yang massanya ringan dan mudah terbawa angin.

Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan kelimpahan mikroplastik udara di Indonesia sangat dipengaruhi oleh kombinasi kepadatan aktivitas



Sumber: Data Primer Diolah, (2025)

Gambar 3

Warna Mikroplastik Udara yang Teridentifikasi

manusia, tipe penggunaan lahan, dan keberadaan vegetasi. Kota besar dengan aktivitas ekonomi tinggi seperti Jakarta menjadi hotspot utama, sementara daerah semi-rural seperti Malang dan pesisir Kabupaten Bulukumba lebih terlindungi. Penempatan titik sampling di ketinggian setara pernapasan memperkuat relevansi data untuk penilaian risiko kesehatan. Paparan tinggi terhadap fragmen dan fiber di udara perlu diwaspadai mengingat sifatnya yang dapat membawa senyawa kimia berbahaya dan memasuki sistem pernapasan manusia. Temuan ini dapat menjadi dasar kebijakan pengendalian polusi mikroplastik udara, baik melalui pengurangan plastik sekali pakai, pengaturan emisi kendaraan, maupun penguatan ruang hijau di perkotaan.

Mikroplastik ini memiliki berbagai warna sesuai dengan sumber plastik yang ada. Dalam kasus mikroplastik udara di Indonesia, terdapat 11 warna yang ditemukan seperti pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3, diketahui bahwa mayoritas mikroplastik adalah berwarna hitam. Warna terbanyak kedua adalah biru, kemudian ada kuning dan

coklat. Dominasi warna gelap seperti hitam dan biru mengindikasikan bahwa sumber utama mikroplastik kemungkinan berasal dari aktivitas manusia yang melibatkan bahan sintesis berpigmen kuat, seperti abrasi ban kendaraan, serpihan serat tekstil, atau residu pembakaran plastik. Sementara itu, warna lain seperti merah, putih, bening, dan pink muncul dalam jumlah sedang, sedangkan ungu, hijau, dan oranye terdeteksi dalam jumlah sangat sedikit. Variasi warna ini mencerminkan keberagaman sumber mikroplastik di udara, mulai dari limbah rumah tangga, bahan pewarna tekstil, hingga plastik kemasan.

Penelitian ini sejalan dengan Pradana (2023) yang mengungkapkan bahwa warna mikroplastik yang ditangkap dari udara sekitar TPST Piyungan, Yogyakarta didominasi oleh warna hitam. Di wilayah Yogyakarta lain, mulai dari jalan raya, TPA, dan pemukiman juga didominasi oleh mikroplastik warna hitam (Ardiyanta et al., 2024; Maharani, 2023; Nashrullaah, 2024). Artinya terlepasnya mikroplastik dari jalan atau pembakaran sampah.

Tabel 1
Identifikasi Polimer Mikroplastik Udara di Indonesia

Lokasi	Jenis Polimer Dominan	Pita Serapan Khas (cm ⁻¹)
Kupang	Polytetrafluoroethylene (PTFE)	1200–1100 (C–F stretching), ~800 (C–F bending)
Jakarta Pusat	PTFE	1200–1100, ~800
Palu	PTFE	1200–1100, ~800
Surabaya	PTFE	1200–1100, ~800
Bulukumba	Polyamide (Nylon)	~3300 (N–H), ~1630 (Amide I), ~1530 (Amide II)
Malang	Polyamide (Nylon)	3300, 1630, 1530
Jambi	Polyamide (Nylon)	3300, 1630, 1530
Palembang	Epoxy resin berbasis Bisphenol A (BPA)	1509 (C=C aromatik), 1240 (C–O–C epoxy), ~830 (C–H aromatik)
Sidoarjo	Poli etilena (PE), Polipropilena (PP)	2920, 2849, 1646, 1026
Surakarta	Poliester (PET)	1715, 1239
Surabaya	Poliester dan Poliamida (Nylon)	1722, 1241, 1321
Aceh Utara (Jl. Medan)	Polyisobutylene (Karet sintetis)	1377, 823
KRL Manggarai (Jakarta Selatan)	Polyisobutylene (Karet sintetis)	1377, 823
Jl. Fachrudin (Jakarta Pusat)	Campuran Poliester & Poliolefin	3300 (O–H broad), 2920
Jl. Mahendradatta (Denpasar, Bali)	Campuran Poliester & Poliolefin	3300, 2920
Pasar Kebayoran Lama (Jakarta Selatan)	Silika / Mineral	1090–1010
Bulukumba (Titik 3)	Poli ester	1715, 1240
Semarang Tengah Kota	Poliolefin (PE, PP)	2920, 2849
Pontianak (Tugu Khatulistiwa)	Silika dominan, jejak kecil Poliolefin	1168, 968, 2920, 2850

Sumber: Data Primer Diolah, 2025

Identifikasi Jenis Polimer Mikroplastik
Hasil analisis FTIR pada sampel udara yang dikumpulkan dari berbagai lokasi di Indonesia menunjukkan keberadaan beragam jenis polimer, Polimer-polimer ini memiliki karakteristik kimia yang khas dan dapat diidentifikasi melalui puncak serapan inframerah spesifik pada kisaran gelombang tertentu seperti pada Tabel 1.

Polytetrafluoroethylene (PTFE) terdeteksi di Kupang, Jakarta Pusat, Palu, dan Taman Jangkar Surabaya, dengan tingkat kemiripan spektrum tinggi terhadap referensi PTFE fiberglass. Ciri khas utamanya muncul pada puncak kuat 1200–1100 cm⁻¹ (C–F stretching) dan ~800 cm⁻¹ (C–F bending). Temuan ini menunjukkan adanya sumber dari bahan

plastik tahan panas yang banyak digunakan pada kabel listrik, lapisan anti lengket, filter industri, dan komponen mesin. PTFE bersifat sangat stabil dan sulit terurai, sehingga partikel yang terlepas ke udara dapat bertahan lama dan menumpuk di lingkungan (Piwowarczyk et al., 2019).

Polyamide (nylon) juga teridentifikasi di Bulukumba, Malang, dan Jambi. Puncak khasnya, yaitu ~3300 cm⁻¹ (N–H stretching), ~1630 cm⁻¹ (amide I), dan ~1530 cm⁻¹ (amide II), mengindikasikan asal dari serat sintetis, jaring ikan, komponen otomotif, atau debu pakaian sintetis. Kehadiran polyamide di udara kemungkinan kuat berkaitan dengan aktivitas industri dan perkotaan yang menggunakan atau memproduksi

tekstil serta plastik teknik (Ntaviglaki et al., 2023). Sementara itu, resin epoxy berbasis Bisphenol A (BPA) terdeteksi di Palembang, dengan ciri puncak serapan pada 1509 cm^{-1} (ikatan aromatik $\text{C}=\text{C}$), 1240 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$ epoxy), dan sekitar 830 cm^{-1} ($\text{C}-\text{H}$ aromatik). Jenis plastik ini banyak digunakan sebagai perekat, pelapis logam, dan bahan bangunan. Partikel epoxy yang terlepas ke udara dapat membawa residu BPA, yaitu zat kimia pengganggu hormon yang dapat memengaruhi sistem hormon manusia (Klose et al., 2023).

Di Sidoarjo, spektrum menunjukkan pita kuat $\text{C}-\text{H}$ alifatik pada 2920 dan 2849 cm^{-1} , ciri khas plastik polietilena (PE) dan polipropilena (PP). Sinyal lemah di 1646 cm^{-1} berasal dari ikatan karbonil atau kelembapan udara, sedangkan pita di 1026 cm^{-1} menandakan silika dari debu jalan atau material bangunan. Temuan ini menunjukkan sumber utama berupa kantong plastik sekali pakai, film kemasan, dan partikel jalan yang terkontaminasi plastik (Kowalczyk et al., 2025). Hal ini dikarenakan pengujian mikroplastik di udara Sidoarjo dilakukan di taman dan sekitar jalan raya.

Di Surakarta, muncul serapan karbonil kuat di 1715 cm^{-1} dan $\text{C}-\text{O}$ ester di 1239 cm^{-1} , menandakan keberadaan poliester (terutama PET) yang dilepaskan dari serat pakaian, aktivitas laundry, dan limbah botol plastik, sejalan dengan aktivitas tekstil dan permukiman padat perkotaan (Benyathiar et al., 2022). Dominasi pita poliester juga tampak di Surabaya pada 1722 dan 1241 cm^{-1} , menyerupai spektrum di Balai Besar Pulp & Kertas Bandung yang cocok dengan poly(butylene terephthalate) (PBT). Plastik ini banyak digunakan dalam komponen otomotif dan elektronik, menunjukkan adanya kontribusi dari limbah industri dan aktivitas perkotaan (Barhoumi et al., 2008). Sinyal $\text{C}-\text{N}$ stretching di 1321 cm^{-1} bersama $\text{C}-\text{H}$ alifatik menegaskan keberadaan poliamida (nylon) yang berasal dari serat pakaian, karpet sintesis, dan kantong

tekstil, menunjukkan kontribusi mikroplastik dari sumber domestik dan residu tekstil di udara (Chavez-Linares et al., 2025).

Di Aceh Utara dan KRL Manggarai Jakarta Selatan, terdeteksi sinyal khas polyisobutylene – bahan karet sintetis dengan pengisi karbon hitam – pada 1377 dan 823 cm^{-1} . Hal ini menunjukkan bahwa debu ban kendaraan dan abrasi rel kereta menjadi sumber penting mikroplastik di udara perkotaan (Valentini & Pegoretti, 2022).

Di Jl. Fachrudin (Tanah Abang, Jakarta Pusat) dan Jl. Mahendradatta (Denpasar, Bali), spektrum menunjukkan campuran poliester dan poliolefin, disertai pita lebar $\text{O}-\text{H}$ di sekitar 3300 cm^{-1} yang menandakan kelembapan atau oksidasi permukaan. Kondisi ini menggambarkan lingkungan urban dengan campuran sumber mikroplastik dari serat laundry, kemasan makanan, dan plastik yang mulai terurai (de Souza et al., 2025). Di Pasar Kebayoran Lama, pita kuat di $1090-1010\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan dominasi partikel silika yang berasal dari debu mineral, abu pembakaran, dan material konstruksi. Sementara itu, Bulukumba (Titik 3) memperlihatkan pita poliester konsisten, yang berasal dari pakaian dan limbah kemasan (Palacios-Mateo et al., 2021).

Semarang memperkuat temuan poliolefin ($\text{C}-\text{H}$ alifatik). Poliolefin merupakan kelompok plastik termoplastik yang tersusun dari etilena dan propilena, meliputi polietilena (PE) dan polipropilena (PP) dalam berbagai bentuk seperti HDPE, LDPE, LLDPE, dan PP daur ulang. Jenis plastik ini digunakan luas dalam kemasan, peralatan rumah tangga, otomotif, pipa, dan produk sekali pakai karena sifatnya yang ringan, tahan bahan kimia, dan mudah diproses (Irgolić et al., 2024).

Di Tugu Khatulistiwa, Pontianak, hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa partikel udara lebih banyak berasal dari bahan anorganik seperti debu tanah dan material bangunan, dibandingkan plastik. Terlihat puncak kuat pada 1168 cm^{-1} dan 968 cm^{-1} yang menjadi ciri khas silikat atau



Sumber: Data Primer Diolah, (2025)

Gambar 4

Persentase Aktivitas Manusia yang Menyumbang Mikroplastik di Udara

mineral kuarsa, menandakan pengaruh besar dari debu jalan, tanah, atau abu pembakaran. Ada juga puncak lemah pada 2920 cm^{-1} dan 2850 cm^{-1} yang menunjukkan jejak kecil plastik jenis polietilena (PE) atau polipropilena (PP). Namun, jumlah plastik di udara Pontianak relatif sangat sedikit dibandingkan partikel debu anorganik (Damayanti et al., 2024).

Aktivitas Sumber Mikroplastik

Mikroplastik yang terlepas di udara itu berasal dari beberapa aktivitas manusia yang melibatkan plastik sekali pakai atau bahan yang terbentuk dari polimer penyusun plastik sekali pakai. Beragam sumber tersebut mencakup kegiatan domestik, transportasi, hingga proses industri dan konstruksi yang tergambar dalam Gambar 4. Temuan ini menegaskan bahwa pencemaran mikroplastik di udara bersifat kompleks dan berasal dari berbagai aktivitas manusia.

Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa aktivitas manusia yang paling banyak menyumbangkan mikroplastik di udara adalah pembakaran

sampah plastik secara terbuka, transportasi, dan pencucian baju (*laundry*). Hasil ini sangat mendukung penemuan mikroplastik dengan warna dominan hitam pada Gambar 3 dan polimer mikroplastik pada Tabel 1. Artinya aktivitas pembakaran sampah dapat mengubah warna plastik menjadi hitam. Begitu pula dengan aktivitas transportasi dengan ban dan aspal yang berwarna hitam. Kontribusi aktivitas pencucian baju dan penggunaan pakaian berbahan sintetis juga menyumbangkan polimer nylon, poliester dan beberapa campurannya ke udara ambien.

Penelitian ini didukung oleh beberapa penelitian yang telah dilakukan di berbagai negara. Pada tahun 2019, di wilayah pedesaan selatan Hamburg, Jerman, ditemukan sekitar 275 partikel mikroplastik per meter persegi per hari dengan ukuran bervariasi, sebagian berukuran lebih dari $300\text{ }\mu\text{m}$, $300\text{--}63\text{ }\mu\text{m}$, dan di bawah $63\text{ }\mu\text{m}$. Partikel ini berbentuk fragmen dan serat (fiber) dengan jenis polimer polietilena/etil vinil asetat dan polietilena (PE) (Klein & Fischer, 2019). Di

Asaluyeh, Iran, studi serupa mendeteksi sekitar 900 partikel mikroplastik dan 250 partikel microrubber dalam setiap 15 gram debu jalanan. Partikel berukuran <100 hingga $>1000 \mu\text{m}$ ini berbentuk fiber, film, dan fragmen, meski jenis polimernya tidak dianalisis lebih lanjut (Abbasi, 2021). Sementara itu, di kawasan pegunungan Gletser Forni, Italia, ditemukan 249 fragmen, 73 film, dan 44 fiber per meter persegi per hari, menandakan bahwa mikroplastik bahkan dapat mencapai wilayah pegunungan terpencil (Ambrosini et al., 2019).

Pada 2020, studi di California, AS mendeteksi mikroplastik di udara dalam dan luar ruangan. Ukuran partikel yang ditemukan berkisar antara $50\text{--}100 \mu\text{m}$, dengan dominasi fragmen dan serat. Jenis polimer yang teridentifikasi meliputi polietilena (PE), polistirena (PS), dan polietilena tereftalat (PET) (Gaston et al., 2020). Di Aveiro, Portugal, ditemukan mikroplastik berukuran kurang dari 10 mm dengan bentuk utama fragmen dan fiber (Chouchene et al., 2021).

Setahun kemudian, studi di Wenzhou, Tiongkok, menemukan mikroplastik dalam jumlah jauh lebih tinggi di udara dalam ruangan ($1583 \pm 1181 \text{ partikel/m}^3$) dibandingkan luar ruangan ($189 \pm 85 \text{ partikel/m}^3$). Polimer yang teridentifikasi mencakup poliester, poliamida, polipropilena (dalam ruangan) serta polietilena, polistirena, dan poliester (luar ruangan). Sebagian besar partikel berukuran lebih kecil dari $100 \mu\text{m}$, menunjukkan potensi tinggi untuk terhirup (Liao et al., 2021). Penelitian di Yorkshire, Inggris, mencatat 3061 partikel mikroplastik dalam tujuh hari pengamatan dengan ukuran $5\text{--}250 \mu\text{m}$, berbentuk fragmen dan fiber dari polimer PET, PA, dan PP (Jenner et al., 2021). Di Sydney, Australia, hasil pengukuran di udara dalam ruangan menemukan 7401 fiber, 64 fragmen, dan 18 film berukuran $50\text{--}200 \mu\text{m}$. Jenis polimer yang ditemukan mencakup polietilena, poliester, poliamida, poliakrilik, dan polistirena (Soltani et al., 2021).

Pada tahun yang sama, penelitian

di Chennai, India, menemukan rata-rata $227,94 \pm 91,37$ partikel mikroplastik per 100 gram debu jalanan. Partikel yang teridentifikasi berupa fragmen dan serat (fiber) dengan berbagai jenis polimer, antara lain polivinil klorida (PVC), polietilena-ko-vinil-asetat (EVA), HDPE, PTFE, selulosa mikrokristalin, lyocell, serta beberapa bahan komposit seperti Superflex 200 dan AC-395 (Patchaiyappan et al., 2021). Di La Aljorra, Spanyol, studi udara luar ruangan melaporkan rata-rata $35,97 \text{ ng/m}^3$ partikel mikroplastik berukuran $125\text{--}200 \mu\text{m}$, seluruhnya berupa polistirena (PS) dalam bentuk fragmen dan fiber (Peñalver et al., 2020). Pemantauan jangka panjang selama satu tahun di Paris, Prancis, menemukan 2 hingga 355 partikel/ m^2 /hari pada area perkotaan padat dan sekitar 53 ± 38 partikel/ m^2 /hari di area pinggiran. Sebagian besar mikroplastik berukuran $50\text{--}600 \mu\text{m}$ dengan bentuk fiber. Analisis FTIR menunjukkan bahwa 50% serat berasal dari bahan alami seperti kapas dan wol, 21% dari serat regenerasi seperti rayon dan asetat, serta 17% dari serat sintetis murni seperti PET dan poliamida, sementara 12% lainnya merupakan campuran serat alami dan sintetis (Dris et al., 2016).

Penelitian lain di Aarhus, Denmark mendeteksi $1,7\text{--}16,2$ partikel/ m^3 mikroplastik di udara dalam ruangan apartemen, berbentuk fiber dan fragmen berukuran $0,004\text{--}0,398 \text{ mm}$, dengan jenis polimer poliester, polietilena, dan nilon (Vianello et al., 2019). Di Edinburgh, Inggris, studi pada dapur rumah tangga menemukan $1666\text{--}1671$ partikel/ m^2 /hari dalam bentuk fiber dan film dengan polimer PET dan poliuretan (Catarino et al., 2018). Sementara itu, di Pelabuhan Bushehr, Iran, udara luar ruangan mengandung sekitar $5,2 \text{ partikel/m}^3$ mikroplastik berukuran $<2,5 \text{ mm}$ berbentuk fiber, fragmen, dan film, dengan jenis polimer PET, PE, nilon, PS, dan PP (Akhbarizadeh et al., 2019). Di Beijing, Tiongkok, partikel mikroplastik berukuran $0,005\text{--}0,2 \text{ mm}$ ditemukan di udara dalam dan luar ruangan kampus

Universitas Pertambangan dan Teknologi Tiongkok (CUMTB), meski jenis polimernya tidak diidentifikasi (Li et al., 2020). Di London, Inggris, pengamatan udara luar ruangan menunjukkan 510–925 serat mikroplastik/m²/hari, serta 12–99 partikel non-serat/m²/hari dengan ukuran 400–500 µm. Polimer yang ditemukan adalah polietilena (PE) dan polipropilena (PP) (Wright et al., 2020).

Dampak Mikroplastik pada Kesehatan Manusia

Partikel mikroplastik yang melayang di udara di ketinggian ±1–1,5 meter—setara dengan zona pernapasan orang dewasa dan anak-anak, akan terhirup bersama udara setiap kali kita bernapas. Begitu memasuki rongga hidung, partikel berukuran besar umumnya akan tersaring oleh rambut hidung (vibrissae) dan lapisan mukus yang berfungsi sebagai penyaring mekanis. Namun, mikroplastik berukuran lebih kecil, terutama yang berdiameter <10 µm, mampu melewati hambatan awal ini dan bergerak lebih dalam ke saluran pernapasan. Aliran udara membawa partikel tersebut melalui nasofaring, laring, hingga ke trakea dan bronkus. Di sini, mekanisme pertahanan tubuh berupa sistem mukosilier yakni lapisan lendir yang digerakkan oleh silia untuk mengangkut partikel keluar menuju tenggorokan berusaha mengeluarkannya. Akan tetapi, serat mikro yang tipis dan fragmen berukuran sangat halus dapat lolos dari proses pembersihan ini. Partikel yang lolos kemudian melaju hingga ke saluran udara yang lebih kecil, bronkiolus terminal, dan akhirnya mencapai alveolus, kantung udara mikroskopis tempat pertukaran oksigen dan karbon dioksida berlangsung. Pada bagian ini, tidak ada sistem mukosilier, sehingga satu-satunya mekanisme pertahanan adalah makrofag alveolar atau sel imun yang bertugas menelan partikel asing. Sayangnya, mikroplastik bersifat tidak mudah diuraikan, sehingga keberadaannya di alveolus dapat memicu respons peradangan berulang dan juga berkepanjangan. Proses ini berpotensi menyebabkan kerusakan jaringan, fibrosis

paru, dan perubahan perilaku sel epitel, termasuk aktivasi gen-gen yang berkaitan dengan stres oksidatif dan proliferasi abnormal.

Lebih jauh lagi, partikel berukuran sangat kecil, termasuk nanoplastik, dapat menembus penghalang alveolar-kapiler, masuk ke aliran darah, dan terbawa ke berbagai organ tubuh. Di dalam peredaran darah, partikel ini dapat memicu respons imun sistemik, mempengaruhi metabolisme, bahkan menembus sawar darah-otak sehingga berpotensi memicu efek neurotoksik. Temuan ini, sebagaimana dilaporkan oleh Zhang et al., (2024) dan Jeon et al., (2023), menegaskan bahwa mikroplastik di udara bukan sekadar polusi lingkungan, tetapi telah menjadi ancaman nyata bagi kesehatan manusia hingga ke tingkat molekuler.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian periode Mei–Juli 2025 di berbagai provinsi di Indonesia, ditemukan bahwa mikroplastik udara memiliki variasi signifikan dalam ukuran, jenis, warna dan jumlah, dengan rentang ukuran 0,02–1,72 mm. Konsentrasi tertinggi tercatat di Jakarta Pusat sebesar 37 partikel per dua jam, sedangkan terendah di Malang dan Bulukumba dengan dua partikel per dua jam. Fragmen menjadi bentuk paling dominan diikuti fiber dan film, dengan warna dominasi hitam yang menunjukkan sumber utama berasal dari pembakaran sampah plastik, transportasi, dan abrasi ban kendaraan. Hasil analisis FTIR mengungkap keberagaman polimer seperti PTFE, nylon, polyester, poliolefin, epoxy resin BPA, dan polyisobutylene, yang menunjukkan kontribusi dari aktivitas industri, transportasi, tekstil, dan domestik. Temuan ini menegaskan bahwa kelimpahan mikroplastik di udara sangat dipengaruhi oleh intensitas aktivitas manusia dan minimnya vegetasi, terutama di wilayah perkotaan. Mengingat potensi mikroplastik untuk terhirup dan menimbulkan gangguan kesehatan akibat sifatnya yang persisten serta mampu membawa senyawa kimia berbahaya,

maka diperlukan langkah pengendalian yang komprehensif, seperti pembatasan plastik sekali pakai, pengaturan emisi kendaraan, pengelolaan sampah yang ramah lingkungan, dan perluasan ruang hijau kota. Selain itu, penting dilakukan edukasi publik serta penguatan sistem pemantauan udara berbasis riset agar upaya pengendalian polusi mikroplastik dapat berjalan efektif dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

1. Terimakasih pada Society of Indonesian Environmental Journalists (SIEJ) yang telah berkontribusi dalam pendanaan penelitian sekaligus publikasi hasil riset.
2. Terima kasih pada para enumerator yakni Azra, Nelson Darma, Yuvika Marin, Intan Nuraini, Ni Kadek Ayu, Sri Dona, Dini Audiensy, Hafsa Nur Ismi, Ririn, Abraham, Kinanti, Cristin, Nurul Aisyah, Aliyya, Keisha Purwaning Sari, Andin Sausan, Fauzi Pohan, Awalina, dan Isra yang telah membantu pengambilan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, S. (2021). Microplastics Washout from the Atmosphere During a Monsoon Rain Event. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416621000346>
- Ahdiat, A. (2024). 57% Rumah Tangga Indonesia Rutin Bakar Sampah. Databoks.<https://databoks.katadata.co.id/layanan-konsumen-kesehatan/statistik/c6a9ee250f4a5c6/57-rumah-tangga-indonesia-rutin-bakar-sampah>
- Akhbarizadeh, R., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2019). Investigating Microplastics Bioaccumulation and Biomagnification in Seafood from the Persian Gulf: A Threat to Human Health? *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(11), 1696–1708.<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19440049.2019.1649473>
- Ambrosini, R., Azzoni, R. S., Pittino, F.,

- Diolaiuti, G., Franzetti, A., & Parolini, M. (2019). First Evidence of Microplastic Contamination in the Supraglacial Debris of an Alpine Glacier. *Environmental Pollution*, 253, 297–301.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119316422>
- Ardiyanta, I., Rahmawati, S., Abdull, N. B., Jannah, B. R., & Pradana, N. F. (2024). Kelimpahan dan Karakteristik Mikroplastik di Udara Ambien Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Piyungan, Yogyakarta. *Jurnal Reka Lingkungan*, 12(2). <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/lingkungan/article/view/12241>
- Barhoumi, N., Jaziri, M., Massardier, V., & Cassagnau, P. (2008). Valorization of Poly (Butylene Terephthalate) Wastes by Blending with Virgin Polypropylene: Effect of the Composition and the Compatibilization. *Polymer Engineering & Science*, 48(8), 1592–1599.<https://doi.org/10.1002/pen.21116>
- Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022). Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. *Polymers*, 14(12), 2366. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/12/2366>
- Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., & Henry, T. B. (2018). Low Levels of Microplastics (MP) in Wild Mussels Indicate that MP Ingestion by Humans is Minimal Compared to Exposure via Household Fibres Fallout during a Meal. *Environmental Pollution*, 237, 675–684.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117344445>
- Chavez-Linares, P., Hoppe, S., & Chevalot, I. (2025). Recycling and Degradation Pathways of Synthetic Textile Fibers such as Polyamide and Elastane. *Global Challenges*, 9(4). <https://doi.org/10.1002/gch2.202400163>

- Chouchene, K., Prata, J. C., Costa, J. da, Duarte, A. C., Rocha-Santos, T., & Ksibi, M. (2021). Microplastics on Barra beach sediments in Aveiro, Portugal. *Marine Pollution Bulletin*, 167, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112264>
- Damayanti, K. I., Ramdhani, D., Ramadhan, F., & Setiawan, G. E. (2024). Variation of Polyethylene and Polypropylene on the Quality of Plastic Types. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*, 9(2). <https://analit.fmipa.unila.ac.id/index.php/analit/article/view/186>
- de Souza, A. S., Ferreira, P. G., Jesus, I. S. de, Oliveira, R. P. R. F. de, Carvalho, A. S. de, Futuro, D. O., & Ferreira, V. F. (2025). Recent Progress in Polyolefin Plastic: Polyethylene and Polypropylene Transformation and Depolymerization Techniques. *Molecules*, 30(1), 87. <https://www.mdpi.com/1420-3049/30/1/87>
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic Fibers in Atmospheric Fallout: A Source of Microplastics in the Environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1–2), 290–293. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X16300066>
- Gaston, E., Woo, M., Steele, C., Sukumaran, S., & Anderson, S. (2020). Microplastics Differ Between Indoor and Outdoor Air Masses: Insights from Multiple Microscopy Methodologies. *Applied Spectroscopy*, 74(9), 1079–1098. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32233850/>
- Han, I., Kee, C., Belchez, C., Shipper, A. G., & Wiens, K. E. (2024). Microplastics in Urban Ambient Air: A Rapid Review of Active Sampling and Analytical Methods for Human Risk Assessment. *Environments*, 11(11), 256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162193>
- Hasan, K. (2025). *Kualitas Udara Indonesia 2024: Polusi Jabodetabek Capai Sepuluh Kali Lipat Batas Aman WHO, Pemerintah “Menunggu dan Lihat Nanti.”*
- Hess, K. Z., Forsythe, K. R., Wang, X., Arredondo-Navarro, A., Tipling, G., Jones, J., Mata, M., Hughes, V., Martin, C., Doyle, J., Scott, J., Minghetti, M., Jilling, A., Cerrato, J. M., Hayek, E. El, & Gonzalez-Estrella, J. (2025). Emerging Investigator Series: Open Dumping and Burning: An Overlooked Source of Terrestrial Microplastics in Underserved Communities. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 27, 52–62. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/em/d4em00439f>
- Hsu, Y. S., Kao, W. H., Chen, Y. C., Liu, Z. S., Hsu, Y. C., Wu, P. J., Wang, Y. H., & Chi, K. H. (2025). Simultaneous Measurement and Compositional Analysis of Atmospheric Microplastics in Taiwan Utilizing Optical and Chemical Methods. *Aerosol and Air Quality Research*, 25(46). <https://link.springer.com/article/10.1007/s44408-025-00047-5>
- Irgolič, M., Čolnik, M., Kotnik, P., Čuček, L., & Škerget, M. (2024). Hydrothermal Recycling of Polyolefins as Potential Alternative Method for Fuel Production. *Journal of Cleaner Production*, 463. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652624021668>
- Jenner, L. C., Sadofsky, L. R., Danopoulos, E., & Rotchell, J. M. (2021). Household Indoor Microplastics within the Humber Region (United Kingdom): Quantification and Chemical Characterisation of Particles Present. *Atmospheric Environment*, 259. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231021003332>
- Jeon, M. S., Kim, J. W., Han, Y. Bin, Jeong, M. H., Kim, H. R., Kim, H. S., Park, Y. J., & Chung, K. H. (2023). Polystyrene Microplastic Particles Induce Autophagic Cell Death in BEAS-2B Human Bronchial Epithelial Cells. *Environmental Toxicology*, 38(2), 359–367. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36485005/>

- Klein, M., & Fischer, E. K. (2019). Microplastic Abundance in Atmospheric Deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany. *Science of The Total Environment*, 685, 96–103. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719324581>
- Klose, L., Meyer-Heydecke, N., Wongwattanasat, S., Chow, J., García, P. P., Carré, C., Streit, W., Antranikian, G., Romero, A. M., & Liese, A. (2023). Towards Sustainable Recycling of Epoxy-based Polymers: Approaches and Challenges of Epoxy Biodegradation. *Polymers*, 15(12), 2653. <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/12/2653>
- Kowalczyk, P., Kadac-Czapska, K., & Grembecka, M. (2025). Polyethylene Packaging as a Source of Microplastics: Current Knowledge and Future Directions on Food Contamination. *Foods*, 14(14), 2408. <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/14/2408>
- Le, V.-G., Nguyen, M.-K., Nguyen, H.-L., Lin, C., Hadi, M., Hung, N. T. Q., Hoang, H.-G., Nguyen, K. N., Tran, H.-T., Hou, D., Zhang, T., & Bolan, N. S. (2023). A Comprehensive Review of Micro- and Nano-plastics in the Atmosphere: Occurrence, Fate, Toxicity, and Strategies for Risk Reduction. *Science of the Total Environment*, 904. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723052749>
- Li, Y., Shao, L., Wang, W., Zhang, M., Feng, X., Li, W., & Zhang, D. (2020). Airborne Fiber Particles: Types, Size and Concentration Observed in Beijing. *Science of the Total Environment*, 705. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719359625>
- Liao, Z., Ji, X., Ma, Y., Lv, B., Huang, W., Zhu, X., Fang, M., Wang, Q., Wang, X., Dahlgren, R., & Shang, X. (2021). Airborne Microplastics in Indoor and Outdoor Environments of a Coastal City in Eastern China. *Journal of Hazardous Materials*, 417. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33992007/>
- Luo, X., Zhang, Y., Kang, S., Chen, R., Gao, T., & Allen, S. (2025). Atmospheric Emissions of Microplastics Entrained with Dust from Potential Source Regions. *Journal of Hazardous Materials*, 488. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389425004212>
- Maharani, H. A. (2023). Identifikasi Mikroplastik di Udara Pada Polutan Total Suspended Particulate (TSP) dan Particulate Matter (Pm_{2,5}, Pm₁₀) di Ringroad Kota Yogyakarta [Universitas Islam Indonesia]. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/47449>
- Mehinto, A. C., Coffin, S., Koelmans, A. A., Brander, S. M., Wagner, M., Hampton, L. M. T., Jr, A. G. B., Miller, E., Gouin, T., Weisberg, S. B., & Rochman, C. M. (2022). Risk-based Management Framework for Microplastics in Aquatic Ecosystems. *Microplastics and Nanoplastics*, 17. <https://microplastics.springeropen.com/articles/10.1186/s43591-022-00033-3>
- Nashrullaah, I. (2024). Identifikasi Mikroplastik di Udara Ambien dari Polutan Pm_{2,5} di Permukiman Yogyakarta [Universitas Islam Indonesia]. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/54542>
- Ntavigliaki, A., Tzanakakis, V., Giannopoulos, G., Maragkaki, A. E., Anastopoulos, I., Pantelis, B., Pashalidis, I., & Monokrousos, N. (2023). Polyamide Nylon 6 Microplastics Enhance Nitrification Activity in Two Agricultural Soils. *Pedosphere*, 34(6). <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.07.018>
- O'Brien, S., Rauert, C., Ribeiro, F., Okoffo, E. D., Burrows, S. D., O'Brien, J. W., Wang, X., Wright, S. L., & Thomas, K.

- V. (2023). There's Something in the Air: A Review of Sources, Prevalence and Behavior of Microplastics in the Atmosphere. *Science of the Total Environment*, 874(May), 162193. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723008094>
- Palacios-Mateo, C., Meer, Y. van der, & Seide, G. (2021). Analysis of the Polyester Clothing Value Chain to Identify Key Intervention Points for Sustainability. *Environmental Sciences Europe*, 33(1). <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-00447-x>
- Patchaiyappan, A., ZakiAhmed, S., Dowarah, K., Khadanga, S. S., Singh, T., Jayakumar, S., Thirunavukkarasu, C., & Devipriya, S. P. (2021). Prevalence of Microplastics in the Sediments of Odisha Beaches, Southeastern Coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, 167. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X210299X>
- Pathak, G., Nichter, M., Hardon, A., Moyer, E., Latkar, A., Simbaya, J., Pakasi, D., Taqueban, E., & Love, J. (2023). Plastic Pollution and the Open Burning of Plastic Wastes. *Global Environmental Change*, 80(May). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937802300014>
- Peñalver, R., Arroyo-Manzanares, N., López-García, I., & Hernández-Córdoba, M. (2020). An Overview of Microplastics Characterization by Thermal Analysis. *Chemosphere*, 242. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519324099>
- Piowarczyk, J., Jędrzejewski, R., Moszyński, D., Kwiatkowski, K., Niemczyk, A., & Baranowska, J. (2019). XPS and FTIR Studies of Polytetrafluoroethylene Thin Films Obtained by Physical Methods. *Polymers*, 11(10), 1629. <https://doi.org/10.3390/polym11101629>
- Pradana, N. F. (2023). *Identifikasi Kandungan Mikroplastik pada Udara di Kawasan Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) Piyungan Yogyakarta [Universitas Islam Indonesia]*. <https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/46861>
- Prata, J. C. (2018). Airborne Microplastics: Consequences to Human Health? *Environmental Pollution*, 234, 115–126. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749117307686>
- Ramadan, B. S., Tina Rosmalina, R., Syafrudin, Munawir, Khair, H., Rachman, I., & Matsumoto, T. (2023). Potential Risks of Open Waste Burning at the Household Level: A Case Study of Semarang, Indonesia. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(5), 1–17. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220412>
- Rao, M. N., Ghude, S. D., Nivdange, S. D., Panchang, R., Pipal, A. S., Mukherjee, A., Sharma, H., & Kumar, V. (2025). Characterization and Health Risk Assessment of Airborne Microplastics in Delhi NCR. *Scientific Reports*, 15(1). <https://www.nature.com/articles/s41598-025-04306-8>
- Sincihu, Y., Sudiana, I. K., Kusumastuti, K., Keman, S., Sulistyorini, L., Lusno, M. F. D., Elias, S. M., & Hasina, S. N. (2022). Membranes and Deoxyribonucleic Acid of Hippocampal Neurons Damage due to low Density Polyethylene Microplastics in Blood of Wistar rats. *International Journal of Health Sciences*, 6(S7). <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS7.12621>
- Soltani, N. S., Taylor, M. P., & Wilson, S. P. (2021). Quantification and Exposure Assessment of Microplastics in Australian Indoor House Dust. *Environmental Pollution*, 283. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121006461>
- Valentini, F., & Pegoretti, A. (2022). End-of-life Options of Tyres: A Review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(4), 203–213. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504822000392>

- Vianello, A., Jensen, R. L., Liu, L., & Vollertsen, J. (2019). Simulating Human Exposure to Indoor Airborne Microplastics Using a Breathing Thermal Manikin. *Scientific Reports*, 9. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-45054-w>
- Wang, Y.-L., Lin, Y.-C., Liu, W.-C., Lee, Y.-H., & Chiu, H.-W. (2025). Air Pollution and Its Impacts on Health: Focus on Microplastics and Nanoplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 299. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651325007389>
- Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y., Hayami, H., Minami, Y., Katsumi, N., Takeuchi, M., Sorimachi, A., Fujii, Y., Kajino, M., Adachi, K., Ishihara, Y., Iwamoto, Y., & Niida, Y. (2023). Airborne Hydrophilic Microplastics in Cloud Water at High Altitudes and Their Role in Cloud Formation. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 3055–3062. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wright, S. L., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A., & Kelly, F. J. (2020). Atmospheric Microplastic Deposition in an Urban Environment and an Evaluation of Transport. *Environmental International*, 136. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019330351>
- Zhang, J., Du, J., Liu, D., Zhuo, J., Chu, L., Li, Y., Gao, L., Xu, M., Chen, W., Huang, W., Xie, L., Chen, J., Meng, X., Zou, F., Cai, S., & Dong, H. (2024). Polystyrene Microplastics Induce Pulmonary Fibrosis by Promoting Alveolar Epithelial Cell Ferroptosis through cGAS/STING Signaling. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 277. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38677073/>
- Zubair, M., & Adrees, A. (2019). Dioxins and Furans: Emerging Contaminations of Air. In *Air Pollution: Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles*. London: IntechOpen