

TESIS

**DISTRIBUSI MIKROPLASTIK DI $PM_{2,5}$ DAN DEBU JALAN SERTA
ESTIMASI INTAKE $PM_{2,5}$ DAN MIKROPLASTIK DI AREA JALAN
UTAMA YOGYAKARTA**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan**



**BAIQ RAUDATUL JANNAH
22927004**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2025**

TESIS

**DISTRIBUSI MIKROPLASTIK DI $PM_{2.5}$ DAN DEBU JALAN SERTA
ESTIMASI INTAKE $PM_{2.5}$ DAN MIKROPLASTIK DI AREA JALAN
UTAMA YOGYAKARTA**

**Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Magister (S2) Teknik Lingkungan**



**BAIQ RAUDATUL JANNAH
22927004**

Disetujui,
Dosen Pembimbing


Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T.
NIK. 155131313
Tanggal: 21/25/62


Dr. Norhidayah Binti Abdull
Tanggal:

Mengetahui,
Ketua Prodi Magister Teknik Lingkungan


Dr. Ir. Andik Yulianto, S.T., M.T.
NIK. 025100407
24/25/62

HALAMAN PENGESAHAN

TESIS

**DISTRIBUSI MIKROPLASTIK DI $PM_{2,5}$ DAN DEBU JALAN SERTA
ESTIMASI INTAKE $PM_{2,5}$ DAN MIKROPLASTIK DI AREA JALAN
UTAMA YOGYAKARTA**

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari: Selasa

Tanggal: 18 Februari 2025

Disusun Oleh:

Baiq Raudatul Jannah

22927004

Tim Penguji:

Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T.

( 21/25
/2)

Dr. Norhidayah Binti Abdull

()

Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res.Eng.), Ph.D

()

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apa pun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 17 Februari 2025

Yang membuat pernyataan,



Baiq Raudatul Jannah

NIM: 22927004

PRAKATA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, Allah Subhanahu Wata'ala, atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tesis ini, yang berjudul "Distribusi Mikroplastik di PM_{2,5} dan Debu Jalan serta Estimasi Intake PM_{2,5} dan Mikroplastik di Area Jalan Utama Yogyakarta". Selawat dan salam juga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, yang menjadi suri tauladan sepanjang zaman.

Laporan tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program pendidikan Magister pada Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Berpuluh minggu tulisan ini terdiam di folder draft tulisan dan tidak diisi dan dibenahi dengan baik. Tulisan ini masih belum menjadi tulisan yang cukup baik, namun sudah penulis usahakan dengan penuh semangat.

Laporan tesis ini dapat diselesaikan dengan baik atas pertolongan dari Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, ilmu pengetahuan, kesehatan, dan kelancaran kepada penulis dalam melaksanakan perkuliahan dan penelitian. Selain itu, terdapat banyak sekali bantuan yang diperoleh penulis dari berbagai pihak sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dan laporan tesis ini. Para pihak yang ingin penulis ucapkan terima kasih sebesar-besarnya adalah:

1. Dr. Suphia Rahmawati, S.T., M.T., pembimbing yang sangat suportif dan sabar dalam membimbing tesis penulis. Penulis mendoakan beliau selalu diberikan keberkahan dan kesehatan untuk terus membimbing mahasiswa di Teknik Lingkungan.
2. Dr. Norhidayah Binti Abdull, pembimbing kedua (ko-pembimbing) sekaligus penguji yang merupakan dosen di Universiti Malaysia Pahang (UMP). Penulis sampaikan banyak terima kasih atas masukan-masukan berharga dari beliau untuk kesempurnaan tesis ini.
3. Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing di kampus dan di rumah, teman diskusi, serta pendukung utama penulis untuk mengenyam kuliah magister.
4. Teman-teman kelompok tugas akhir skripsi mikroplastik udara di bawah bimbingan Bu Suphia: Ara, Raihan, Ophel, Nasrul, Arya. Mereka adalah teman belajar penulis dari awal yang sudah bekerja keras untuk meneliti keberadaan mikroplastik di udara.
5. Teman-teman kelompok tugas akhir skripsi mikroplastik debu jalan di bawah bimbingan Pak Adam: Farah, Al, Rivandi, dan Satria, yang telah berhasil menemukan karakteristik mikroplastik di jalanan Yogyakarta.

6. Teman-teman Magister Teknik Lingkungan yang selalu meriah dan saling mendukung, khususnya angkatan pertama. Semoga selalu diberikan kemudahan dan semangat untuk menyelesaikan perkuliahan dan tesisnya.
7. Cidris Khoirus Sora, putra penulis yang selalu pengertian dan sabar menemani selama proses perkuliahan dan penyusunan laporan tesis.

Penulis menyadari bahwa terdapat banyak kesalahan dan kekurangan dalam laporan tesis ini, yang tidak luput dari keterbatasan ilmu pengetahuan penulis. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk menyempurnakan penulisan laporan ini. Semoga laporan ini bermanfaat baik bagi penulis maupun bagi para pembaca.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 17 Februari 2025

Baiq Raudatul Jannah

ABSTRAK

Polusi udara adalah masalah lingkungan yang dihadapi oleh setiap orang. Berkembangnya ilmu pengetahuan membuat kejadian polusi baru (*emerging pollutant*) mendapatkan perhatian untuk diteliti lebih lanjut, salah satunya tentang polutan Mikroplastik (MP). Penelitian tentang mikroplastik sudah banyak dilakukan didunia, namun sayangnya masih kurang di Indonesia. Keberadaan mikroplastik di udara sering disamakan dengan $PM_{2,5}$ di udara dan keduanya memiliki kemungkinan untuk masuk ke dalam tubuh dan menimbulkan masalah kesehatan bagi manusia. Daerah Istimewa Yogyakarta sebagai pusat budaya, pendidikan dan wisata di Jawa dan Indonesia memiliki penduduk tetap dan pendatang serta wisatawan yang tinggi sepanjang tahun, hal ini menimbulkan perubahan kualitas udara khususnya dari kegiatan transportasinya. Penelitian ini menginvestigasi sebaran $PM_{2,5}$ di 3 kawasan (Terminal, Ringroad dan Wisata), serta menginvestigasi keberadaan mikroplastik di dalam $PM_{2,5}$ dan debu jalan untuk melihat kemungkinan transfer mikroplastik antar media lingkungan. Selain itu dilakukan analisis korelasi Spearman antara $PM_{2,5}$, mikroplastik di udara, mikroplastik di debu jalan dan kondisi cuaca lokasi penelitian. Metode pengambilan sampel $PM_{2,5}$ menggunakan pedoman SNI 7119-14-2016 untuk udara ambien, dengan pendekatan *active sampling* menggunakan HVAS selama 24 jam, laju alir yang digunakan sebesar $1,2 \text{ m}^3/\text{menit}$ dengan ketinggian filter sekitar 1,2 m. Pengambilan sampel debu jalan menggunakan sapu dan wadah non plastik untuk mendapatkan 30 gram sampel debu. Analisis sampel di laboratorium menggunakan H_2O_2 30% untuk menghilangkan bahan organik dan garam KI dan NaCl untuk ekstraksi mikroplastik dari larutan dengan metode pemisahan berat jenis. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi $PM_{2,5}$ tertinggi di kawasan Wisata, lalu Terminal dan terendah di Ringroad. Kelimpahan mikroplastik di udara tertinggi berada di kawasan Terminal, lalu Wisata dan terendah di Ringroad sedangkan kelimpahan mikroplastik di debu jalan berdasarkan kawasan memiliki hasil yang sama dengan $PM_{2,5}$. Karakteristik utama dari mikroplastik yang ditemukan yaitu bentuk fragmen dengan warna hitam. Hasil korelasi menunjukan $PM_{2,5}$ dan mikroplastik di udara memiliki korelasi negatif dengan tekanan udara; mikroplastik di udara berkorelasi positif dengan kelembapan udara; dan mikroplastik di debu jalan berkorelasi positif dengan temperatur. Analisis risiko juga dilakukan untuk debu terhirup di udara, dan didapatkan hasil risiko yang sangat rendah ($RQ < 1$) bagi manusia untuk $PM_{2,5}$. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menambah data dan memahami sumber dan transportasi dari MP di Yogyakarta dan Indonesia.

Kata kunci: debu jalan, mikroplastik udara, pajanan kontaminan, $PM_{2,5}$

ABSTRACT

Air pollution is an environmental problem faced by every human. The development of science has made emerging pollutants to receive attention for further research, one of which is research on Microplastic (MP) pollutants. Research on microplastics has been widely conducted in the world, but still lacking in Indonesia. The presence of microplastics in the air is often equated with PM_{2.5} in the air and both have the potential to enter the body and cause health problems for humans. The Special Region of Yogyakarta as a center of culture, education and tourism in Java and Indonesia has a high number of permanent and incomer residents and lot of tourists throughout the year, which causes changes in air quality, especially from transportation activities. This study investigated the distribution of PM_{2.5} in 3 areas (Terminal, Ringroad and Tourism), and investigated the presence of microplastics in PM_{2.5} and road dust to see the possibility of microplastic transfer between environmental media. In addition, Spearman correlation analysis was carried out between PM_{2.5}, microplastics in the air, microplastics in road dust and weather conditions at the research location. The PM_{2.5} sampling method uses the SNI 7119-14-2016 guidelines for ambient air, with an active sampling approach using HVAS for 24 hours, the flow rate used is 1.2 m³/minute with a filter height of around 1.2 m. Road dust sampling uses a natural fibres broom and non-plastic containers to obtain 30 grams of dust samples. Sample analysis in the laboratory uses 30% H₂O₂ to remove organic matter and KI and NaCL salts solution for microplastic extraction from sample with different specific gravity methode. The results showed the highest PM_{2.5} concentration in the Tourism area, then the Terminal and the lowest in the Ringroad. The highest abundance of microplastics in the air was in the Terminal area, then Tourism and the lowest in the Ringroad while microplastics in road dust based on the area had the same results as PM_{2.5}. The main characteristics of the microplastics found were the form of fragments with a black color. The correlation results showed that PM_{2.5} and microplastics in the air had a negative correlation with air pressure; microplastics in the air were positively moist with air humidity; and microplastics on debug roads freeze at positive temperatures. Risk analysis was also conducted for inhaled dust in the air, and the results obtained were very low risk (RQ<1) for humans for PM_{2.5}. Further research is needed to add data and understand the sources and transportation of MP in Yogyakarta and Indonesia.

Keywords: airborne microplastics, contaminant exposure, PM_{2.5}, road dust

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Hipotesis Penelitian	4
1.5. Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Partikulat di Udara	6
2.1.1 Definisi dan Karakteristik PM _{2,5}	6
2.1.2 Standar dan Baku Mutu PM _{2,5}	8
2.1.3 Dampak PM _{2,5}	8
2.1.4 Pengaruh Cuaca pada PM _{2,5}	10
2.1.4 Pengaruh Penggunaan Lahan pada PM _{2,5}	10
2.2. Mikroplastik di Udara	11
2.2.1 Definisi Mikroplastik	11
2.2.2 Karakteristik Mikroplastik di Udara	12
2.2.3 Sumber dan Distribusi Mikroplastik di Udara	16
2.2.4 Dampak Mikroplastik di Udara	19
2.3. Debu Jalan dan Resuspensi Partikulat ke Udara.....	19
2.3.1 Definisi dan Komposisi Debu Jalan.....	19
2.3.1 Mikroplastik di Debu Jalan.....	20
2.3.1 Mekanisme Resuspensi Debu Jalan ke Udara	22
2.4. Potensi Paparan (<i>Intake</i>) PM _{2,5} dan Mikroplastik dari Udara	23
2.4.1 Paparan dan Dampak Kesehatan PM _{2,5} dan Mikroplastik.....	23
2.4.2 Kerangka Penilaian Risiko.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1. Tahapan Penelitian	28

3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	29
3.3. Prosedur Penelitian	35
3.3.1 Persiapan Pengambilan Sampel	35
3.3.2 Pengambilan Sampel.....	36
3.3.3 Analisis Sampel di Laboratorium.....	38
3.3.4 Klasifikasi dan Analisis Sampel.....	41
3.4 Analisis Data.....	44
3.4.1 Analisis Data Statistik	44
3.4.2 Analisis Data Spasial.....	47
3.4.3 Analisis Paparan (<i>Intake</i>)	49
3.5 Keterbatasan Studi	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	57
4.1. PM _{2,5} di Udara Ambien	57
4.2. Kelimpahan Mikroplastik	62
4.2.1 Kelimpahan Mikroplastik di PM _{2,5}	62
4.2.2 Kelimpahan Mikroplastik di Debu Jalan	67
4.3 Distribusi PM _{2,5} dan Mikroplastik di Udara	72
4.4 Hasil Analisis Korelasi.....	76
4.4.1 Korelasi PM _{2,5} dengan Keadaan Meteorologi.....	77
4.4.2 Korelasi PM _{2,5} dengan Keberadaan Mikroplastik.....	78
4.4.3 Korelasi MP PM _{2,5} dan MP Debu Jalan dengan Kondisi Meteorologi	80
4.5 Perhitungan Nilai Risiko Paparan PM _{2,5} dan MP untuk Manusia.....	82
4.5.1 Identifikasi Bahaya	82
4.5.2 Analisis Dosis - Respons.....	83
4.5.3 Karakterisasi Risiko	87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	90
5.1. Kesimpulan	90
5.2. Saran	91
DAFTAR PUSTAKA	93

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi bentuk mikroplastik	14
Tabel 2.2 Tipe polimer plastik dan penggunaannya.....	15
Tabel 2.3 Penelitian terdahulu tentang mikroplastik di udara.....	18
Tabel 2.4 Penelitian terdahulu tentang mikroplastik di debu jalan.....	21
Tabel 3.1 Lokasi dan waktu pengambilan sampel	34
Tabel 3.2 Koefisien korelasi dan interpretasinya	45
Tabel 3.3 Faktor eksposur yang digunakan dalam penelitian ini	53
Tabel 4.1 Konsentrasi PM _{2,5} rata-rata kawasan.....	59
Tabel 4.2 Konsentrasi PM _{2,5} berdasarkan kejadian hujan.....	60
Tabel 4.3 Hasil observasi MP di udara pada penelitian ini	64
Tabel 4.4 Hasil observasi MP di debu jalan pada penelitian ini	69
Tabel 4.5 Kondisi presipitasi pada titik sampling	76
Tabel 4.6 Hasil korelasi Spearman untuk PM _{2,5} dengan variabel cuaca	77
Tabel 4.7 Hasil korelasi PM _{2,5} , MP di udara dan MP di debu jalan.....	79
Tabel 4. 8 Hasil Korelasi MP di udara dan debu jalan dengan variabel cuaca	80
Tabel 4.9 Index intake PM _{2,5} di berbagai kawasan di Yogyakarta	84
Tabel 4.10 Karakterisasi risiko	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ukuran relatif dari polutan partikulat.....	6
Gambar 2.2 Ukuran partikel mikroplastik	12
Gambar 2.3 Representasi sumber mikroplastik ke atmosfer di wilayah Amerika Barat.....	17
Gambar 2.4 Proses resuspensi debu jalan dari gerakan ban kendaraan.....	23
Gambar 2.5 Efek mikroplastik terhirup bagi manusia	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	29
Gambar 3.2 Titik sampling pengambilan sampel lingkungan	31
Gambar 3.3 Metode pengujian laboratorium untuk MP pada sampel udara	39
Gambar 3.4 Metode pengujian laboratorium untuk MP di sampel debu jalan	40
Gambar 3.5 Lingkungan kerja software R.....	47
Gambar 3.6 Lingkungan kerja di GEE	49
Gambar 4.1 Konsentrasi PM _{2,5} di berbagai kawasan di Yogyakarta.....	57
Gambar 4.2 Tutupan lahan di area lokasi sampling (bufer 1 km).....	58
Gambar 4.3 Konsentrasi PM _{2,5} di laporan lain.....	61
Gambar 4.4 Kelimpahan MP di PM _{2,5}	62
Gambar 4.5 Persebaran warna dan bentuk MP di PM _{2,5} berdasarkan kawasan.....	65
Gambar 4.6 Hasil pengujian FTIR. a. R3; b. T1 wd; c. T2 wd; c. R1	66
Gambar 4.7 Kelimpahan MP di debu jalan.....	68
Gambar 4.8 Distribusi bentuk MP di debu jalan.....	70
Gambar 4.9 Distribusi warna MP di debu jalan.....	71
Gambar 4.10 Tumpukan sampah di area jalan ringroad	72
Gambar 4.11 Persebaran konsentrasi PM _{2,5} di Yogyakarta.....	73
Gambar 4.12 Persebaran dan karakteristik MP di udara.....	75
Gambar 4. 13 Matriks korelasi Spearman antar semua variabel	81
Gambar 4.14 Perbandingan Intake antar studi	85
Gambar 4.15 Intake/Pajanan PM _{2,5} dan MP	87

“Halaman sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Mikroplastik merupakan polutan baru yang menjadi fokus penelitian dalam dekade ini terkait dengan dampaknya bagi lingkungan dan manusia (Y. Li et al., 2023; Wang et al., 2021; WHO, 2022). Mikroplastik didefinisikan secara umum sebagai potongan plastik yang berukuran antara 1 μm hingga 5 mm (Habibi et al., 2022; O'Brien et al., 2023) dan telah terdeteksi di setiap kompartemen lingkungan; udara, tanah, air laut dan air tawar, hewan, tumbuhan hingga manusia. (Haque & Fan, 2023; Myat et al., 2024; Talbot et al., 2022).

Polusi udara antropogenik merupakan salah satu bahaya kesehatan masyarakat terbesar di dunia, yang menyebabkan sekitar 9 juta kematian setiap tahunnya (WHO, 2021). Kegiatan seperti transportasi, industri, proses manajemen sampah, dan industri yang menjadi sumber utama polusi udara serta mikroplastik di area perkotaan (Leitão et al., 2023; Myat et al., 2024) oleh karena itu polusi udara dan mikroplastik khususnya di wilayah perkotaan perlu perhatian lebih banyak karena populasi dan aktivitas manusia yang tinggi di area perkotaan. Kegiatan lalu lalang kendaraan di jalanan juga dapat membentuk debu jalan (*road dust*) yang merupakan campuran partikel halus yang terkumpul dari emisi kendaraan, keausan ban dan rem, material konstruksi, dan tanah yang dapat tersuspensi ke udara (Järnlskog et al., 2022a; O'Brien et al., 2021; Tamis et al., 2021). Debu jalan dapat berperan sebagai sumber dan penyerap polutan perkotaan, termasuk *Particulate Matter* (PM) dan mikroplastik (Abbasi et al., 2019; Akhbarizadeh et al., 2021). Lebih lanjut Mon (2022) melaporkan bahwa kota besar memiliki tingkat mikroplastik di debu jalan dalam yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kawasan pedesaan (*rural*).

Mikroplastik di udara memiliki karakteristik aerodinamis yang mirip dengan pencemar partikulat PM_{2,5} di udara ambien (Ahmad et al., 2023; Akhbarizadeh et al., 2021). PM_{2,5} merupakan polutan utama (kelas 1) penyebab kanker paru-paru, yang menyebabkan 350 ribu kematian dan 7,8 juta disabilitas pada tahun 2017 (WHO, 2020). Partikel mikroplastik telah terobservasi di jaringan paru-paru

(Eberhard et al., 2024; Gasperi et al., 2018; Jenner et al., 2022) menunjukkan bahwa mikroplastik di udara dapat dihirup dan terakumulasi dalam tubuh manusia (Din et al., 2024; Gasperi et al., 2018; Shuo et al., 2021; Zuri et al., 2023). Mikroplastik dengan kepadatan dan ukuran partikel kecil yang dihirup dan tidak dihilangkan secara mekanis (misalnya, dengan bersin) akhirnya akan terakumulasi di paru-paru, bermigrasi ke kelenjar getah bening atau diangkut ke jaringan dan organ lain melalui sistem sirkulasi darah (Wang et al., 2021). Haque (2023) memperkirakan bahwa manusia dapat menghirup hingga 22 juta partikel mikroplastik setiap tahunnya. Mikroplastik secara umum dianggap sebagai partikel berbahaya karena karakteristiknya yang dapat membawa kontaminan lain jika masuk ke dalam tubuh (Ahmad et al., 2023) dengan beberapa laporan tentang peradangan lokal di tubuh manusia akibat inhalasi mikroplastik (Habibi et al., 2022).

Keberadaan mikroplastik di udara melalui pendekatan *active sampling* PM di dokumentasikan di berbagai tempat di Asia, khususnya di area perkotaan seperti di Bushehr (Akhbarizadeh et al., 2021) dan Asaluyeh (Abbasi et al., 2019) Iran; Bangkok, Thailand (Sarathana & Winijkul, 2023); Manila, Filipina (Romarate et al., 2023); Kuala Lumpur, Malaysia (Afiq Daniel Azmi et al., 2023), Surabaya, Indonesia (Syafei et al., 2019) dan Medan, Indonesia (Suryati et al., 2024). Melihat kelimpahan dan ancaman mikroplastik diudara terhadap kesehatan bagi manusia berdasarkan banyak penelitian di berbagai negara, penelitian tentang mikroplastik di udara Indonesia masih sangat terbatas. Vriend (2021) menyebutkan adanya *research gap* untuk penelitian mikroplastik di atmosfer di Indonesia, dengan laporan oleh Alam (2020) menemukan hanya 3 persen penelitian terkait mikroplastik di Indonesia dilakukan di udara dan tidak ditemukan penelitian mikroplastik di debu jalan sebagai potensi sumber mikroplastik di lingkungan.

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) salah satu kota penting di Indonesia yang dirujuk sebagai pusat kota pendidikan dan wisata bagi masyarakat Indonesia. Meningkatnya jumlah penduduk (BPS Provinsi D.I.Yogyakarta, 2024) dan kegiatan pendidikan serta wisata menyebabkan peningkatan jumlah aktivitas manusia dan lalu lintas di jalan-jalan utama Kota Yogyakarta berhubungan langsung dengan menurunnya kualitas udara di Kota Yogyakarta (Novianto et al., 2022). Penelitian oleh Syafei (2019) dan Järnlskog (2022a) melaporkan hubungan

yang kuat antara kepadatan lalu lintas dan kelimpahan mikroplastik di udara, hal ini mendukung perlunya penelitian tentang PM_{2,5}, mikroplastik dan debu jalan yang dilakukan sekaligus di area lingkungan lalu lintas di kota Yogyakarta. Selain itu terdapat *research gap* tentang kelimpahan mikroplastik diantar beberapa jenis wilayah aktivitas manusia di perkotaan seperti kawasan wisata dan transportasi umum. Penelitian tentang polutan di udara juga sangat erat kaitannya dengan kondisi cuaca yang juga berkaitan dengan potensi sumber mikroplastik seperti debu jalan (O'Brien et al., 2023). Perlu dilakukan pembahasan lebih lanjut hubungan antara PM_{2,5}, debu jalan dan kondisi cuaca dengan keberadaan mikroplastik. Lebih lanjut, penelitian ini memberikan bahasan tentang kemungkinan risiko pajanan yang ada di PM_{2,5} dan mikroplastik di udara sebagai data untuk pengelolaan polusi udara dan monitoring kesehatan publik di Kota Yogyakarta yang lebih baik.

1.2. Rumusan Masalah

Kota Yogyakarta memiliki memiliki tingkat kepadatan penduduk dan lalu lintas yang cukup tinggi sehingga konsentrasi PM_{2,5} (partikulat atau debu) juga berpotensi menjadi tinggi. Selain kekhawatiran terhadap bahaya partikulat terhadap manusia, belakangan ini terdapat juga kekhawatiran akan bahaya mikroplastik yang terhirup ke dalam tubuh manusia. Sementara itu, mikroplastik dapat terbawa di dalam partikulat yang terhirup ke dalam saluran pernapasan (*respirable*), yaitu PM_{2,5}. Studi untuk mengetahui kelimpahan mikroplastik di dalam debu sudah ada sebelumnya, namun belum ada di area Yogyakarta.

Untuk mengetahui hal ini diperlukan investigasi yang cukup terhadap jalur transportasi mikroplastik di udara, yaitu dengan mengidentifikasi keberadaan mikroplastik pada PM_{2,5}. Selain polutan udara, debu jalan sebagai salah satu sumber potensial mikroplastik belum pernah dilakukan di Yogyakarta. Studi yang mengaitkan studi mikroplastik di PM_{2,5} (*airborne microplastic*), mikroplastik di debu jalan (*road dust microplastic*) dan keadaan cuaca perlu dilakukan untuk memahami kemungkinan interaksi antara media terhadap kelimpahan mikroplastik. Selain itu, tingkat risiko dari debu (PM_{2,5}) dan mikroplastik di udara menjadi penting untuk diketahui secara spesifik demi memberikan informasi pengelolaan kualitas udara dan mitigasi kesehatan masyarakat di area Yogyakarta.

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian tesis ini adalah:

1. Menentukan tingkat konsentrasi $PM_{2,5}$ di area jalan utama Kota Yogyakarta.
2. Mengetahui kelimpahan dan karakteristik mikroplastik pada $PM_{2,5}$ dan debu jalan di berbagai kawasan jalan utama Kota Yogyakarta.
3. Menentukan korelasi konsentrasi $PM_{2,5}$ dan kelimpahan mikroplastik di dalamnya.
4. Menentukan korelasi antara $PM_{2,5}$, mikroplastik $PM_{2,5}$, dan mikroplastik debu jalan dengan kondisi cuaca dan kondisi lalu lintas di Kota Yogyakarta.
5. Menentukan tingkat pajanan *intake* $PM_{2,5}$ dan mikroplastik di udara terhadap masyarakat di sekitar area sampling.

1.4. Hipotesis Penelitian

Beberapa hipotesis yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Bahwa konsentrasi $PM_{2,5}$ akan berbeda pada setiap kawasan sampling.
2. Bahwa terdapat mikroplastik di udara pada parameter $PM_{2,5}$ di area jalan utama Kota Yogyakarta.
3. Bahwa terdapat mikroplastik di debu jalanan di area jalan utama Kota Yogyakarta.
4. Bahwa konsentrasi $PM_{2,5}$ dan kelimpahan mikroplastik dipengaruhi faktor kondisi cuaca.
5. Bahwa adanya hubungan antara kelimpahan mikroplastik di $PM_{2,5}$ dan debu jalan.
6. Bahwa kelimpahan mikroplastik kemungkinan berbeda di setiap kawasan area sampling.
7. Bahwa faktor meteorologi dan kondisi lalu lintas berpengaruh pada kelimpahan mikroplastik.
8. Bahwa terdapat kemungkinan mikroplastik yang masuk ke tubuh manusia melalui udara di area jalan utama kota Yogyakarta.

1.5. Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini antara lain sebagai berikut:

- 1) Penelitian ini memfokuskan pada deskripsi secara umum tentang konsentrasi mikroplastik di $PM_{2,5}$ di jalanan utama provinsi DIY. Lokasi sampling dibagi berdasarkan kawasan yaitu Kawasan Terminal, Kawasan Ringroad, dan Kawasan Wisata dengan minimal 2 titik sampling.
- 2) Udara yang di ambil adalah *Particulate Matter* 2,5 μm ($PM_{2,5}$) dengan standar pengambilan sampel menggunakan SNI 7119-14- 2016 untuk Udara ambien;
- 3) Analisis lebih lanjut menggunakan sampel debu jalan sebagai pembanding kelimpahan mikroplastik di lingkungan jalan.
- 4) Debu jalan (*road dust*) merupakan hasil debu yang didapatkan dari aktivitas di jalan raya. Pengambilan sampel debu jalan belum memiliki standar internasional sehingga mencontoh pada penelitian Yukioka (2020) dan Mon (2022) yang kemudian di sesuaikan sesuai kondisi sampling penelitian ini.
- 5) Satuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah $\mu g/m^3$ untuk konsentrasi $PM_{2,5}$, partikel/ m^3 untuk kelimpahan mikroplastik di udara, dan partikel/g untuk kelimpahan mikroplastik di debu jalan, guna memudahkan perbandingan dengan hasil penelitian lainnya.
- 6) Semua sampel yang didapatkan dari lingkungan di simpan, di pindahkan dan di olah menggunakan wadah non plastik
- 7) Identifikasi kelimpahan dan karakteristik mikroplastik di udara menggunakan metode dari Akhbarizadeh (2021) yang sudah di modifikasi. Pengujian mikroplastik di debu jalan menggunakan metode yang diacu dari penelitian Yukioka (2020) dan metode *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dengan modifikasi.
- 8) Identifikasi komposisi mikroplastik yang dominan dengan menggunakan pengujian *Spektrofotometri Fourier Transform Infrared* (FTIR).
- 9) Penentuan potensi pajanan/*intake* menggunakan perhitungan yang mengacu pada Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Direktorat Jenderal PP dan PL Kementerian Kesehatan (2012).

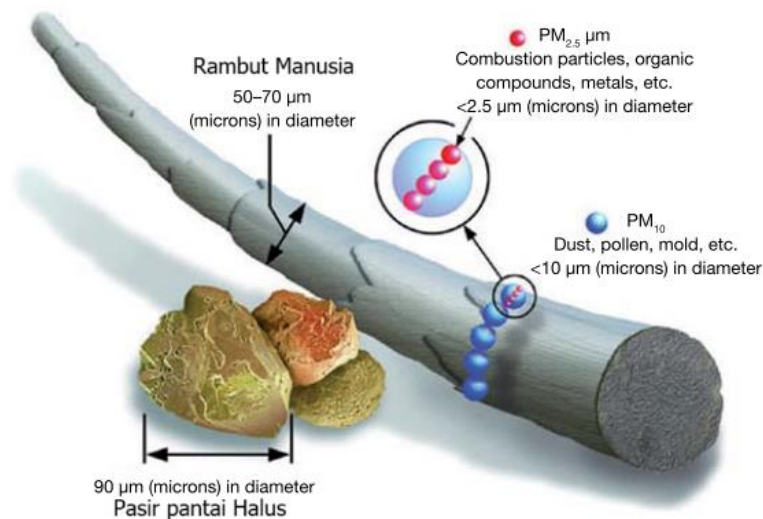
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Partikulat di Udara

2.1.1 Definisi dan Karakteristik PM_{2,5}

Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021, mendefinisikan Pencemaran Udara sebagai masuk atau di masukkannya zat, energi dan atau komponen lainnya ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu udara ambien yang telah di tetapkan. Polutan udara yang menjadi parameter pada PP 22/2021 adalah keberadaan *particulate matter* (PM). Karakterisasi untuk PM berdasarkan konsentrasi massa partikel (Gambar 2.1) yaitu PM_{2,5} untuk partikel yang lebih kecil dari 2,5 μm dan PM₁₀ untuk partikel yang lebih kecil dari 10 μm .



Gambar 2.1 Ukuran relatif dari polutan partikulat
(WHO, 2022)

PM di lingkungan perkotaan dan non-perkotaan merupakan campuran kompleks dengan komponen yang memiliki karakteristik kimia dan fisik yang beragam. Karakteristik PM yang berbeda relevan dengan efek kesehatan yang berbeda. Penelitian terbaru menyoroti kompleksitas dan sifat dinamis PM di udara, karena terbentuk baik secara primer maupun sekunder dan kemudian terus mengalami transformasi kimia dan fisik di atmosfer (WHO, 2022). Meskipun demikian, partikel di udara masih diklasifikasikan secara umum berdasarkan sifat

aerodinamisnya, karena sifat ini menentukan proses pengangkutan dan pembuangan di udara serta lokasi pengendapan dan jalur pembersihan di dalam saluran pernapasan. Bukti epidemiologi dan toksikologi menunjukkan bahwa massa PM ($PM_{2.5}$, PM_{10}) memiliki fraksi-fraksi dengan berbagai jenis penyusun dan tingkat dampak kesehatan yang berbeda (González Ortiz et al., 2021).

Sumber $PM_{2.5}$ meliputi emisi langsung seperti kebakaran hutan dan pembakaran limbah pertanian, debu mineral yang tertiuap angin dari daerah kering, dan pembakaran bahan bakar yang tidak efisien, serta emisi sekunder dari reaksi kimia atmosfer antara polutan pendahulu fase gas primer. Prekursor ini dipancarkan dari proses pembakaran dan non-pembakaran yang meliputi penggunaan energi rumah tangga, kendaraan di jalan raya dan di luar jalan raya, pembangkitan energi, penggunaan pelarut, proses industri, dan aplikasi pupuk pertanian (Qonitan et al., 2024; Zhang et al., 2023). Setelah masuk ke atmosfer, produksi kimia $PM_{2.5}$ di atmosfer sangat non-linier. Sumbernya yang sangat banyak dan proses pembentukan kimia yang kompleks, membuat baik massa total maupun unsur kimia $PM_{2.5}$ bergantung pada kondisi lingkungan setempat, sumber dominan, dan besarnya emisi spesifik sumber tersebut. Polusi udara dan kimia atmosfer tidak mematuhi batasan politik, upaya mitigasi memerlukan pertimbangan efek lintas batas di berbagai lokasi, yang diinformasikan oleh studi tentang kontribusi sumber $PM_{2.5}$ dan beban penyakit yang dapat distribusikan di berbagai skala sub nasional hingga global (McDuffie et al., 2021).

Waktu paruh partikel $PM_{2.5}$ di atmosfer sangat panjang karena ukurannya yang kecil, hal ini memungkinkan partikel $PM_{2.5}$ bertahan lama di atmosfer dan bahkan berpindah dan menyebar ke tempat-tempat yang jauh di mana orang-orang dan lingkungan dapat terpapar polusi dalam skala yang sama. Partikel-partikel tersebut dapat mengubah keseimbangan nutrisi dalam ekosistem perairan, merusak hutan dan tanaman, serta mengasamkan badan air. Ukuran kecil $PM_{2.5}$, juga menyebabkan dampak kesehatan yang lebih serius. Partikel-partikel halus tersebut merupakan penyebab utama terbentuknya “kabut asap (*Haze*)” di berbagai wilayah metropolitan (Sirithian & Thanatrakolsri, 2022; Sulong et al., 2017).

2.1.2 Standar dan Baku Mutu PM_{2,5}

WHO merekomendasikan standar baku mutu (*Air Quality Guideline - AQG*) untuk konsentrasi PM_{2,5} di udara (WHO, 2021). Standar konsentrasi PM_{2,5} direkomendasikan untuk pengukuran 24 jam adalah 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan rekomendasi interim target kualitas udara dibagi menjadi 4, dan target akhir interim 4 sebesar 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Indonesia sendiri pada peraturan terbaru di PP No. 21 tahun 2021 memiliki standar baku mutu PM_{2,5} sebesar 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ yang masih berada dalam rentang target interim 2 rekomendasi WHO sebesar 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sebagai pembanding, negara lain seperti Malaysia dan Amerika serikat memiliki baku mutu dalam interim 3 rekomendasi WHO sebesar 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (CREA, 2022). Negara lain seperti Cina memiliki standar sendiri dengan batasan konsentrasi rata-rata harian adalah 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tingkat I) dan 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tingkat II). Tingkat I mengacu pada batas konsentrasi yang diperlukan untuk tempat seperti cagar alam, dan area lain yang memerlukan konservasi khusus. Tingkat II mengacu pada batas konsentrasi yang diperlukan untuk area pedesaan, area perumahan, area industri, area budaya, dan area perumahan dengan penggunaan campuran (C. Li et al., 2020).

Upaya monitoring dan pengukuran konsentrasi polutan PM_{2,5} telah dilakukan di kota-kota besar di Indonesia, dengan data yang dapat di akses secara umum, khususnya di kota besar seperti Kota Jakarta dan Kota Yogyakarta. Qonitan (2024) menyebutkan bahwa dampak kematian akibat PM_{2,5} terhadap kesehatan dan ekonomi Jakarta diperkirakan sebesar 2,2% dari Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Provinsi Jakarta. Berdasarkan laporan dari Greenpeace (2022), untuk warga Malaysia, harapan hidup bertambah 1,8 tahun jika konsentrasi PM_{2,5} menjadi 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.1.3 Dampak PM_{2,5}

PM_{2,5} sangat terkait dengan berbagai penyakit sistem pernapasan, karena ukurannya memungkinkan mereka menembus ruang dalam paru-paru. Partikel-partikel tersebut menghasilkan efek toksik sesuai dengan sifat kimia dan fisiknya (Ihsan et al., 2023; Sulong et al., 2017; C. Yang et al., 2023). Orang dengan asma, pneumonia, diabetes, dan penyakit pernapasan dan kardiovaskular sangat rentan

dan mudah terpengaruh oleh efek PM_{2.5}. Laporan WHO tentang AQG menyebutkan peningkatan risiko yang lebih curam pada tingkat paparan yang lebih rendah.

Komponen PM_{2.5} dapat bersifat organik (hidrokarbon aromatik polisiklis, dioksin, benzena, 1-3 butadiena) atau anorganik (karbon, klorida, nitrat, sulfat, logam) (Manisalidis et al., 2020) dengan penelitian baru bahwa komponen PM_{2.5} bisa juga terdiri dari mikroplastik (Abbasi et al., 2017; Akhbarizadeh et al., 2021; WHO, 2021). Berbagai material yang terkandung dalam PM_{2.5} ini dapat menyebabkan berbagai gangguan saluran pernafasan seperti infeksi saluran pernafasan akut (ISPA), kanker paru-paru, kardiovaskular, kematian dini, dan penyakit paru-paru obstruktif kronis (Qonitan et al., 2024). PM_{2.5} dapat menembus pertahanan sistem saluran pernapasan manusia sehingga dapat terikat oleh darah manusia melalui pertukaran udara pada alveolus di paru-paru. Partikulat dapat mengendap dalam saluran pernafasan melalui beragam mekanisme fisik antara lain sedimentasi, impaksi, difusi, intersepsi, dan elektronik presipitasi. (Ida et al., 2022; R. Pangestika & Wilti, 2021). Penelitian lain juga telah membuktikan PM_{2.5} memiliki dampak signifikan terhadap visibilitas atmosfer, iklim dan ekosistem (Jing et al., 2020).

Penelitian tentang dampak PM_{2.5} di Indonesia sendiri telah banyak dilakukan seperti penelitian pada pedagang Kota Depok menunjukkan hubungan signifikan antara gangguan fungsi paru dengan asupan PM_{2.5} yang melebihi dosis referensi, penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa terdapat hubungan signifikan antara gangguan fungsi paru dengan konsentrasi polutan PM_{2.5} dengan proporsi sampel 50% mengalami restriktif dan 10,9% mengalami obstruktif pada pekerja industri semen di Citereup (Sembiring, 2020). Paparan jangka panjang terhadap PM_{2.5} merupakan faktor risiko lingkungan terbesar bagi kesehatan manusia, dengan perkiraan 4,1 juta kematian yang dapat distribusikan di seluruh dunia (7,3% dari total jumlah kematian global) pada tahun 2019. PM_{2.5} luar ruangan sebagian besar terdiri dari ion anorganik, senyawa karbon (karbon hitam dan organik, termasuk aerosol organik sekunder), dan debu mineral (Azhari et al., 2021; Meo et al., 2022). Berdasarkan laporan kanker dunia yang dilakukan oleh *International Agency for Research on Cancer* (IARC) (WHO, 2020) disebutkan bahwa PM_{2.5} diklasifikasikan sebagai polutan utama (kelas 1) penyebab kanker paru-paru.

2.1.4 Pengaruh Cuaca pada PM_{2,5}

Konsentrasi PM_{2,5} dapat dipengaruhi oleh banyak faktor khususnya kondisi meteorologi (Enyoh et al., 2019a; Jing et al., 2020; H. Yang et al., 2017). Kondisi meteorologi memainkan peran penting dalam proses emisi polutan udara, transportasi, pengenceran, konversi kimia, dan pengendapan. Kecepatan angin dapat mengubah difusi dan transportasi PM_{2,5} dalam arah horizontal. Deposisi basah yang disebabkan oleh presipitasi memiliki efek pengurangan pada PM_{2,5} di sebagian besar wilayah. Kelembaban absolut juga memengaruhi konsentrasi PM_{2,5}, dan peningkatan kelembaban kondusif terhadap konversi zat semi-volatil menjadi fase aerosol, sehingga meningkatkan konsentrasi PM_{2,5}. Faktor-faktor seperti turbulensi dan ketinggian pencampuran (ditentukan oleh gradien suhu), kecepatan angin, arah angin, dan presipitasi selama periode pengambilan sampel dapat memengaruhi konsentrasi yang ditemukan dalam sampel udara (Jing et al., 2020; Novianto et al., 2022)

Cuaca yang lebih dingin dan lebih lembap mengakibatkan permukaan jalan yang lembap yang memungkinkan partikel terperangkap di permukaan jalan daripada terbawa ke udara. Selama musim dingin, kecepatan kendaraan sering kali lebih rendah karena lapisan salju dan es yang juga dapat mengurangi turbulensi dan *resuspensi* partikel oleh lalu lintas. Peningkatan aktivitas biologis yang terjadi selama musim semi (dan juga musim panas), yang menyebabkan peningkatan emisi partikel alami seperti serbuk sari dan spora serta senyawa organik sekunder (Järnlskog et al., 2022a).

2.1.4 Pengaruh Penggunaan Lahan pada PM_{2,5}

Peningkatan jumlah penduduk, perluasan wilayah perkotaan, penggundulan hutan, dan adaptasi teknologi baru oleh industri telah berdampak besar pada penggunaan permukaan bumi/sumber daya alam juga dapat menyebabkan perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan (*Land use Land Cover* - LULC). Transformasi penggunaan lahan memiliki efek mendalam pada karakteristik fisik dan termal permukaan tanah, akibatnya berdampak pada kualitas udara lingkungan perkotaan (Jodhani et al., 2024)

Polusi udara terkait erat dengan distribusi penggunaan lahan lokal pada skala mikro; khususnya, distribusi spasial ruang hijau perkotaan dan lahan konstruksi memiliki dampak signifikan terhadap polusi udara perkotaan (C. Li et al., 2020; J. Yang et al., 2020). Analisis tentang hubungan polusi udara dan penggunaan lahan (*land use land cover* (LULC)) sudah banyak dilakukan (Dilawar et al., 2023; Jodhani et al., 2024; C. Li et al., 2020; Noi Phan et al., 2020) sama halnya hubungannya dengan PM_{2,5} tutupan lahan, dan sudah banyak dilakukan di wilayah Asia. Li (2020) secara umum menyampaikan, area yang memiliki banyak lahan hijau seperti hutan dan rerumputan dapat mengurangi konsentrasi PM_{2,5} secara signifikan, sementara area terbangun memiliki korelasi yang positif dengan konsentrasi PM_{2,5} (Cheewinsiriwat et al., 2022) selain area terbangun untuk area urban di temukan mayoritas partikel di udara (kecuali partikel organik/biogenik) dapat dikaitkan dengan kegiatan lalu lintas lalu lintas (Järnskog et al., 2022a)

2.2. Mikroplastik di Udara

2.2.1 Definisi Mikroplastik

Sampah plastik pertama kali dilaporkan pada awal tahun 1970-an, namun baru pada tahun 2004 istilah “Mikroplastik (MP)” diciptakan untuk menggambarkan partikel plastik yang ukurannya berkisar antara 1 µm hingga 5 mm. (C. Yang et al., 2023). Salah satu klasifikasi plastik yang paling umum adalah berdasarkan ukuran, yang dapat dibagi menjadi lima kategori: megaplastik (>50 cm), makroplastik (5–50 cm), mesoplastik (0,5–5 cm), mikroplastik (1 µm –5 mm) dan nanoplastik (<1 µm) (Myat et al., 2024).

MP didefinisikan sebagai partikel padat, tidak larut dalam air, berbasis polimer dengan ukuran kurang dari 5 mm dan tingkat degradasi rendah (Järnskog et al., 2022b). Terdapat beberapa perdebatan untuk ambang maksimum ukuran MP sebesar 1 mm dikarenakan kekhawatiran meningkatnya toksisitas partikel dengan luas area lebih besar dibandingkan dengan rasio volumenya (Hartmann et al., 2019; Myszk et al., 2021). Setiap tahap siklus hidup plastik, dari ekstraksi bahan baku hingga produksi, pengangkutan, penggunaan, pembuangan, dan pemulihan, mengeluarkan MP primer dan sekunder serta zat berbahaya lainnya (O’Brien et al., 2023; Yao et al., 2022).

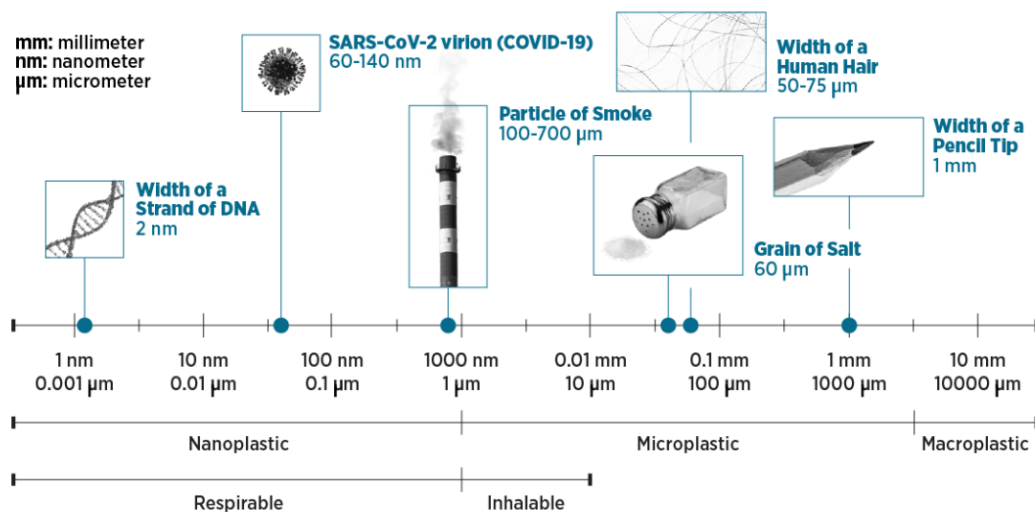
Berdasarkan sumbernya, MP dibagi menjadi 2 kategori yaitu plastik yang sengaja dibuat dengan ukuran di bawah 5 mm disebut sebagai MP primer; dan MP sekunder yang merupakan MP hasil dari proses degradasi/terkelupas/terfragmentasi dari produk plastik yang lebih besar (O'Brien et al., 2023).

2.2.2 Karakteristik Mikroplastik di Udara

Karakteristik MP yang di temukan di udara dapat lebih jelas dijabarkan sebagai berikut.

A. Ukuran Partikel Mikroplastik

Ukuran MP dapat dilihat langsung menggunakan mikroskop. Partikel yang berukuran > 5 mm tidak termasuk sebagai MP di banyak penelitian. Partikel tersebut sering disebut sebagai mesoplastik atau makroplastik. Partikel plastik berukuran $< 1 \mu\text{m}$ secara umum dikategorikan sebagai nanoplastik (Hartmann et al., 2019). Ukuran MP dapat dilihat di Gambar 2.2 Berikut.



Gambar 2.2 Ukuran partikel mikroplastik

Sumber: *Center for International Environmental Law (Ciel.org)*

B. Bentuk Partikel Mikroplastik

Partikel MP menunjukkan morfologi yang sangat heterogen dan telah dijelaskan menggunakan serangkaian terminologi yang sama beragamnya, termasuk bola, pelet, butiran, manik-manik, granula, filamen, serat, garis, film, busa, polistiren yang mengembang, dan fragmen. mengetahui morfologi partikel sangat berguna ketika mencoba mengidentifikasi sumber potensial atau menyimpulkan interaksi

lingkungan, seperti perilaku partikel dalam sistem lingkungan dan potensi tertelan oleh biota.

Serat dapat berasal dari tekstil atau tali dan bentuknya yang tidak beraturan dapat memengaruhi cara serat tersebut tenggelam di lingkungan perairan. Namun, saat ini, tidak ada standar untuk mengklasifikasikan partikel berdasarkan morfologi MP dan oleh karena itu, observasi dan pencatatan bentuk MP sangat subjektif dan perbandingan antara berbagai penelitian menjadi cukup sulit.(A. L. Lusher et al., 2020). Bentuk MP yang sering ditemukan di lingkungan dapat dilihat di Tabel 2.1.

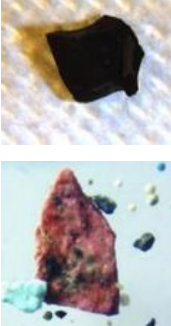
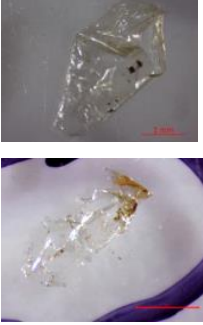
C. Warna Partikel Mikroplastik

Warna dari MP sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan dan pewarna atau aditif yang ditambahkan selama proses produksi. Dengan adanya proses pelapukan atau *weathering* di lingkungan, warna MP dapat berubah seiring waktu, yang dapat menyebabkan perubahan warna seperti pudar atau menggelap. Pemahaman tentang berbagai warna MP di lingkungan dapat membantu identifikasi sumber MP dan pemantauan pencemaran plastik secara umum (Chen et al., 2020; Noorimotlagh et al., 2024).

Produk plastik dapat dibagi menjadi tujuh kategori menurut warna kromatiknya: coklat, merah, jingga, kuning, hijau, biru, dan ungu (hitam, putih, dan abu-abu adalah warna akromatik) (Zhao et al., 2022). Warna yang homogen dianggap sebagai indikasi partikel plastik, khususnya untuk fragmen. Warna MP dapat berubah akibat paparan sinar matahari, oksidasi, atau kontaminasi lingkungan, menyebabkan perubahan warna menjadi pudar atau menggelap. Untuk mengurangi bias identifikasi visual untuk klasifikasi warna MP, Lusher, et al. (2020) merekomendasikan pencatatan warna ke tingkat warna sekunder (merah, jingga, kuning, hijau, biru, ungu) serta memasukkan warna hitam, putih, dan bening.

Perbedaan warna partikel berefek langsung pada proses *weathering* plastik, warna selanjutnya dapat memengaruhi kolonisasi mikroorganisme pada MP, penyerapan, pelepasan, dan degradasi polutan yang terkait dengan MP, dan toksisitas biologis MP.

Tabel 2.1 Klasifikasi bentuk mikroplastik

Bentuk MP	Contoh Gambar	Definisi	Sumber
Bola/granule/ pelet		Berbentuk bulat sempurna, tidak memiliki tepi yang patah yang menunjukkan bahwa partikel tersebut berasal dari partikel yang lebih besar. tidak ada bentuk irregular, dan biasanya terlihat halus dan mengkilap. Mungkin berbentuk bulat atau granular. Menunjukkan tanda-tanda telah direkayasa secara khusus agar memiliki bentuk dan ukuran tertentu.	(De Frond & Munno, 2021; A. L. Lusher et al., 2020)
Fragmen		Bentuk tidak beraturan, mungkin memiliki tepi yang halus atau bersundut, mungkin datar atau bersundut tetapi umumnya tampak seperti pecah akibat serpihan yang lebih besar serta relatif keras.	(Abbasi et al., 2019; A. L. Lusher et al., 2020)
Film		Terlihat seperti lembaran tipis, datar dan flexible, bisa melengkuk. Sering ditemukan dalam warna transparan atau agak transparan dan tidak mudah pecah.	(De Frond & Munno, 2021; A. L. Lusher et al., 2020)
Fiber/Serat/ Filamen		Bahan berserat panjang yang panjangnya jauh lebih panjang daripada lebarnya. Serat biasanya diidentifikasi oleh ketebalannya yang homogen di seluruh panjangnya. Serat juga dapat hadir dalam bundel	(Akhbarizadeh et al., 2021; A. L. Lusher et al., 2020)

D. Komposisi Polimer Mikroplastik

Penentuan komposisi kimia partikel plastik dapat membantu memahami sumber pencemar dan sifat dari MP. Terdapat enam jenis utama MP yang diamati di lingkungan berdasarkan komposisi kimia dan kepadatannya: PS, LDPE, HDPE, PP, PVC, dan PET. Hal ini sangat berhubungan dengan material plastik yang paling banyak digunakan oleh masyarakat dunia (Haque & Fan, 2023; Ilyas et al., 2018), namun secara lebih luas, partikel MP yang dapat ditemukan di lingkungan dapat memiliki komposisi kimia seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tipe polimer plastik dan penggunaannya

Tipe Polimer/Resin	Pengunaan	Densitas (g/cm³)
<i>Polyethylene</i> (PE)	Kantong plastik, botol plastik, kontainer penyimpanan	0,91 – 0,95
<i>Polypropylene</i> (PP)	sedotan, peralatan memancing (jaring dan tali), pita, karpet, barang berkemah botol, kemasan makanan, alat-alat medis steril dan wadah untuk obat-obatan	0,90 – 0,92
<i>Polystyrene</i> (PS) (<i>expanded</i>)	Gelas plastik, kotak pendingin, peralatan rumah tangga dan kemasan busa	1,01 – 1,05
<i>Polystyrene</i> (PS)	produk kosmetik, furnitur plastik, peralatan dapur, peralatan plastik sekali pakai, dan bahan kemasan plastik	1,04 – 1,09
<i>Polyvinyl chloride</i> (PVC)	Pipa, kontainer, talang, jendela dan pintu	1,16 – 1,30
<i>Polyamides</i> (PA) atau nilon	Tali, jaring ikan, lemari es, kemasan makanan	1,13 – 1,15
<i>Polyethylene terephthalate</i> (PET)	Botol, strapping atau tali pengikat, dan tekstil	1,34 – 1,39
<i>Polyester</i> (PES) resin + Fiberglass	Tekstil, fiber, kapal laut	>1,3
Asetat selulosa	Filter rokok	1,22 – 1,24
<i>Low-density polyethylene</i> (LDPE)	Bungkus dan film plastik yang lengket, kotak jus, isolasi kawat, dan tas belanja sekali pakai	0,91 – 0,93
<i>High-density polyethylene</i> (HDPE)	mainan, botol sampo, tempat sampah daur ulang, pelapis kotak sereal, dan sistem pipa	0,94

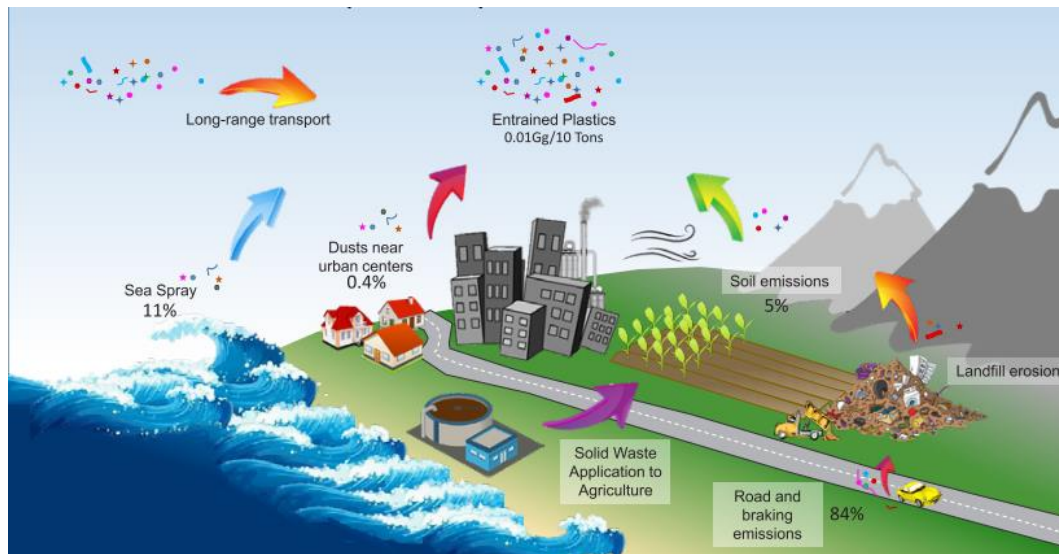
Tipe Polimer/Resin	Penggunaan	Densitas (g/cm ³)
<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i> (ABS)	Peralatan rumah tangga, peralatan elektronik, komponen otomotif dan peralatan medis	1,06 – 1,08
<i>Polycarbonate</i> (PC)	Kacamata, perangkat elektronik, panel dan komponen otomotif	1,20 – 1,22

Sumber: GESAMP (2016), A. Lusher et al. (2017)

2.2.3 Sumber dan Distribusi Mikroplastik di Udara

Emisi MP di udara (*Atmospheric Microplastic* - AMP) berasal dari industri rumah tangga, daerah padat penduduk, dan fasilitas terkait limbah. Ada berbagai sumber MP di udara, misalnya, pakaian berbahan sintetis, debu jalan, ban kendaraan, sampah MP, aplikasi rumah tangga, proses industri, dan pencetakan 3D. Berdasarkan publikasi oleh Brahney (2020) pada Gambar 2.3, menyebutkan bahwa sekitar 84% dari MP di Atmosfer di area Amerika Barat mungkin berasal dari jalanan, 11% berasal dari laut, 5% dari tanah dan bisa berasal dari sumber *landfill*, kegiatan perkotaan dan transportasi jarak jauh, namun karena nilai kepastian yang masih rendah (<30%) memerlukan penelitian lebih lanjut bagaimana mekanisme MP masuk ke Atmosfer dari berbagai media lingkungan. Kelimpahan AMP berbeda-beda tergantung pada lokasi yang diteliti (negara yang berbeda, daerah perkotaan atau pedesaan, dan tujuan penggunaan lahan) (Myat et al., 2024).

Fokus peneliti MP yang mulanya hanya banyak di laut dan perairan, kini mulai beralih ke MP yang terdispersi di udara (Enyoh et al., 2019a). Sumber MP yang terangkat ke atmosfer berasal dari berbagai kegiatan seperti dari keausan (*wear and tear*) bahan pakaian sintetis, pencucian dan pengeringan, erosi ban karet sintetis, kerusakan perabot rumah tangga, emisi dari industri tekstil sintetis, emisi dari industri *vinil klorida* dan *polivinil klorida* (PVC), pembuangan barang plastik dan kontaminasi dari debu kota (Habibi et al., 2022). Partikel-partikel ini dapat terdistribusi secara luas dan menumpuk di berbagai lokasi, tergantung pada faktor-faktor seperti kecepatan angin, pola cuaca, dan aktivitas manusia.



Gambar 2.3 Representasi sumber mikroplastik ke atmosfer di wilayah Amerika Barat (Brahney et al., 2021)

MP dengan ukuran kecil dan kepadatan rendah dapat tersuspensi dalam arus angin dan diangkut dalam jarak yang jauh. Kemungkinan besar beberapa MP mudah tersuspensi di udara karena ukurannya yang kecil dan kepadatannya yang rendah. Seiring meningkatnya polusi MP, kekhawatiran tentang potensi dampaknya terhadap kesehatan pun meningkat (Rahman et al., 2021).

Dilaporkan bahwa MP di udara, yang juga dikenal sebagai partikel MP atmosfer, dapat diangkut dari permukaan laut di zona lintang rendah ke daerah terpencil termasuk zona Arktik. MP di atmosfer dianggap sebagai kategori kontaminan yang baru muncul (*emerging pollutant*) dengan kekhawatiran bahwa menghirup MP dapat merugikan kesehatan manusia. Distribusi dan pengangkutan MP atmosfer diatur oleh kecepatan dan arah arus angin, aliran udara naik/turun, daya angkat konveksi, dan turbulensi (Gasperi et al., 2018; Rahman et al., 2021).

Keberadaan MP sudah di konfirmasi ada di atmosfer (udara), baik di udara dalam maupun luar ruangan (Dris et al., 2016). Penelitian lain juga melaporkan bahwa MP dapat terbawa udara dalam berbagai bentuk (Enyoh et al., 2019). Beberapa penelitian tentang MP di udara yang telah dilakukan dapat dilihat di Tabel 2.3, menunjukkan konsentrasi MP di udara sangat beragam dari kurang dari 1 partikel per m^3 hingga ratusan partikel per m^3 . Temuan dari penelitian mengonfirmasi bahwa MP kini ada di mana-mana dalam ekosistem global bumi.

Tabel 2.3 Penelitian terdahulu tentang mikroplastik di udara

Lokasi Studi	Kelimpahan (partikl/m³)	Bentuk	Warna	Tipe Polimer*	Sumber
Kota Bangkok, Thailand	333.42 ±142.99	Fiber, fragmen	N/A	PE, PP, PU, PS, and cellophane	(Sarathana & Winijkul, 2023)
Nakhon si Thammarat, Thailand	0.2 - 1.55	Fiber, fragmen	Hitam, biru, coklat	ABS, EP, NY, PES, PET, PMMA, and PU	(Myat et al., 2024)
Kuala Lumpur, Malaysia	97 - 775	N/A	N/A	N/A	(Afiq Daniel Azmi et al., 2023)
Surabaya, Indonesia	131.75 - 174.97	Fiber, fragmen, film	N/A	PE, PET, and cellophane	(Syafei et al., 2019)
Bandung, Indonesia	3.67 - 14.27	Fragmen, fiber, granule	N/A	EVA, PBR, PCL, PDAP, PE, PET, PVA	(Hidayat et al., 2024)
Osaka, Jepang	0.63 - 1.12	Fragmen, fiber, granule	N/A	EVA, PE, PP, PS, PVC	(Hidayat et al., 2024)

*ABS: acrylonitrile butadiene styrene, CA: cellulose acetate, EP: epoxy resin, EVAc: ethylene vinylacetate copolymer, NY: nylon, PA: polyamide, PAN: polyacrylonitrile, PBT: polybutylene terephthalate, PC: polycarbonate, PE: polyethylene, PEI: polyethylenimine, PES: polyester, PET: polyethylene terephthalate, PMMA: polymethylmethacrylate, POM: polyoxymethylene, PP: polyphenylene sulfide, PPSU: polyphenylsulfone, PS: polystyrene, PSU: polysulfone, PTFE: polytetrafluoroethylene, PU: polyurethane, PUR: polyurethane resin, PVA: polyvinyl alcohol, PVC: polyvinyl chloride.

Penelitian MP secara luas masih menggunakan pengamatan visualisasi dalam mengidentifikasi keberadaan MP, setelah dilakukan proses purifikasi dan ekstraksi MP dari media lingkungan, partikel terduga plastik diamati di bawah mikroskop (Tirkey & Upadhyay, 2021). Dalam hierarki visualisasi MP, kategori deskriptif dapat digunakan untuk membantu identifikasi antara lain: morfologi (ukuran, bentuk) dan sifat optik (warna). Selanjutnya partikel dapat di konfirmasi sebagai MP dengan melakukan pengujian polimer dengan alat seperti Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).

Distribusi dan pengangkutan MP atmosfer diatur oleh kecepatan dan arah arus angin, aliran udara naik/turun, daya angkat konveksi, dan turbulensi. Mereka memengaruhi pengangkutan dan nasib MP di antara berbagai kompartemen

lingkungan—hidrosfer, pedosfer, dan atmosfer. MP atmosfer dapat berpindah ke daerah terpencil dan mengendap melalui presipitasi hujan dan salju. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami dampak peristiwa curah hujan/salju dan menarik korelasi antara pengendapan MP dan kondisi iklim. Angin kencang dan hujan lebat mengakibatkan pengendapan MP atmosfer di kota-kota besar lebih tinggi. Pengendapan atmosfer ditemukan lebih tinggi di daerah pesisir tempat arus angin lebih kuat serta pengendapan MP atmosfer yang lebih tinggi dapat dikaitkan dengan aktivitas manusia yang lebih tinggi (Haque & Fan, 2023).

2.2.4 Dampak Mikroplastik di Udara

Tingkat toksisitas MP bertambah seiring dengan berkurangnya ukuran partikel dikarenakan kemungkinan masuknya MP ke dalam makhluk hidup termasuk polutan yang ikut dan terakumulasi seperti *persistent organic pollutants* (POPs) yang ada di permukaan dari partikel MP (Myszka et al., 2021).

MP lebih kecil dan lebih sulit didaur ulang dan dihilangkan dari lingkungan. Selain itu, MP dapat dengan cepat tersebar dan dibuang ke air limbah, tanah, dan udara, yang menyebabkan dampak ekologis yang negatif. MP dalam debu jalan dapat tertelan, terhirup, dan bersentuhan dengan kulit oleh manusia, sehingga mengancam kesehatan manusia. Selain toksisitas bawaan MP sendiri, MP dapat membawa berbagai bahan kimia beracun seperti logam berat dan polutan organik melalui proses penyerapan dan memperkuat risiko polutan ini (C. Yang et al., 2023). Penjelasan tentang dampak MP lebih lanjut akan dijabarkan di bagian 2.4.1.

2.3. Debu Jalan dan Resuspensi Partikulat ke Udara

2.3.1 Definisi dan Komposisi Debu Jalan

Dalam studi polusi MP di jalan raya, istilah yang umum digunakan adalah “*street dust*” dan “*road dust*”. Debu jalan diartikan tidak hanya mencakup debu dari jalan raya saja, tetapi juga debu dari tempat lain seperti pinggiran kota, jembatan, jalan raya, dll. (C. Yang et al., 2023). Debu jalan terdiri dari kombinasi partikel organik dan anorganik, di antaranya juga MP ditemukan menyumbang hingga 0,06% massa kering dalam debu jalan di lingkungan perkotaan (Myszka et al., 2021; O’Brien et al., 2021)

Partikel yang berasal dari ban, rem, permukaan jalan, dan marka jalan merupakan sumber pencemaran lingkungan yang penting. Polutan organik yang berhubungan dengan lalu lintas seperti hidrokarbon poliaromatik (PAH), mikroplastik (misalnya karet dari keausan ban, plastik dari marka jalan, dan aspal yang dimodifikasi polimer), partikel logam (Järnskog et al., 2022a).

2.3.1 Mikroplastik di Debu Jalan

Polutan tradisional seperti nitrogen, fosfor, dan logam berat dalam debu jalan raya telah mendapat perhatian lebih dan dipahami dengan baik selama beberapa dekade terakhir (Myszka et al., 2021; C. Yang et al., 2023). Namun, sebagai kelas baru polutan yang muncul, MP dalam debu jalan raya masih kurang dipahami dan pengetahuan yang komprehensif masih kurang. Selain itu, karena karakteristik ukuran kecil, kepadatan rendah, dan luas permukaan spesifik yang besar, MP dalam debu jalan raya dapat tertelan, terhirup, dan bersentuhan dengan kulit oleh manusia, sehingga mengancam kesehatan manusia. Selain toksisitas inheren MP, ia dapat membawa berbagai bahan kimia beracun seperti logam berat dan polutan organik melalui proses penyerapan dan memperkuat risiko MP (C. Yang et al., 2023).

Debu dapat menjadi tempat penampungan berbagai kontaminan yang mengakumulasi senyawa-senyawa yang telah mengendap selama jangka waktu yang tidak diketahui. ‘debu segar’ berusia di bawah 1 minggu dan ‘debu lama’ merupakan emisi non-episodik. Debu yang terkait dengan MP yang dapat di ambil sampelnya yaitu debu jalan (dari permukaan jalan atau selokan yang bersebelahan) dengan ciri-ciri komposisi yang setiap daerah kawasan yang berbeda antara rumah tangga dan kondisi sosial ekonomi (O’Brien et al., 2023).

Sumber utama MP dalam debu jalan adalah permukaan aus ban mobil, perkerasan jalan yang menggunakan bitumen dan cat marka jalan. Selain itu, makroplastik umum yang berserakan di sepanjang jalan dapat menjadi sumber sekunder yang penting bagi MP dalam debu jalan. Di pusat kota, debu jalan juga dapat mengandung plastik yang berasal dari berbagai sumber lain, di antaranya bahan konstruksi dan bangunan (misalnya lukisan, foil, busa, komposit semen, dll.). (Vogelsang et al., 2020).

Kelimpahan MP dalam debu jalan merupakan salah satu indikator terpenting pencemaran MP di lingkungan. Kelimpahan MP di debu jalan biasanya ditunjukkan sebagai jumlah MP per satuan massa debu (n/kg) atau jumlah MP per satuan luas permukaan jalan (n/m²) (C. Yang et al., 2023). Beberapa penelitian yang telah dilakukan tentang MP di debu jalan dapat dilihat di Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Penelitian terdahulu tentang mikroplastik di debu jalan

Lokasi Studi	Alat Sampling	Kelimpahan (n/kg)	Bentuk	Warna	Polimer	Sumber
Bushehr, Iran	<i>Dustpan</i> plastik, sapu	14800 - 87600	Fragmen, fiber, film, granule	putih/transparan, kuning/oranye, merah/pink, biru/hijau, hitam/abu	N/A	Abbasi et al. (2017)
Asaluyeh, Iran	Sapu kayu dan <i>dustpan</i> metal	21000 - 165800	Fragmen, fiber, film, granule	putih/transparan, merah/pink, biru/hijau, hitam/abu	N/A	Abbasi et al. (2019)
Nay Pyi Taw, Myanmar	Sapu bahan natural dan <i>dustpan</i> metal	285	N/A	N/A	PP, PE, PS, PVC, PET, PDAP, others	Mon et al., (2022)
Mandalay, Myanmar		79	N/A	N/A	PP, PE, PVC, PET, PS,	Mon et al., (2022)
Yangon, Myanmar		63	N/A	N/A	PP, PE, PES, PDAP, PVC, PS	Mon et al., (2022)
Taiwan		555	N/A	N/A	PVC, PE, PP, PS, PET, PMMA	Mon et al., (2022)
Goyang, Korea Selatan	Sapu kayu dan <i>dustpan</i> metal	1363000	Fragmen, fiber, film, granule	N/A	N/A	Kang et al., (2022)
Kusatsu, Jepang	Vacum	19.7±13.7	Fragmen, fiber, film, granule	Hitam, abu abu, putih, kuning, coklat, merah, biru, hijau	PE, PP, PVC, PS, PET, PAK, PVS, EPC, SBR	Yukioka et al., (2020)
Da Nang, Vietnam		19.7±13.7	Fragmen, fiber, film, granule	Hitam, abu abu, putih, kuning, coklat, merah, biru, hijau	PE, PP, PVC, PS, PET, PAK, PVS, EPC, SBR	Yukioka et al., (2020)
Kathmandu, Nepal		12.5±10.1	Fragmen, fiber, film, granule	Hitam, abu abu, putih, kuning, coklat, merah, biru, hijau	PE, PP, PVC, PS, PET, PAK, PVS, EPC, SBR	Yukioka et al., (2020)

* PE: polyethylene, PEI: polyethylenimine, PES: polyester, PET: polyethylene terephthalate, PP: polyphenylene sulfide, PPSU: polyphenylsulfone, PS: polystyrene, PSU: polysulfone, PTFE: polytetrafluoroethylene, PU: polyurethane, PUR: polyurethane resin, PVA: polyvinyl alcohol, PVC: polyvinyl chloride, PMMA: polymethylmethacrylate, POM: polyoxymethylene,

2.3.1 Mekanisme Resuspensi Debu Jalan ke Udara

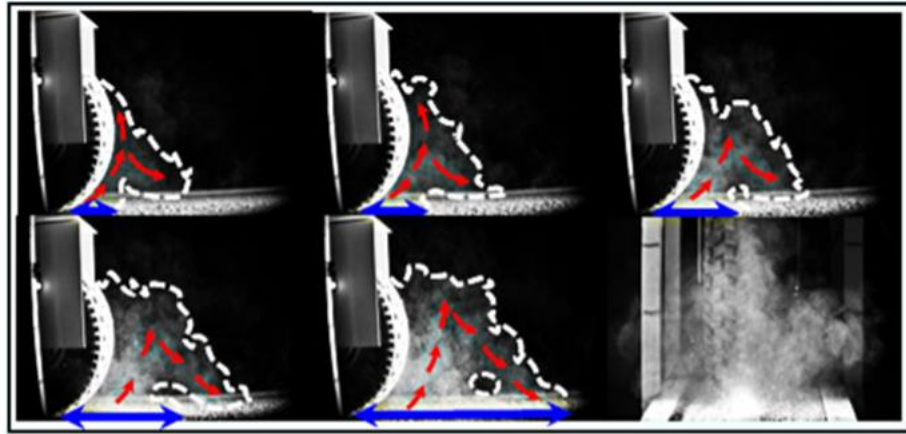
Sektor lalu lintas jalan raya umumnya digambarkan sebagai salah satu sumber utama emisi partikulat dan lokasi yang dilalui lalu lintas bertanggung jawab atas sebagian besar pelampauan nilai PM yang tercatat di negara-negara Eropa. Secara mekanis, debu dapat tersuspensi kembali oleh abrasi atau melalui aksi langsung angin di permukaan. Mekanisme ini sangat dinamis, dengan beberapa aliran pembentukan, penghilangan, dan pengangkutan yang beroperasi pada saat yang bersamaan (Sulong et al., 2017).

Diperkirakan emisi debu jalan raya (*road dust - RD*) yang tertiuap angin dan tersuspensi kembali secara mekanis yang berlaku untuk pemodelan kualitas udara skala regional. Kesulitan dalam memperkirakan kontribusi debu jalan bertambah karena variasi komposisi dari satu wilayah ke wilayah lain, berdasarkan banyak faktor, seperti meteorologi setempat, pemeliharaan infrastruktur jalan, aktivitas ekonomi, kecepatan lalu lintas, dan berat kendaraan. Iklim yang lebih cerah dan lebih kering lebih rentan mengalami beban tinggi materi tersuspensi ulang. Misalnya, intrusi debu Sahara di negara-negara Mediterania cenderung berkontribusi terhadap akumulasi debu di permukaan jalan, yang memengaruhi proses resuspensi (Casotti Rienda & Alves, 2021).

Bila partikel terbentuk di permukaan jalan melalui interaksi antara ban dan aspal, partikel dapat mengendap di tepi jalan atau masuk ke lingkungan melalui limpasan jalan atau melalui udara, proses *resuspensi* debu oleh ban kendaraan dapat dilihat di Gambar 2.4. Fraksi partikel yang lebih halus dapat diangkut lebih lanjut bersama limpasan jalan ke sistem air hujan atau melalui transportasi atmosfer (Järnlskog et al., 2022b).

Debu jalan dapat beterbangan ke udara melalui pergerakan lalu lintas kendaraan (O'Brien et al., 2021). Karena kemampuannya untuk melayang di udara, pengangkutan partikel debu jalan juga mencakup dinamika lingkungan angin dan curah hujan yang dapat mengakibatkan *redistribusi* partikel MP. Di udara, partikel

debu jalan dianggap relevan dengan kesehatan manusia, melalui jalur paparan kontak kulit, inhalasi (Abbasi et al., 2019), dan konsumsi, yang menimbulkan risiko khusus bagi populasi rentan termasuk anak-anak yang sering melakukan kontak tangan ke mulut.



Gambar 2.4 Proses resuspensi debu jalan dari gerakan ban kendaraan
(Wang, 2023)

Kejelasan tentang bagaimana plastik dilepaskan ke atmosfer masih belum pasti diteliti (Brahney et al., 2021). Tidak seperti partikel atmosfer yang lebih kecil ($<2,5 \mu\text{m}$) yang dilepaskan langsung melalui pembakaran atau terbentuk di atmosfer, partikel kasar ($>2,5 \mu\text{m}$) biasanya terbawa ke atmosfer melalui proses mekanis, seperti terbawanya debu selama angin kencang atau angin. Brahney (2021) selanjutnya menyatakan bahwa emisi plastik dapat terjadi di sekitar pusat populasi, di mana data yang tersedia menunjukkan tingkat pengendapan plastik yang relatif tinggi di area urban.

2.4. Potensi Paparan (*Intake*) $\text{PM}_{2,5}$ dan Mikroplastik dari Udara

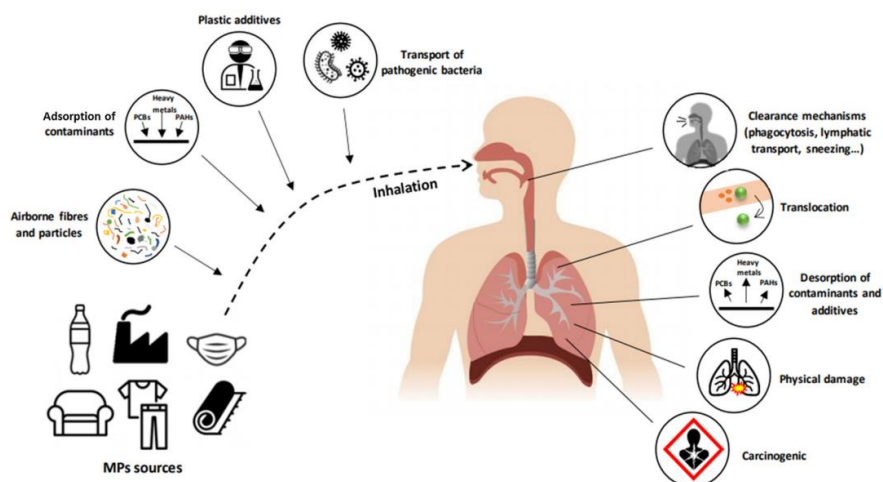
2.4.1 Paparan dan Dampak Kesehatan $\text{PM}_{2,5}$ dan Mikroplastik

Tingkat polusi MP udara yang berbeda terdeteksi di banyak negara dan wilayah baik di lingkungan dalam maupun luar ruangan. Manusia dapat mengonsumsi MP paling banyak melalui udara dibandingkan dengan sumber lain seperti madu, garam, air keran, gula, air kemasan, dan makanan laut. MP memiliki tiga rute utama untuk memasuki tubuh manusia: inhalasi, konsumsi, dan kontak kulit. Paparan MP di udara dapat terjadi melalui inhalasi, yang dapat menyebabkan

berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan paru-paru dan translokasi ke bagian tubuh lainnya (Myat et al., 2024).

Paparan MP melalui udara menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan (Enyoh et al., 2019a). Partikel MP dapat terhirup dan masuk ke sistem pernapasan, menyebabkan iritasi, peradangan, dan potensi gangguan kesehatan jangka panjang. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa MP dapat mengandung bahan kimia berbahaya, seperti aditif plastik dan kontaminan lingkungan, yang dapat meningkatkan risiko kesehatan. Meskipun studi mengenai dampak kesehatan dari MP di udara masih terbatas, kekhawatiran mengenai potensi efek kesehatan sudah mulai meningkat. Integrasi biologis ke dalam organisme dapat terjadi ketika MP tertanam dalam jaringan hewan melalui dua cara utama, yaitu konsumsi dan respirasi. Tidak hanya hewan dan tumbuhan yang dapat menelan MP, tetapi beberapa mikroba juga dapat hidup di permukaan MP (Campanale et al., 2022).

Kemungkinan partikel berserat yang terbawa udara memasuki sistem pernapasan kita akan bergantung pada ukuran. Untuk tujuan penilaian risiko kesehatan manusia, PM yang dapat dihirup (*Respirable*) sering didefinisikan sebagai partikel dengan diameter aerodinamis $< 2,5 \mu\text{m}$. MP memiliki potensi bahaya yang meliputi dampak secara kimiawi, fisik dan biologis terhadap organisme yang menelannya. MP yang terhirup oleh manusia memiliki berbagai sumber dan efek bagi organ tubuh (Gambar 2.5). MP berperan sebagai vektor pembawa patogen yang mengakumulasi kontaminan kimia, lalu mengangkutnya pada jarak jauh serta menyebarkan polutan kepada organisme saat MP dikonsumsi.



Gambar 2.5 Efek mikroplastik terhirup bagi manusia (Torres-Agullo et al., 2021)

Dampak negatif yang ditimbulkan oleh pencemaran mikroplastik terhadap organisme, termasuk translokasi partikel, stres fisiologis, respons imun, metabolisme abnormal, perubahan perilaku, gangguan kesuburan, dan kerusakan usus yang parah. Proses translokasi MP dalam tubuh organisme dapat berlangsung melalui beberapa cara. MP yang tertelan awalnya berpindah melalui saluran pencernaan kemudian dapat berpindah ke organ tubuh lainnya, termasuk sistem peredaran darah, hati, dan ginjal. Rute translokasi ini dapat memiliki dampak yang bervariasi tergantung pada spesies dan lokasi translokasi MP (WHO, 2022).

Perhitungan potensi risiko dari MP memerlukan konsentrasi MP di udara dan jenis-jenis polimer yang dikandungnya. Untuk analisis dari pajanan MP kerap di samakan dengan pajanan dari *fine particulate matter* dalam hal ini PM_{2.5}. Penelitian oleh Azmi (2023) menggunakan standar PM untuk menghitung pajanan dari MP di udara berdasarkan standar dari US EPA (2011).

Selain toksisitas partikel, MP juga dapat menimbulkan risiko kimia dan biologis berdasarkan komposisinya. Monomer dan aditif dapat larut dari matriks MP di dalam organisme, bahan kimia seperti fatal dan bisfenol A, yang dikenal sebagai pengganggu endokrin bahkan dalam konsentrasi yang sangat rendah. Selain konstituennya, luas permukaan MP yang tinggi membuatnya rentan bekerja sebagai vektor bagi mikroorganisme atau bahan kimia yang bersentuhan dengannya. Misalnya, polutan organik persisten (POP) telah diidentifikasi dalam MP yang diperoleh kembali dari lingkungan, termasuk hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) (Akhbarizadeh et al., 2021) dan bifenil terklorinasi (PCB) (Crawford & Quinn, 2017). Ketika tertelan, MP dapat memaparkan organisme terhadap konsentrasi yang lebih tinggi dari bahan kimia berpotensi beracun atau bahkan memperkuat toksisitasnya. Namun, kontribusi MP terhadap paparan POP tampaknya tidak berarti jika dibandingkan dengan asupan dari makanan dan air (Bakir et al. 2016). Meskipun demikian, dampak kesehatan manusia dari monomer, aditif, dan produk degradasi yang bermigrasi dari plastik dan MP harus dieksplorasi lebih lanjut (Wang et al., 2021).

2.4.2 Kerangka Penilaian Risiko

Kerangka penilaian risiko di Indonesia mengikuti aturan dari Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan yang di buat oleh Kementerian Kesehatan (Dirjen P2PL, 2016). Analisis risiko digunakan untuk berbagai bahaya lingkungan, termasuk bahaya fisik dan biologis. Bahaya-bahaya fisik, kimiawi dan biologis lingkungan bisa menimbulkan efek yang merugikan kesehatan manusia dan kerusakan lingkungan. Kajian efek kesehatan dikenal dengan *health risk assessment* (HRA, analisis risiko kesehatan), sedangkan kajian efek lingkungan disebut *ecological risk assessment* (ERA). Secara mendasar proses-proses analisis risiko adalah sama, beberapa istilah yang sedikit berbeda banyak digunakan untuk setiap langkah atau proses. International Life Science Institute mencatat ada 6 model analisis risiko yang masing-masing menggunakan terminologi agak berbeda, yaitu *enHealth EHRA* (Australia), *International Life Science Institute-Risk Science Institute*, *US EPA Ecological Risk Assessment*, *NAS- NRC Risk Assessment* (AS), *Codex Risk Assessment* (WTO) dan *OIE Import Risk Assessment* (enHealth 2002).

Analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) adalah Sebuah proses yang dimaksudkan untuk menghitung atau memprakirakan risiko pada kesehatan manusia, termasuk juga identifikasi terhadap keberadaan faktor ketidakpastian, penelusuran pada pajanan tertentu, memperhitungkan karakteristik yang melekat pada agen yang menjadi perhatian dan karakteristik dari sasaran yang spesifik.

Pada dasarnya, ARKL hanya mengenal empat langkah, yaitu :

1. Identifikasi bahaya,
2. Analisis dosis respon (dalam literatur lainnya disebut juga Karakterisasi bahaya),
3. Analisis pajanan, dan
4. Karakterisasi risiko.

Beberapa istilah yang perlu diketahui untuk analisis risiko antaranya:

- i. Analisis dosis respon (*dose-response assessment*): Analisis hubungan antara jumlah total suatu agen yang diberikan, diterima, atau diserap oleh suatu organisme, sistem, atau sub/populasi dengan perubahan yang terjadi pada suatu organisme, sistem, atau sub/populasi,

- ii. Analisis pajanan (*exposure assessment*): Evaluasi pajanan agen dan turunannya pada organisme, sistim, atau sub/populasi. Analisis pajanan merupakan langkah yang keempat dalam ARKL.
- iii. Dosis/konsentrasi referensi (RfD/RfC): Dosis/konsentrasi dari pajanan harian agen risiko non karsinogenik yang diestimasi tidak menimbulkan efek yang mengganggu walaupun pajanannya terjadi sepanjang hayat (seumur hidup),
- iv. Tingkat risiko (*risk quotient* [RQ]) : Besarnya risiko yang dinyatakan dalam angka tanpa satuan yang merupakan perhitungan perbandingan antara *intake* dengan dosis / konsentrasi referensi dari suatu agen risiko non karsinogenik serta dapat juga diinterpretasikan sebagai aman/tidak amannya suatu agen risiko terhadap organisme, sistim, atau sub/populasi.

Penilaian risiko kesehatan terkait PM_{2,5} sering dilakukan dengan menggunakan RQ. Nilai RQ > 1 menunjukkan risiko kesehatan non-karsinogenik yang signifikan sedangkan RQ > 1 menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap PM_{2,5} dapat menimbulkan ancaman kesehatan yang serius. Penggunaan RQ untuk PM_{2,5} dikarenakan adanya hubungan paparan partikulat dengan gangguan pernapasan, kardiovaskular, dan metabolik, serta paparan jangka pendek dan jangka panjang terhadap PM_{2,5} telah dikaitkan dengan peningkatan mortalitas, penurunan harapan hidup, dan peningkatan risiko penyakit kronis (Abidin et al., 2023).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian secara menyeluruh diilustrasikan oleh diagram alir penelitian pada Gambar 3.1. Secara garis besar, penelitian dilakukan dalam tahapan-tahapan berikut:

1. Tahap pengkajian awal,

Pada tahap ini dilakukan studi literatur mengenai teori pencemaran udara dan mikroplastik sebagai polutan baru beserta karakteristiknya. Referensi dari penelitian mikroplastik sangat jauh meningkat dibandingkan dengan 2 tahun belakang khususnya di Indonesia. Pemilihan metode serta arah pengkajian pertama di teliti dan ditentukan pada tahap ini.

2. Tahap persiapan penelitian,

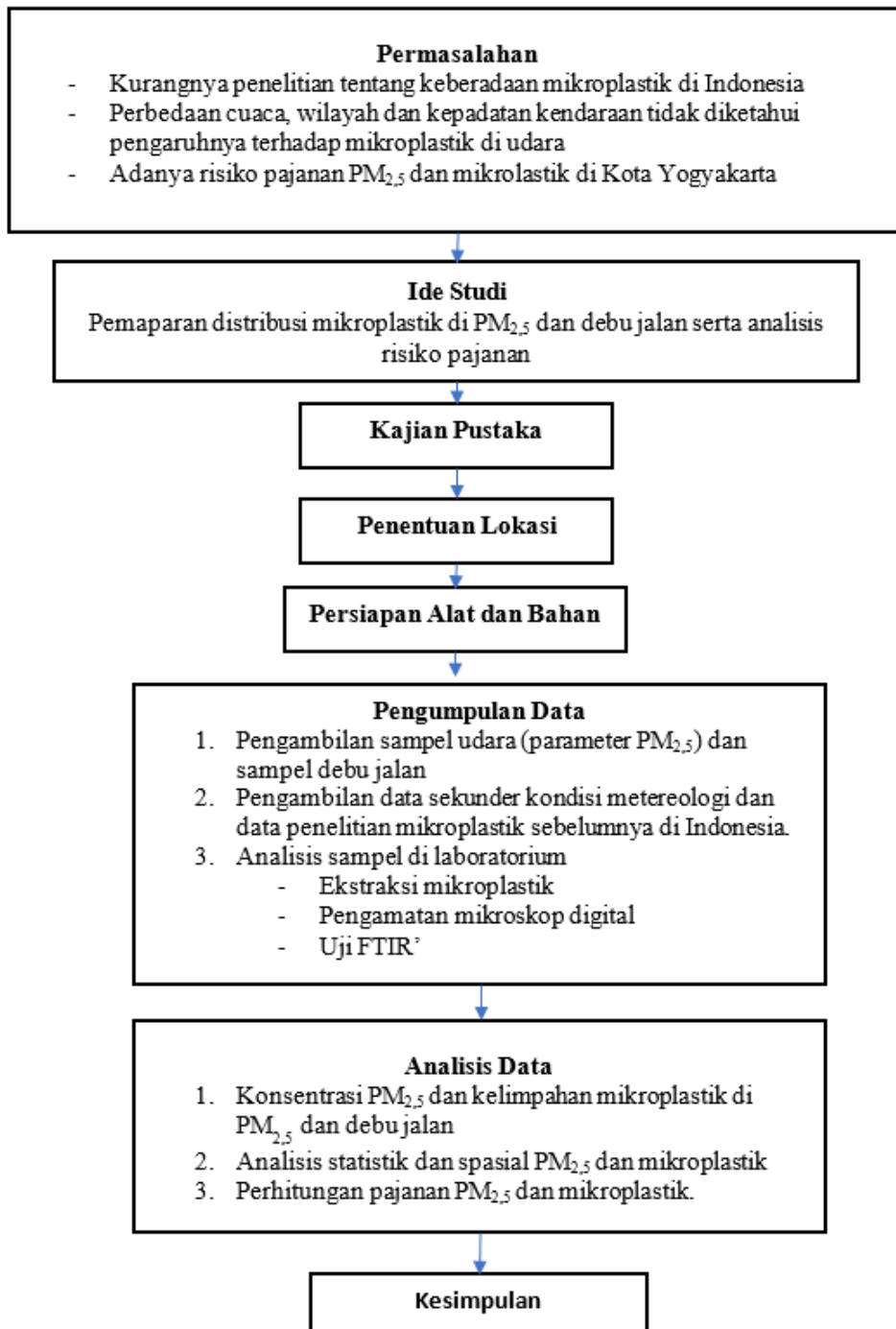
Pada tahap ini, dengan pemahaman dari studi literatur, penelitian kemudian dirancang untuk menyesuaikan hipotesis awal dari penelitian, kemudian penentuan jumlah lokasi pengambilan data dan parameter yang dibutuhkan. Kegiatan pra pengumpulan data juga dilakukan di tahap ini seperti persiapan alat dan bahan untuk pelaksanaan tahap selanjutnya..

3. Tahap pengumpulan data,

Tahap ini merupakan kelanjutan dari tahap sebelumnya, dimana data sampel primer dan sekunder dikumpulkan untuk selanjutnya dianalisis. Data primer kemudian masuk ke tahap uji laboratorium untuk mendapatkan data final dari keberadaan dan kelimpahan mikroplastik di media udara dan debu jalan.

4. Tahap analisis data.

Data yang telah dikumpulkan diolah menggunakan Microsoft Excel untuk selanjutnya dianalisis statistik menggunakan software R dan dianalisis spasial menggunakan GEE. Hasil tersebut kemudian diinterpretasikan dan hasil penelitian disimpulkan.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

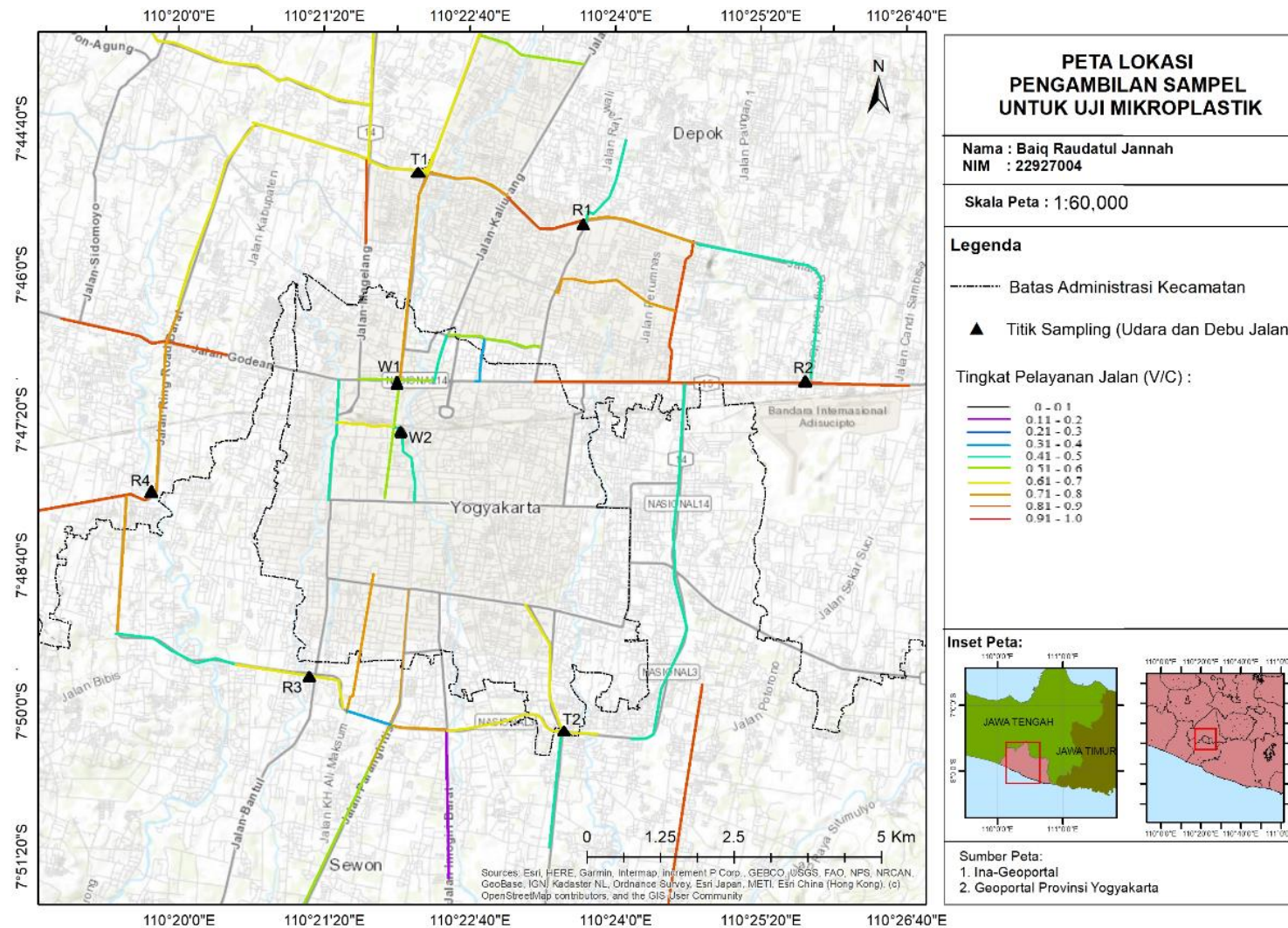
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki tingkat kepadatan penduduk tertinggi. Jumlah penduduk Provinsi DIY menurut data BPS DIY (2024) sebanyak 3.759.500 jiwa yang pada

tahun 2023 dan meningkat terus setiap tahunnya. Provinsi DIY merupakan salah satu tujuan wisata utama di Indonesia dengan jumlah wisatawan tercatat oleh Dinas Pariwisata DIY mencapai 24.174.855 jiwa pada tahun 2023, jauh melebihi jumlah penduduk kota Yogyakarta. Selain itu, Yogyakarta juga merupakan kota pelajar khususnya perguruan tinggi dengan total mahasiswa tercatat sebesar 638.345 orang. Tambahan jumlah pengguna jalan dari wisatawan dan pelajar akan menambah jumlah aktivitas transportasi di wilayah Kota Yogyakarta dan sekitarnya sehingga dapat menyebabkan penurunan kualitas udara ambien (Nurhidayat, 2020).

Pada penelitian ini, dipilih 8 lokasi untuk pengambilan sampel udara dan debu jalan. Lokasi dipilih berdasarkan hasil studi literatur dengan kriteria kepadatan lalu lintas (Ramadan & Susilo, 2019), tingkat pelayanan jalan (Dinas Perhubungan DIY, 2021), dan jenis kawasan di area jalan utama, serta titik untuk masuk dan keluar kota Yogyakarta. Penelitian ini juga membagi kawasan penelitian menjadi 3 kelompok, yaitu kawasan Terminal, kawasan Jalan raya/Ringroad, dan kawasan Wisata. Semua kegiatan sampling dilakukan di pinggir area jalan (*roadside*) dan di sekitar area pemberhentian lampu lalu lintas, lokasi pengambilan juga mempertimbangkan rasio volume per kapasitas kendaraan (V/C) kendaraan seperti penelitian oleh Moges dan Alemu (2024) di Ethiopia tentang pengaruh kondisi lalu lintas terhadap konsentrasi polutan menunjukkan bahwa tingkat polusi $PM_{2.5}$ bisa meningkat hingga 30% pada jalan yang memiliki V/C tinggi. Nilai V/C menunjukkan tingkat kemacetan masing-masing jalan, di mana nilai rasio V/C 0,8 ke atas lalu lintas dapat dikategorikan padat, yakni volume arus lalu lintas telah mendekati kapasitas jalan sehingga perlu dilakukan tindakan rekayasa lalu lintas (Yevizal et al., 2021).

Gambar 3.2 menunjukkan lokasi masing-masing titik sampling beserta gambaran kepadatan lalu lintas di masing-masing jalan utama Yogyakarta. Sementara itu, pembagian lokasi sampling dan waktu sampling dapat dilihat pada Tabel 3.1.



Gambar 3.2 Titik sampling pengambilan sampel lingkungan (T= terminal, R= Ringroad, W= wisata)

Titik yang diambil sebagai lokasi sampling antara lain yaitu:

- Terminal Bus Jombor (T1) : merupakan terminal tipe B yang melayani penumpang khususnya dari dan ke area utara dan barat provinsi DIY. Jumlah penumpang di terminal Jombor menurut Dinas Perhubungan DIY (2022) pada tahun 2021 sebesar 3.52 juta penumpang. Sampling dilakukan pada hari libur/*weekend* (disingkat T1 we) dan pada hari kerja/*weekday* (disingkat T1 wd) untuk melihat perbedaan laju masuknya kendaraan dari luar kota ke Yogyakarta dan sebaliknya berdasarkan waktu aktivitas kerja dan istirahat/berpergian. Nilai rasio V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0.61 – 0.8 yang berarti tingkat kemacetan area ini rendah hingga cukup tinggi.
- Terminal Bus Giwangan (T2): merupakan terminal tipe A, melayani transportasi antar provinsi dan pulau. Terminal Giwangan merupakan tempat singgah bus dari seluruh kota besar di Sumatra, Jawa, Bali Nusa Tenggara. Jumlah penumpang yang menggunakan terminal ini pada tahun 2021 sebesar 2.036 juta penumpang dengan puncak pengguna di tahun 2019 sebesar 7.2 juta penumpang. Sampling dilakukan pada hari libur/*weekend* (disingkat T2 we) dan pada hari kerja/*weekday* (disingkat T2 wd) untuk melihat perbedaan laju masuknya kendaraan dari luar kota ke Yogyakarta dan sebaliknya. Nilai rasio V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0,41 – 0,7 yang berarti tingkat kemacetan area ini rendah.
- Ringroad Utara (R1) : titik sampling berada di persimpangan area Condong Catur, Sleman, yang merupakan salah satu titik ramai lalu lintas untuk masyarakat dari Kabupaten Sleman ke kota Yogyakarta dan sebaliknya. Nilai rasio V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0,41 – 0,8 yang berarti tingkat kemacetan area ini rendah hingga cukup tinggi.
- Ringroad Timur (R2): titik sampling berada di persimpangan area Maguwoharjo, Sleman, yang merupakan salah satu titik ramai lalu lintas untuk masyarakat dari Kota Solo dan Klaten ke kota Yogyakarta dan sebaliknya. Serta merupakan titik masuk untuk wisatawan, pekerja, maupun mahasiswa yang datang dari area timur Provinsi DIY. Nilai rasio

V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0,41 – 0,9 yang berarti tingkat kemacetan area ini rendah hingga tinggi.

- Ringroad Selatan (R3) : titik sampling berada di persimpangan area Panggungharjo, Bantul, yang merupakan salah satu titik ramai lalu lintas untuk masyarakat dari Kota Bantul ke kota Yogyakarta dan sebaliknya. Nilai rasio V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0,41 – 0,7 yang berarti tingkat kemacetan area ini rendah hingga cukup tinggi.
- Ringroad Barat (R4) : titik sampling berada di persimpangan area Gamping, Bantul, yang merupakan salah satu titik ramai lalu lintas untuk masyarakat dari Kota wates dan Kabupaten Kulon proge ke kota Yogyakarta dan sebaliknya. Nilai rasio V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0,71 – 0,9 yang berarti tingkat kemacetan area ini tinggi.
- Wisata Tugu Yogyakarta: merupakan *landmark* Provinsi DIY, berada di tengah-tengah pusat kota. Daerah tugu penuh dengan area komersial seperti hotel, toko dan restoran juga dekat dengan pusat kegiatan pasar tradisional. Tugu dipakai semua kalangan karena merupakan jalur utama untuk bepergian di kota Yogyakarta. Sampling dilakukan pada hari libur/*weekend* (disingkat W1 we) dan pada hari kerja/*weekday* (disingkat W1 wd) untuk melihat perbedaan konsentrasi dari polutan dengan asumsi masuknya pengunjung ke kota. Nilai rasio V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0,51 – 0,8 yang berarti tingkat kemacetan area ini rendah hingga cukup tinggi.
- Wisata Malioboro: area jalanan yang merupakan lokasi pusat perbelanjaan di Kota Yogyakarta. Terkenal sebagai pusat oleh-oleh merupakan salah satu lokasi yang wajib didatangi oleh masyarakat setempat dan wisatawan. Terdapat pusat pemerintahan di sekitar area Malioboro serta area hotel, toko dan restoran, dan stasiun kereta api. Sampling dilakukan pada hari libur/*weekend* (disingkat W2 we) dan pada hari kerja/*weekday* (disingkat W2 wd) untuk melihat perbedaan konsentrasi dari polutan dengan asumsi adanya masuknya pengunjung ke kota. Nilai rasio V/C pada sekitar lokasi ini berada pada rentang 0,41 – 0,6 yang berarti tingkat kemacetan area ini rendah.

- Sampel juga diambil di media debu jalan, karena wilayah Indonesia yang tropis, yang memiliki kecenderungan angin yang cukup tinggi dan lahan terbuka yang masih cukup banyak memungkinkan adanya resuspensi partikulat (Brahney et al., 2021) dari debu jalan ke udara. Titik sampling yang di ambil sama dengan titik sampling partikulat udara dengan penamaan titik sampling ditambahkan dengan kata *Dust* , contohnya titik Terminal Jombor T1 menjadi TD1.

Tabel 3.1 Lokasi dan waktu pengambilan sampel

Jenis Kawasan	Titik Sampling Udara	Titik Koordinat	Waktu Pengambilan
Terminal	T1 <i>weekend</i>	-7,782137 ° S	Sabtu, 10 Juni 2023
	T1 <i>weekday</i>	110,429637 ° E	Kamis, 13 Juni 2023
	T2 <i>weekend</i>	-7,836665 ° S	Sabtu, 25 Maret 2023
	T2 <i>weekday</i>	110,3915 ° E	Selasa, 28 Maret 2023
Ringroad	R1	-7,762347° S 110,415155° E	Rabu 28 Juni 2023
	R2	-7,827937° S 110,35519° E	Rabu, 14 Juni 2023
	R3	-7,827937° S 110,35519° E	Selasa, 11 April 2023
	R4	-7,799806° S 110,330028 E	Sabtu, 11 Maret 2023
Wisata	W1 <i>weekend</i>	-7,789993° S	Sabtu, 11 Maret 2023
	W1 <i>weekday</i>	110,366144° E	Selasa, 14 Maret 2023
	W2 <i>weekend</i>	-7,782961° S	Sabtu, 1 April 2023
	W2 <i>weekday</i>	110,367128° E	Selasa, 4 April 2023

Pengambilan sampel debu jalan dilakukan dalam satu masa yaitu pada tanggal 30 - 31 Maret 2024 pada saat hari yang cerah dan tidak berangin (Järllskog et al., 2022a). Pengambilan sampel udara dan debu jalan, hanya dilakukan sekali untuk masing-masing parameter karena waktu pengambilan sampel udara cukup lama, serta keterbatasan alat, bahan dan tenaga di laboratorium.

Pengambilan sampel dilakukan 2 kali untuk parameter PM_{2,5} di area terminal dan wisata, hal ini dikarenakan adanya hipotesis perbedaan jumlah pergerakan transportasi saat hari kerja dan hari libur bagi para wisatawan dan masyarakat. Sampling saat hari kerja dan hari libur juga dilakukan oleh Bahrina (2020) yang meneliti plastik dalam ruangan berdasarkan pekerjaan, dan ditemukan bahwa untuk hari kerja, MP di dalam ruangan jauh lebih tinggi dari saat hari libur. Pengambilan

sampel debu jalan mengikuti lokasi sampling dari PM_{2,5} untuk melihat adanya relasi antara keberadaan MP di satu media dengan yang lain.

3.3. Prosedur Penelitian

3.3.1 Persiapan Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel PM_{2,5} dilakukan dengan menggunakan standar pengambilan SNI 7119-14- 2016 untuk Udara ambien “Cara uji partikel dengan ukuran $\leq 2,5 \mu\text{m}$ menggunakan peralatan *high Volume Air Sampler* (HVAS) dengan metode gravimetri, penggunaan HVAS sudah dilakukan oleh banyak peneliti untuk investigasi MP di udara, seperti penelitian oleh Hidayat (2024) di Bandung dan Osaka serta oleh Sarathana (2023) di Bangkok. Pengambilan sampel debu jalan mengikuti metode pengambilan sampel oleh Yukioka (2020) dengan pengambilan sampel 1 m² dan Mon (2022) yang menggunakan sapu untuk mengambil sampel. Persiapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah persiapan alat dan bahan sebelum melakukan pengambilan sampel lingkungan.

Alat dan bahan yang disiapkan sebelum pengambilan sampel udara diantaranya:

- HVAS (Envilife, PM_{2,5})
- *Thermo Hygro Barometer* (PCE-THB 40)
- Anemometer
- Roll Kabel
- Filter Mikrofiber 60x60
- Timbangan analitik (Ohaus Pioneer, PA 214)
- Desikator (tidak bermerek, *non-vacuum*)

Alat dan bahan yang disiapkan sebelum pengambilan sampel debu jalan yaitu:

- Sapu bahan naturan (ijuk – sert pelepah pohon aren)
- Serokan (*dustpan*) non plastik (bahan besi)
- Wadah non plastik (bahan kaca) ukuran 125 ml
- Meteran

Untuk menjaga kualitas (*Quality Control*) dan meminimalisasi kontaminasi saat pengambilan sampel, semua alat dibersihkan terlebih dahulu dengan di lap tisu basah dan ditransportasikan ke lokasi sampling dari laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia dengan wadah tertutup. Filter Mikro fiber timbang terlebih dahulu lalu di simpan diwadah non plastik (kertas) untuk dibawa

ke titik sampling. Sampel debu diambil dengan wadah yang sudah dibilas selama 3 kali, serokan besi untuk sampling juga sudah dicuci dan dibilas dengan air lalu sebelum di bawa ke lokasi sampling. Alat dibungkus oleh aluminium *foil* sebelum, sedang dan setelah pengambilan sampel debu jalan, sapu ijuk yang digunakan berukuran kecil, dan diganti tiap perpindahan tempat pengambilan sampel. Penggunaan sapu berbahan natural seperti ijuk merupakan pilihan yang paling sering digunakan oleh penelitian lain seperti terlihat pada Tabel 2.4 untuk mengurangi kemungkinan kontaminasi MP dari alat.

3.3.2 Pengambilan Sampel

A. Pengambilan Sampel Udara

Sampel yang digunakan adalah sampel udara dengan parameter $PM_{2,5}$. Pengambilan sampel dilakukan sebanyak 12 kali selama 24 jam dengan lokasi yang berbeda. Dalam pengambilan sampel udara peneliti menggunakan alat *High Volume Air Sampler* (HVAS) dengan *flow rate* $1,2\text{ m}^3$ pengambilan sampling mengacu pada SNI 7119-14-2016. Fiter di alat HVAS berada pada ketinggian 1,2 m untuk mencontoh ketinggian manusia saat bernapas (Azari et al., 2023). Sampel udara di tampung pada kertas filter mikro fiber berukuran 60x60 cm selama 24 jam selama pengambilan sampel udara dilakukan juga pengukuran tekanan, kecepatan angin, kelembapan dan temperatur. Kertas filter mikro fiber ditimbang terlebih dahulu sebelum dan sesudah digunakan guna mengetahui total berat polutan yang tertangkap selama pengambilan sampel. Setelah itu sampel akan dilakukan pengujian pada laboratorium. Pengambilan sampel debu jalan menggunakan alat yang ekonomis seperti sapu alami dan wadah non plastik. Pengambilan sampel dilakukan dengan menyapu area 1 m^2 yang telah diukur di sekitar bahu jalan di lokasi sampling.

Jumlah kendaraan tidak dihitung saat pengambilan sampel sehingga jumlah kendaraan dan konsentrasi mikroplastik dan $PM_{2,5}$ pada penelitian ini tidak dapat dibandingkan secara langsung, namun terdapat data kepadatan kendaraan berdasarkan beban jalan yang didapatkan dari dinas perhubungan Provinsi DIY yang dipaparkan pada Gambar 3.2.

Pengambilan sampel dilakukan antara bulan Maret hingga Juni di wilayah Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Bulan Maret adalah penghujung musim hujan dan bulan Juni adalah musim peralihan dari musim hujan ke musim kemarau. Kondisi meteorologis sangat mempengaruhi konsentrasi MP seperti pada penelitian Wilyalodia (2023), khususnya curah hujan saat pengambilan sampel MP di lingkungan, baik itu di udara, tanah dan laut. Kondisi meteorologis di lapangan diukur setiap jam pada saat pengambilan sampel debu di udara selama 24 jam.

B. Pengambilan Sampel Debu Jalan

Pengambilan sampel dilakukan sebanyak 12 kali dalam periode satu hari yang sama dengan lokasi yang berbeda. Pengambilan sampel debu jalan menyesuaikan waktu pengambilan sampel udara dimana dilakukan saat hari setelah hujan. Sampel debu yang diambil dengan menggunakan sapu bahan ijuk dan serokan besi yang telah di bersihkan sebelumnya. Sebelum pengukuran dilakukan, di tentukan area dekat lokasi pengambilan sampel udara, kemudian area dekat pinggir jalan namun bukan area pejalan kaki diukur dengan ukuran 1 m x 1 m. Area tersebut kemudian di sampu hingga bersih dan hasil pengumpulannya di ambil menggunakan serokan besi. Sapu ijuk diganti setiap lokasi pengambilan sampel berpindah. Hasil debu/pasir yang didapatkan di *dustpan* di simpan di dalam gelas aca berukuran 120 ml kemudian akan di oven dan di analisis di lab. Alat pengambilan sampel debu jalan sangat beragam digunakan oleh peneliti lain, yang paling sering digunakan adalah sapu bahan natural merupakan peralatan non-plastik yang sesuai dengan ketersediaan yang luas dan harga yang murah, selain itu potensi kontaminasi plastik eksternal dari alat sampling dapat dihindari dibandingkan dengan menggunakan alat vakum (C. Yang et al., 2023).

Quality Control (QC) yang dilakukan pada tahap pengambilan sampel diantaranya membungkus kertas filter menggunakan pembungkus non plastik baik sebelum dan sesudah dilakukan pengambilan sampel selain itu selama sampel, pakaian yang dikenakan merupakan pakaian berbahan katun untuk mencegah kontaminasi dari peneliti.

3.3.3 Analisis Sampel di Laboratorium

Pengujian sampel di laboratorium membutuhkan alat dan bahan yang spesifik untuk mendapatkan hasil kelimpahan MP dan PM_{2,5} yang dapat dipercaya. Alat-alat yang digunakan untuk pengujian laboratorium pada penelitian ini adalah:

- Gelas beaker 200 ml
- *Water Bath* (Memmert)
- Oven (Memmert, UM 400)
- Timbangan Analitik (Ohaus Pioneer, PA 214)
- Pengaduk Magnet (HMS-79)
- Pompa Vakum (Rocker, 400-MF31A)
- Mikroskop (Motic, BA 210)
- Desikator (tidak bermerek, *non-vacuum*)
- Corong Gelas
- Gelas Ukur 100ml
- Mikroskop (Binocular Motic, BA310 Led)
- FTIR (Shimadzu, IR Tracer-100-AH)

Sementara itu, bahan-bahan yang digunakan adalah:

- Filter Whatman 0,45 μm
- Aquades
- H₂O₂ 30%
- Kalium Iodida (KI) jenuh (untuk udara)
- Natrium Klorida (NaCl) jenuh (untuk debu jalan)

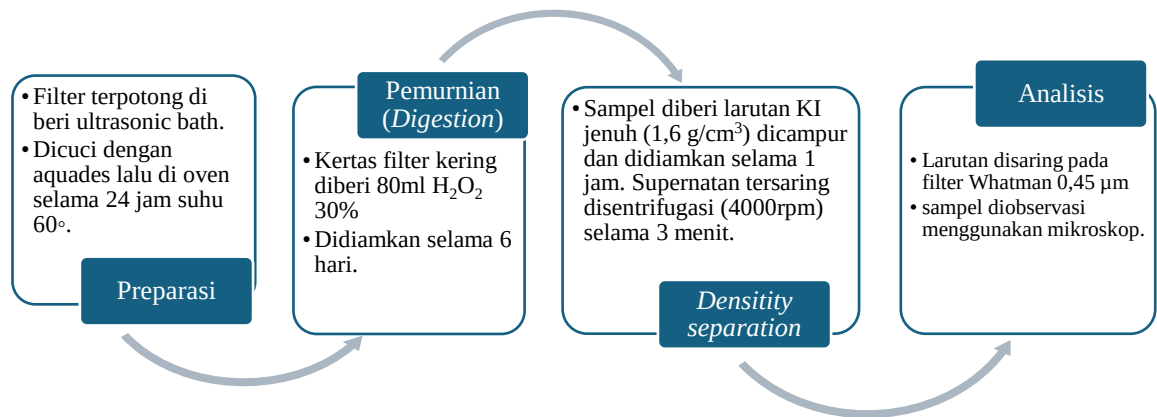
A. Analisis PM_{2,5} di kertas Filter

Untuk mengetahui konsentrasi PM_{2,5} dilakukan penyimpanan filter di desikator dengan temperatur 15°C, kelembapan relatif < 50% dan dibiarkan selama 24 jam. Setelah 24 jam filter ditimbang dengan timbangan analitik. Untuk mengurangi tingkat keraguan, pembacaan dilakukan minimal 3 kali lalu hasilnya dirata-rata.

B. Ekstraksi Mikroplastik dari Filter PM_{2,5}

Belum adanya standar baku dalam pengujian mikroplastik (MP) di udara, membuat pengujian sampel pada penelitian ini dilakukan dengan metode pada

penelitian dari Akhbarizadeh (2021) yang menguji keberadaan MP di partikulat halus ($PM_{2,5}$). Secara ringkas, proses ekstraksi MP dari kertas saring berisi sampel debu dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Metode pengujian laboratorium untuk MP pada sampel udara

Langkah pertama dalam pengujian sampel adalah dengan menyiapkan kertas filter yang telah berisi sampel debu udara di dalam gelas beaker. Sebanyak 80 mL aquades kemudian ditambahkan pada gelas tersebut. Setelah itu, gelas dimasukkan ke dalam *water bath* dengan fungsi *ultrasonic* selama 40 menit. *Water bath* berguna untuk membantu melonggarkan partikel pada kertas filter agar dapat diekstraksi dengan baik (Meyers et al., 2023). Setelah itu, kertas filter dibersihkan menggunakan cairan aquades.

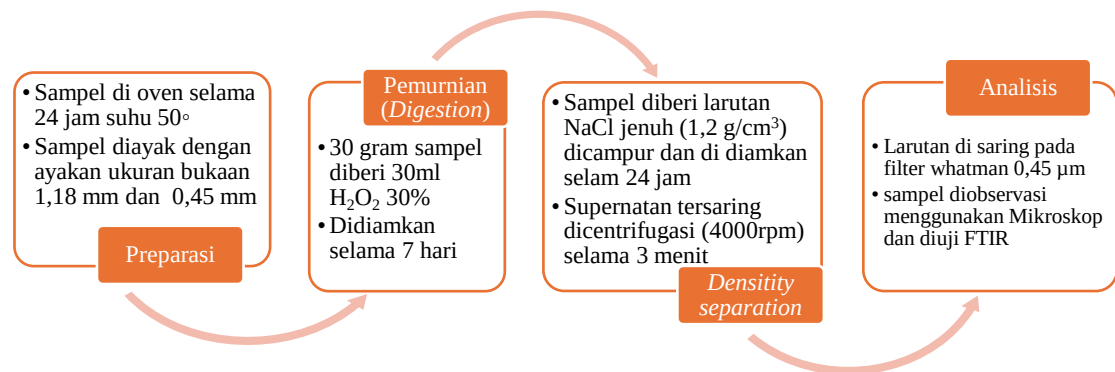
Proses selanjutnya adalah pengeringan menggunakan oven. Sampel dikeringkan dalam oven selama 24 jam dengan suhu 60°C. Setelah dikeringkan, sampel direndam selama 6 hari menggunakan cairan H_2O_2 30% sebanyak 80 mL. Cairan H_2O_2 30% berguna untuk mengurangi (menghilangkan) bahan organik pada kertas filter sehingga memudahkan analisis mikroskop nantinya (Yukioka et al., 2020).

Setelah 6 hari, sampel diberi tambahan larutan Kalium Iodida (KI) jenuh (densitas diperkirakan 1,6 g/m³) sebanyak 120 mL. Setelah itu, larutan diaduk pada kecepatan 30 RPM selama 10 menit lalu didiamkan sampai 1 jam atau sampai terjadi pengendapan. Kalium Iodida berguna untuk melakukan pemisahan mikroplastik dari larutan dengan membuat perbedaan densitas. Proses ini disebut sebagai *density separation*: mikroplastik akan naik ke atas disebabkan berat

jenisnya yang lebih ringan dari berat jenis larutan (Akhbarizadeh et al., 2021). Setelah itu larutan disaring dan disentrifugasi selama 3 menit pada 4000 RPM. Larutan disaring menggunakan kertas saring Whatman 0,45 μm dan didiamkan pada suhu ruangan selama 24 jam sebelum dilakukan pengamatan mikroplastik menggunakan mikroskop.

C. Ekstraksi Mikroplastik dari Debu Jalan

Sebanyak 8 sampel dari lokasi dikumpulkan dan dibawa ke laboratorium menggunakan wadah kaca. Pengambilan sampel RD belum memiliki standar internasional, sehingga penelitian ini mengikuti metode pada penelitian Yukioka (2020) dan Mon (2022). Selain itu, penelitian ini juga mengacu pada metode laboratorium untuk analisis mikroplastik pada air dan sedimen yang dikembangkan oleh National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dari Amerika (Matsura, 2015) yang kemudian sedikit dimodifikasi. Modifikasi yang dilakukan terkait perbedaan suhu oven dan penambahan proses sentrifugasi sebelum disaring. Secara singkat, pengujian untuk ekstraksi MP dari debu jalan dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Metode pengujian laboratorium untuk MP di sampel debu jalan

Pertama-tama, sampel tanah dikeringkan pada oven bersuhu 50°C selama 24 jam. Setelah itu, sampel diayak menggunakan ayakan dengan mesh 5 (diameter sekitar 5 mm, mengikuti ukuran mikroplastik). Lalu, 30 gram sampel diambil untuk proses purifikasi (penghilangan bahan organik) dengan menambahkan 30 mL H₂O₂ 30% dan didiamkan selama 7 hari. Sampel kemudian direndam dalam 30 mL larutan garam (NaCl) dengan densitas 1,2 g/cm³, dikocok selama 10 menit dengan

kecepatan 350 RPM, dan didiamkan selama 1 jam (atau sampai terjadi pengendapan), kemudian dilakukan penyaringan.

Larutan supernatan kemudian disentrifugasi selama 3 menit dengan kecepatan 4000 RPM. Setelah itu larutan tersebut disaring melalui kertas saring Whatman 0,45 μm dengan pompa vakum yang dihubungkan ke corong penyaring. Kertas saring yang berisi obyek terduga MP dikeringkan selama 24 jam. Kertas saring Whatman tersebut kemudian dianalisis visual menggunakan mikroskop dengan pembesaran $4\times/0,1$ kemudian diuji menggunakan FTIR pada permukaan kertas saring untuk mengetahui komposisi kimiawi polimer dari partikel MP yang ditemukan dalam sampel.

D. *Quality Control* di Laboratorium

Penelitian MP sangat rentan terhadap kontaminasi. Tindakan meminimalisasi kontaminasi sangat perlu dilakukan dalam penelitian. kontrol yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain semua kontainer, alat dan bahan yang mengenai sampel berasal dari bahan non plastik dan dicuci semua sebelum digunakan. Semua sampel ditutup dengan kertas aluminium untuk mengurangi kontaminasi dari udara laboratorium. Selain itu, saat pengerjaan digunakan baju berbahan katun, dan semua alat di cuci sebelum digunakan.

Penghilangan bahan organik di dalam sampel penelitian untuk mencegah kesalahan perhitungan MP menggunakan H_2O_2 30% ke dalam sampel debu dan dibiarkan hingga tidak terlihat gelembungnya. Diperkirakan larutan H_2O_2 30% dapat menghilangkan 50% bahan organik dalam tujuh hari. (Järllskog et al., 2022b; Mon et al., 2022; Myszka et al., 2021; Yukioka et al., 2020).

3.3.4 Klasifikasi dan Analisis Sampel

1. Konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$

Setelah berat sebelum dan sesudah filter didapatkan, selanjutnya penentuan konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ dapat dilakukan dengan perhitungan berdasarkan SNI 7119-14-2016 yang tahapannya sebagai berikut:

- a. Koreksi laju alir

$$Q_s = Q_o \times \left(\frac{T_s \times P_o}{T_o \times P_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Di mana :

Q_s : Laju alir volume dikoreksi pada kondisi standar (Nm^3/menit)

Q_o : Laju alir volume uji (m^3/menit)

T_s : Temperatur Standar (298 K)

T_o : Temperatur rata-rata aktual ($273+T$ ukur)

P_s : Tekanan barometrik standar ($101,3 \text{ kPa} = 760 \text{ mmHg}$)

P_o : Tekanan barometrik rata-rata aktual

b. Volume udara

$$V_{std} = \frac{Q_s}{n} \times t \quad (2)$$

Di mana :

V_{std} : Volume contoh uji udara dalam keadaan standar (Nm^3)

Q_s : Laju alir volume dikoreksi pada kondisi standar (Nm^3/menit)

n : Jumlah pencatatan laju alir

t : Durasi pengambilan contoh uji (menit)

c. Konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ dalam udara ambien

$$C = \frac{(W_2 - W_1) \times 10^6}{V_{std}} \quad (3)$$

Di mana :

C : Konsentrasi massa partikel tersuspensi ($\mu\text{g}/(\text{Nm}^3)$)

V_{std} : Volume contoh uji udara dalam keadaan standar (Nm^3)

W_1 : Berat filter awal (g)

W_2 : Berat filter akhir (g)

10^6 : Konversi gram ke mikrogram

2. Observasi Mikroskop untuk Mikroplastik

Analisis sampel MP dilakukan dengan menggunakan mikroskop untuk pengamatan MP yang berukuran sangat kecil. Mikroskop yang digunakan adalah Binocular Motic BA310 Led dan dibantu oleh *Software Optilab Viewer 2.2* untuk melihat gambar melalui komputer. Analisis dilakukan dengan menempatkan kertas sampel diatas kaca preparat dan mengatur fokus dan pembesaran mikroskop mulai dari 4x, 10x. Sampel dapat dilihat dan diamati sesuai dengan kuadran yang telah digambar pada sampel. Hasil pengamatan menggunakan mikroskop bertujuan

untuk mengumpulkan data berupa jumlah, jenis, ukuran, dan warna MP. MP yang telah diperoleh kemudian diukur menggunakan aplikasi *Raster Image*.

Metode identifikasi warna mengacu pada penelitian dari Crawford dan Quinn (2017), dengan kategori sebagai berikut:

- a. transparan: mikroplastik yang tembus cahaya.
- b. berwarna: warna spesifik (coklat, hitam, hijau, biru, pink, ungu, merah, oranye, abu-abu, dan kuning).

Setiap partikel MP dihitung satu persatu dan dibagi berdasarkan bentuk dan warnanya. Pengumpulan data jumlah MP pada sampel kemudian dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi MP pada sampel di masing-masing lokasi dan media sampling. Rumus yang digunakan untuk menghitung konsentrasi/kelimpahan MP antara lain:

A. Untuk konsentrasi MP di udara digunakan rumus:

$$\text{Kelimpahan } MPm^{-3} = \frac{\text{Jumlah Partikel MP}}{\text{Total Volume sampling } (m^{-3})} \quad (4)$$

$$\text{Total volume sampling } m^3 = \text{Laju alir} \times \text{Lama sampling} \quad (5)$$

Laju alir yang dipakai pada penelitian ini adalah 1,2 m³/detik dengan lama sampling 24 jam atau 86.400 detik.

B. Untuk konsentrasi MP di *road dust* digunakan rumus:

$$\text{Kelimpahan } MPkg^{-3} = \frac{\text{Jumlah Partikel MP}}{\text{Berat sedimen kering } (kg)} \quad (6)$$

3. Pengujian FTIR

Berbagai jenis polimer sintetis yang terdapat di berbagai bagian MP di lingkungan yang diidentifikasi dalam banyak penelitian yaitu polipropilena (PP), polistirena (PS), polietilena tereftalat (PET), polietilena (PE), polivinil klorida (PVC), polimetil metakrilat (PMMA), polietilena densitas rendah (LDPA), polietilena densitas tinggi (HDPA), dan masih banyak lagi (Hartmann et al., 2019)

Pengamatan sampel menggunakan FT-IR dilakukan agar dapat mengetahui unsur kimia atau polimer yang terkandung pada MP. Untuk melakukan analisis sampel menggunakan FT-IR dilakukan dengan menempatkan sampel ke dalam *sample compartement*. Kemudian detektor pada FT-IR diputar hingga menempel

pada sampel atau hingga berbunyi ‘click’. Sampel lalu dibaca melalui sinar inframerah yang ditransmisikan dari permukaan sampel. Sinar yang dipantulkan akan menuju detektor untuk pengukuran akhir dan mengubah sinar menjadi sinyal listrik yang dapat direkam oleh *recorder*. Hasil pengukuran FT-IR dapat berupa grafik intensitas dan unsur kimia yang terekam dan disimpan pada *software* komputer.

3.4 Analisis Data

3.4.1 Analisis Data Statistik

Analisis statistik deskriptif akan digunakan untuk pengumpulan, pengolahan, dan penyajian data untuk memberikan gambaran yang jelas tentang karakteristik suatu kumpulan data, dalam penelitian ini adalah konsentrasi PM_{2,5}, kelimpahan dan karakteristik MP pada PM_{2,5} dan MP pada RD. Selain itu analisa ini juga akan digunakan untuk menjelaskan keberadaan PM_{2,5} serta MP di udara dan ketaatannya terhadap peraturan, selain itu, penelitian ini ingin mengetahui tentang sebaran/distribusi MP di berbagai wilayah di jalanan utama kota Yogyakarta secara khusus dan Provinsi DIY secara umum. Serta untuk mengetahui hubungan antar MP dengan faktor-faktor meteorologi yang ada saat proses pengambilan sampel. analisis yang sama akan dilakukan untuk sampel MP di debu jalan.

Statistik inferensial digunakan untuk menarik kesimpulan atau membuat prediksi tentang populasi berdasarkan sampel data. Berbeda dengan statistik deskriptif yang hanya menggambarkan atau meringkas data, statistik inferensial menggunakan metode yang lebih lanjut, seperti uji hipotesis, analisis varians, dan regresi, untuk membuat generalisasi atau memprediksi pola dalam populasi yang lebih luas. Pada penelitian ini jumlah data yang dimiliki terbilang cukup sedikit, jauh dibawah *Central Limit Theorem*, yang menyatakan bahwa distribusi dari rata-rata sampel akan mendekati distribusi normal jika ukuran sampelnya cukup besar (sekitar 30 data poin) sehingga analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah statistik non-parametrik dengan menggunakan metode korelasi spearman.

Korelasi dalam arti luas adalah ukuran hubungan antara variabel. Dalam data berkorelasi, perubahan besaran 1 variabel dikaitkan dengan perubahan besaran variabel lain, baik dalam arah yang sama (korelasi positif) maupun berlawanan

(korelasi negatif) (Schober & Schwarte, 2018). Perubahan dengan proporsi yang tidak sama atau tidak-linier disebut sebagai hubungan monotonik merupakan salah satu karakteristik korelasi spearman. Koefisien korelasi Spearman adalah ukuran statistik kekuatan hubungan monotonik antara data berpasangan. Koefisien ini dilambangkan dengan ρ (rho) atau r_s dan dirancang dengan batasan $-1 \leq \rho \leq 1$. interpretasinya mirip dengan interpretasi Pearson, dimana semakin dekat dengan angka 1 maka semakin kuat hubungan monotoniknya. Secara umum, interpretasi koefisien korelasi spearman dapat dilihat di Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Koefisien korelasi dan interpretasinya

Koefisien Korelasi	Interpretasi
0.00 - 0.10	Korelasi dapat diabaikan
0.10 - 0.39	Korelasi lemah
0.40 - 0.69	Korelasi sedang (<i>Moderate</i>)
0.70 - 0.89	Korelasi Kuat
0.90 - 1.00	Korelasi Sangat Kuat

Sumber: Ellis and Victoria (2011), Schober & Schwarte (2018)

Dalam korelasi Spearman, nilai signifikansi (atau *p-value*) digunakan untuk menentukan apakah ada hubungan yang berarti antara dua variabel, nilai konvensional untuk *p-value* adalah 0.05 atau tingkat kepercayaan 95% yang akan digunakan pada penelitian ini. Jika $p\text{-value} \leq 0.05$, maka hubungan antara kedua variabel dianggap signifikan secara statistik, dimana kemungkinan besar hubungan yang terdeteksi bukan karena kebetulan. Sedangkan jika $p\text{-value} > 0.05$, maka hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik yang artinya hasil korelasi mungkin terjadi secara kebetulan, dan tidak bisa disimpulkan adanya hubungan yang konsisten antara kedua variabel. Secara umum, signifikansi statistik tidak menunjukkan kekuatan korelasi Spearman karena uji signifikansi menyelidiki apakah Anda dapat menolak atau gagal menolak hipotesis nol (Nuryadi et al., 2017).

Oleh karena itu, pertanyaan pentingnya yang menjadi hipotesis dari penelitian ini yaitu;

- H_0 : tidak ada hubungan yang signifikan antara parameter yang diuji.
- H_1 : terdapat hubungan yang signifikan antara parameter yang diuji.

Korelasi pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui apakah ada hubungan antara konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan kondisi meteorologi, serta juga ingin

mengetahui hubungan antara MP dengan parameter lain seperti konsentrasi $PM_{2,5}$, konsentrasi MP di debu jalan juga dengan meteorologi saat pengambilan sampel.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara $PM_{2,5}$ dengan tekanan (P), kecepatan angin (v), temperature (T) dan kelembapan relative (RH). Konsentrasi $PM_{2,5}$ dan kelimpahan MP, termasuk mikroplastik di udara (MP), dan mikroplastik di road dust (RD). Hubungan antara kelimpahan MP di udara (MP) dan MP di debu jalan (RD) termasuk tekanan (P), kecepatan angin (v), temperature (T) dan kelembapan relative (RH).

Pada penelitian ini, aplikasi yang digunakan adalah *software R*. R adalah perangkat lunak statistik yang sangat populer di kalangan peneliti dan ilmuwan data karena kemampuannya dalam analisis statistik yang kompleks dan visualisasi data yang canggih. Menurut verzani (2005) R dipilih untuk analisis dalam penelitian dikarenakan memiliki kemampuan statistik yang luas, visualisasi data yang banyak serta keterbukaan dan fleksibilitas.

Dalam penelitian ini, beberapa perintah R yang digunakan untuk melakukan analisis korelasi Spearman dan untuk mempersiapkan data adalah sebagai berikut:

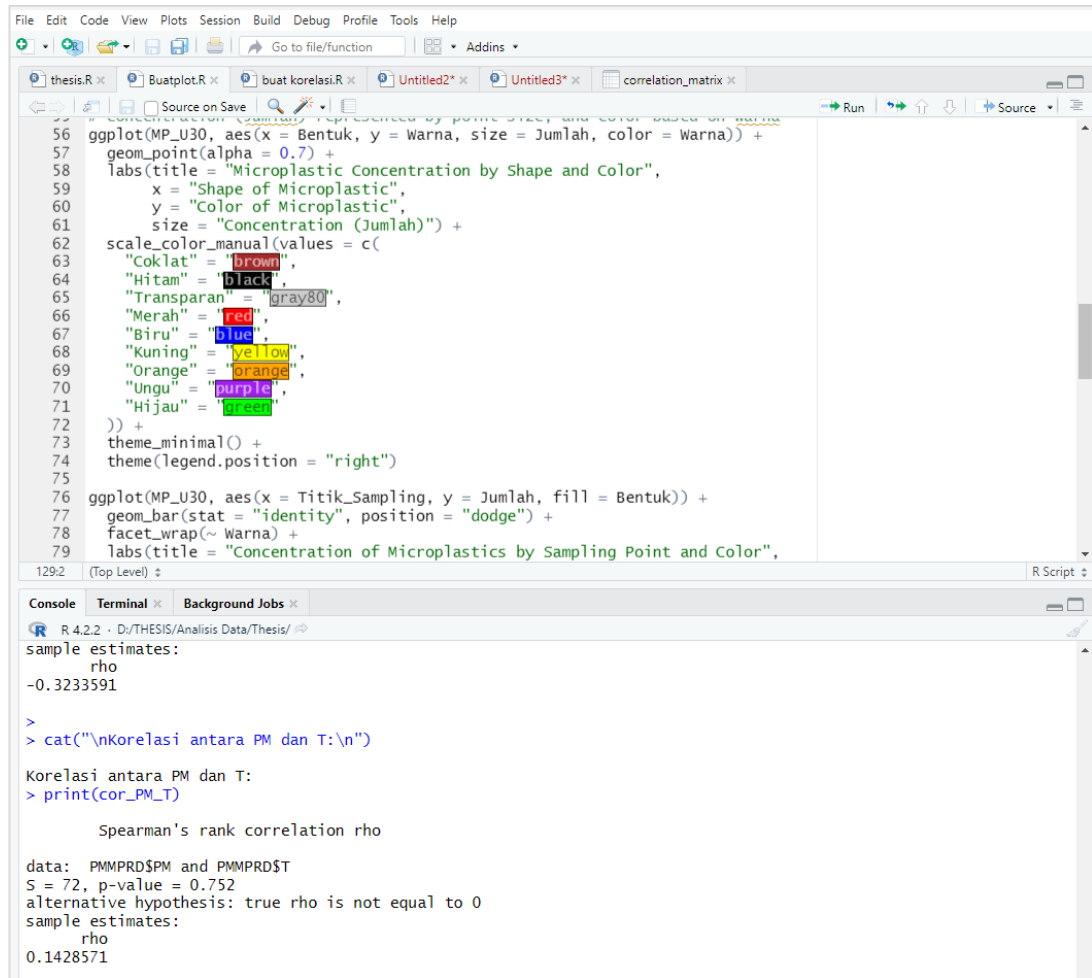
Melakukan Uji Korelasi Spearman:

```
cor.test(Cuaca$PM, Cuaca$P, method = "spearman") # Uji korelasi antara  
PM dan P
```

Membuat Grafik Korelasi:

```
library(ggplot2)  
ggplot(hasil_korelasi, aes(x=Variabel1, y=Variabel2)) +  
  geom_tile(aes(fill=Koefisien)) +  
  scale_fill_gradient2(low="blue", high="red", mid="white",  
midpoint=0, limit=c(-1,1)) +  
  labs(title="Heatmap Korelasi", x="Variabel", y="Variabel")
```

Lingkungan kerja dalam perangkat lunak R seperti pada Gambar 3.5 berikut, perintah yang dituliskan dalam bentuk kode yang dapat di akses langsung di *library*.



Gambar 3.5 Lingkungan kerja *software* R

3.4.2 Analisis Data Spasial

Analisis data secara spasial dilakukan dengan pendekatan analisis pola sebaran berdasarkan konsentrasi PM_{2,5} dan MP melalui grafik. Selain itu, sebaran bentuk MP juga dianalisis secara spasial dan disajikan melalui piechart. Analisis spasial memanfaatkan Sistem Informasi Geografis atau SIG yaitu QGIS atau *Quantum Geographic Information System* versi 3.20.3 dengan fitur Diagram. Penggunaan lahan dan tutupan lahan juga menjadi informasi yang penting untuk mencari hubungan antar PM_{2,5} dan MP dengan lingkungan spasialnya.

Analisis tentang hubungan polusi udara dan penggunaan lahan (*land use land cover* (LULC)) sudah banyak dilakukan (Dilawar et al., 2023; Jodhani et al., 2024; C. Li et al., 2020; Noi Phan et al., 2020) sama halnya hubungannya dengan PM_{2,5} tutupan lahan, dan sudah banyak dilakukan di wilayah Asia. Li (2020) secara umum

menyampaikan, area yang memiliki banyak lahan hijau seperti hutan dan rerumputan dapat mengurangi konsentrasi $PM_{2.5}$ secara signifikan, sementara area terbangun memiliki korelasi yang positif dengan konsentrasi $PM_{2.5}$. Untuk penelitian ini, dilakukan analisis penggunaan lahan secara sederhana menggunakan *Google Earth Engine* (GEE) untuk mengetahui luasan tutupan lahan di sekitar area titik sampling terutama untuk kategori tutupan pohon dan area terbangun.

GEE adalah sebuah platform *cloud-based computing*. Pengguna dapat menganalisis semua citra hasil penginderaan jauh yang tersedia menggunakan editor kode *Integrated Development Environment* (IDE) berbasis web tanpa mengunduh data ini ke komputer lokal. Selain pemrosesan yang cepat, aspek penting lain yang membuat GEE semakin populer adalah ketersediaan beberapa paket dengan banyak algoritme yang menyederhanakan akses ke perangkat penginderaan jauh baik untuk pakar maupun non-pakar. GEE telah diterapkan di berbagai bidang, mulai dari pertanian, kehutanan, ekologi hingga ekonomi dan kedokteran (Noi Phan et al., 2020).

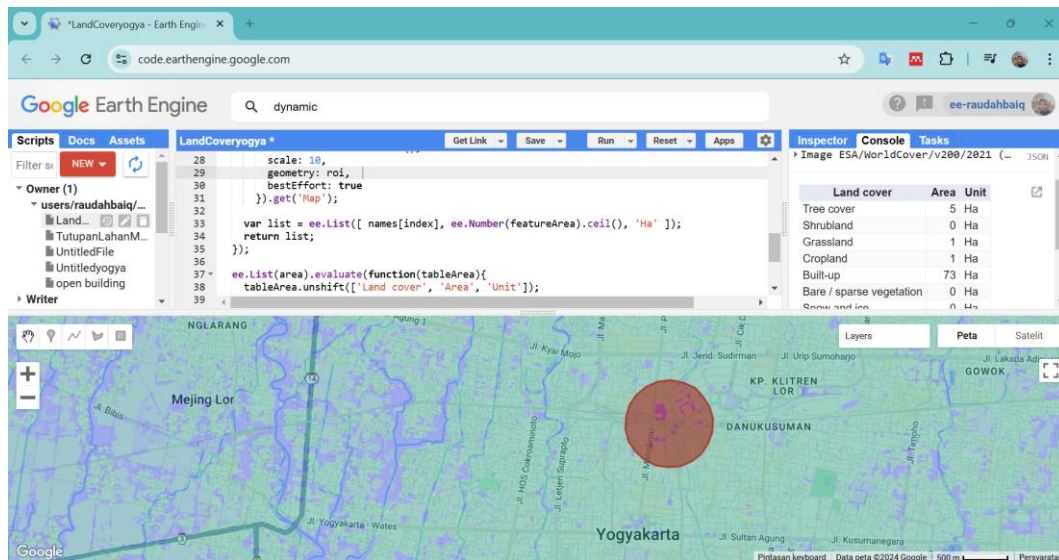
Penelitian ini menganalisis tutupan lahan menggunakan peta ESA WorldCover yang ada di katalog GEE, yaitu peta dari Badan Antariksa Eropa (ESA) untuk tutupan lahan global tahun 2021 pada resolusi 10 m berdasarkan data Sentinel-1 dan Sentinel-2. Rangkaian *buffer* ditetapkan pada penelitian polusi udara untuk mengetahui pengaruh penggunaan lahan pada konsentrasi polutan, pada umumnya yaitu radius: 1 km, 2 km, 3 km, 4 km dan 5 km. jika radius *buffer* terlalu jauh dari stasiun pemantauan, perbedaan kategori penggunaan lahan tidak dapat dibedakan dengan jelas. Berdasarkan penelitian Halim (2020) di area kota di Malaysia, menemukan bahwa konsentrasi PM memiliki korelasi yang erat dengan menggunakan lahan di area <1 km, sehingga pada penelitian ini digunakan *buffer* 1 km (lingkaran merah di Gambar 3.6) sebagai area asosiasi penggunaan lahan karena paling berpengaruh dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ (Dilawar et al., 2023).

Dalam penelitian ini, beberapa perintah GEE yang digunakan untuk melakukan mendapatkan tutupan lahan yaitu:

Mendapatkan Nama dan Nilai Kelas Tutupan Lahan:

```
var classNames = lulc.get('Map_class_names');
```

```
var classValues = lulc.get('Map_class_values');
```



Gambar 3.6 Lingkungan kerja di GEE

Menghitung Luas untuk Setiap Kelas Tutupan Lahan:

```
dict.evaluate(function(obj){
  var names = obj.classNames;
  var values = obj.classValues;
  var area = values.map(function(value, index){
    var featureArea =
    lulc.eq(value).multiply(ee.Image.pixelArea().divide(10000)).reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.sum(), scale: 10, geometry: geometry, bestEffort: true
    }).get('Map');
    var list = ee.List([ names[index], ee.Number(featureArea).ceil(), 'Ha' ]);
    return list; });
```

Lalu data yang didapatkan dari perintah di atas dibuat dalam bentuk tabel dengan kategori yang dipilih: tutupan pohon, pertanian, area terbuka dan area terbangun.

3.4.3 Analisis Paparan (*Intake*)

Penelitian ini juga dilakukan untuk studi analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) yang bertujuan memperkirakan risiko yang diterima suatu masyarakat akibat paparan agen-agen pencemar di lingkungan. mencermati potensi besarnya

risiko yang dimulai mengidentifikasi bahaya, memahami hubungan antara dosis agen risiko dan respons tubuh yang diketahui dari berbagai penelitian, mengukur seberapa besar pajanan agen risiko tersebut dan menetapkan tingkat risiko suatu agen risiko tidak aman atau tidak bisa diterima pada suatu populasi tertentu dan memberikan pengelolaan risiko yang dibutuhkan (Maksum & Tarigan, 2022).

Penilaian risiko biasanya menggunakan standar EPA yang dikeluarkan oleh WHO dengan berbagai parameter yang juga mengikuti parameter negara Amerika Serikat. Pada penelitian ini standar yang akan dipakai untuk penilaian pajanan dari PM_{2,5} dan pajanan dari MP akan menggunakan Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan yang di buat oleh Kementerian Kesehatan (Dirjen P2PL, 2016). Walaupun sudah cukup lama, pedoman ini berpacu pada perumusan yang telah di buat oleh EPA (US Environmental Protection Agency, 2011) yang juga tidak memiliki banyak perubahan terkait penggunaan rumus hingga faktor pajanannya. Beberapa penelitian yang mengikuti pedoman ini (Abidin et al., 2023; Maksum & Tarigan, 2022) merupakan penelitian yang masih baru sehingga menurut penulis, pedoman masih relevan.

Hal yang perlu dilakukan saat melaksanakan analisis risiko adalah:

1. Identifikasi bahaya

Identifikasi bahaya merupakan langkah pertama dalam ARKL yang digunakan untuk mengetahui secara spesifik agen risiko apa yang berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan bila tubuh terpajan. Sebagai pelengkap dalam identifikasi bahaya dapat ditambahkan gejala – gejala gangguan kesehatan apa yang terkait erat dengan agen risiko yang akan dianalisis. Tahapan ini harus menjawab pertanyaan agen risiko spesifik apa yang berbahaya, di media lingkungan yang mana agen risiko eksisting, seberapa besar kandungan/konsentrasi agen risiko di media lingkungan, gejala kesehatan apa yang potensial

2. Analisis dosis – respons

Setelah melakukan identifikasi bahaya (agen risiko, konsentrasi dan media lingkungan), maka tahap selanjutnya adalah melakukan analisis dosis- respons yaitu mencari nilai *Reference Dose* (RfD), dan/atau *Reference Concentration* (RfC), dan/atau *slope factor* (SF) dari agen risiko yang menjadi fokus ARKL, serta memahami efek apa saja yang mungkin ditimbulkan oleh agen risiko tersebut pada

tubuh manusia. Analisis dosis – respons ini tidak harus dengan melakukan penelitian percobaan sendiri namun cukup dengan merujuk pada literatur yang tersedia. Langkah analisis dosis respons ini dimaksudkan untuk :

- mengetahui jalur pajanan (*pathways*) dari suatu agen risiko masuk ke dalam tubuh manusia.
- memahami perubahan gejala atau efek kesehatan yang terjadi akibat peningkatan konsentrasi atau dosis agen risiko yang masuk ke dalam tubuh.
- mengetahui dosis referensi (RfD) atau konsentrasi referensi (RfC) atau *slope factor* (SF) dari agen risiko tersebut.

Untuk mengetahui RfC, RfD, dan SF suatu agen risiko dapat dilihat pada Integrated Risk Information System (IRIS) yang bisa diakses di situs www.epa.gov/iris. Jika tidak ada RfD, RfC, dan SF maka nilai dapat diturunkan dari dosis eksperimental yang lain seperti NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*), LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*), MRL (*Minimum Risk Level*), baku mutu udara ambien pada NAAQS (*National Ambient Air Quality Standard*) dengan catatan dosis eksperimental tersebut mencantumkan faktor antropometer yang jelas (Wb, tE, fE, dan Dt). Hingga saat ini nilai RfC untuk PM_{2,5} belum terdapat pada IRIS dan media lainnya sehingga dihitung menggunakan nilai ambang batasnya.

Satuan dosis referensi (RfD) dinyatakan sebagai milligram (mg) zat per kilogram (Kg) berat badan per hari, disingkat mg/kg/hari. Dalam literatur terkadang ditulis mg/kg.hari, mg/kg-hari, dan mg/kg-hari. Satuan konsentrasi referensi (RfC) dinyatakan sebagai milligram (mg) zat per meter kubik (m³) udara, disingkat mg/M³. Konsentrasi referensi ini dinormalisasikan menjadi satuan mg/kg/hari dengan cara memasukkan laju inhalasi dan berat badan yang bersangkutan.

Setelah melakukan 2 langkah tersebut, selanjutnya dilakukan Analisis pajanan yaitu dengan mengukur atau menghitung *intake* / asupan dari agen risiko. Untuk menghitung *intake* digunakan persamaan atau rumus yang berbeda. Data yang digunakan untuk melakukan perhitungan dapat berupa data primer (hasil pengukuran konsentrasi agen risiko pada media lingkungan yang dilakukan sendiri) atau data sekunder (pengukuran konsentrasi agen risiko pada media lingkungan yang dilakukan oleh pihak lain yang dipercaya seperti BLH, Dinas Kesehatan,

LSM, dll), dan asumsi yang didasarkan pertimbangan yang logis atau menggunakan nilai default yang tersedia. Rumus perhitungan yang digunakan untuk perhitungan *intake* jalur pemajanan inhalasi adalah sebagai berikut :

$$Ink = \frac{C \times R \times tE \times fE \times Dt}{Wb \times tavg} \quad (7)$$

dengan:

Ink = *intake* (mg/kg/hari) ;

C = konsentrasi polutan $PM_{2,5}$ pada media udara (mg/m^3);

R = laju inhalasi (m^3/jam);

tE = lama pajanan (jam/hari);

fE = frekuensi pajanan (hari/tahun);

Dt = durasi pajanan (tahun);

Wb = berat badan (kg);

$tavg$ = periode waktu rata-rata (hari).

Nilai tE diperoleh dari hasil survei, tE dihitung berdasarkan jumlah hari kerja responden dalam satu tahun dan Dt menyatakan waktu tinggal di lokasi studi dan terpapar polutan.

Nilai dari masing-masing pajanan jika tidak dilakukan survei secara langsung, dapat menggunakan data sekunder dengan mendapatkan dari jurnal penelitian. Dalam hal ini, analisis *intake* yang ingin difokuskan oleh penulis adalah kepada penduduk yang tetap ada di sekitar area jalan utama Kota Yogyakarta. Seperti pedagang kaki lima dan restoran, petugas keamanan dan pekerja lain yang setiap hari ada di area tersebut.

Penelitian ini tidak melakukan wawancara atau kuesioner, dan sampling individu, oleh karena itu, nilai dalam perhitungan *intake* akan diambil dari pedoman analisis risiko kesehatan lingkungan dengan tambahan dari beberapa penelitian lain (Dirjen P2PL, 2016). Penelitian oleh Abidin (2023) melakukan penelitian di area Provinsi Yogyakarta namun di area landfill, selain itu penulis tidak menemukan analisis risiko lain untuk partikulat di udara yang dilakukan di Yogyakarta.

Nilai yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat di Tabel 3.3 ini.

Tabel 3.3 Faktor eksposur yang digunakan dalam penelitian ini

Karakteristik	Satuan	Nilai	Sumber
Berat badan (Wb)	kg	60	Permenkes 28 tahun 2019
Durasi pajanan (Dt)	tahun	30	Dirjen P2PL (2016)
Waktu pajanan (Te)	jam/hari	8	Dirjen P2PL (2016)
Frekuensi pajanan (Fe)	hari/tahun	250	Abidin et al. (2023)
Laju inhalasi (R)	mg/m ³	0,83	Maksum & Tarigan (2022)
Waktu rata-rata (Tavg)	hari/tahun	10950	Abidin et al. (2023)

Pada tahun 2024, BPS DIY menyatakan bahwa angka harapan hidup dari penduduk Yogyakarta mencapai 75 Tahun, sehingga durasi pajanan 30 tahun masih dapat diterima untuk warga masyarakat yang bermukim di sekitar area sampling berdasarkan Dirjen P2PL yang menerbitkan pedoman analisis risiko di Indonesia, namun karena ada kemungkinan perubahan pekerja setelah masa Covid, Durasi Pajanan juga akan dihitung selama 4 tahun. Selain itu, berat badan di hampir semua penelitian tentang analisis risiko partikulat di Indonesia (Ihsan et al., 2023; Maksum & Tarigan, 2022; M. W. Pangestika, 2023; Sembiring, 2020) memiliki rata-rata tidak jauh dari berat standar di pedoman pada Angka Kecukupan Gizi (AKG) yang dianjurkan pada Peraturan Menteri Kesehatan No 28 tahun 2019 serupa dengan standar WHO dalam “*Human Health Risk Assessment Toolkit: Chemical Hazards*”.

Untuk memberikan gambaran secara lebih menyeluruh tentang risiko bagi setiap pengguna jalan, pemberian nilai risiko untuk partikulat halus akan membagi perhitungan risiko berdasarkan waktu pajanan dan area,

- Area pemukiman (fE : 350 hari, tE : 24 jam/hari)
Bagi warga yang tinggal disekitar area sampling
- Area bekerja (fE : 250 hari, tE : 8 jam/hari)
Untuk penduduk yang bekerja diarea jalan/titik sampling, bisa jadi pegawai formal atau non formal, untuk mendapatkan informasi yang mewakili berbagai populasi penduduk, durasi pajanan (Dt) dibagi menjadi 4 tahun, 5 tahun, 10 tahun, 20 tahun dan 30 tahun)
- Sesaat (fE : 250 hari, tE : 0,06 jam/hari)

Pajanan sesaat diperuntuhkan untuk pengguna jalan yang melewati area sampling. Semua lokasi sampling merupakan persimpangan jalan dengan lampu lalu lintas. Menurut Yastica (2014), lama lampu berwarna merah di perempatan Condong-catur (titik sampling R1) selama 109 detik, dengan asumsi pengendara melewati persimpangan yang sama sebanyak 2 kali, maka waktu pajanannya selama lampu merah berlangsung yaitu 218 detik atau 0.06 jam.

3. Karakterisasi risiko

Langkah ARKL yang terakhir adalah karakterisasi risiko yang dilakukan untuk menetapkan tingkat risiko atau dengan kata lain menentukan apakah agen risiko pada konsentrasi tertentu yang dianalisis pada ARKL berisiko menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat (dengan karakteristik seperti berat badan, laju inhalasi/konsumsi, waktu, frekuensi, durasi pajanan yang tertentu) atau tidak. Beredasarkan pedoman ARKL yang digunakan (Dirjen P2PL, 2016) karakteristik risiko dilakukan dengan membandingkan/membagi *intake* dengan dosis /konsentrasi agen risiko tersebut. Variabel yang digunakan untuk menghitung tingkat risiko adalah *intake* (yang didapatkan dari analisis pemajanan) dan dosis referensi (RfD) / konsentrasi referensi (RfC) yang didapat dari literatur yang ada (dapat diakses di situs www.epa.gov/iris).

Karakterisasi risiko digunakan untuk menentukan paparan konsentrasi PM_{2,5} yang dapat menimbulkan risiko gangguan kesehatan pada kelompok masyarakat di sekitar lokasi berdasarkan nilai *intake* yang diperoleh. Penentuan tingkat risiko (RQ) dilakukan dengan membandingkan *intake* dengan konsentrasi agen risiko (RfC). Penentuan RfC dilakukan berdasarkan analisis dosis-respon dengan menggunakan nilai batas aman paparan PM_{2,5} oleh *National Ambient Air Quality Standard* (NAAQS) US - EPA tahun 2006 yaitu sebesar 35 µg/m³ karena nilai default untuk antropometri subjek pajanan diketahui. Sedangkan untuk baku mutu PM_{2,5} menurut PP RI Nomor 21 Tahun 2021 tidak dapat digunakan karena nilai default antropometri belum diketahui. Berdasarkan perhitungan RfC dari default tersebut dihasilkan bahwa RfC = 0,01 mg/kg/hari (R. Pangestika & Wilti, 2021)

Tingkat risiko untuk efek non karsinogenik dinyatakan dalam notasi *Risk Quotient* (RQ). Untuk melakukan karakterisasi risiko untuk efek non karsinogenik dilakukan perhitungan dengan membandingkan / membagi *intake* dengan RfC atau RfD. Rumus untuk menentukan RQ adalah sebagai berikut :

$$RQ = \frac{I}{RfC} \quad (8)$$

Keterangan

I (*intake*) : *Intake* yang telah dihitung dengan rumus 7

RfC (*reference concentration*) : Nilai referensi agen risiko pada pemajanan inhalasi.

Tingkat risiko dinyatakan dalam angka atau bilangan desimal tanpa satuan. Tingkat risiko dikatakan aman bilamana $intake \leq RfD$ atau RfCnya atau dinyatakan dengan $RQ \leq 1$. Tingkat risiko dikatakan Tidak Aman jika $intake > RfD$ atau RfCnya yang dinyatakan dengan $RQ > 1$.

3.5 Keterbatasan Studi

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan antara lain:

1. Jumlah kendaraan yang melewati lokasi sampling tidak dihitung saat proses sampling dilakukan. Hal ini mungkin dapat mempengaruhi analisis terhadap pengaruh jumlah kendaraan terhadap konsentrasi PM_{2,5} dan MP yang ada di lokasi sampling.
2. Pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran awal atau *background study* pada lokasi penelitian yang sama, namun untuk konsentrasi PM_{2,5} dan MP, dapat dibandingkan dengan penelitian lain yang memiliki metode yang mirip dengan penelitian ini.
3. Keterbatasan jumlah stasiun meteorologi di Daerah Istimewa Yogyakarta membuat hasil pengukuran meteorologi langsung di lokasi sampling tidak dapat divalidasi dengan baik.
4. Pengambilan sampling untuk MP di udara dan di debu jalan tidak dilakukan secara bersamaan. Hal ini memungkinkan perbandingan kelimpahan MP di kedua media tidak akurat karena adanya tambahan variabel lain yang tidak diketahui.

5. Keterbatasan alat dan metodologi untuk analisis MP sehingga jenis plastik yang didapatkan terbilang terbatas.
6. larutan asam berpotensi merusak plastik, menyebabkannya menguning atau dapat hancur pada suhu di atas 60°C. Oleh karena itu, pencernaan asam dengan H₂O₂ 30% dapat menyebabkan perkiraan yang lebih rendah tentang kontaminasi MP.

Dengan keterbatasan yang telah disebutkan, penelitian ini memberikan gambaran secara umum tentang polusi udara dan keberadaan polusi MP, yang memungkinkan sebagai dasar analisis MP ke depannya. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat melakukan analisis kepadatan lalu lintas dan MP secara menyeluruh dengan melakukan perhitungan kendaraan selama sampling, juga melakukan sampling secara bersamaan dengan objek lingkungan lain yang akan dibahas. Standarisasi metode dan ketersediaan alat untuk analisa lebih lanjut juga diperlukan dalam penelitian MP di udara selanjutnya.

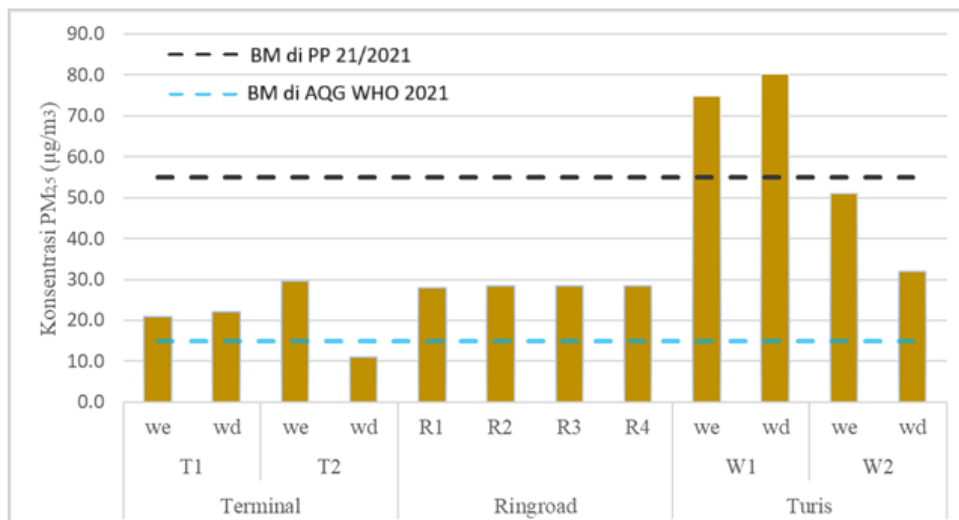
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. PM_{2,5} di Udara Ambien

Pada Tahun 2021, Pemerintah Indonesia memperbarui baku mutu udara ambien melalui PP No. 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Baku mutu parameter PM_{2,5} yang sebelumnya sebesar 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berdasarkan PP No. 41 tahun 1999 menjadi 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, namun baku mutu ini masih jauh diatas rekomendasi dari World Health Organization (WHO) dalam *Air Quality Guideline* (AKG) terbaru (2021) sebesar 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk pengukuran selama 24 jam.

Penelitian ini membagi 3 kawasan utama yang berada di sekitar jalan utama Provinsi DIY yang disebut sebagai jalan Nasional untuk melihat kualitas udara khususnya konsentrasi PM_{2,5}. Sumber PM_{2,5} yang sangat beragam dan kompleks (Liu et al., 2019) perlu diteliti lebih lanjut, khususnya mengenai keberadaan dan konsentrasinya, begitu pula dengan konsentrasi dan karakteristik polutan tersebut di berbagai jenis kawasan di Provinsi DIY. Konsentrasi PM_{2,5} yang di dapatkan pada penelitian ini terlihat sangat beragam dengan karakteristik mencirikan wilayah (Gambar 4.1).

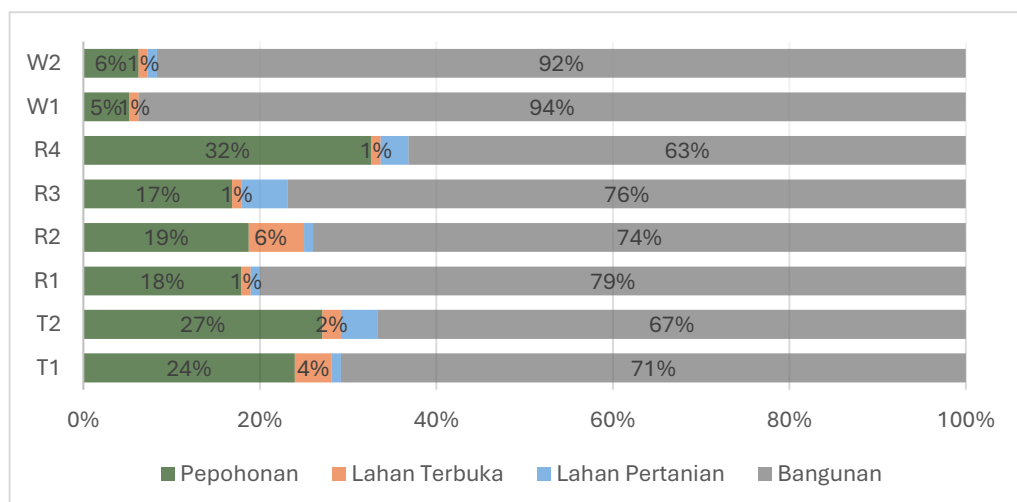


Keterangan: we: pengukuran saat weekend; wd: pengukuran saat weekday

Gambar 4.1 Konsentrasi PM_{2,5} di berbagai kawasan di Yogyakarta

Konsentrasi tertinggi PM_{2,5} yang dideteksi pada penelitian ini yaitu sebesar 80,29 µg/m³ pada pengukuran di hari kerja dan konsentrasi sebesar 74,80 µg/m³ pada pengukuran di hari libur pada tempat yang sama yang menunjukkan konsentrasi melebihi baku mutu (BM) resmi di Indonesia, sedangkan hampir semua lokasi sampling tidak memenuhi BM yang direkomendasikan oleh WHO. Berdasarkan penelitian oleh Ghaida (2024) di Jakarta tentang pola spasial pencemaran PM_{2,5} menyebutkan bahwa konsentrasi polutan sangat berpengaruh dengan sumber polutan lokal suatu area, untuk penelitian ini area sampling dilakukan di sekitar Jalan utama dengan sumber polutan utama berasal dari kendaraan. Terlihat pada Gambar 4.1 bahwa konsentrasi di area lingkaran utama (Ringroad) terlihat sama, yang dapat menandakan tidak adanya polutan lain selain sumber polutan utama yang berasal dari kendaraan.

Analisis tutupan lahan dilakukan area sampling berdasarkan pengamatan langsung dan hasil pengolahan data menggunakan metode di bagian 3.4.2, didapatkan tutupan lahan semua area dalam jarak 500 m, untuk area sampling ringroad memiliki tutupan pohon yang hampir serupa dengan nilai >17% di semua lokasi, dengan titik yang memiliki tutupan pohon paling banyak berada di R4 sebesar 32%, sedangkan kawasan Terminal memiliki tutupan pohon cukup tinggi >20% dengan tutupan pohon terendah ada di Kawasan Wisata, hasil lengkapnya dapat dilihat di Gambar 4.2.



Keterangan : W: lokasi pengukuran wisata
R: lokasi pengukuran ringroad (jalan utama)
T: lokasi pengukuran terminal

Gambar 4.2 Tutupan lahan di area lokasi sampling (bufer 1 km)

Dibandingkan jenis penggunaan lahan lainnya, distribusi pepohonan secara efektif dapat mengurangi konsentrasi PM_{2,5} dengan lahan bangunan dan konstruksi cenderung memiliki konsentrasi PM_{2,5} yang lebih tinggi (He et al., 2024). Penelitian ini memberikan hasil yang serupa dengan penelitian yang telah dilakukan di China (He et al., 2024; C. Li et al., 2020; H. Yang et al., 2017) dan Pakistan (Dilawar et al., 2023) dimana area dengan tutupan pohon paling rendah, yaitu wisata memiliki konsentrasi PM_{2,5} yang paling tinggi di antara kawasan yang lain, sedangkan area terminal, walaupun memiliki jumlah lalu lintas yang tinggi memiliki konsentrasi PM_{2,5} yang jauh lebih rendah dari area wisata.

Pengukuran konsentrasi terendah ada di area T2 dengan konsentrasi 10,95 µg/m³ yang merupakan terminal Giwangan. Kedua terminal di penelitian ini sama-sama memiliki konsentrasi yang rendah dibandingkan dengan lokasi lain di penelitian ini, hal ini mungkin dikarenakan jumlah tutupan pohon di lokasi terminal terbilang cukup tinggi, dengan nilai di atas 20% di setiap lokasi. Pada penelitian ini kawasan dengan konsentrasi PM_{2,5} tertinggi ke terendah berturut yaitu kawasan Wisata > kawasan Ringroad > dan kawasan Terminal.

Untuk memudahkan analisis, bisa dilihat Tabel 4.1 dibawah ini tentang distribusi dari data partikulat pada penelitian ini. Rata-rata konsentrasi di kawasan wisata menunjukkan partikulat PM_{2,5} di area ini melebihi baku mutu pada PP No. 22/2021 (>55 µg/m³), untuk konsentrasi kawasan Terminal dan Ringroad masih dibawah baku mutu baik standar Nasional Indonesia namun telah melebihi baku mutu dari WHO (>15 µg/m³).

Tabel 4.1 Konsentrasi PM_{2,5} rata-rata kawasan

Kawasan	Max PM_{2,5} (µg/m³)	Min PM_{2,5} (µg/m³)	Rata-rata PM_{2,5} (µg/m³)
Terminal	29,6	11,0	20,8
Ringroad	28,6	29,6	28,4
Wisata	80,3	32,0	59,6

Pengambilan sampel juga dilakukan di situasi cuaca yang berbeda, 6 sampel (T1 wd, T2 wd, R1, R3, W2 we, W2 wd) diambil saat adanya hujan, 2 sampel (T2 we, R2) saat ada gerimis dan 4 sampel (T1 we, R4, W1 we, W1 wd) dimana tidak turun hujan sama sekali. Keadaan cuaca khususnya kejadian hujan akan sangat berpengaruh pada perubahan konsentrasi polutan di udara (Requia et

al., 2019). Untuk melihat perbedaan polutan berdasarkan kondisi hujan di area sampling Kota Yogyakarta, dapat dilihat rata-rata dari ketiga kategori tersebut pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Konsentrasi $PM_{2,5}$ berdasarkan kejadian hujan

Kejadian Hujan	Max $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	Min $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	Rata-rata $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)
Hujan	51,2	11,0	28,7
Gerimis	29,6	28,5	29,0
Tidak Hujan	80,3	20,9	51,1

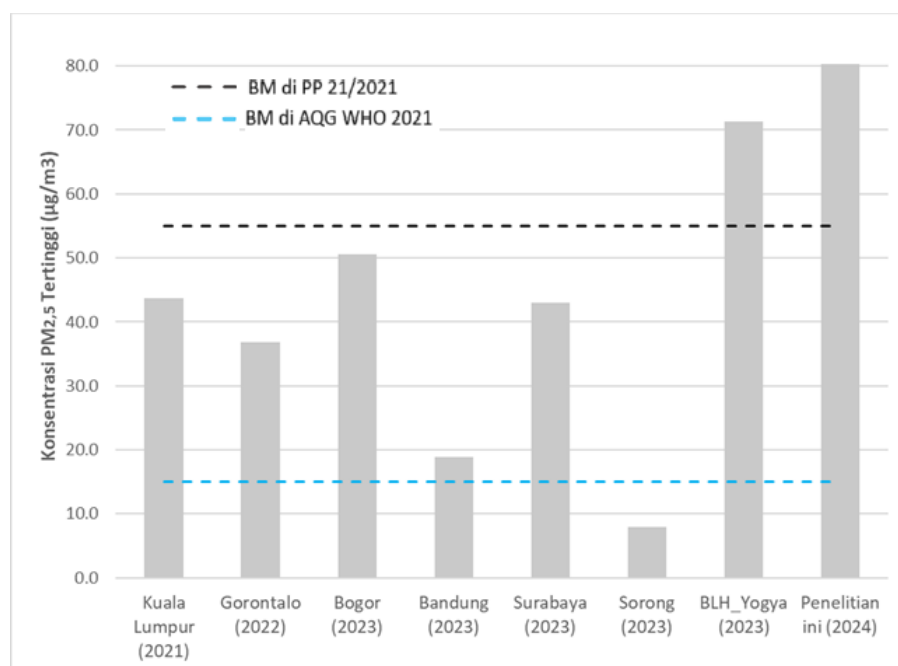
Melihat dari rata-rata konsentrasi partikulat di kondisi hujan, lebih rendah dari pada saat tidak hujan, menurut laporan dari BLH Provinsi DKI Jakarta (Fitratunnisa et al., 2023) kejadian presipitasi dapat menurunkan konsentrasi $PM_{2,5}$ sebesar 58% pada saat hujan, dan 43 % setelah hujan. Besaran curah hujan akan turut mempengaruhi proses pencucian polutan dari atmosfer. Sehingga kemungkinan kejadian gerimis juga memberikan efek pencucian sehingga konsentrasi polutan menjadi lebih rendah.

Manisalidis (2020) menuliskan bahwa mobil dan kereta api bisa menjadi sumber $PM_{2,5}$, selain itu kegiatan seperti merokok dan keberadaan debu di jalanan dapat menambah konsentrasi partikulat berukuran kecil, yang sesuai jika melihat lokasi titik sampling wisata berada di kawasan komersial yang dekat dengan stasiun kereta api dan lokasi restoran dan cafe sehingga jumlah masyarakat yang berlalu lalang ataupun duduk di sekitar area sampling sangat banyak sehingga konsentrasi polutan pun menjadi lebih banyak dibandingkan lokasi sampling lain.

Berdasarkan pada Gambar 3.2 tentang titik pengambilan sampel, beban lalu lintas dari kedua kegiatan ini terlihat mirip, namun jika melihat tutupan lahan (Gambar 4.2) dari kedua lokasi tersebut, terlihat bahwa persentase pepohonan lebih banyak di area lain dibandingkan dengan lokasi W1 dan W2 sebagai lokasi wisata, McDuffie (2021) dan Meo (2021) menyebutkan bahwa keberadaan pepohonan dapat membantu mengurangi konsentrasi $PM_{2,5}$ di area perkotaan, selain itu hal yang mungkin berkurangnya tingkat dispersi partikulat di area W1 (Tugu Yogya) karena banyaknya Gedung tinggi di area tersebut yang menghalangi pergerakan angin (J. Yang et al., 2020) .

Sejak tahun 2021, Badan Lingkungan Hidup (BLH) Kota Yogyakarta, menggunakan *Air Quality Monitoring System* (AQMS), dimana pengukuran polutan di udara Kota Yogyakarta dilakukan secara otomatis dan terekam setiap hari. Berdasarkan laporan yang diterbitkan oleh BLH kota Yogyakarta (2024), konsentrasi tertinggi PM_{2,5} pada tahun 2023 sebesar 71 µg/m³ dengan konsentrasi rata-rata 20,8 µg/m³, hasil pengukuran tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil yang dikemukakan dalam penelitian ini. Pada tahun 2020 dan 2021, AQMS kota Yogyakarta mencatat rata-rata konsentrasi sebesar 14,08 µg/m³ dan 17,35 µg/m³ yang merupakan efek dari kejadian pandemi Covid 19. WHO (2024) juga menerbitkan laporan dari konsentrasi rata-rata tahunan dari PM_{2,5} di daerah perkotaan di Dunia, dengan rata-rata konsentrasi berada di angka 32,9 µg/m³, masih di bawah standar US EPA namun di atas konsentrasi rekomendasi dari WHO.

Perbandingan hasil pengukuran antara PM_{2,5} di penelitian ini dengan beberapa penelitian dan laporan lain, dapat dilihat di Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Konsentrasi PM_{2,5} di laporan lain

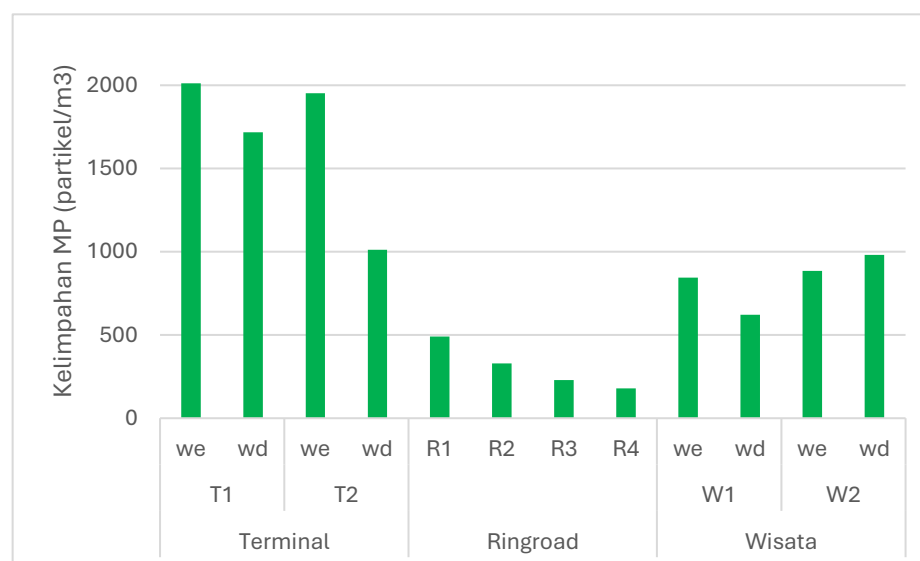
Penelitian yang dipaparkan di Gambar 4.3 berasal dari penelitian di berbagai kota besar di Indonesia dan satu lokasi di ibukota Malaysia, nilai konsentrasi yang ditampilkan adalah nilai konsentrasi tertinggi PM_{2,5} yang didapatkan pada penelitian tersebut. Hampir semua penelitian di Gambar 4.3 melakukan pengambilan sampel di area jalan dengan metode HVAS. Hasil paling tinggi ada di

area wisata kota Yogyakarta dengan nilai $80,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang hasilnya tidak berbeda jauh dengan nilai konsentrasi yang didapatkan oleh BLH Kota Yogyakarta sebesar $71,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada tahun 2023. Selain laporan diatas, laporan kualitas udara Kota Jakarta diterbitkan oleh BLH Jakarta (Fitratunnisa et al., 2023) menggunakan AQMS, memaparkan konsentrasi partikulat tertinggi mencapai $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ saat dimana sedang dilaksanakan *event* yang menyebabkan peningkatan tingkat lalu lintas diarea pengukuran. Konsentrasi rendah didapatkan di area Sorong, yang merupakan area perkotaan di Provinsi Papua Barat Daya, lokasi pengambilan sampel penelitian ini ada di area dataran tinggi, dengan kecepatan angin yang tinggi juga, hal yang sama terjadi di area Bandung dimana penelitian dilakukan di area Terminal oleh Wellid (2023) konsentrasi partikulat sangat rendah.

4.2. Kelimpahan Mikroplastik

4.2.1 Kelimpahan Mikroplastik di $\text{PM}_{2,5}$

MP di udara merupakan bidang MP yang cukup baru. Penelitian yang dilakukan di Iran (Abbasi et al., 2019; Akhbarizadeh et al., 2021) menunjukkan bahwa MP ditemukan pada partikulat kecil seperti $\text{PM}_{2,5}$. Pada penelitian ini, MP yang berhasil diidentifikasi dari kertas filter dijabarkan dalam bentuk kelompok kawasan, sama dengan analisis dari konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ diatas. Kelimpahan dari MP di $\text{PM}_{2,5}$ dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Keterangan: we: pengukuran saat weekend; wd: pengukuran saat weekday

Gambar 4.4 Kelimpahan MP di $\text{PM}_{2,5}$

Berbeda dengan hasil konsentrasi $PM_{2.5}$ di udara, dimana konsentrasi $PM_{2.5}$ tertinggi ditemukan di kawasan wisata. Kelimpahan MP tertinggi berada di kawasan terminal, di titik “T1 we”, terminal Jombor saat *weekend*, dengan kelimpahan sebanyak 2011 partikel/ m^3 . Kelimpahan terbanyak kedua terdapat pada “T2 we”, terminal Giwangan saat *weekend*, dengan kelimpahan sebanyak 1951 partikel/ m^3 . Kelimpahan MP paling rendah berada di area Ringroad, dengan titik R4, yaitu Ringroad barat, dengan kelimpahan sebanyak 178 partikel/ m^3 . Nilai kelimpahan MP pada kawasan Ring Road secara umum sangat jauh di bawah kawasan terminal. Kawasan dengan kelimpahan MP tertinggi hingga terendah yaitu Terminal (1672 partikel/ m^3), Wisata (832 partikel/ m^3) dan Ringroad (306 partikel/ m^3).

Berdasarkan data Balai Pengelolaan Transportasi Darat Kelas III DIY (2024), setiap harinya, rata-rata terdapat 734 bus antar kota antar provinsi, 386 bus antar kota dalam provinsi, dan 392 angkutan perkotaan yang masuk ke Terminal Giwangan. Sementara itu, pada terminal Jombor rata-rata per harinya terdapat 58 kendaraan antar kota antar provinsi. Lebih dari itu, berdasarkan Gambar 3.2, semua area titik pengambilan sampel memiliki beban lalu lintas yang cukup tinggi.

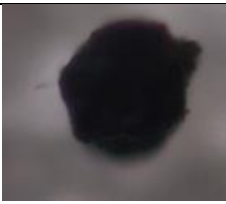
Jumlah bus yang sangat banyak keluar-masuk terminal diduga menjadi sebab tingginya kelimpahan MP di area terminal. Hal ini berdasarkan perkiraan bahwa sumber pencemar MP terbesar di jalanan adalah dari ban kendaraan yang aus. Berdasarkan standar *wear and tear* ban untuk Swedia (Jan Kule et al., 2017), tingkat keausan ban bus adalah 700 mg/km. Nilai tersebut jauh lebih besar dibandingkan dengan tingkat keausan ban mobil pribadi yang hanya sebesar 50 mg/km.

Secara umum, bentuk dan warna MP udara yang teridentifikasi pada ketiga kawasan berdasarkan area penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.5. Sementara itu, bentuk MP pada $PM_{2.5}$ yang terobservasi menggunakan mikroskop dapat dilihat pada Tabel 4.3.

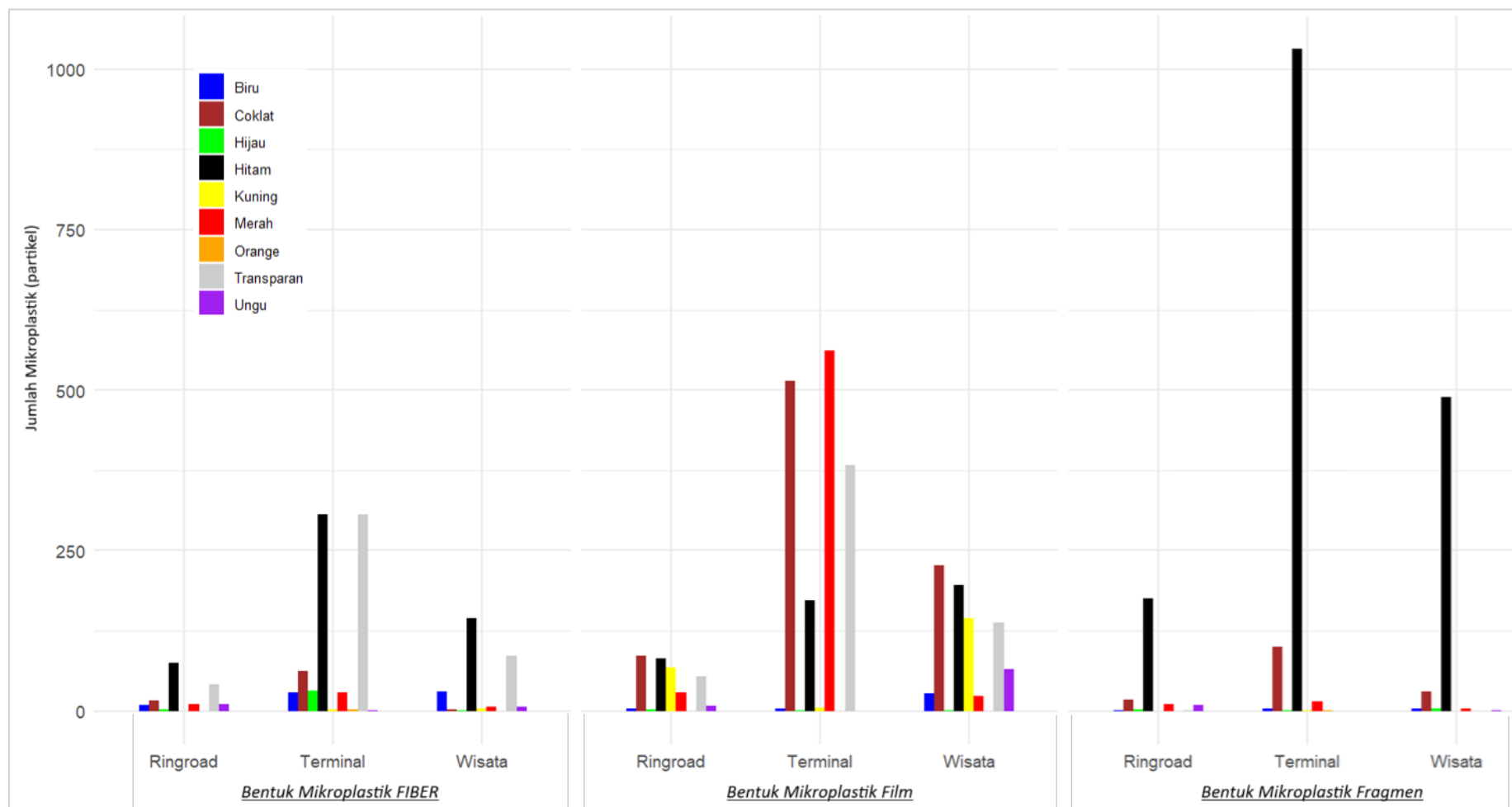
Jumlah MP didapatkan dengan menghitung banyaknya partikel di tiap filter. Pada penelitian ini, didapatkan bahwa MP paling dominan memiliki karakteristik berbentuk fragmen dan berwarna hitam baik itu di kawasan Terminal, Ringroad dan kawasan wisata, sama seperti penelitian oleh Suryati (2024) di kota Medan dan Myat (2024) di area jalan raya Thailand yang memberikan hasil dominan MP

berbentuk fragmen, dimana hampir 90% dari penelitian Myat untuk *airborne* MP merupakan bentuk fragmen. Untuk ukuran MP di dalam sampel, Sarathana (2023) mendapatkan hasil fragmen mendominasi sampel MP di udara dengan ukuran kecil ($<2,5\mu\text{m}$).

Tabel 4.3 Hasil observasi MP di udara pada penelitian ini

Bentuk MP	Penelitian ini	Referensi dari Lusher et al. (2020)	Definisi
Fragmen			Bentuk tidak beraturan dan tampak seperti pecah akibat serpihan yang lebih besar
Film			Terlihat seperti lembaran tipis, datar dan berwarna transparan atau agak transparan.
Fiber/ serat/ filamen			Terlihat bahan berserat dan ketebalannya homogen di seluruh panjangnya.

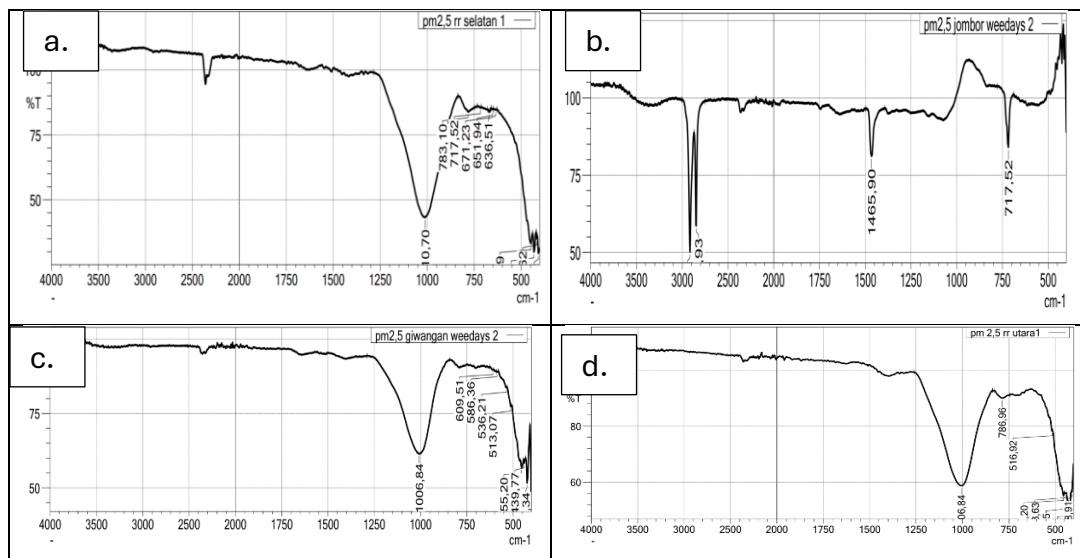
Begitu juga dengan warna menunjukan hasil yang sama dimana partikel warna hitam dan transparan menjadi dominan seperti yang terlihat di Gambar 4.5. Hal ini dimungkinkan karena lokasi sampling berada di kawasan jalan raya, dimana potensi sumbernya berasal dari kegiatan di jalan raya, seperti dari sumber ban mobil dan kegiatan transportasi lainnya (Cao & Cai, 2023; Sarathana & Winijkul, 2023; Syafei et al., 2019). Berdasarkan warnanya, partikel MP udara pada penelitian ini dapat diurutkan seperti hitam(54%)>transparan(18%)>coklat(16%)>merah(7%)>kuning(2%)>biru(2%)> ungu(1%)> hijau(<1%)>orange(<1%). Warna hitam sebagai warna dominan sudah banyak dilaporkan dalam penelitian (Myat et al., 2024; Sarathana & Winijkul, 2023; Talbot et al., 2022) namun transparan juga merupakan salah satu warna yang paling sering di temui pada *suspended* MP (Abbasi et al., 2019; Akhbarizadeh et al., 2021; Jahandari, 2023) dapat menjadi indikasi sumber dan tahapan degradasi.



Gambar 4.5 Persebaran warna dan bentuk MP di $PM_{2.5}$ berdasarkan kawasan

Pada Gambar 4.5 terlihat persebaran warna dan bentuk plastik yang didapatkan pada penelitian ini. dapat terlihat bahwa MP pada masing-masing area memiliki karakteristik yang berbeda antara bentuk dan warnanya. kawasan Terminal memiliki karakteristik MP yang didominasi bentuk fragmen berwarna hitam dan film berwarna coklat, merah dan transparan, kawasan Wisata memiliki MP dengan bentuk fragmen berwarna hitam dan MP film berbagai warna, sedangkan untuk kawasan Ringroad, MP yang ditemukan dalam bentuk fragmen dominan berwarna hitam sedangkan untuk fiber dan film memiliki bermacam warna. Karakteristik MP berbentuk Film dengan warna merah dan coklat mendominasi dari sampel MP film. MP berbentuk Film biasanya berasal dari bahan yang transparan atau berubah karena paparan lingkungan. Syafei (2019) menemukan PET botol sebagai bahan MP. Ahmad (2023) juga mengemukakan bahwa plastik pembungkus dapat rusak dan mengalami degradasi karena cuaca.

MP bentuk Film dan Fragmen dapat berasal dari sumber primer dan sekunder (misalnya abrasi, kerusakan, dan pelapukan produk plastik besar), sedangkan serat dapat berasal dari bahan tekstil (Akhbarizadeh et al., 2021) Selain itu, kontribusi keausan ban terhadap $PM_{2.5}$ diperkirakan berada pada kisaran 1–10% berdasarkan massa. Hasil uji FTIR menunjukkan jenis polimer plastik yang ada di dalam MP di udara dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil pengujian FTIR. a. R3; b. T1 wd; c. T2 wd; c. R1

Penelitian ini hanya memberikan jenis yang di deteksi saja tanpa ada proporsi konsentrasi masing-masing polimer. Beberapa jenis polimer MP yang terdeteksi yaitu *Polyethylene* (PE), *Polypropylene* (PP), *Low Density Polyethylene* (LDPE), dan *High Density Polyethylene* (HDPE). Untuk MP di luar ruangan, PE dan PP merupakan bahan yang sering ditemukan (Enyoh et al., 2019b; Sarathana & Winijkul, 2023), walau begitu, bahan pakaian seperti rayon dan polyester tidak dapat dideteksi pada penelitian kali ini, karena jumlahnya yang jauh lebih sedikit dengan partikel MP fragmen, namun karena karakteristik dari MP yang ditemukan memiliki bentuk fiber, menandakan bahwa pelepasan partikel dari pakaian pun juga terjadi di area jalan utama Yogyakarta, bahan plastik seperti rayon sering kali ditemukan pada pengambilan sampel udara di dalam ruangan (Bahrina et al., 2020; Noorimotlagh et al., 2024). Penelitian ini sendiri tidak menemukan polimer karet atau sejenisnya dikarenakan tidak adanya alat yang tersedia, namun bisa diduga dari bentuk dan warnanya, salah satu sumber dari MP di udara adalah dari ban kendaraan atau kepadatan lalu lintas.

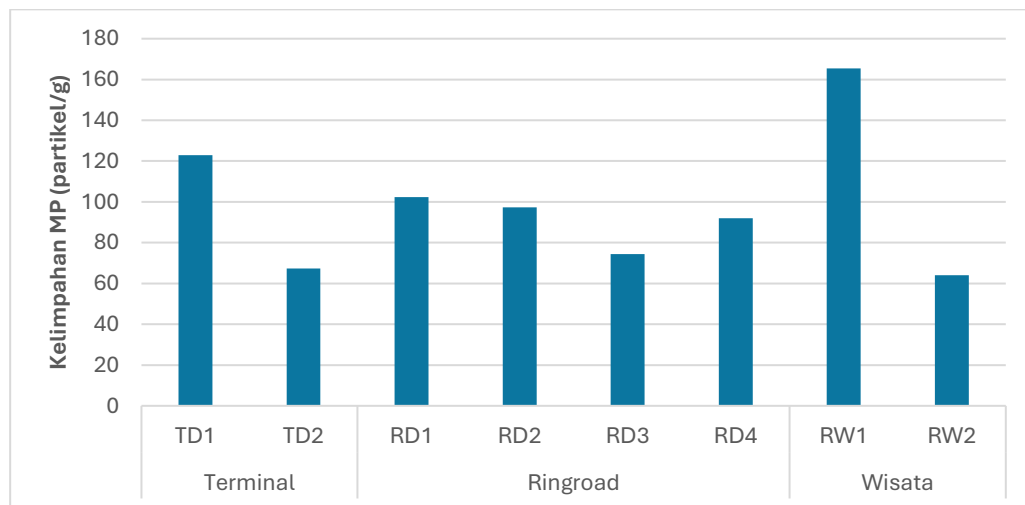
Pembandingan hasil penelitian ini dengan penelitian lain tentang MP di udara dapat dilihat di Tabel 2.5. Kelimpahan MP di udara pada penelitian ini jauh melebihi nilai kelimpahan pada lokasi penelitian lain seperti di Surabaya (Syafei et al., 2019) dengan kelimpahan 131 – 134 partikel/m³ dan di kota Bangkok (Sarathana & Winijkul, 2023) dengan kelimpahan 333,42 partikel/m³ yang sama-sama merupakan area dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi. Kawasan wisata pada penelitian di Thailand (Myat et al., 2024) memberikan kelimpahan sebesar 0,2 – 1,55 partikel/m³, hal ini sangat jauh berbeda dengan hasil kelimpahan di area wisata Kota Yogyakarta pada penelitian ini sebesar 832,9 partikel/m³. Hal ini dapat dikarenakan perbedaan lokasi dan perbedaan metode perhitungan MP di kertas filter yang sangat subjektif terhadap peneliti sendiri. Karakteristik warna sendiri cukup sama dengan hitam sebagai warna dominan di kawasan wisata Thailand dengan tipe polimer PE dan PP yang ada di setiap lokasi penelitian tentang MP di udara.

4.2.2 Kelimpahan Mikroplastik di Debu Jalan

Debu jalan dikenal sebagai salah satu sumber utama pencemaran MP yang berasal dari kegiatan lalu lintas kendaraan (Vogelsang et al., 2020). Pada penelitian

oleh Jan Kole (2017) menyebutkan bahwa sekitar 3-7% dari partikulat di $PM_{2.5}$ bersumber pada debu yang dihasilkan kendaraan. Sama halnya dengan PM diudara, sumber utama dari MP di debu jalan adalah kendaraan (Ii & Bacosa, 2024). Laporan di seluruh dunia tentang MP dalam debu jalan telah dibuat dan dipelajari oleh banyak peneliti di negara lain seperti Myanmar, Vietnam, Jepang, dan Australia (Mon et al., 2022; O'Brien et al., 2021; Romarate et al., 2023; Yukioka et al., 2020) yang dapat dilihat di Tabel 2.4.

Akibat pesatnya urbanisasi di wilayah metropolitan ini, hal ini telah menimbulkan dampak samping pada kualitas dan keberlanjutan lingkungan. tingkat partikulat dari lalu lintas akan naik seiring dengan meningkatnya laju lalu lintas (Novianto et al., 2022) begitu pula dengan meningkatnya kuantitas debu jalan dan keberadaan MP nya yang tidak banyak memiliki informasi di Indonesia. Penelitian ini dilakukan 8 lokasi titik sampling mengikuti lokasi titik sampling Partikulat. Sampling dilakukan selama satu kali di masa musim hujan yang sering disebut sebagai D+1. Kelimpahan MP di debu jalan pada penelitian ini dapat dilihat di Gambar 4.7 dengan hasil observasi MP di debu jalan dapat dilihat di Tabel 4.4.



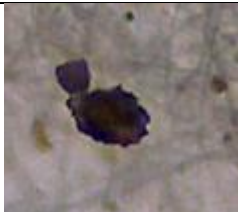
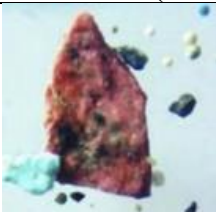
Gambar 4.7 Kelimpahan MP di debu jalan

Hasil pengukuran MP di debu jalan dapat dilihat dengan kelimpahannya, dimana lokasi tertinggi berada di kawasan wisata RW1 yaitu daerah Tugu Yogya dengan kelimpahan 166 partikel/g atau 166000 partikel/kg, daerah dengan kelimpahan terendah berada di area terminal TD2 yaitu Terminal Giwangan dengan kelimpahan 67 partikel/g atau 67000 partikel/kg.

Berdasarkan kawasan, nilai kelimpahan MP di debu jalan tidak berbeda jauh antar satu kawasan dengan kawasan yang lain. Kawasan dengan area paling tinggi berurutan yaitu Wisata (115 partikel/g), Terminal (95 partikel/g), dan Ringroad (91 partikel/g). Konsentrasi tertinggi MP di debu jalan didapatkan pada kawasan wisata seperti pada penelitian konsentrasi PM_{2,5}. Hasil kelimpahan MP di debu jalan pada penelitian ini tidak berbeda jauh dengan penelitian lain yang dapat dilihat di Tabel 2.4 dengan konsentrasi MP yang cukup besar.

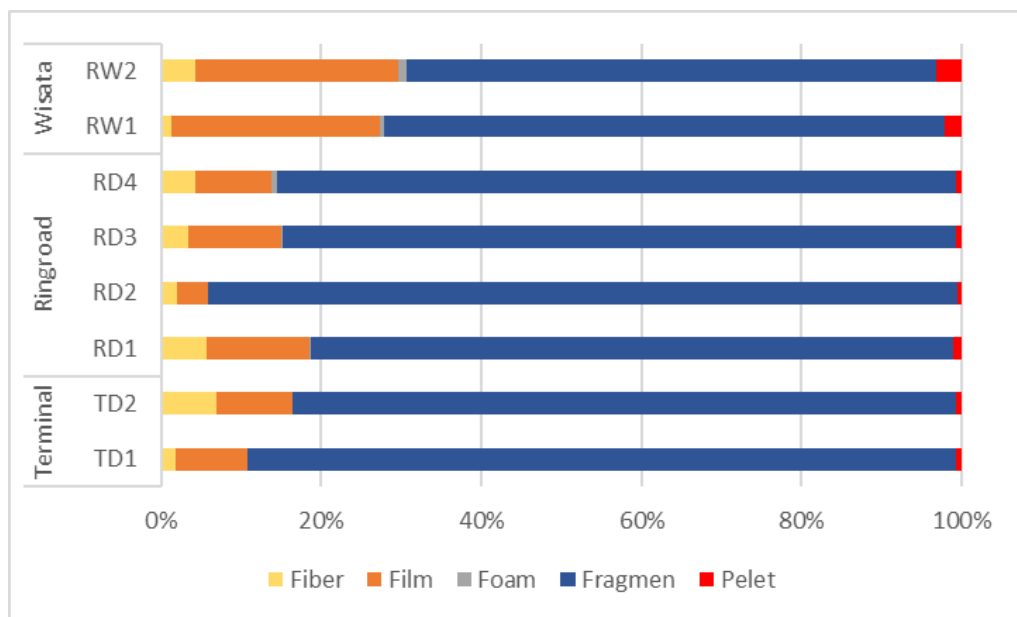
Penelitian MP di Iran memiliki kelimpahan sebesar 210 – 165,8 partikel/g (Abbasi et al., 2019), sedangkan untuk kelimpahan yang sangat tinggi ditemukan di debu jalan di Korea sebesar 1363 partikel/g karena dilakukan saat hari kering, berbeda dengan penelitian ini yang dilakukan saat hari setelah hujan. Untuk area non kota seperti hasil penelitian oleh Mon (2022) di Myanmar dan area yang memiliki transportasi dan pengelolaan sampah yang baik seperti yang dilakukan oleh Yukioka (2020) di Kusatsu Jepang menunjukkan nilai kelimpahan mikroplastik yang rendah jika dibandingkan dengan penelitian ini.

Tabel 4.4 Hasil observasi MP di debu jalan pada penelitian ini

Bentuk MP	Penelitian ini	Referensi dari Lusher et al. (2020)	Definisi
Fragmen			Bentuk tidak beraturan dan tampak seperti pecah akibat serpihan yang lebih besar
Film			Terlihat seperti lembaran tipis, datar dan berwarna transparan atau agak transparan.
Fiber/ serat/ filamen			Terlihat bahan berserat dan ketebalannya homogen di seluruh panjangnya.
Pelet/ granule			Terlihat berbentuk bulat dan tidak ada tanda-tanda rekayasa khusus dan sudut iregular

Debu jalan dapat beterbangan ke udara melalui pergerakan lalu lintas kendaraan (O'Brien et al., 2021). Karena kemampuannya untuk melayang di udara, pengangkutan partikel debu jalan juga mencakup dinamika lingkungan angin dan curah hujan yang dapat mengakibatkan redistribusi partikel MP. Di udara, partikel debu jalan dianggap relevan dengan kesehatan manusia, melalui jalur paparan kontak kulit, inhalasi (Abbasi et al., 2019),

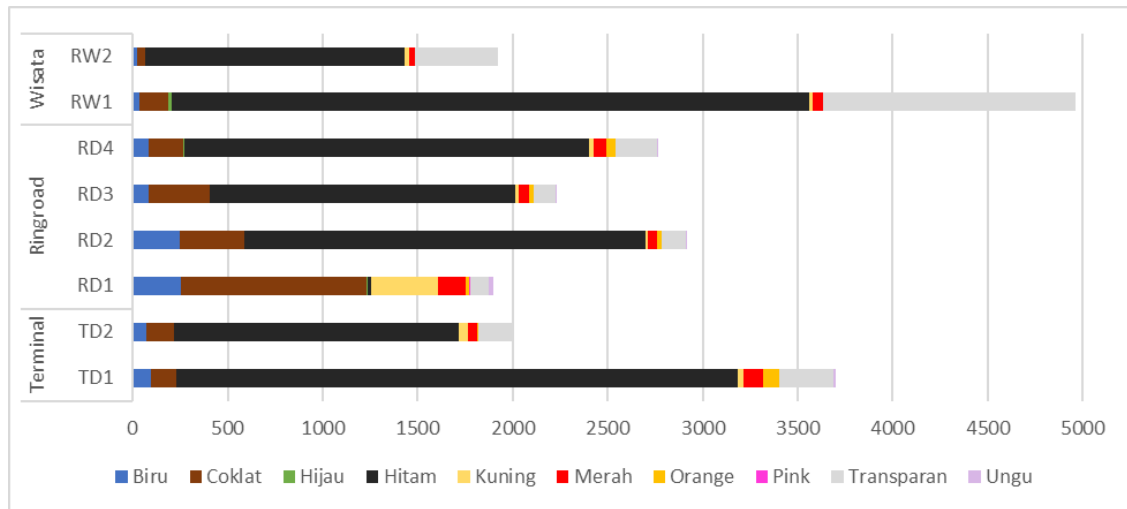
Karakteristik dari MP di debu jalan sendiri sama seperti pada MP di udara, didominasi oleh bentuk fragmen dilanjutkan dengan bentuk film. Pada MP udara tidak ditemukan adanya bentuk pelet namun ada sekitar 1% MP di debu jalan berbentuk pelet, hal ini karena pelet merupakan hasil dari MP primer yang berasal dari produk kecantikan atau produk *Hygiene*. Grafik bentuk dan warna dari MP pada Debu Jalan dapat di lihat di Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Distribusi bentuk MP di debu jalan

Penelitian lain tentang MP di debu jalan dapat dilihat pada Tabel 2.4, penelitian ini memiliki hasil yang serupa dengan penelitian lain di Iran (Abbasi et al., 2019), Korea (Kang et al., 2022), Jepang dan Vietnam (Yukioka et al., 2020) dimana bentuk merupakan fragmen, film, fiber dan granule, dengan bentuk dominan adalah fragmen. Hal ini disesuaikan dengan hipotesis awal bahwa MP berasal dari kegiatan lalu lintas dan keausan ban (Yukioka et al., 2020). Untuk bentuk film dan fiber

kemungkinan dapat berasal dari jalan raya dan juga dari aktivitas penduduk dan pejalan kaki di sekitar area sampling.



Gambar 4.9 Distribusi warna MP di debu jalan

Warna MP paling banyak di debu jalan yaitu warna hitam 46%>transparan (12%)>coklat(9%)>biru(4%)>kuning(2%)>merah(2%)>orange(1%)>hijau(<1%)>pink(<1%)>ungu(<1%). Pada penelitian oleh Kang (2022) di Korea, bentuk paling domain yang ditemukan yaitu partikel berbentuk fragmen berwarna hitam yang mirip dengan penelitian ini, namun penelitian oleh Romarate (2023) di are Metro Manila menemukan fiber dan palet sebagai bentuk dominan dengan biru sebagai warna dominan dari MP, bisa jadi karena perbedaan penggunaan area di sekitar area atau karakter sumber dari pencemar MP berbeda dengan yang penelitian ini.

Hasil uji FTIR menunjukkan jenis polimer plastik yang ada di dalam MP di debu jalan. Dalam penelitian ini hanya memberikan jenis yang di deteksi saja tanpa ada proporsi konsentrasi masing-masing polimer. Beberapa jenis polimer MP yang terdeteksi yaitu *Polyethylene* (PE), *Polypropylene* (PP), *Polystyrene* (PS), *Acrylonitrile butadiene styrene* (ABS) dan *High Density Polyethylene* (HDPE). Dibeberapa penelitian, polimer pembungkus makanan seperti PE dan PS merupakan penyusun paling besar dalam MP di debu jalan (Romarate et al., 2023; Yukioka et al., 2020) hal ini menandakan ada kemungkinannya polusi MP di debu jalan berasal dari tidak benarnya sistem pengelolaan sampah di area tersebut dimana banyak sampah yang dikumpulkan di sekitar jalan raya seperti di negara Vietnam (Yukioka et al., 2020), termasuk dalam penelitian ini yaitu di Yogyakarta, Indonesia seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Tumpukan sampah di area jalan ringroad

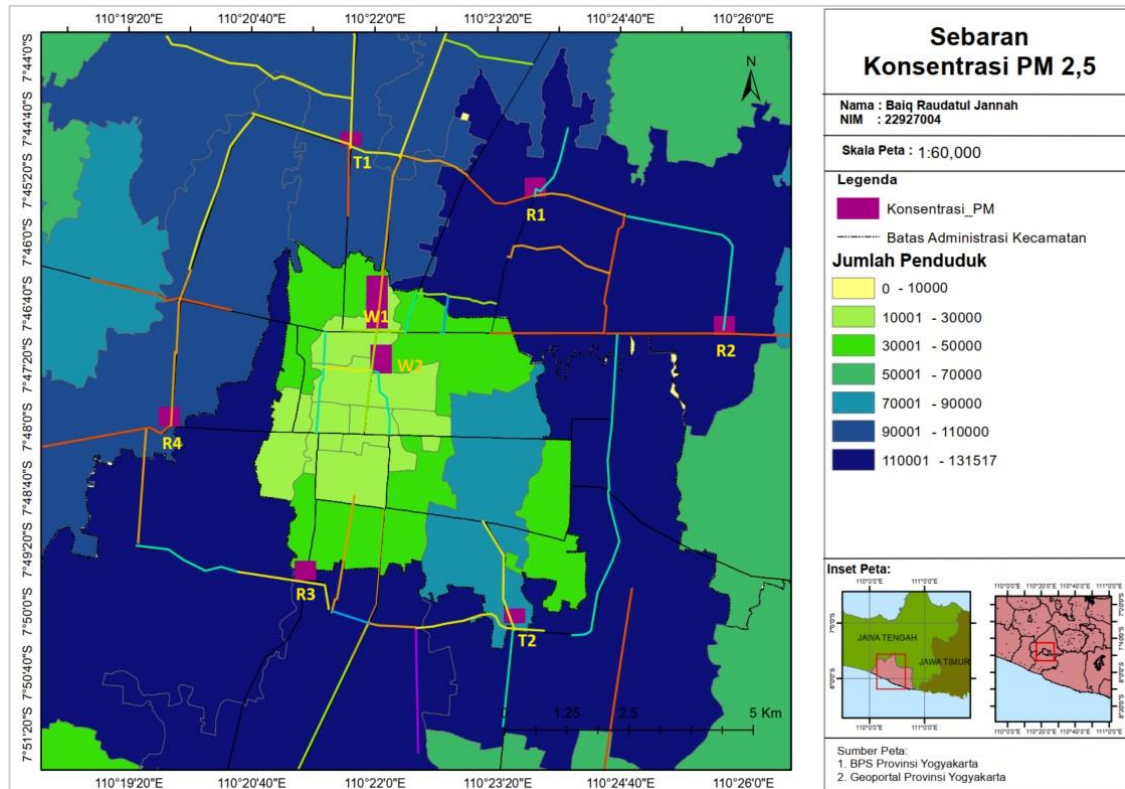
4.3 Distribusi $PM_{2.5}$ dan Mikroplastik di Udara

A. Distribusi $PM_{2.5}$ di Udara

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) yang merupakan tujuan wisata utama di Indonesia dengan jumlah wisatawan jauh melebihi jumlah penduduk kota Yogyakarta, selain itu, jumlah pelajar yang masuk ke Yogya juga sangat besar. Tambahan jumlah pengguna jalan dari wisatawan dan pelajar akan menambah jumlah aktivitas transportasi di wilayah Kota Yogyakarta dan sekitarnya sehingga dapat menyebabkan penurunan kualitas udara ambien (Nurhidayat, 2020; Syafaati et al., 2023).

Penelitian menyebutkan tentang sumber utama dari polusi $PM_{2.5}$ antaranya adalah sumber bergerak seperti kendaraan, namun Zuhri (2014) menyebutkan bahwa faktor demografi juga memungkinkan untuk mempengaruhi kualitas udara dari perkotaan. Untuk melihat jumlah penduduk dan persebaran konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Yogyakarta, dapat di lihat digambar 4.11. Kepadatan jalan (Ramadan & Susilo, 2019) serta tingkat pelayanan jalan (Dinas Perhubungan DIY, 2021) sama dengan Gambar 3.2 dengan tambahan jumlah penduduk.

Kegiatan utama wisata dan pemerintahan berada di area kota Yogyakarta di titik sampling kawasan wisata, untuk jumlah penduduk sendiri tidak mempengaruhi adanya perubahan konsentrasi dari polutan PM, hal ini dapat menunjukkan bahwa sumber polutan PM di kota Yogyakarta tidak bergantung pada jumlah penduduk, namun dikarenakan adanya aktivitas kendaraan dari wisatawan dan pekerja yang jumlahnya bertambah setiap tahunnya.



Gambar 4.11 Persebaran konsentrasi PM_{2,5} di Yogyakarta

A. Distribusi Mikroplastik di Udara

Mikroplastik ditemukan berjumlah banyak di setiap kawasan dan titik sampling dari penelitian ini. MP berada disemua kompartemen lingkungan (Gasperi et al., 2018) dan dengan ukurannya yang sangat kecil mungkin sekali sudah terhirup oleh manusia. Karakteristik MP berdasarkan area di Yogyakarta dapat dilihat pada Gambar 4.6 yang menjelaskan karkarakteristik bentuk dan warna mikroplastik pada udara berdasarkan area/kawasan, namun secara umum, masing masing kawasan penelitian memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Kawasan Terminal

- MP diudara yang ditemukan di Kawasan Terminal pada hari libur (Twe) berjumlah sebesar 3274 partikel dengan karakteristik 48% berwarna hitam dan 11% berwarna coklat dan 21 % berwarna transparan dengan bentuk dominan MP yaitu fragmen (40%) dan film (40%).
- MP yang ditemukan di terminal pada hari kerja (Twd) sebanyak 4756 partikel MP dengan karakteristik 51% berwarna hitam dan 24% berwarna

coklat dan 20 % berwarna transparan dengan bentuk dominan yaitu film (47%) dan fragmen (37%).

Jumlah MP ditemukan pada hari kerja lebih banyak dikarenakan area terminal berada di kawasan padat perkantoran dan perkuliahan sehingga memungkinkan area ini memiliki keramaian dan aktivitas yang lebih tinggi saat hari kerja.

2. Kawasan Ringroad

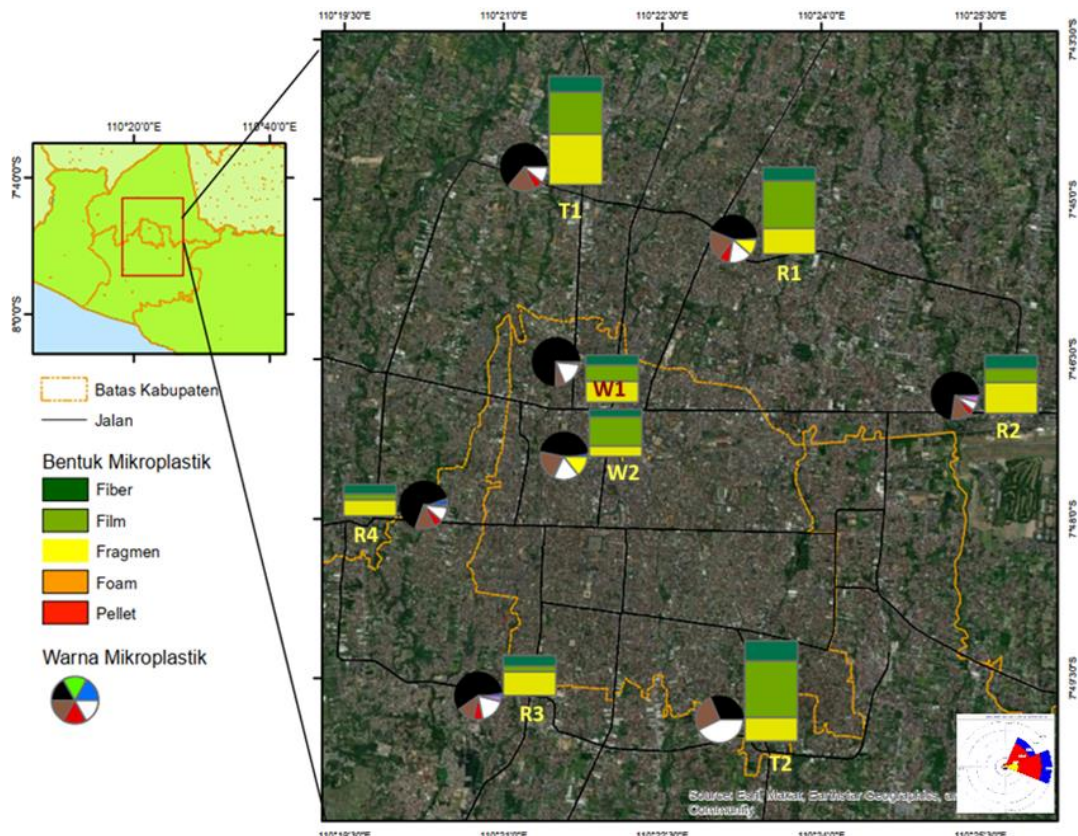
Jumlah MP di udara yang ditemukan di kawasan ringroad sebanyak 1472 partikel MP, dengan karakteristik warna dominan hitam (56%), coklat (16%) dan transparan (13%). Bentuk dominan di area ini yaitu fragmen (44%) dan film (34%)

3. Kawasan Wisata

- MP diudara yang ditemukan di Kawasan Wisata pada hari libur (Wwe) berjumlah sebesar 1924 partikel dengan karakteristik 56% berwarna hitam dan 14% berwarna coklat dan 13 % berwarna transparan dengan bentuk dominan MP yaitu film (48%) dan fragmen (32%).
- MP yang ditemukan pada Kawasan Wisata hari kerja (Twd) sebanyak 2074 partikel MP dengan karakteristik 66% berwarna hitam dan 9% berwarna coklat dan 18% berwarna transparan dengan bentuk dominan yaitu film (41%) dan fragmen (40%).

Berdasarkan rincian karakteristik MP berdasarkan kawasan, didapatkan bahwa warna hitam menjadi karakteristik umum di setiap area dikarenakan kemungkinan sumber dari MP di udara berasal dari kegiatan transportasi dan TWP (Evangeliou et al., 2020; Tamis et al., 2021). Area terminal dan wisata pada hari libur terlihat cenderung memiliki MP bentuk film dengan presentasi lebih tinggi dibandingkan dengan saat pengukuran hari kerja. Sedangkan untuk kawasan Ringroad cenderung terdapat partikel MP yang berwarna lebih banyak dibandingkan dengan kawasan Terminal dan Wisata.

Untuk memperjelas distribusi dari MP di udara, diperlukan visualisasi letak lokasi pengambilan sampel dan kelimpahan MP tersebut. Dari kelimpahan MP dari Gambar 4.4 di atas, dapat dijabarkan lebih lanjut karakteristik dari MP di udara beserta lokasinya, yang dapat dilihat di Gambar 4.11.



Gambar 4.12 Persebaran dan karakteristik MP di udara

Kelimpahan MP dapat di lihat dengan memperhatikan tinggi dari kolom, dengan bentuk MP di kolom yang sama. Menggunakan visual dapat mempermudah penggambaran dari karakteristik dan kelimpahan MP. Bentuk dominan MP yaitu film>fiber>fragmen. penelitian oleh Namada (2020), Liu (2019) dan Syafei (2019) menemukan bahwa fiber menjadi bentuk paling umum di media udara, khususnya dengan teknik aktif sampling, karena metode observasi MP masih sangat subjektif, terdapat banyak perbedaan dalam hal hasil dan metode penelitian.

Analisis tutupan lahan juga diperlukan untuk memberikan informasi terkait kemungkinan sumber MP dan kemungkinan pajanan risiko dapat diketahui dengan baik. Tutupan lahan dari lokasi sampling ini yaitu didominasi area terbangun dan jalan raya. Penggunaan lahan relasinya dengan konsentrasi MP, telah cukup banyak dilakukan (Bond et al., 2022; Leitão et al., 2023; Talbot et al., 2022). Penelitian tersebut menemukan relasi antara penggunaan lahan dengan keberadaan dan MP. Konsentrasi di area urban/pemukiman jauh lebih besar dari pada area lain. Oroh (2019) menjelaskan bahwa area terbangun melebihi 60% menandakan wilayah tersebut sebagai area peri urban. Hal ini sesuai dengan lokasi pengambilan sampel di

penelitian ini untuk kawasan Ringroad. Kawasan Terminal dan Wisata pada studi ini merupakan wilayah urban/perkotaan sehingga keberadaan MP yang tinggi sesuai dengan ciri-ciri kota Yogyakarta sebagai area urban.

MP merupakan partikel yang sangat ringan dan kecil, sehingga kondisi cuaca Warna MP di dominasi oleh warna hitam, coklat dan transparan. Pengambilan sampel MP di udara dilakukan tidak dalam waktu yang sama, sehingga bisa jadi ada perbedaan. Pengambilan sampel di bagi menjadi 3 kawasan kelompok. Kawasan hujan dengan 5 lokasi sampling, kawasan gerimis 2 lokasi sampling dan kawasan tidak hujan. Konsentrasi pengelompokan tersebut yaitu,

Tabel 4.5 Kondisi presipitasi pada titik sampling

Kawasan	Max MP (partikel/m³)	Min MP (partikel/m³)	Rata-rata MP (partikel/m³)
Hujan	1951,7	229,2	954,7
Tidak Hujan	2011,7	621,7	1172,5

Pada Tabel 4.5, terlihat kelimpahan MP pada keadaan tidak hujan lebih besar dibandingkan dengan saat sedang ada hujan. Untuk konsentrasi PM_{2,5} dan MP memiliki kecenderungan yang sama terkait konsentrasi saat tidak hujan, namun saat gerimis, partikulat di udara seperti PM_{2,5} mengalami penurunan tajam sedangkan pada debu jalan tidak ada penurunan signifikan antara saat adanya hujan atau gerimis. Penjabaran lebih lanjut mengenai hubungan polutan dengan media lain akan dijelaskan lebih lanjut pada uraian selanjutnya.

4.4 Hasil Analisis Korelasi

Salah satu tujuan penelitian ini adalah untuk memahami hubungan antara PM_{2,5}, kelimpahan mikroplastik, dan juga faktor meteorologis. Hubungan tersebut dianalisis menggunakan analisis korelasi dengan metode Spearman. Dari hasil analisis korelasi kemudian diidentifikasi pola-pola tertentu untuk menjelaskan fenomena keterkaitan antar parameter.

Metode Spearman adalah metode non-parametrik yang lebih sesuai untuk data dengan ukuran sampel kecil (Smith, 2006). Pada penelitian ini, terdapat 12 data konsentrasi PM_{2,5}, MP PM_{2,5}, dan variabel cuaca, sedangkan untuk MP debu jalan hanya terdapat 8 data. Walaupun sedikit, data ini dapat relevan untuk analisis awal hubungan antar variabel.

4.4.1 Korelasi PM_{2,5} dengan Keadaan Meteorologi

Hal pertama yang diteliti adalah keberadaan PM_{2,5} dan kondisi cuaca memiliki pengaruh timbal balik. Hasil korelasi PM_{2,5} dengan tekanan (P), kecepatan angin (v), temperature (T) dan kelembapan relative (RH). dapat dilihat di Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil korelasi Spearman untuk PM_{2,5} dengan variabel cuaca

Variabel 1	Variabel 2	Koefisien Korelasi (ρ)	p-value	Interpretasi
PM _{2,5}	P	-0,587	0,126	Tidak signifikan
PM _{2,5}	T	0,143	0,752	Tidak Signifikan
PM _{2,5}	v	-0,323	0,435	Tidak Signifikan
PM _{2,5}	RH	0,167	0,703	Tidak Signifikan

Batas konvensional yang biasa dipakai dalam penelitian ini adalah 0.05 (Smith, 2006) untuk nilai signifikan. Hasil korelasi menunjukkan bahwa hubungan antara PM_{2,5} dengan kondisi tekanan udara memiliki nilai -0,5 sehingga hubungannya yang cenderung negatif dan tidak cukup kuat, dimana ketika tekanan udara meningkat, konsentrasi PM_{2,5} cenderung meningkat, namun karena nilai signifikan/ P-value masih diatas 0,05, dinyatakan tidak signifikan.

Untuk hubungan antara PM_{2,5} dengan suhu, hubungannya positif namun sangat lemah dengan nilai 0,14, nilai signifikan juga sangat jauh diatas nilai konvensional. Hal ini mengindikasikan bahwa kenaikan suhu memiliki hubungan sangat kecil dengan peningkatan konsentrasi PM_{2,5} namun tidak memiliki bukti statistik untuk mendukung hubungan tersebut.

Hubungan PM_{2,5} dengan kecepatan angin menunjukkan nilai negatif -0,3, hal ini berarti ada sedikit kecenderungan untuk PM_{2,5} berkurang seiring dengan peningkatan kecepatan angin. P-value 0,43 menunjukkan bahwa hubungan ini juga tidak signifikan, artinya tidak ada cukup bukti yang menunjukkan bahwa kecepatan angin berpengaruh pada konsentrasi PM_{2,5}.

Hubungan antara PM_{2,5} dan kelembapan udara juga menunjukkan korelasi positif yang sangat lemah dengan nilai rho 0,16. Namun, P-value sebesar 0,7 menandakan bahwa hubungan ini tidak signifikan secara statistik, menunjukkan bahwa kelembapan udara tidak memiliki hubungan yang berarti terhadap konsentrasi PM_{2,5} pada data penelitian ini. Secara keseluruhan, data pada penelitian ini tidak cukup kuat untuk menyimpulkan adanya korelasi yang berarti antara PM_{2,5} dan

variabel-variabel cuaca yang diteliti. Penelitian oleh Zhang (2023) juga menunjukkan nilai korelasi yang rendah bagi polutan, temperatur dan kecepatan angin.

Untuk curah hujan dan konsentrasi $PM_{2.5}$ karena nilai presipitasi tidak di hitung langsung, tidak dapat dilakukan pengujian korelasi antar partikulat dengan curah hujan, namun terlihat pada Tabel 4.5 konsentrasi PM menurun saat terjadi hujan dan naik saat tidak ada hujan. Hal serupa terjadi di area Bengkulu, dimana 40% $PM_{2.5}$ mengalami fenomena dibersihkan saat terjadi hujan (Akmal & Carolina, 2023).

Beberapa penelitian menyebutkan kecepatan angin dapat mengubah difusi dan transportasi $PM_{2.5}$ dalam arah horizontal. Kelembaban absolut juga memengaruhi konsentrasi $PM_{2.5}$, dan peningkatan kelembaban kondusif terhadap konversi zat semi-volatil menjadi fase aerosol, sehingga meningkatkan konsentrasi $PM_{2.5}$. Faktor-faktor seperti turbulensi dan ketinggian pencampuran (ditentukan oleh gradien suhu), kecepatan angin, arah angin, dan presipitasi selama periode pengambilan sampel dapat memengaruhi konsentrasi yang ditemukan dalam sampel udara (Jing et al., 2020; Novianto et al., 2022).

Penelitian tentang variabel lain dilakukan oleh Requia (2019) di Amerika Serikat dan Sirithian (2022) di area utara Thailand. Korelasi yang didapatkan oleh penelitian di area utara Thailand berbeda dengan hasil dari penelitian ini, dimana konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan temperatur adalah positif, dan negatif dengan kecepatan udara dan kelembapan relatif. Hal ini dikarenakan jumlah data yang berbeda jauh antara penelitian ini dan penelitian Sirithian (2022) yang menggunakan data konsentrasi $PM_{2.5}$ dan variabel cuaca selama 4 tahun. Selain itu kondisi cuaca dan penggunaan lahan yang berbeda bisa jadi mempengaruhi hasil dari korelasi cuaca.

4.3.2 Korelasi $PM_{2.5}$ dengan Keberadaan Mikroplastik

Hubungan antara konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan kelimpahan MP juga akan diteliti dengan menggunakan korelasi spearman. Begitu pula dengan korelasi antara $PM_{2.5}$ dan kelimpahan MP $PM_{2.5}$ dan kelimpahan MP di debu jalan, dilaporkan pada penelitian bahwa debu jalan memiliki kontribusi yang tinggi terhadap keberadaan MP di udara (Ii & Bacosa, 2024; Liu et al., 2019; Mon et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara konsentrasi $PM_{2.5}$ dan kelimpahan MP, termasuk mikroplastik di udara (MP), dan mikroplastik di debu jalan (RD). Hasil uji korelasi Spearman terdapat di Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Hasil korelasi PM_{2,5}, MP di udara dan MP di debu jalan

Variabel 1	Variabel 2	Koefisien Korelasi (ρ)	p-value
PM _{2,5}	MP	0,02	0,97
PM _{2,5}	RD	-0,26	0,53
MP	RD	0,07	0,88

Hubungan antara PM_{2,5} dengan MP di udara memiliki nilai korelasi (ρ) yang sangat rendah, yaitu 0,02, hal ini menunjukkan tidak adanya hubungan yang berarti antara konsentrasi PM_{2,5} dan mikroplastik di udara (MP). P-value yang tinggi (0,97) menunjukkan bahwa hasil ini tidak signifikan. Sehingga tidak dapat disimpulkan adanya hubungan antara PM_{2,5} dan MP di udara.

Hubungan antara PM_{2,5} dengan RD memiliki korelasi negatif dengan nilai ρ -0,26 menunjukkan sedikit kecenderungan bahwa peningkatan PM_{2,5} mungkin berhubungan dengan penurunan konsentrasi MP di debu jalan, meskipun hubungannya sangat lemah. P-value sebesar 0,53 menunjukkan bahwa hasil ini tidak signifikan, sehingga tidak ada cukup bukti untuk mendukung adanya korelasi antara PM_{2,5} dan MP di debu jalan secara statistik.

Untuk hubungan MP dengan RD memiliki nilai korelasi yang sangat rendah ($\rho = 0,07$) menunjukkan hampir tidak adanya hubungan antara konsentrasi mikroplastik di udara (MP) dan di debu jalan (RD). Dengan p-value sebesar 0,88, hasil ini tidak signifikan, sehingga kita tidak dapat menyimpulkan adanya korelasi antara MP dan RD. Secara keseluruhan, data pada penelitian ini tidak cukup kuat untuk menyimpulkan adanya korelasi yang berarti antara PM_{2,5} dengan MP dan RD.

Distribusi konsentrasi PM_{2,5} dan kelimpahan MP masing-masing dapat dilihat di Gambar 4.1 Dan Gambar 4.4 menunjukkan distribusi yang sangat berbeda didalam grafiknya, dimana PM_{2,5} tertinggi berada di kawasan Wisata sedangkan untuk MP berada di kawasan Terminal. Hasil ini sama dengan hasil yang didapatkan oleh Azmi (2023) yang meneliti MP di udara berdasarkan lokasi, namun jika dibandingkan dengan penelitian lain seperti yang di dapatkan oleh Akhbarizadeh (2021) dimana terdapat korelasi positif antara MP dan PM_{2,5} dengan nilai $p < 0,05$. Hal ini mungkin dikarenakan jumlah sampel yang sedikit dalam penelitian ini serta perbedaan penggunaan lahan, dimana lokasi sampling Akhbarizadeh (2021) berada di area dengan hari debu yang tinggi. Hubungan antara MP dan RD cenderung tidak ada,

dikarenakan waktu sampling yang berbeda, serta kondisi cuaca saat diambilnya sampel. Sampel MP di RD diambil saat hari setelah hujan, yang menyebabkan MP yang ada di RD akan mengalami *run off* ke area badan air (O'Brien et al., 2021; C. Yang et al., 2023) dan tidak mengalami resuspensi ke udara.

4.3.2 Korelasi MP PM_{2,5} dan MP Debu Jalan dengan Kondisi Meteorologi

Kondisi meteorologi, khususnya kecepatan angin dapat mempengaruhi keberadaan dari MP. Ahmad (2023) menyebutkan bahwa kondisi meteorologi seperti hujan, salju, suhu, kelembaban, tekanan udara, dan kecepatan angin juga memengaruhi pengangkutan dan pengendapan partikel MP.

Hubungan antara kelimpahan MP di udara (MP) dan MP di debu jalan (RD) termasuk tekanan (P), kecepatan angin (v), temperature (T) dan kelembapan relative (RH). Hasil analisis korelasinya ada di Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4. 8 Hasil Korelasi MP di udara dan debu jalan dengan variabel cuaca

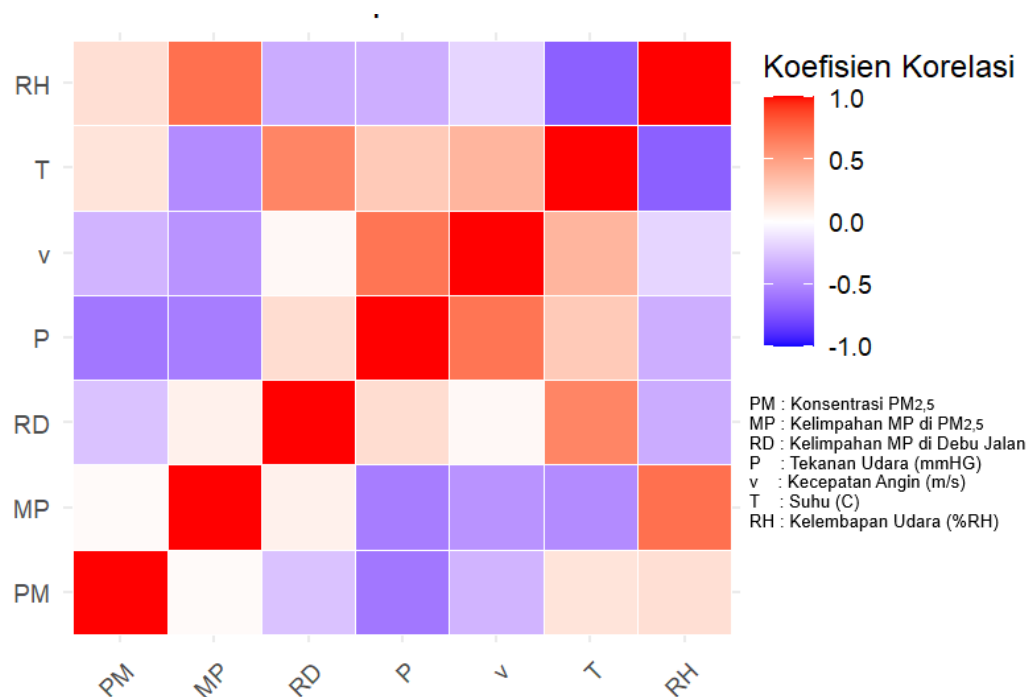
Variabel 1	Variabel 2	Koefisien Korelasi (ρ)	p-Value
MP	P	-0,56	0,14
MP	T	-0,5	0,21
MP	v	-0,46	0,24
MP	RH	0,71	0,5
RD	P	0,17	0,67
RD	T	0,61	0,11
RD	v	0,03	0,93
RD	RH	-0,3	0,38

Hubungan MP udara memiliki nilai korelasi negatif dengan variabel tekanan udara, suhu dan kecepatan angin, dengan nilai yang cukup tinggi menunjukkan kecenderungan hubungan terbalik antara MP di udara dengan suhu udara, tekanan dan kecepatan angin. Sementara p-value ketiga variabel tersebut juga cukup kecil namun belum cukup kuat untuk dinyatakan signifikan sehingga tidak ada bukti statistik yang cukup untuk hubungan ini.

Secara umum, hasil dari analisis korelasi antara semua variabel dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.13 yang merupakan grafik *heatmap* yang menunjukkan kekuatan korelasi dan arah korelasi dari semua variabel.

Untuk kelembapan udara, hubungannya bernilai positif yang cukup kuat ($\rho : 0,7$) namun nilai signifikan $0,5$, hal ini menunjukkan nilai yang saling mempengaruhi antara kedua variabel tersebut, hasil ini sesuai dengan penelitian oleh Zhang (2023) dimana korelasi positif terjadi antara PM dan MP dengan kelembapan udara, dikarenakan kenaikan kelembapan relatif dapat menyebabkan reaksi fotokimia dan menghasilkan partikulat aerosol sekunder di atmosfer.

Masa pengambilan dari sampel udara cukup luas dimana, sampel diambil di antara musim hujan dan musim peralihan (Gambar 4.14). Secara umum, suhu udara, kecepatan angin dan kelembapan mempengaruhi variasi kelimpahan dari partikel di atmosfer, termasuk MP (Akhbarizadeh et al., 2021). Studi ini menghasilkan hasil yang sama dengan penelitian di Asaluyeh, Iran oleh Abbasi (2019) bahwa tidak ada korelasi antara kelimpahan MP dengan variabel meteorologi. Hal ini berkaitan erat dengan partikel di udara, hal serupa terjadi juga di Nanyang dimana kelembapan udara memiliki relasi yang kuat dengan partikel di udara (Zhang et al., 2023).



Gambar 4.13 Matriks korelasi Spearman antar semua variabel

Hubungan RD dengan tekanan udara dan kecepatan angin cenderung lemah positif dengan nilai signifikan yang tinggi mengindikasikan hubungan yang tidak signifikan. Untuk hubungan RD dengan suhu udara, memiliki nilai korelasi yang

cukup kuat ($\rho : 0,6$) sehingga kemungkinan kenaikan suhu terkait dengan kenaikan konsentrasi MP di debu jalan. Sedangkan nilai signifikan nya ($0,1$) tidak cukup kuat untuk disebut signifikan. Hubungan RD dengan kelembapan udara memiliki korelasi negatif dengan nilai signifikan yang jauh dari nilai signifikan konvensional, sehingga tidak ada indikasi signifikansi antara RD dan kelembapan udara. Hal ini sesuai dengan banyak penelitian tentang debu jalan (*road dust*) (Jan Kole et al., 2017; Järnskog et al., 2022a; Kang et al., 2022) dimana saat suhu udara naik, panas yang terakumulasi, menciptakan titik-titik panas pada permukaan ban, menyebabkan kandungan volatil menguap, yang mengakibatkan pelepasan partikel-partikel berukuran relatif kecil ke jalan.

Beberapa variabel dengan nilai korelasi antara lain $PM_{2,5}$ dan MP berkorelasi negatif dengan tekanan udara; MP berkorelasi positif dengan kelembapan udara; dan MP di debu jalan berkorelasi positif dengan temperatur. Hasil ini merupakan penemuan dalam penelitian ini. penelitian lebih lanjut diperlukan dengan data yang lebih banyak untuk mendukung studi tentang polusi udara dan MP di provinsi DIY.

4.5 Perhitungan Nilai Risiko Paparan $PM_{2,5}$ dan MP untuk Manusia

Paparan $PM_{2,5}$ dan MP melalui udara menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan (Abbasi et al., 2019; Akhbarizadeh et al., 2021). Partikel MP dapat terhirup dan masuk ke sistem pernapasan, menyebabkan iritasi, peradangan, dan potensi gangguan kesehatan jangka panjang. Banyak sekali penelitian terhadap pekerja, hewan, dan pasien dengan paparan plastik telah memberikan bukti yang menunjukkan toksisitas unik dari paparan beberapa jenis MP (Eberhard et al., 2024). Efek paru-paru dikaitkan dengan ukuran, bentuk, dan jenis; efek hati dikaitkan dengan jenis; efek kekebalan tampaknya lebih dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk; Pengambilan sampel aktif memompa udara melalui filter dan memberikan indikasi yang lebih akurat mengenai paparan $PM_{2,5}$ dan MP di udara. $PM_{2,5}$ dan MP masuk ke tubuh manusia melalui banyak cara. Khusus untuk MP, paparan dapat terjadi melalui paparan kulit, dimakan dan di hirup (WHO, 2022).

4.5.1 Identifikasi Bahaya

Bahaya yang diidentifikasi pada penelitian ini adalah adanya keberadaan konsentrasi $PM_{2,5}$ yang sudah melebihi baku mutu lingkungan yang ditetapkan oleh

pemerintah. Berdasarkan data dari Dinas Kesehatan Provinsi DIY, terdapat sebanyak 5979 orang yang terdiagnosis mengidap Pneumonia di tahun 2024, meningkat cukup banyak dibandingkan tahun 2023. Keberadaan sumber bahaya seperti PM_{2,5} di udara dengan masyarakat akan meningkatkan kejadian masalah pernapasan akut (Wellid et al., 2023). Data primer yang dimiliki yaitu konsentrasi dari polutan, namun data lain yang seharusnya di dapatkan dari proses Identifikasi Bahaya akan menggunakan data sekunder dari penelitian dan peraturan yang ada di Indonesia.

4.5.2 Analisis Dosis - Respons

Untuk melakukan analisis dosis – respons perlu diketahui tentang karakteristik antropometer dari kota Yogyakarta. Data ini didapatkan melalui studi literatur dengan pengambilan data yang dianggap mirip dengan keadaan kota Yogyakarta. Data yang digunakan ada pada Tabel 3.5 dengan perhitungan menggunakan rumus (7).

A. Perhitungan *Intake* untuk PM_{2,5} di Udara

Komposisi PM_{2,5} tidak dilakukan pada penelitian ini, tetapi berdasarkan hasil evaluasi komposisi PM udara ambien dari penelitian suatu area perkotaan di ditunjukkan bahwa di dalamnya mengandung senyawa logam beracun diantara-Nya Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Mn (Manisolidis et al., 2020). Penelitian komposisi sektor transportasi menunjukkan bahwa partikulat mengandung Fe, Ba, Sb, Mn dan Cu dengan ukuran partikulat logam didominasi oleh satu hingga lima mikron. Kebanyakan logam berat ini berpotensi beracun pada makhluk hidup tergantung dosis dan durasi paparannya. Qonitan (2024) menyebutkan bahwa dampak kematian akibat PM_{2,5} terhadap kesehatan dan ekonomi Jakarta diperkirakan sebesar 2,2% dari Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Provinsi Jakarta. Berdasarkan laporan dari Greenpeace (2022), untuk warga Malaysia, harapan hidup bertambah 1,8 tahun jika konsentrasi PM_{2,5} menjadi 10 µg/m³.

Studi ini dilakukan di area Kota, khususnya titik sampling dominan dilakukan di titik persimpangan lalu lintas, yang memiliki banyak kegiatan di sekitarnya. Untuk perhitungan pajanan/ *intake* dari PM_{2,5} dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu kelompok pekerja, kelompok pemukiman dan kelompok pengguna jalan khususnya motor yang disebut sebagai *intake* sesaat yang mendapatkan paparan saat berhenti saat lampu lalu lintas berwarna merah. Ketiga kelompok ini berbeda untuk faktor durasi pajanan (Dt), lama eksposur (tE) dan frekuensi eksposur (fE) ke polutan udara. Selain itu,

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) ini hanya menghitung risiko untuk dewasa saja untuk melihat risiko secara umum bagi warga. Selain itu untuk *intake* pekerja, dibagi menjadi beberapa kelompok kerja, dimana, daerah Yogyakarta memiliki bayak sekali warga pendatang, sehingga untuk tenaga kerja di sekitar area sampling mungkin juga berganti setiap tahun atau bertahan hingga pensiun, oleh karena itu pembagian waktu kerja di *intake* perlu dilakukan. Waktu bekerja dimulai dari 4 tahun, karena mengikuti timeline kejadian pandemi, dimana banyak pekerja lapangan pekerjaan yang tutup dan para pekerja “pulang kampung”.

Perhitungan asupan bagi para masyarakat sekitar area jalan utama Yogyakarta dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut:

Tabel 4.9 Index *intake* PM_{2,5} di berbagai kawasan di Yogyakarta

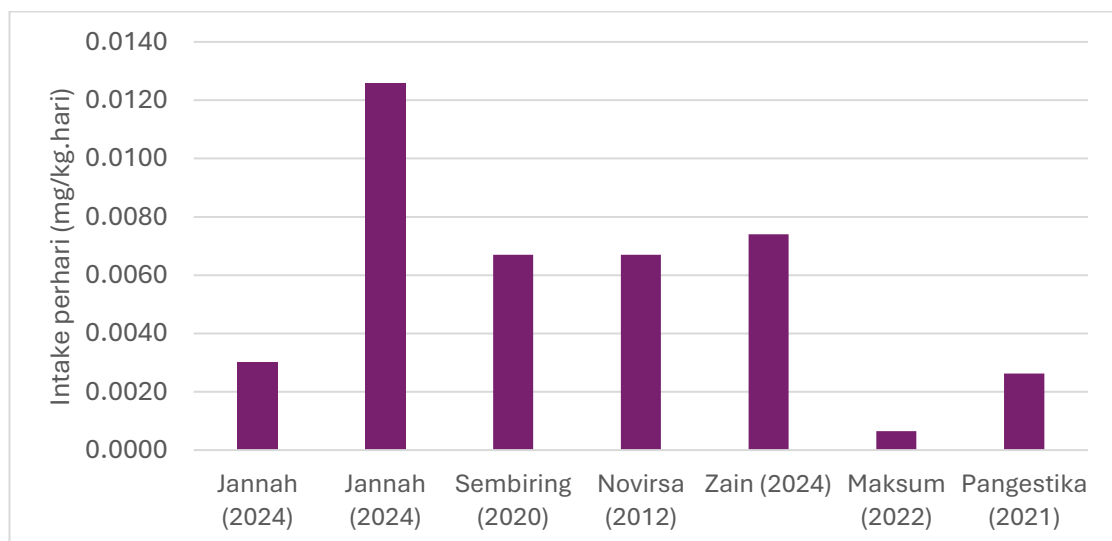
Lokasi Sampling	Intake Pekerja (tahun)					Intake di Pemukiman	Intake Sesaat
	4	5	10	20	30		
T1 we	0,00021	0,00026	0,00053	0,00106	0,00158	0,00726	0,00001
T1 wd	0,00022	0,00028	0,00056	0,00111	0,00167	0,00764	0,00001
T2 we	0,00030	0,00037	0,00075	0,00149	0,00224	0,01026	0,00002
T2 wd	0,00011	0,00014	0,00028	0,00055	0,00083	0,00380	0,00001
R1	0,00028	0,00035	0,00071	0,00141	0,00212	0,00970	0,00002
R2	0,00029	0,00036	0,00072	0,00144	0,00216	0,00990	0,00002
R3	0,00029	0,00036	0,00072	0,00143	0,00215	0,00986	0,00002
R4	0,00029	0,00036	0,00072	0,00144	0,00217	0,00993	0,00002
W1 we	0,00076	0,00094	0,00189	0,00378	0,00567	0,02598	0,00005
W1 wd	0,00081	0,00101	0,00203	0,00406	0,00609	0,02788	0,00005
W2 we	0,00052	0,00065	0,00129	0,00259	0,00388	0,01777	0,00003
W2 wd	0,00032	0,00040	0,00081	0,00162	0,00243	0,01111	0,00002

Keterangan: we: pengukuran saat *weekend*; wd: pengukuran saat *weekday*

Konsentrasi maksimum didapat melebihi baku mutu di area sampling wisata Tugu. konsentrasi debu polutan dimungkinkan meningkat drastis dikarenakan beban tinggi transportasi berkaitan dengan waktu sedang berangkat kerja pada hari weekday, namun karena area ini merupakan pusat kota, beban lalu lintas selalu sangat tinggi. Keadaan lalu lintas dan pengaruh meteorologis bersamaan dengan waktu dimana dapat terjadi peristiwa inversi suhu pada atmosfer perkotaan. Jumlah kendaraan yang melintas, titik kemacetan, kegiatan menaikkan dan menurunkan penumpang dari angkutan kota, dan keberadaan Gedung tinggi dapat menjadi penyebab tingginya konsentrasi maksimum (Sembiring, 2020).

Studi ini menggunakan perhitungan untuk *intake* seumur hidup. Jumlah *intake* PM_{2,5} akan berkaitan langsung dengan konsentrasi PM_{2,5} di udara. Berdasarkan pembahasan sebelumnya, konsentrasi PM_{2,5} paling tinggi ada di titik W1 (Wisata Tugu) pada hari libur, terlihat dalam Tabel 4.9, memiliki nilai *intake* tertinggi dengan nilai 0,00265 (mg/kg.hari) pada paparan 30 tahun, dan nilai terendah pada titik T2 yang merupakan area terminal Giwangan dengan nilai 0,00091 (mg/kg.hari). Untuk area pemukiman, *intake* pemukiman tertinggi memiliki nilai 0,02788 (mg/kg.hari) dengan nilai terendah 0,00380 (mg/kg.hari). sedangkan untuk pajanan sesaat, nilai tertinggi yaitu 0,00005 (mg/kg.hari) dan terendah 0,00001 (mg/kg.hari) sesuai dengan waktu pajanan masing-masing lokasi.

Area pemukiman memiliki faktor hitungan pajanan yang lebih tinggi daripada lokasi lingkungan kerja, dimana waktu eksposur (tE) pemukiman yaitu 24 jam/hari sedangkan untuk lingkungan kerja waktu eksposurnya adalah 8 jam/hari. Frekuensi eksposur (fE) pemukiman yaitu 350 hari/tahun sedangkan untuk lingkungan kerja frekuensi eksposurnya adalah 250 hari/tahun. Untuk waktu sesaat sendiri, nilainya rendah karena waktu eksposur hanya saat lampu merah, berdasarkan penelitian Yastica (2014), lama lampu berwarna merah di perempatan Condong catur (titik sampling R1) selama 109 detik, dengan asumsi pengendara melewati persimpangan yang sama sebanyak 2 kali, maka waktu pajanannya selama lampu merah berlangsung yaitu 218 detik atau 0,06 jam. Sebagai pebanding, Gambar 4.14 menunjukkan hasil *intake* studi ini dengan beberapa penelitian lain di Indonesia



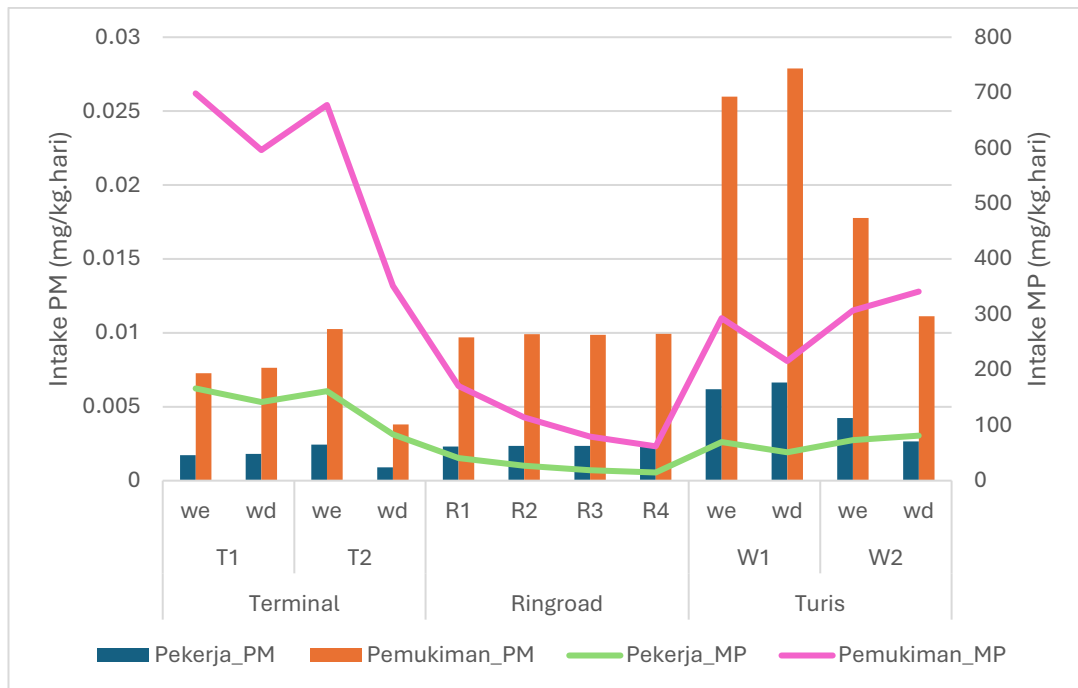
Gambar 4.14 Perbandingan *Intake* antar studi

Gambar 4.14 memberikan gambaran jumlah pajanan yang didapatkan penelitian ini dengan intake tertinggi didapatkan dari pajanan pemukiman (0,01259 mg/kg.hari) disusul oleh intake pekerja (0,00299 mg/kg.hari) dan intake sesaat, jumlah *intake* yang ditampilkan untuk studi lain merupakan rata-rata *intake* untuk semua lokasi di masing-masing studi. Sembirng (2020) meneliti paparan bagi pekerja kaki lima di jalan raya, nilai tertinggi *intakenya* berada di angka 0,0034 (mg/kg.hari). penelitian oleh Maksum (2022) dilakukan di Gorontalo, area yang masih memiliki kualitas udara yang baik, sehingga pajanannya menjadi rendah. Secara umum, *intake* di studi ini memiliki hasil yang mirip dengan studi lain tentang pajanan PM_{2,5} di Indonesia.

B. Perhitungan *Intake* untuk Mikroplastik di Udara

Penelitian ini memberikan bukti keberadaan MP di udara Kota Yogyakarta dan sekitarnya, dengan adanya kebutuhan bernapas, partikel tersebut dapat dengan mudah masuk ke dalam tubuh manusia melalui inhalasi. Oleh karena itu, keberadaannya di udara sekitar dapat dianggap sebagai ancaman potensial bagi kesehatan manusia. Risiko terhirupnya MP meningkat seiring dengan berkurangnya ukuran partikel dengan MP berdiameter kurang dari 2,5 µm dapat mengendap jauh di dalam paru-paru (Jenner et al., 2022) dan dapat menembus saluran pernapasan dan mencapai sistem peredaran darah (Enyoh et al., 2019a). Oleh karena itu, penting untuk memberikan gambaran potensi inhalasi dari MP ke manusia. Hasil perhitungan pajanan MP dapat dilihat di Gambar 4.15, beserta perbandingan pajanan dengan PM_{2,5}.

Intake MP disamakan perhitungannya dengan *Intake* PM_{2,5}, dengan penelitian menyatakan MP di udara, yang diidentifikasi sebagai jalur penting untuk masuknya MP ke manusia (Habibi et al., 2022). Penelitian lain menghitung inhalasi MP dengan beberapa anggapan, *carcinogenic* (Rabin et al., 2023) dan *non-carcinogenic* (Akhbarizadeh et al., 2021) penelitian ini menggunakan perhitungan berdasarkan panduan dari Dirjen Kementerian Kesehatan (Dirjen P2PL, 2016) dengan anggapan MP sebagai partikulat. Penelitian menggunakan pendekatan yang lebih sederhana dilakukan oleh Akhbarizadeh (2021) dengan menggunakan metode WHO, dengan mengalikan konsentrasi dari MP dengan laju inhalasi.



Keterangan: we: pengukuran saat *weekend*; wd: pengukuran saat *weekday*

Gambar 4.15 Intake/Pajanan PM_{2.5} dan MP

Sama seperti *intake* partikulat lain, konsentrasi MP diudara mempengaruhi jumlah *intake* ke dalam tubuh. Intake MP di area kerja selama 30 tahun, didapatkan nilai tertinggi sebesar 166 partikel/hari di T1 we, yaitu terminal Jombor saat hari kerja, dan nilai *intake* terendah sebanyak 15 partikel/hari di area 4 yaitu ringroad barat. Untuk *intake* pemukiman, nilai tertinggi yaitu 699 partikel/hari dengan nilai terendah 62 *intake*/hari. *Intake* tertinggi untuk sesaat yaitu 1 partikel/partikel. Penelitian lain tentang pajanan MP di PM_{2.5} juga dilakukan oleh Akhbarizadeh (2021) namun dengan metode perhitungan yang berbeda dengan mengalikan konsentrasi MP dan *inhalation rate* berdasarkan WHO. perhitungan yang berbeda dengan nilai terendah pajanan yaitu 32.5 partikel. Hari dan pajanan paling tinggi dengan nilai 161.2 partikel/hari.

4.5.3 Karakterisasi Risiko

Penentuan dosis referensi aman ini (RfC) menggunakan nilai baku *National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS), yakni 35 µg/m³ untuk baku mutu PM_{2.5}. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 tahun 2021 tidak digunakan karena nilai default faktor pemajannya tidak diketahui. Berdasarkan hasil perhitungan dengan persamaan (7) diperoleh nilai RfC sebesar 0,009 mg/kg/hari.

Langkah penilaian risiko yang terakhir adalah karakterisasi risiko, untuk tahapan ini, hanya dilakukan untuk PM_{2,5} karena memungkinkan untuk dihitung nilai RfCnya dengan menggunakan nilai baku mutu, namun karena MP belum memiliki baku mutu atau nilai RfC sendiri, maka tidak dilakukan karakterisasi risiko. Hasil perhitungan didapatkan dari RQ>1 dan nilai RQ<1. Keadaan berisiko (tidak aman) apabila nilai RQ>1 sehingga keadaan perlu dilakukan pengendalian dan tidak berisiko (aman) jika nilai RQ<1. Tabel 4.4 menunjukkan nilai RQ ≤1 di setiap lokasi sampling, sehingga dapat disimpulkan bahwa keberadaan PM di udara sekitar jalan utama kota Yogyakarta tidak berisiko dan tidak perlu dilakukan pengendalian.

Tabel 4.10 Karakterisasi risiko

Lokasi Sampling	Nilai Intake	RfC	RQ
T1 wd	0,00092	0,009	0,1025
T1 we	0,00097	0,009	0,1078
T2 wd	0,00048	0,009	0,0537
T2 we	0,00127	0,009	0,1416
R1	0,00123	0,009	0,1369
R2	0,00126	0,009	0,1397
R3	0,00125	0,009	0,1391
R4	0,00126	0,009	0,1401
W1 wd	0,00330	0,009	0,3665
W1 we	0,00354	0,009	0,3934
W2 wd	0,00226	0,009	0,2507
W2 we	0,00141	0,009	0,1568

Keterangan : we: pengukuran saat *weekend*; wd : pengukuran saat *weekday*

Tabel 4.10 diatas menunjukkan bahwa nilai *intake* PM_{2,5} masih berada dalam kategori aman bagi manusia. Nilai RQ<1 pada konsentrasi rata-rata bukan berarti setiap individu terlepas dari risiko kesehatan karena diketahui ada populasi dari masyarakat Yogyakarta yang rentan terhadap pencemaran udara. penurunan pengangkutan oksigen. Semakin tinggi dosis pajanan PM_{2,5} semakin turun fungsi paru.

Manajemen risiko dilakukan dengan tujuan agar individu atau populasi yang berisiko terpajan agen risiko tetap aman dari gangguan kesehatan. Manajemen risiko yang dapat dilakukan yaitu menurunkan konsentrasi pajanan, mengurangi waktu pajanan, dan mengurangi frekuensi pajanan. Dalam rangka mempertahankan konsentrasi polutan PM_{2,5} agar tetap berada di bawah baku mutu dan tidak meningkat

pada jam-jam sibuk, upaya yang dapat dilakukan adalah membatasi usia kendaraan bermotor dan penggunaan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan, penyiraman secara rutin dan penggunaan masker bagi penduduk sensitif (Zain et al., 2024)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini, kesimpulan yang dapat ditarik yaitu:

1. Konsentrasi PM_{2,5} rata-rata untuk udara ambien di:
 - a. Kawasan wisata: 59,56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (tidak memenuhi baku mutu PP 22/2021)
 - b. Kawasan terminal: 20,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (memenuhi baku mutu PP 22/2021)
 - c. Kawasan Ringroad: 28,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (memenuhi baku mutu PP 22/2021)
2. Rata-rata kelimpahan mikropastik teridentifikasi pada:
 - a. PM_{2,5} di udara adalah 938 partikel/ m^3 , dengan kelimpahan tertinggi terdapat pada kawasan terminal (1673 partikel/ m^3), diikuti oleh kawasan wisata (833 partikel/ m^3), lalu kawasan Ringroad (307 partikel/ m^3).
 - b. Debu jalan (*road dust*) adalah 98 partikel/gram, dengan kelimpahan tertinggi terdapat pada jalanan kawasan wisata (115 partikel/gram), diikuti oleh jalan Ringroad dekat kawasan terminal (95 partikel/gram), lalu kawasan jalan Ringroad sisanya (91 partikel/gram).
3. Ditemukan karakteristik mikroplastik berikut pada ketiga kawasan studi:
 - a. Mikroplastik pada PM_{2,5} di udara maupun pada debu jalan didominasi oleh bentuk fragmen dan warna hitam,
 - b. Kelimpahan mikroplastik PM_{2,5} teridentifikasi lebih besar pada hari kerja (*weekday*) dibandingkan pada akhir pekan (*weekend*) di kawasan terminal dan kawasan wisata.
4. Tidak ditemukan korelasi yang berarti antara konsentrasi PM_{2,5} dengan kelimpahan mikroplastik di udara (PM_{2,5}) maupun dengan mikroplastik debu jalan. Selain itu, korelasi dengan parameter meteorologis disimpulkan sebagai berikut (seluruh uji korelasi Spearman menunjukkan hasil tidak signifikan):
 - a. Konsentrasi PM_{2,5} dan kelimpahan mikroplastik di udara (PM_{2,5}) berkorelasi negatif dengan tekanan udara ($\rho = -0,58$ untuk PM_{2,5} dan $\rho = -0,56$ untuk mikroplastik udara);

- b. Kelimpahan mikroplastik di udara berkorelasi positif dengan kelembaban udara ($\rho = 0,71$);
 - c. Kelimpahan mikroplastik di debu jalan berkorelasi positif dengan temperatur udara ($\rho = 0,61$).
5. Nilai *intake* pajanan PM_{2,5} pada manusia yang tertinggi ditemukan pada kawasan wisata (Tugu Yogyakarta). Secara keseluruhan, nilai *intake* pajanan PM_{2,5} rata-rata adalah sebagai berikut untuk masing-masing kelompok:
 - a. Kelompok pekerja: 0,00275 mg/kg.hari,
 - b. Kelompok pemukiman: 0,0125 mg/kg.hari
 - c. Kelompok sesaat: 0,00002 mg/kg.hari.
6. Nilai *intake* untuk mikroplastik rata-ratanya untuk kelompok bekerja sebesar 78 partikel/hari, kelompok pemukiman sebesar 326 partikel/hari dan kelompok sesaat sebesar 1 partikel/hari.
7. Didapatkan nilai *risk quotient* (RQ) untuk paparan partikulat PM_{2,5} di bawah 1 untuk semua titik pengambilan sampel, sehingga dapat disimpulkan tingkat risiko paparan PM_{2,5} di lokasi studi masih dalam kategori aman.

5.2. Saran

Hipotesis awal dari penelitian ini bahwa sebagian besar dari mikroplastik yang ada di udara dan debu jalan kemungkinan berasal dari kegiatan transportasi khususnya keausan ban. Namun karena keterbatasan dari instrumen FTIR yang digunakan pada penelitian ini, jenis polimer dari material seperti karet tidak dapat terdeteksi. Disarankan untuk menggunakan alat FTIR lain yang lebih mumpuni untuk mendeteksi keberadaan dari material ban pada penelitian selanjutnya.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat cukup banyak mikroplastik di udara sehingga memiliki potensi terhirup oleh manusia. Namun dalam penelitian ini tidak dibahas terkait dampaknya terhadap kesehatan manusia. Oleh sebab itu, disarankan untuk melakukan penyelidikan lebih lanjut mengenai dampak dari paparan mikroplastik terhadap kesehatan manusia.

Beberapa hasil penelitian ini menunjukkan kesimpulan yang berbeda dengan penelitian mikroplastik yang lain, sehingga perlu ada peningkatan standar penelitian dan mengurangi *human error* untuk penelitian selanjutnya. Penelitian tentang

penggunaan lahan juga perlu dilakukan lebih detail, dengan memvariasi lokasi sampling untuk mendapatkan gambaran lebih luas mengenai sumber dan distribusi mikroplastik di lingkungan, terutama di Indonesia, di mana mikroplastik pada udara belum cukup banyak diteliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Delshab, H., Soltani, N., & Sorooshian, A. (2017). Investigation of microrubbers , microplastics and heavy metals in street dust : a study in Bushehr city , Iran. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7137-0>
- Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O., & Jaafarzadeh, N. (2019). Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution*, 244, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.039>
- Abidin, A. U., Maziya, F. B., Susetyo, S. H., Yoneda, M., & Matsui, Y. (2023). Exposure particulate matter (PM2.5) and health risk assessment on informal workers in landfill site, Indonesia. *Environmental Challenges*, 13(November), 100795. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100795>
- Afiq Daniel Azmi, M., Yasin, N. L. N. M., Norruwaida, J., Hasnatul, A. H., Dewika, M., & Sara, Y. Y. (2023). Analysis of suspended atmospheric microplastics size at different elevation in Universiti Teknologi Malaysia, Kuala Lumpur. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1144(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1144/1/012009>
- Ahmad, M., Chen, J., Khan, M. T., Yu, Q., Phairuang, W., Furuuchi, M., Ali, S. W., Nawab, A., & Panyametheekul, S. (2023). Sources, analysis, and health implications of atmospheric microplastics. *Emerging Contaminants*, 9(3), 100233. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100233>
- Akhbarizadeh, R., Dobaradaran, S., Amouei Torkmahalleh, M., Saeedi, R., Aibaghi, R., & Faraji Ghasemi, F. (2021). Suspended fine particulate matter (PM2.5), microplastics (MPs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air: Their possible relationships and health implications. *Environmental Research*, 192(July 2020), 110339. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110339>
- Akmal, S., & Carolina, A. (2023). Variasi Konsentrasi Particulate Matter 2 . 5 Di Wilayah Kota Bengkulu. *Buletin Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika*, 4(4), 22–31.

- Alam, F. C., & Rachmawati, M. (2020). Development of Microplastic Research in Indonesia. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 17(3), 344–352. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v17i3.344-352>
- Azari, A., Vanoirbeek, J. A. J., Van Belleghem, F., Vleeschouwers, B., Hoet, P. H. M., & Ghosh, M. (2023). Sampling strategies and analytical techniques for assessment of airborne micro and nano plastics. *Environment International*, 174(March), 107885. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107885>
- Azhari, A., Halim, N. D. A., Mohtar, A. A. A., Aiyub, K., Latif, M. T., & Ketznel, M. (2021). Evaluation and prediction of PM10 and PM2.5 from road source emissions in Kuala Lumpur city centre. *Sustainability (Switzerland)*, 13(10), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13105402>
- Bahrina, I., Syafei, A. D., Satoto, R., Jiang, J. J., Nurasrin, N. R., Assomadi, A. F., Boedisantoso, R., Hermana, J., & Nasir, M. (2020). An Occupant-Based Overview of Microplastics in Indoor Environments in the City of Surabaya, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 21(8), 236–242. <https://doi.org/10.12911/22998993/126876>
- Bond, C., Li, H., & Rate, A. W. (2022). Land Use Pattern Affects Microplastic Concentrations in Stormwater Drains in Urban Catchments in Perth, Western Australia. *Land*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/land11101815>
- BPS Provinsi D.I.Yogyakarta. (2024). *Provinsi D.I. Yogyakarta Dalam Angka 2024*.
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. *Science*, 368(6496), 1257–1260. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Brahney, J., Mahowald, N., Prank, M., Cornwell, G., Klimont, Z., Matsui, H., & Prather, K. A. (2021). Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(16), 1–10. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020719118>
- Campanale, C., Galafassi, S., Savino, I., Massarelli, C., Ancona, V., Volta, P., & Uricchio, V. F. (2022). Microplastics pollution in the terrestrial environments: Poorly known diffuse sources and implications for plants. *Science of the Total Environment*, 805, 150431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150431>

- Cao, G., & Cai, Z. (2023). Getting Health Hazards of Inhaled Nano/Microplastics into Focus: Expectations and Challenges [Article-commentary]. *Environmental Science and Technology*, 57(9), 3461–3463.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00029>
- Casotti Rienda, I., & Alves, C. A. (2021). Road dust resuspension: A review. *Atmospheric Research*, 261(May).
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105740>
- Cheewinsiriwat, P., Duangyiwa, C., Sukitpaneenit, M., & Stettler, M. E. J. (2022). Influence of Land Use and Meteorological Factors on PM2.5 and PM10 Concentrations in Bangkok, Thailand. *Sustainability (Switzerland)*, 14(9).
<https://doi.org/10.3390/su14095367>
- Chen, Q., Li, Y., & Li, B. (2020). Is color a matter of concern during microplastic exposure to *Scenedesmus obliquus* and *Daphnia magna* ? *Journal of Hazardous Materials*, 383(August 2019), 121224.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121224>
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Plastic production, waste and legislation. In *Microplastic Pollutants* (Vol. 306, hal. 39–56). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809406-8.00003-7>
- CREA. (2022). *The Health & Economic Impacts of Ambient Air Quality in Malaysia Content*. 6–8. www.energyandcleanair.org
- Darat, B. P. T. (2024). *Terminal Tipe A Giwangan*.
<https://hubdat.dephub.go.id/id/bptd/diy/satuan-pelayanan/terminal/>
- De Frond, H., & Munno, K. (2021). *Microplastic identification and characterization*. 8.
<https://rochmanlab.files.wordpress.com/2021/01/microplastic-identification-and-characterization-sop-1.pdf>
- Dilawar, A., Chen, B., Ul-Haq, Z., Ali, S., Sajjad, M. M., Junjun, F., Gemechu, T. M., Guo, M., Dilawar, H., Zhang, H., Zicheng, Z., & Lohdi, E. (2023). Evaluating the potential footprints of land use and land cover and climate dynamics on atmospheric pollution in Pakistan. *Frontiers in Environmental Science*, 11(2), 1–21. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1272155>
- Din, K. S., Khokhar, M. F., Butt, S. I., Qadir, A., & Younas, F. (2024). Exploration

- of microplastic concentration in indoor and outdoor air samples: Morphological, polymeric, and elemental analysis. *Science of The Total Environment*, 908, 168–398.
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168398>.
- Dinas Perhubungan Daerah Istimewa Yogyakarta. (2022). Transportasi Dalam Angka 2022. In *Laporan*.
- Dinas Perhubungan DIY. (2021). *Transportasi dalam angka DIY 2021*.
- Dirjen P2PL. (2016). *Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (Guidance on Environmental Health Risk Analysis)*.
- Ellis and Victoria. (2011). Spearman's correlation. *Environmetrics*, 8.
- Enyoh, C. E., Verla, A. W., Verla, E. N., Ibe, F. C., & Amaobi, C. E. (2019a). Airborne microplastics: a review study on method for analysis, occurrence, movement and risks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(11).
<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7842-0>
- Enyoh, C. E., Verla, A. W., Verla, E. N., Ibe, F. C., & Amaobi, C. E. (2019b). Airborne microplastics: a review study on method for analysis, occurrence, movement and risks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(11).
<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7842-0>
- Evangelidou, N., Grythe, H., Klimont, Z., Heyes, C., Eckhardt, S., Lopez-Aparicio, S., & Stohl, A. (2020). Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. *Nature Communications*, 11(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17201-9>
- Fitratunnisa, E. P., Rahmawati, Rahmawati, N., Turyanti, A., Ariwibowo, P., Yuliasih, F., Yulian, N. I., Oktariani, T., Sarunggu, Profianita, Sihombing, E. S. N., Gultom, G., & Azima, M. L. A. (2023). *Laporan Akhir Kegiatan Pemantauan Kualitas Udara Provinsi DKI Jakarta Tahun 2023*. 20–73.
- Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J., & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 1, 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
- GESAMP. (2016). Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: Part 2 of a Global Assessment. *Rep. Stud. GESAMP*, No. 90, 96

- p. file:///C:/Users/BACHEL~2/AppData/Local/Temp/sources-fate-and-effects-of-microplastics-in-the-marine-environment-part-2-of-a-global-assessment-en.pdf%0Awww.imo.org
- Ghaida, A., Firdaus, F. M., Qatrunnada, K. M., Peters, D., Cardenas, B., & Lestari, P. (2024). Spatial patterns of PM2.5 air pollution in Jakarta: insights from mobile monitoring. *E3S Web of Conferences*, 485, 1–20.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448506002>
- González Ortiz, A., Gsell, A., Guerreiro, C., Soares, J., & Horálek, J. (2021). Health Risk Assessment of air pollution. *Eionet Report - ETC/ATNI 2021/10, November*, 1–40. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-10-2021-health-risk-assessments-of-air-pollution-estimations-of-the-2019-hra-benefit-analysis-of-reaching-specific-air-quality-standards-and-more/@@download/file/2021-10>
- Habibi, N., Uddin, S., Fowler, S. W., & Behbehani, M. (2022). Microplastics in the atmosphere : a review. *Journal of Environmental Exposure Assessment*.
<https://doi.org/10.20517/jeea.2021.07>
- Halim, N. D. A., Latif, M. T., Mohamed, A. F., Maulud, K. N. A., Idrus, S., Azhari, A., Othman, M., & Sofwan, N. M. (2020). Spatial assessment of land use impact on air quality in mega urban regions, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 63(January), 102436. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102436>
- Haque, F., & Fan, C. (2023). Fate and Impacts of Microplastics in the Environment: Hydrosphere, Pedosphere, and Atmosphere. *Environments - MDPI*, 10(5).
<https://doi.org/10.3390/environments10050070>
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Dugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L., & Wagner, M. (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environmental Science and Technology*, 53(3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- He, H., Ca, S., Chen, S., Li, Q., Wan, P., Ye, R., Zeng, X., Yao, B., & Ji, Y. (2024). Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Potential Environments. *Water*, 16, 1270.

- Hidayat, N. A. A., Kitano, K., Tani, Y., Lestari, P., Iriana, W., Fujii, Y., Okochi, H., & Niida, Y. (2024). Airborne microplastics in Bandung and Osaka: concentration and characteristics. *E3S Web of Conferences*, 485, 1–12.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448506004>
- Ida, A., Purwiyanto, S., Prartono, T., Riani, E., Naulita, Y., Reza, M., & Frendy, A. (2022). The deposition of atmospheric microplastics in Jakarta-Indonesia : The coastal urban area. *Marine Pollution Bulletin*, 174(June 2021), 113195.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113195>
- Ihsan, I. M., Oktivia, R., Anjani, R., & Zahroh, N. F. (2023). Health risk assessment of PM_{2.5} and PM₁₀ in KST BJ Habibie, South Tangerang, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), 0–10.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012033>
- Ii, R. R., & Bacosa, H. (2024). Road-Associated Microplastics (RAMP) in Metropolitan Areas of The Philippines: Potential Source of Suspended Plastics in The Air. *Research Square Journal*, 3(2), 1–22.
- Ilyas, M., Ahmad, W., Khan, H., Yousaf, S., Khan, K., & Nazir, S. (2018). Plastic waste as a significant threat to environment - A systematic literature review. *Reviews on Environmental Health*, 33(4), 383–406.
<https://doi.org/10.1515/reveh-2017-0035>
- Jahandari, A. (2023). Microplastics in the urban atmosphere: Sources, occurrences, distribution, and potential health implications. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 12(August), 100346. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100346>
- Jan Kole, P., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., & Ragas, A. M. J. (2017). Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10).
<https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>
- Järnskog, I., Jaramillo-Vogel, D., Rausch, J., Gustafsson, M., Strömvall, A. M., & Andersson-Sköld, Y. (2022a). Concentrations of tire wear microplastics and other traffic-derived non-exhaust particles in the road environment. *Environment International*, 170(November).
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107618>
- Järnskog, I., Jaramillo-Vogel, D., Rausch, J., Gustafsson, M., Strömvall, A. M., &

- Andersson-Sköld, Y. (2022b). Concentrations of tire wear microplastics and other traffic-derived non-exhaust particles in the road environment. *Environment International*, 170(June).
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107618>
- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., & Cowen, M. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of the Total Environment*, 831(December 2021), 154907.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>
- Jing, Z., Liu, P., Wang, T., Song, H., Lee, J., Xu, T., & Xing, Y. (2020). Effects of meteorological factors and anthropogenic precursors on PM_{2.5} concentrations in cities in China. *Sustainability (Switzerland)*, 12(9), 1–13.
<https://doi.org/10.3390/SU12093550>
- Jodhani, K. H., Gupta, N., Parmar, A. D., Bhavsar, J. D., Patel, H., Patel, D., Singh, S. K., Mishra, U., & Omar, P. jee. (2024). Synergizing google earth engine and earth observations for potential impact of land use/ land cover on air quality. *Results in Engineering*, 22(January), 102039.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102039>
- Kang, H., Park, S., Lee, B., Kim, I., & Kim, S. (2022). Concentration of Microplastics in Road Dust as a Function of the Drying Period—A Case Study in G City, Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5).
<https://doi.org/10.3390/su14053006>
- Leitão, I. A., van Schaik, L., Ferreira, A. J. D., Alexandre, N., & Geissen, V. (2023). The spatial distribution of microplastics in topsoils of an urban environment - Coimbra city case-study. *Environmental Research*, 218(November 2022).
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114961>
- Li, C., Zhang, K., Dai, Z., Ma, Z., & Liu, X. (2020). Investigation of the impact of land-use distribution on pm_{2.5} in weifang: Seasonal variations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 1–20.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17145135>
- Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G., & Song, M. (2023). Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environment and Health*, 1(4), 249–257.

<https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., & Li, D. (2019). Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of the Total Environment*, 675, 462–471.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>

Lusher, A., Hollman, P., & Mendoza-Hill, J. (2017). *Microplastics in Fisheries and Aquaculture* (615 ed., Nomor July 2017). FAO (Fisheries and Aquaculture Technical Paper).

Lusher, A. L., Brâte, I. L. N., Munno, K., Hurley, R. R., & Welden, N. A. (2020). Is It or Isn't It: The Importance of Visual Classification in Microplastic Characterization. In *Applied Spectroscopy* (Vol. 74, Nomor 9).

<https://doi.org/10.1177/0003702820930733>

Maksum, T. S., & Tarigan, S. F. N. (2022). Analisis Risiko Kesehatan Akibat Paparan Partikel Debu (Pm2.5) Dari Aktivitas Transportasi. *Jambura Health and Sport Journal*, 4(1), 19–28. <https://doi.org/10.37311/jhsj.v4i1.13447>

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8(February), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>

McDuffie, E. E., Martin, R. V., Spadaro, J. V., Burnett, R., Smith, S. J., O'Rourke, P., Hammer, M. S., van Donkelaar, A., Bindle, L., Shah, V., Jaeglé, L., Luo, G., Yu, F., Adeniran, J. A., Lin, J., & Brauer, M. (2021). Source sector and fuel contributions to ambient PM_{2.5} and attributable mortality across multiple spatial scales. *Nature Communications*, 12(1), 1–12.

<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23853-y>

Meo, S. A., Ahmed Alqahtani, S., Saad binmeather, F., Abdulrhman AlRasheed, R., Mohammed Aljedaie, G., & Mohammed Albarrak, R. (2022). Effect of environmental pollutants PM_{2.5}, CO, O₃ and NO₂, on the incidence and mortality of SARS-COV-2 in largest metropolitan cities, Delhi, Mumbai and Kolkata, India. *Journal of King Saud University - Science*, 34(1), 101687.

<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101687>

Meo, S. A., Almutairi, F. J., Abukhalaf, A. A., & Usmani, A. M. (2021). Effect of green space environment on air pollutants PM_{2.5}, PM₁₀, CO, O₃, and

- incidence and mortality of SARS-CoV-2 in highly green and less-green countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24). <https://doi.org/10.3390/ijerph182413151>
- Meyers, N., Everaert, G., & Witte, B. De. (2023). Extraction of microplastics from marine biota samples followed by Nile red staining. In *ANDROMEDA project* (hal. 56–68).
- Moges, G. T., & Alemu, G. T. (2024). Contribution of congested traffic flow condition to air pollution at intersections in Addis Ababa, Ethiopia. *Heliyon*, 10(17), e36477. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36477>
- Mon, E. E., Tun, T. Z., Agusa, T., Yeh, H., Huang, C., & Nakata, H. (2022). *Monitoring of microplastics in road dust samples from Myanmar and Taiwan*.
- Myat, Y. N., Kongpran, J., Vattanasit, U., & Tanaka, S. (2024). Airborne microplastics in the roadside and residential areas of Southern Thailand. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(January), 100682. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100682>
- Myszka, R., Enfrin, M., & Giustozzi, F. (2021). Microplastics in Road Dust : A Practical Guide for Identification and Characterisation. *Chemosphere*, xxxx.
- Noi Phan, T., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using google earth engine and random forest classifier-the role of image composition. *Remote Sensing*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/RS12152411>
- Noorimotlagh, Z., Hopke, P. K., & Mirzaee, S. A. (2024). A systematic review of airborne microplastics emissions as emerging contaminants in outdoor and indoor air environments. *Emerging Contaminants*, 10(4), 100372. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100372>
- Novianto, H., Mufti Azis, M., & Mudrika Arini, H. (2022). Analisis perubahan sistem kualitas udara Kota Yogyakarta pada masa pandemi COVID-19. *Jurnal Rekayasa Proses*, xx, 1–14. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.71888>
- Nurhidayat, S. A. (2020). *Analisis Dampak Paparan Particulate Matter (PM10) di Kota Yogyakarta*.
- Nuryadi, Astuti, T. D., Utami, E. S., & Budiantara, M. (2017). Buku Ajar Dasar-dasar Statistik Penelitian. In *Sibuku Media*.
- O'Brien, S., Okoffo, E. D., Rauert, C., O'Brien, J. W., Ribeiro, F., Burrows, S. D.,

- Toapanta, T., Wang, X., & Thomas, K. V. (2021). Quantification of selected microplastics in Australian urban road dust. *Journal of Hazardous Materials*, 416(December 2020), 125811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125811>
- 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 behaviour of microplastics in the atmosphere. *Science of the Total Environment*, 874(February), 162193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162193>
- Oroh, A., Kumurur, V. A., & Warouw, F. (2019). Analisis karakteristik Wilayah Peri Urban berdasarkan aspek fisik di kecamatan Pineleng Kabupaten Minahasa. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, 06 No 2(2), 388–397.
- Pangestika, M. W. (2023). *Identifikasi Keberadaan Mikroplastik Pada Tanah Tpa Piyungan Bantul*. Universitas Islam Indonesia.
- Pangestika, R., & Wilti, I. R. (2021). Karakteristik Risiko Kesehatan Non-Karsinogenik Akibat Paparan PM_{2,5} di Tempat-Tempat Umum Kota Jakarta. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 20(1), 7–14. <https://doi.org/10.14710/jkli.20.1.7-14>
- Qonitan, F. D., Kuncoro, N. W., Rahman, A., Rahmi, S. A., & Damayanti, S. (2024). Characterizing PM_{2.5} Pollution in Urban Jakarta: Insights from Morphology, Elemental Composition, and Concentration Analysis. In *Springer Proceedings in Physics* (Vol. 305, Nomor June). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0740-9_9
- Rabin, M. H., Wang, Q., Enyoh, C. E., Kai, X., & Sheuty, T. F. (2023). Distribution, Potential Sources, and Health Risk of Microplastics (MPs) in Street Dust during and after COVID-19 Lockdown in Bangladesh. *Environments - MDPI*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/environments10070130>
- Rahman, L., Mallach, G., Kulka, R., & Halappanavar, S. (2021). Microplastics and nanoplastics science: collecting and characterizing airborne microplastics in fine particulate matter. *Nanotoxicology*, 15(9), 1253–1278. <https://doi.org/10.1080/17435390.2021.2018065>
- Ramadan, A. F., & Susilo, B. (2019). Kajian Spasio-Temporal Volume dan Laju Kendaraan Untuk Identifikasi Kemacetan Lalu Lintas di Jalan Lingkar

- (Ringroad) Daerah Istimewa Yogyakarta Menggunakan Geographic Information dan Video Udara. *Skripsi, SI Kartografi dan Pengindraan Jauh*. <https://core.ac.uk/download/pdf/196255896.pdf>
- Requia, W. J., Jhun, I., Coull, B. A., & Koutrakis, P. (2019). Climate impact on ambient PM_{2.5} elemental concentration in the United States: A trend analysis over the last 30 years. *Environment International*, 131(February), 104888. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.082>
- Romarate, R. A., Ancla, S. M. B., Patilan, D. M. M., Inocente, S. A. T., Pacilan, C. J. M., Sinco, A. L., Guihawan, J. Q., Capangpangan, R. Y., Lubguban, A. A., & Bacosa, H. P. (2023). Breathing plastics in Metro Manila, Philippines: presence of suspended atmospheric microplastics in ambient air. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 53662–53673. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26117-y>
- Sarathana, D., & Winijkul, E. (2023). *Concentrations of Airborne Microplastics during the Dry Season at Five Locations in Bangkok Metropolitan Region* ,.
- Schober, P., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Sembiring, E. T. J. (2020). Risiko Kesehatan Paparan Pm_{2,5} Di Udara Ambien Pada Pedagang Kaki Lima Di Bawah Flyover Pasar Pagi Asemka Jakarta. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 26(1), 101–120. <https://doi.org/10.5614/j.tl.2020.26.1.7>
- Shuo, W., Weiyu, D., Huanming, L., Rui, S., & Xu, Z. (2021). The Pollution of Atmospheric Microplastics and Their Potential Risks to Humans. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 793(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/793/1/012016>
- Sirithian, D., & Thanatrakolsri, P. (2022). Relationships between Meteorological and Particulate Matter Concentrations (PM_{2.5} and PM₁₀) during the Haze Period in Urban and Rural Areas, Northern Thailand. *Air, Soil and Water Research*, 15. <https://doi.org/10.1177/11786221221117264>
- Smith, E. P. (2006). Using R for Introductory Statistics. *Technometrics*, 48(2), 307–308. <https://doi.org/10.1198/tech.2006.s387>

- Sulong, N. A., Latif, M. T., Khan, M. F., Amil, N., Ashfold, M. J., Wahab, M. I. A., Chan, K. M., & Sahani, M. (2017). Source apportionment and health risk assessment among specific age groups during haze and non-haze episodes in Kuala Lumpur, Malaysia. *Science of the Total Environment*, 601–602, 556–570. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.153>
- Suryati, I., Hasibuan, N. H., Silalahi, R. A., Malau, R., & Tambun, Y. (2024). Microplastic Distribution Model in Ambient Air PM_{2.5} Around the Medan Industrial Area, North Sumatra. *E3S Web of Conferences*, 519, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451903014>
- Syafaati, A. D., Utami, S. N. N., & Arifin, S. (2023). Analisis Kualitas Udara Parameter PM_{2.5} Di Wilayah Kota Sorong Berbasis ISPU. *Megasains*, 14(2), 6–13. <https://megasains.gawbkt.id>
- Syafei, A. D., Nurasrin, N. R., Assomadi, A. F., & Boedisantoso, R. (2019). Microplastic Pollution in the Ambient Air of Surabaya, Indonesia. *Current World Environment*, 14(2), 290–298. <https://doi.org/10.12944/cwe.14.2.13>
- Talbot, R., Granek, E., Chang, H., Wood, R., & Brander, S. (2022). Spatial and temporal variations of microplastic concentrations in Portland's freshwater ecosystems. *Science of the Total Environment*, 833(January), 155143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155143>
- Tamis, J. E., Koelmans, A. A., Dröge, R., Kaag, N. H. B. M., Keur, M. C., Tromp, P. C., & Jongbloed, R. H. (2021). Environmental risks of car tire microplastic particles and other road runoff pollutants. *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00008-w>
- Tirkey, A., & Upadhyay, L. S. B. (2021). Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 170(June), 112604. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112604>
- Torres-Agullo, A., Karanasiou, A., Moreno, T., & Lacorte, S. (2021). Overview on the occurrence of microplastics in air and implications from the use of face masks during the COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 800, 149555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149555>
- US Environmental Protection Agency. (2011). Exposure Factors Handbook: 2011 Edition. *U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-(September)*, 1–

1466. <https://doi.org/EPA/600/R-090/052F>
- Verzani, J., & Statistics, I. (2005). *Using R for Introductory Statistic*.
- Vogelsang, C., Lusher, A., Dadkhah, M. E., Sundvor, I., Umar, M., Ranneklev, S. B., Eidsvoll, D., & Meland, S. (2020). Microplastics in road dust - characteristics, pathways and measures REPORT SNO. 7526-2020. In *Integrated environmental assessment and management* (Nomor 7361–2019). <https://toi.brage.unit.no/toi-xmlui/handle/11250/2670146>
- Vriend, P., Hidayat, H., van Leeuwen, J., Cordova, M. R., Purba, N. P., Löhr, A. J., Faizal, I., Ningsih, N. S., Agustina, K., Husrin, S., Suryono, D. D., Hantoro, I., Widianarko, B., Lestari, P., Vermeulen, B., & van Emmerik, T. (2021). Plastic Pollution Research in Indonesia: State of Science and Future Research Directions to Reduce Impacts. *Frontiers in Environmental Science*, 9(June), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.692907>
- Wang, Y., Huang, J., Zhu, F., & Zhou, S. (2021). Airborne Microplastics: A Review on the Occurrence, Migration and Risks to Humans. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(4), 657–664. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03180-0>
- Wellid, I., Nurfitriani, N., Falahuddin, M. A., Simbolon, L. M., Sunardi, C., Nuryati, N., & Bin Sukri, M. F. (2023). Experimental Investigation on PM10 and PM2.5 Concentrations in North Bandung. *Current Journal: International Journal Applied Technology Research*, 4(2), 95–105. <https://doi.org/10.35313/ijatr.v4i2.124>
- WHO. (2020). World Cancer Report. In *Cancer Control* (Vol. 199). <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.02.010>
- WHO. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. In *World Health Organization*.
- WHO. (2022). Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health. In *World Health Organization*.
- Yang, C., Niu, S., Xia, Y., & Wu, J. (2023). Microplastics in urban road dust: Sampling, analysis, characterization, pollution level, and influencing factors. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 168(October), 117348.

<https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117348>

- Yang, H., Chen, W., & Liang, Z. (2017). Impact of land use on PM_{2.5} pollution in a representative city of middle China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph14050462>
- Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., & Xia, G. (2020). Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101941. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101941>
- Yao, X., Luo, X. S., Fan, J., Zhang, T., Li, H., & Wei, Y. (2022). Ecological and human health risks of atmospheric microplastics (MPs): a review. *Environmental Science: Atmospheres*, 2(5), 921–942. <https://doi.org/10.1039/d2ea00041e>
- Yevizal, M., Mulyadi, A., & Fatnanta, F. (2021). Analisis pengaruh V/C ratio lalu lintas kendaraan terhadap tingkat polusi udara berdasarkan volume lalu lintas kendaraan (studi di kawasan persimpangan Mall SKA Kota Pekanbaru). *Jurnal Zona*, 1(2), 64–74. <https://doi.org/10.52364/jz.v2i2.26>
- Yukioka, S., Tanaka, S., Nabetani, Y., Suzuki, Y., Ushijima, T., Fujii, S., Takada, H., Van Tran, Q., & Singh, S. (2020). Occurrence and characteristics of microplastics in surface road dust in Kusatsu (Japan), Da Nang (Vietnam), and Kathmandu (Nepal). *Environmental Pollution*, 256, 113447. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113447>
- Zain, L., Prabang, S., & Siti, R. (2024). Risiko Cemaran Particulate Matter 2 . 5 pada Pedagang Kaki Lima di Jalan. *Jurnal Keselamatan Kesehatan Kerja dan Lingkungan (JK3L)*, 05(2).
- Zhang, M., Chen, S., Zhang, X., Guo, S., Wang, Y., Zhao, F., Chen, J., Qi, P., Lu, F., Chen, M., & Bilal, M. (2023). Characters of Particulate Matter and Their Relationship with Meteorological Factors during Winter Nanyang 2021–2022. *Atmosphere*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/atmos14010137>
- Zhao, X., Wang, J., Mei, K., Leung, Y., & Wu, F. (2022). Color: An Important but Overlooked Factor for Plastic Photoaging and Microplastic Formation. 9161–9163. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02402>
- Zuhri, M. S. (2014). Pengaruh Faktor-faktor Demografi Terhadap Emisi Udara di

Indonesia. *Jiep*, 14(2), 13–37. <https://jurnal.uns.ac.id/jiep/article/view/9880>

Zuri, G., Karanasiou, A., & Lacorte, S. (2023). Microplastics: Human exposure assessment through air, water, and food. *Environment International*, 179(May), 108150. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108150>