TA/TL/2025/2032

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Analisis Dispersi *Particulate Matter* 10 (PM_{10}) di Kawasan Perkotaan Yogyakarta menggunakan Pemodelan AERMOD

Galih Naufal Miftahuddin
21513193

Dosen Pembimbing I:
Noviani Ima Wantoputri, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing II:
Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2025

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Analysis of *Particulate Matter* 10 (PM_{10}) Dispersion in Ambient Air Quality in the Urban Area of Yogyakarta using AERMOD Modeling

Galih Naufal Miftahuddin
21513193

Supervisor I:
Noviani Ima Wantoputri, S.T., M.T.

Supervisor II:
Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Civil Engineering and Planning
Universitas Islam Indonesia
2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Analisis Dispersi *Particulate Matter* 10 (PM_{10}) Kualitas Udara Ambien di Kawasan Perkotaan Yogyakarta menggunakan Pemodelan AERMOD

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Galih Naufal Miftahuddin

21513193

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 12 September 2025 dan disetujui oleh:

19/09 2025

Noviani Ima Wahtoputri, S.T., M.T. (Pembimbing 1)

19/09/2025

Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T. (Pembimbing 2)

19/09 2025

Ir. Luqman Hakim, S.T., M.Si. (Penguji)

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN YOGYAKARTA

17/9-25

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

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi 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. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan *(artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
   a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
   b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

   Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 31 Agustus 2025

Yang membuat pernyataan,



Galih Naufal Miftahuddin

21513193

PRAKATA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya yang tak terhingga. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sosok panutan umat manusia yang membawa cahaya petunjuk dalam kehidupan. Berkat kehendak-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir yang berjudul "Analisis Dispersi Particulate Matter 10 (PM_{10}) Kualitas Udara Ambien di Kawasan Perkotaan Yogyakarta menggunakan Pemodelan AERMOD".

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu bentuk pemenuhan kurikulum akademik Program Studi Teknik Lingkungan dan sebagai kontribusi dalam bidang ilmu lingkungan, khususnya terkait permasalahan pencemaran udara di wilayah perkotaan. Penulisan tugas akhir ini juga menjadi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu (S1) di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.Selama proses penyusunan tugas akhir ini, penulis memperoleh banyak arahan, dorongan, dan dukungan dari berbagai pihak yang sangat membantu dalam menyelesaikan laporan ini. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas karunia kesehatan, kelapangan waktu, dan ilmu yang bermanfaat yang telah memungkinkan tugas akhir ini terselesaikan.
2. Ayah dan Ibu tercinta, Bapak Sarkosi dan Nenah, atas cinta, doa, dukungan, serta pengorbanan yang menjadi sumber kekuatan dan motivasi terbesar dalam hidup penulis. Juga kepada kakak dan adik tercinta, Tatang Isma Artha Wiguna dan Adwa Isma Nismara, atas semangat dan dukungan yang tak pernah putus.
3. Ibu Noviani Ima Wantoputri, S.T., M.T. dan Ibu Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang

telah membimbing dengan sabar, memberikan masukan, serta ilmu yang sangat berarti selama proses penulisan ini.

4. Bapak Ir. Luqman Hakim, S.T., M.SI. selaku Dosen Penguji, atas kritik dan saran yang membangun serta sangat membantu dalam penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen dan tenaga laboratorium di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan banyak ilmu, pengalaman, dan dukungan selama masa studi.
6. Kepada diri sendiri, atas ketekunan, semangat pantang menyerah, serta kesabaran dalam melewati berbagai proses dan tantangan. Semoga perjuangan ini menjadi pijakan awal menuju masa depan yang lebih baik.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang.yangsangat bermanfaat untuk terselesaikannya tugas akhir ini.

Wassalamualaikum Warrahmatullah

Sleman, 30 Juli 2025

Galih Naufal Miftahuddin

Analisis Dispersi *Particulate Matter* 10 (PM_{10}) di Kawasan Perkotaan Yogyakarta menggunakan Pemodelan AERMOD

Mahasiswa	: Galih Naufal Miftahuddin
NIM	: 21513193
Program Studi	: Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing I	: Noviani Ima Wantoputri, S.T., M.T.,
Pembimbing II	: Ana Uswatun Hasanah, S.Si.,M.T.,

Abstrak

Kualitas udara di kawasan perkotaan Yogyakarta semakin menurun seiring meningkatnya aktivitas transportasi yang menjadi salah satu sumber utama emisi partikulat (PM_{10}). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana aktivitas transportasi berkontribusi terhadap pencemaran udara di kawasan tersebut. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menghitung beban emisi PM_{10} dari sektor transportasi, mengukur konsentrasi PM_{10} di udara ambien menggunakan metode gravimetri, serta menganalisis pola sebaran PM_{10} dengan menggunakan perangkat lunak AERMOD. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi inventarisasi emisi berdasarkan volume kendaraan dan faktor emisi, pengambilan sampel PM_{10} menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS), serta pemodelan dispersi PM_{10} dengan AERMOD. Data meteorologi diperoleh dari ERA5 dan diproses menggunakan AERMET, sementara data topografi diolah melalui AERMAP. Validasi hasil pemodelan dilakukan dengan metode Root Square Mean Percentage Error (RMSPE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban emisi PM_{10} tertinggi ditemukan di Jalan Laksda Adisucipto dengan nilai 5156,76 gr/jam, sedangkan yang terendah berada di Jalan Suryaparopto sebesar 315,77 gr/jam. Konsentrasi PM_{10} tertinggi dari hasil pemodelan AERMOD mencapai 158 µg/Nm³, sedangkan hasil pengukuran langsung dengan HVAS mencapai 124,31 µg/Nm³. Pola sebaran menunjukkan bahwa arah angin dominan memengaruhi distribusi polutan ke wilayah pemukiman dan area pendidikan. Nilai RMSPE rata-rata sebesar 68% mengindikasikan kurangny akurasi model dalam mempresentasikan kondis aktual kualitas udara.

Kata kunci: AERMOD, Emisi transportasi, HVAS, Partikulat PM_{10}, Pemodelan Dispersi

Analysis of Particulate Matter 10 (PM_{10}) Dispersion in Ambient Air Quality in the Urban Area of Yogyakarta using AERMOD Modeling

Student : Galih Naufal Miftahuddin
Student Number : 21513193
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor I : Noviani Ima Wantoputri, S.T., M.T.,
Supervisor II : Ana Uswatun Hasanah, S.Si.,M.T.,

Abstract

Air quality in the urban area of Yogyakarta has been deteriorating along with the increasing transportation activities, which serve as one of the main sources of particulate emissions (PM_{10}). This study was conducted to determine the extent to which transportation activities contribute to air pollution in the area. The main objectives of this research are to calculate PM_{10} emission loads from the transportation sector, measure ambient PM_{10} concentrations using the gravimetric method, and analyze the dispersion patterns of PM_{10} through the AERMOD software. The methods applied in this study include emission inventory based on vehicle volume and emission factors, PM_{10} sampling using a High Volume Air Sampler (HVAS), and PM_{10} dispersion modeling with AERMOD. Meteorological data were obtained from ERA5 and processed using AERMET, while topographic data were analyzed through AERMAP. Model validation was carried out using the Root Mean Square Percentage Error (RMSPE) method. The results showed that the highest PM_{10} emission load was found on Jalan Laksda Adisucipto at 5156.76 g/hour, while the lowest was on Jalan Suryaparopto at 315.77 g/hour. The highest PM_{10} concentration from AERMOD modeling reached 158 µg/Nm³, whereas direct measurement with HVAS reached 124.31 µg/Nm³. The dispersion pattern indicated that the dominant wind direction influenced the distribution of pollutants toward residential areas and educational zones. The average RMSPE value of 68% indicated a lack of accuracy of the model in representing the actual air quality conditions.

Keywords: AERMOD, Transportation emissions, HVAS, PM_{10} Particulates, Dispersion modeling

DAFTAR ISI

PRAKATA i

Abstrak iii

DAFTAR ISI v

DAFTAR TABEL vii

DAFTAR GAMBAR viii

DAFTAR LAMPIRAN ix

BAB I PENDAHULUAN 10

1.1 Latar Belakang 10

1.2 Perumusan Masalah 11

1.3 Tujuan Penelitian 11

1.4 Manfaat Penelitian 12

1.5 Ruang Lingkup 12

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 14

2.1 Pencemaran Udara 14

2.1.1 Sumber Pencemaran Udara 14

2.1.2 Jenis Pencemaran Udara 15

2.2 Faktor yang memengaruhi konsentrasi polutan & udara ambien 17

2.3 *Particulate Matter* (PM_{10}) 18

2.3.1 Sumber Parcitulate Matter (PM_{10}) 19

2.3.2 Sifat *Particulate Matt*er (PM_{10}) 20

2.3.3 Karakteristik *Particulate Matter* (PM_{10}) 21

2.3.4 Faktor Penyebaran Particulate Matter (PM_{10}) 22

2.3.5 Baku Mutu Particulate Matter (PM_{10}) 23

2.3.5 Dampak *Particulate Matter* (PM_{10}) 24

2.4 Pengukuran *Particulate Matter* (PM_{10}) 24

2.5 Metode Gravimetri 25

2.6 AERMOD 26

2.7 Penelitian Terdahulu 29

BAB III METODE PENELITIAN 34

3.1 Lokasi dan Waktu penelitian 34
3.1.1 Lokasi Penelitian 34
3.1.2 Waktu Penelitian 35
3.2 Diagram Alir Peneltian 36
3.3 Pengumpulan data 37
3.3.1 Pengambilan Sample 40
3.3.2 Metode Pengambilan Data Meteorologi 40
3.4 Analisis Data 40
3.4.1 Inventarisasi Emisi Transportasi 40
3.4.2 Analisis Konsentrasi PM_{10} 42
3.4.3 Pengolahan AERMOD 45
3.4.4 Uji Validasi Model 45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 47
4.1 Gambaran Umum Kondisi Lokasi Penelitian 47
4.2 Hasil Sampling Perhitungan Volume Kendaraan 48
4.3 Inventarisasi Emisi 54
4.4 Hasil Sampling Meteorologi 58
4.5 Hasil Perhitungan PM_{10} 60
4.6 Visualisasi Persebaran PM_{10} 63
4.7 Hasil Validasi Model 75
BAB V PENUTUP 79
5.1 Kesimpulan 79
5.2 Saran 80
DAFTAR PUSTAKA 82
LAMPIRAN 88
RIWAYAT HIDUP 105

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Baku Mutu berdasarkan Peraturan World Health Organization (WHO)-2021 23
Tabel 2.2 Baku Mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 tahun 2021..... 23
Tabel 3.1 Lokasi Jalan Penelitian..... 32
Tabel 3.2 Titik CCTV Lokasi Penelitian 35
Tabel 3.3 Titik Pengambilan Sample 36
Tabel 3.4 Faktor Emisi Kendaraan untuk Metropolitan dan Kota Besar 39
Tabel 4.1 Volume Kendaraan 47
Tabel 4.2 Hasil Rata-rata Data Meteorologi 56
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan PM_{10} Konsentrasi pada Lokasi Sampling 57
Tabel 4.4 Data Line Source 61
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Konsentrasi 68
Tabel 4.6 Perhitungan Validasi Model dengan Metode RMSPE 69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Alur Pengolahan AERMOD 24
Gambar 3.1 Lokasi Sampling 31
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian 33
Gambar 3.3 Alur Pengambilan Sample 40
Gambar 4.1 Rekapitulasi rata-rata volume kendaraan 49
Gambar 4.2 Perbandingan Volume Kendaraan Berdasarkan Jenis 50
Gambar 4.3 Nilai Hasil Faktor Emisi Berdasarkan Jenis Kendaraan 51
Gambar 4.4 Total Emisi Setiap Jalan 52
Gambar 4.5 Perbandingan Volume Kendaraan dengan Emisi Kendaraan 54
Gambar 4.6 Perbandingan Konsentrasi PM_{10} dan Baku Mutu di lokasi sampling 60
Gambar 4.7 Mawar Angin (*Wind Rose)* 61
Gambar 4.8 Grafik Distribusi Kelas Angin 63
Gambar 4.9 Peta Sebaran Polutan PM_{10} 65
Gambar 4.10 Pola Sebaran Polutan Menuju Rumah Sakit Bethesda 66
Gambar 4.11 Pola Sebaran Polutan Menuju Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa Kampus 1 67
Gambar 4.12 Pola Sebaran Polutan Menuju Gedung Rektorat Universitas Islam Negeri (UIN) Sunan Kalijaga 68

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Contoh Perhitungan Inventarisasi Emisi…….....79

Lampiran 2 Contoh Perhitungan Sampling Partikulat PM_{10}……...80

Lampiran 3 Contoh Perhitungan RMSPE.....81

Lampiran 4 Data Inventarisasi……82

Lampiran 5 Data Meteorologi Sampling Lapangan.....83

Lampiran 6 Dokumentasi Kegiatan Sampling.....87

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas udara di daerah perkotaan telah menjadi masalah lingkungan yang semakin mendesak, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Aktivitas manusia yang meningkat, seperti transportasi, industri, dan pembangunan infrastruktur, telah menyebabkan peningkatan konsentrasi polutan udara, termasuk Particulate Matter 10 (PM_{10}). PM_{10} adalah partikel dengan diameter kurang dari 10 mikrometer yang dapat terhirup dan menyebabkan dampak serius bagi kesehatan manusia, seperti gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan bahkan kematian dini (Driejana dkk, 2018). Selain dampak kesehatan, PM_{10} juga memengaruhi kualitas lingkungan dengan mengurangi visibilitas, merusak ekosistem, dan berkontribusi terhadap perubahan iklim (Tarigan dkk, 2016).

Yogyakarta, sebagai salah satu kota besar di Indonesia, menghadapi tantangan serius terkait kualitas udara. Pertumbuhan populasi, peningkatan jumlah kendaraan bermotor, dan aktivitas industri telah menyebabkan peningkatan konsentrasi PM_{10} di udara. Studi oleh Sari dkk (2020) menunjukkan bahwa emisi dari kendaraan bermotor merupakan penyumbang utama PM_{10} di kota-kota besar Indonesia, termasuk Yogyakarta. Selain itu, aktivitas konstruksi dan pembangunan infrastruktur juga berkontribusi terhadap peningkatan PM_{10} (Prasetyawati dkk, 2021). Kondisi ini diperparah oleh faktor meteorologi seperti kecepatan angin, kelembaban, dan suhu, yang memengaruhi dispersi dan akumulasi PM_{10} di atmosfer (Sutriyono dkk, 2018).

Pencemaran udara terjadi ketika zat pencemar berupa gas dan partikel kecil atau aerosol masuk ke atmosfer, menyebabkan perubahan kualitas udara. Menurut Budiyono (2010), perubahan kualitas udara disebabkan oleh aktivitas manusia yang menghasilkan polutan seperti Particulate Matter 10 μg (PM_{10}). Hal ini disebabkan oleh zat pencemar, seperti partikulat yang dihasilkan dari permukaan jalan serta komponen dari ban dan rem kendaraan (Haruna, dkk. 2019). PM_{10} merupakan salah satu bahan pencemar udara yang digolongkan sebagai pencemar primer (*primary pollutant*), yaitu bahan pencemar yang langsung diemisikan ke udara dari sumber

pencemar, seperti kendaraan bermotor (Wijayanti, 2010). Ada tiga cara masuknya bahan polutan seperti PM_{10} dari udara ke tubuh manusia, yaitu melalui inhalasi, ingesti, dan penetrasi kulit. Inhalasi bahan polutan udara ke paru-paru dapat menyebabkan gangguan pada paru-paru dan saluran napas.

Pemantauan kualitas udara secara konvensional melalui stasiun pemantauan memiliki keterbatasan dalam cakupan geografis serta memerlukan biaya operasional yang tinggi. Oleh karena itu, pemodelan kualitas udara menjadi instrumen yang esensial dalam memprediksi distribusi konsentrasi PM_{10} di suatu wilayah. Salah satu perangkat lunak yang umum digunakan untuk pemodelan dispersi udara adalah (*American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model*) AERMOD. AERMOD merupakan model dispersi Gaussian yang diakui secara luas karena kemampuannya dalam memprediksi konsentrasi polutan udara dengan tingkat akurasi yang tinggi, khususnya pada skala lokal dan regional (USEPA, 2022).

Pemodelan kualitas udara menggunakan AERMOD memerlukan data masukan yang mencakup parameter meteorologi, topografi, serta emisi yang akurat. Model ini memungkinkan simulasi penyebaran polutan seperti PM_{10} di atmosfer berdasarkan kondisi meteorologi dan karakteristik sumber emisi. Melalui penerapan AERMOD, peneliti dan pembuat kebijakan dapat mengidentifikasi wilayah dengan potensi risiko tinggi terhadap paparan PM_{10}, sehingga memungkinkan perumusan strategi mitigasi yang lebih efektif.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1) Bagaimana nilai beban emisi yang dihasilkan dari kegiatan sektor transportasi di sekitar kawasan Kota Yogyakarta?
2) Bagaimana nilai konsentrasi PM_{10} dari kegiatan sektor transportasi di sekitar kawasan Kota Yogyakarta?
3) Bagaimana pola sebaran PM_{10} di kawasan perkotaan Yogyakarta berdasarkan pemodelan menggunakan *software* AERMOD?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1) Untuk menghitung nilai beban emisi yang dihasilkan dari kegiatan sektor tranposrtasi di sekitar kawasan Kota Yogyakarta
2) Untuk menghitung nilai konsentrasi PM_{10} hasil pengukuran HVAS dari kegiatan sektor transportasi di sekitar kawasan Kota Yogyakarta
3) Untuk menganalisis pola sebaran PM_{10} di kawasan perkotaan Yogyakarta berdasarkan pemodelan menggunakan *software* AERMOD

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1) Dapat mengetahui nilai beban emisi yang dihasilkan dari kegiatan sektor tranposrtasi di sekitar kawasan Kota Yogyakarta
2) Dapat mengetahui nilai konsentrasi PM_{10} dari kegiatan sektor transportasi di sekitar kawasan Kota Yogyakarta
3) Dapat mengetahui pola sebaran PM_{10} di kawasan perkotaan Yogyakarta berdasarkan pemodelan menggunakan *software* AERMOD

1.5 Ruang Lingkup

1. Lokasi Penelitian dilakukan di jalan disekitar Kawasan Kota Yogyakarta yaitu Jalan Jend. Sudirman, Jalan Urip Sumoharjo, Jalan Laksda Adisucipto, Jalan Timoho, Jalan Ipda Tut Harsono, Jalan Kusumanegara, Jalan Sultan Agung, Jalan Suryopranoto, Jalan Dr. Sutomo, Jalan Dr. Wahidin Sudirohusodo, dan Jalan Panembahan Senopati.
2. Pengambilan data dilakukan pada hari Minggu (27 April 2025), Kamis (1 Mei 2025, dan Selasa (6 Mei 2025) dengan durasi 24 jam.
3. Penelitian bertujuan untuk mengetahui sumber emsisi dan analisis pola dispersi dan konsentrasi *Particulate Matter* (PM_{10}) dari kendaraan bermotor sebagai sumber utama emisi di sekitar kawasan Kota Yogyakarta.
4. Jenis kendaraan yang dianalisis dalam penelitian ini antara lain kendaraan motor, mobil, bus, dan truk yang menggunakan bahan bakar fosil (solar dan bensin).

5. Perhitungan jumlah kendaraan akan dilakukan secara langsung melalui observasi lapangan dan pemantauan menggunakan kamera CCTV untuk memperoleh data.
6. Data PM_{10} yang digunakan dalam penelitian ini merupakah data primer yang diambil secara langsung menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS)
7. Data meteorologi yang digunakan yakni, suhu, kelembaban, kecepatan angin, dan tekanan udata
8. Baku mutu yang digunakan adalah Peratuan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Udara Ambien

.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Udara

Pencemaran udara disebabkan oleh akumulasi zat fisik, kimia, atau biologis dalam jumlah besar di atmosfer secara bersamaan. Hal ini berdampak negatif pada kehidupan manusia, termasuk kesehatan tubuh, hewan, dan tumbuhan, serta mengganggu kenyamanan dan merusak properti. Udara memiliki peran krusial bagi kelangsungan hidup semua makhluk. Oleh karena itu, menjaga kestabilan kualitas udara merupakan hal yang sangat penting (Yasir, 2021). Sedangkan menurut PP Nomor 22 Tahun 2021 Pencemaran Udara adalah masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam Udara Ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui Baku Mutu Udara Ambien yang telah ditetapkan.

Penyebab pencemaran udara antara lain adalah kendaraan bermotor, pabrik industri, pabrik zat kimia, serta limbah rumah tangga. Semakin banyak populasi, semakin banyak pula alat transportasi yang digunakan. Setiap orang merasa bahwa memiliki alat transportasi pribadi akan lebih memudahkan mobilitas mereka. Namun, dampaknya juga meningkat secara signifikan. Banyaknya kendaraan bermotor menyebabkan emisi asap yang mengkontaminasi udara, sehingga menjadi tercemar. Padahal, penggunaan transportasi umum jauh lebih efektif dalam mengurangi polusi udara yang dihasilkan. Banyaknya alat transportasi pribadi tidak hanya menyebabkan polusi udara, tetapi juga menyebabkan kemacetan. Oleh karena itu, kota kota besar sering mengalami masalah ini. (Iqbal & Hermanto, 2019)

2.1.1 Sumber Pencemaran Udara

Pencemaran udara terjadi ketika udara tercampur dengan zat-zat asing yang bersifat merugikan kesehatan manusia, hewan, tumbuhan, serta lingkungan secara keseluruhan. Zat-zat tersebut dikenal sebagai polutan, dan dapat berasal dari berbagai sumber pencemar, yang umumnya dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu sumber alami dan sumber antropogenik (buatan manusia).

1. Sumber alami mencakup fenomena alam yang menghasilkan polutan tanpa campur tangan manusia, seperti :

a. Letusan gunung berapi (menghasilkan gas SO_2, CO_2, dan abu vulkanik)
b. kebakaran hutan alami
c. pelapukan batuan, serta
d. aktivitas biologis seperti proses fermentasi di rawa-rawa yang menghasilkan metana (CH_4).

Meskipun bersifat alami, kontribusi sumber ini bisa signifikan, terutama pada wilayah yang rawan bencana vulkanik atau kekeringan panjang (Kampa & Castanas, 2008).

2. Sumber antropogenik merupakan penyumbang terbesar pencemaran udara di daerah perkotaan maupun kawasan industri. Sumber ini berasal dari berbagai aktivitas manusia, antara lain:
    a. Transportasi: Kendaraan bermotor mengeluarkan polutan seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), hidrokarbon (HC), dan partikel halus ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}). Penggunaan bahan bakar fosil seperti bensin dan solar merupakan penyebab utama (Krzyzanowski dkk, 2014).
    b. Industri dan manufaktur: Proses pembakaran dalam pabrik menghasilkan emisi SO_2, NO_x, volatile organic compounds (VOCs), dan logam berat. Industri energi seperti pembangkit listrik berbahan bakar batubara menjadi penyumbang utama (IEA, 2021).
    c. Rumah tangga dan domestik: Aktivitas seperti pembakaran sampah, penggunaan kayu bakar, dan pemakaian bahan bakar minyak untuk memasak juga dapat menghasilkan CO dan partikel halus (Sapkota dkk, 2020).
    d. Pertanian: Penggunaan pupuk nitrogen dapat melepaskan amonia (NH_3) ke udara, sementara limbah ternak melepaskan metana (CH_4) dan gas-gas lainnya yang dapat membentuk ozon troposferik (Singh & Agrawal, 2014).

2.1.2 Jenis Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan kondisi tercemarnya atmosfer oleh satu atau lebih zat pencemar yang dapat membahayakan kesehatan manusia, merusak

ekosistem, dan menurunkan kualitas lingkungan. Jenis-jenis pencemaran udara dapat diklasifikasikan berdasarkan ciri fisik, proses terbentuknya, dan pola penyebaran emisinya.

1. Berdasarkan Ciri Fisik

   Berdasarkan bentuk fisiknya, pencemar udara dibedakan menjadi dua kategori utama:

   a. Pencemar Gas dan Uap

      Termasuk gas-gas seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), ozon troposferik (O_3), dan senyawa organik volatil (VOCs). Gas ini tidak dapat dilihat secara langsung dan biasanya tersebar homogen di udara.(Seinfeld & Pandis, 2016)

   b. Pencemar Partikulat

      Merupakan partikel padat atau cair yang tersuspensi di udara, seperti debu (PM_{10}), jelaga (*black carbon*), dan aerosol. Ukuran partikel ini menentukan efek kesehatannya, di mana $PM_{2.5}$ lebih berbahaya karena dapat menembus alveoli paru-paru.(WHO, 2021)

2. Berdasarkan Proses Terbentuk

   Jenis pencemar juga dapat dibedakan berdasarkan bagaimana zat pencemar tersebut terbentuk di atmosfer:

   a. Pencemar Primer Dilepaskan langsung dari sumber pencemaran ke atmosfer, misalnya CO dari kendaraan bermotor, atau SO_2 dari pembakaran batu bara. (Dominici dkk., 2014)

   b. Pencemar Sekunder Terbentuk dari reaksi kimia antara pencemar primer dan komponen atmosfer lainnya. Contohnya adalah ozon troposferik (O_3) yang terbentuk dari reaksi fotokimia antara NO_x dan VOCs di bawah sinar matahari. (Jacob, 1999)

3. Berdasarkan Pola Penyebaran Emisi

Penyebaran pencemar di atmosfer dipengaruhi oleh bentuk sumber emisinya dan kondisi meteorologi. Pola ini dapat diklasifikasikan menjadi:

   a. Sumber Titik (*Point Source*), emisi berasal dari satu titik lokasi seperti cerobong pabrik atau pembangkit listrik. Penyebaran cenderung

membentuk plume tergantung pada kecepatan angin dan stabilitas atmosfer

b. Sumber Garis (*Line Source*), emisi berasal dari sepanjang garis, seperti jalan raya yang padat lalu lintas. Penyebarannya membentuk pita polusi di sepanjang sumber emisi.
c. Sumber Luas (Area Source), merupakan emisi dari wilayah luas seperti daerah pemukiman, area industri, atau kebakaran hutan. Penyebarannya lebih merata tetapi dipengaruhi kondisi topografi dan atmosfer. (Guttikunda & Jawahar, 2014)

2.2 Faktor yang memengaruhi konsentrasi polutan & udara ambien

Salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas udara ambien adalah sumber emisi, seperti sumber emisi antropogenik (seperti kendaraan bermotor, industri, pembangkit listrik, dan pembakaran bahan bakar) dan sumber alami (seperti kebakaran hutan, letusan gunung berapi, dan debu alami (Zellner, 2000).

Adapun faktor-faktor meteorologis seperti kecepatan angin, temperatur, kelembaban, dan tekanan udara dapat mempengaruhi pencemaran udara dengan berbagai cara.

a. Kecepatan Angin

Kecepatan angin dapat mempengaruhi dispersi polutan di udara. Angin yang kencang dapat membantu menyebarkan polutan lebih jauh dari sumbernya, sehingga mengurangi konsentrasi polutan di satu tempat. Sebaliknya, angin yang lemah dapat menyebabkan polutan tetap terkonsentrasi di suatu area, meningkatkan kualitas udara yang buruk (Zellner, 2000).

b. Temperatur

Temperatur mempengaruhi reaksi kimia di atmosfer yang dapat menghasilkan atau menghilangkan polutan. Misalnya, suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju pembentukan ozon troposferik. Selain itu, inversi suhu, di mana lapisan udara yang lebih hangat berada di atas lapisan udara yang lebih dingin, dapat menjebak polutan di dekat permukaan tanah dan meningkatkan konsentrasi polutan

c. Kelembaban

Kelembaban udara dapat mempengaruhi pembentukan dan pemecahan polutan. Kelembaban tinggi dapat membantu pembentukan partikel-partikel halus (aerosol) melalui proses kondensasi. Selain itu, reaksi kimia tertentu yang menghilangkan polutan, seperti konversi SO_2 menjadi partikel sulfat, dapat dipengaruhi oleh kelembaban udara

d. Tekanan Udara

Tekanan udara dapat mempengaruhi distribusi vertikal polutan di atmosfer. Tekanan yang rendah biasanya terkait dengan kondisi cuaca buruk dan dapat menyebabkan peningkatan pencampuran vertikal yang membantu penyebaran polutan. Sebaliknya, tekanan tinggi sering dikaitkan dengan kondisi cuaca tenang yang dapat membatasi dispersi polutan dan meningkatkan konsentrasi polutan di dekat permukaan tanah. (Holton dkk, 2002).

2.3 *Particulate Matter* (PM_{10})

PM_{10} adalah partikulat padat dan cair yang melayang di udara dengan nilai media ukuran diameter aerodinamik 10 mikron. Partikulat 10 mikron mempunyai beberapa nama lain, yaitu PM_{10} sebagai *inhalable particles, respirable particulate, respirable dust, dan inhalable dust.* PM_{10} merupakan kelompok partikulat yang dapat di inhalasi, tetapi karena ukurannya, PM10 lebih spesifik merupakan partikulat yang *respirable* dan *predictor* kesehatan yang baik (Koren, 2003).

Partikel-partikel ini dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk emisi kendaraan, debu jalanan, dan aktivitas konstruksi (Holmes & Morawska, 2016). Emisi dari kendaraan bermotor, terutama yang menggunakan bahan bakar diesel, merupakan sumber utama PM_{10}. Partikel-partikel ini dapat terhirup dan masuk ke dalam sistem pernapasan, menyebabkan berbagai masalah kesehatan, terutama pada populasi yang tinggal atau bekerja di sekitar jalan tersebut.

Selain itu, PM_{10} juga dapat mengandung komponen kimia berbahaya seperti logam berat (timbal, merkuri) dan senyawa organik yang bersifat karsinogenik (WHO, 2021). Di daerah perkotaan, interaksi antara PM_{10} dengan gas-gas lain di atmosfer, seperti NOx dan SO_2, dapat membentuk partikel sekunder yang meningkatkan konsentrasi PM_{10}.

2.3.1 Sumber Parcitulate Matter (PM_{10})

Sumber PM_{10} dapat berasal dari berbagai aktivitas alamiah dan antropogenik. Sumber alamiah meliputi debu yang terbawa angin dari daerah gurun, letusan gunung berapi, dan kebakaran hutan. Sementara itu, sumber antropogenik utama PM_{10} meliputi emisi dari kendaraan bermotor, industri, pembangkit listrik, pembakaran biomassa, dan aktivitas konstruksi (Kumar dkk, 2019). Di daerah perkotaan, sumber utama PM_{10} adalah emisi dari kendaraan bermotor, terutama kendaraan berat seperti truk dan bus yang menggunakan bahan bakar diesel. Kendaraan ini menghasilkan partikulat dalam jumlah besar, terutama saat mengalami percepatan atau perlambatan (Zhang dkk, 2020).

Selain itu, debu yang terbang dari permukaan jalan akibat pergerakan kendaraan juga berkontribusi terhadap emisi PM_{10}, terutama di jalan-jalan yang kurang terawat atau sedang dalam proses konstruksi (Seangkiatiyuth dkk., 2018).

Sumber partikulat sesuai dengan ukuran diameter adalah sebagai berikut (US.EPA, 2004):

a. Partikulat sangat halus/ultrafine (diameter ≤0,1 μm), berasal dari hasil pembakaran transformasi SO_2 dan campuran organic di atmosfir serta hasil proses kimia pada temperature tinggi.
b. Partikulat mode akumulasi (diameter 0,1 μm sampai 3 μm), berasal dari hasil pembakaran batubara, minyak, bensin, solar dan kayu bakar, hasil transformasi NOx, SO_2 dan campuran organik.
c. Partikulat kasar/coarse (>3 μm), berasal dari resuspensi partikulat industri, jejak tanah diatas jalan raya, suspense dari kegiatan yang mempengaruhi tanah (pertanian, pertambangan).

Sumber lalu lintas jalan merupakan kontributor utama terhadap konsentrasi partikulat PM_{10} di udara perkotaan, baik dari emisi knalpot (exhaust) maupun non-knalpot (non-exhaust). Melalui pengukuran di terowongan lalu lintas, studi ini mampu memisahkan faktor emisi kendaraan antara bensin dan diesel. Hasilnya, kendaraan berbahan bakar bensin menghasilkan 3,9–4,5 mg/vkm PM_{10} dari knalpot, sedangkan kendaraan diesel lebih tinggi yaitu 7,2–8,3 mg/vkm. Nilai ini membuktikan bahwa proses pembakaran mesin kendaraan bermotor berkontribusi langsung terhadap pembentukan PM_{10} di udara ambien. Selain itu, penelitian ini juga menekankan bahwa meskipun non-exhaust seperti aus rem, ban, dan

resuspensi debu jalan berkontribusi signifikan, emisi dari pembakaran mesin tetap menjadi komponen penting yang perlu diperhitungkan dalam inventarisasi emisi dan strategi pengendalian kualitas udara (Lawrence dkk, 2016).

Particulate Matter 10 (PM_{10}) yang berasal dari kendaraan bermotor pada dasarnya terbentuk melalui proses pembakaran bahan bakar di dalam mesin. Pembakaran yang tidak sempurna menghasilkan partikel karbon elementer (elemental carbon, EC) dan karbon organik (organic carbon, OC), serta senyawa anorganik seperti sulfat, nitrat, dan abu logam, yang kemudian dilepaskan melalui knalpot (exhaust emission) (Chaudhari dkk, 2011). Pada kendaraan diesel, terutama yang tidak dilengkapi diesel particulate filter (DPF), emisi PM_{10} cenderung lebih tinggi dibandingkan kendaraan bensin karena karakteristik pembakaran dan kandungan sulfur dalam bahan bakar (Lawrence dkk, 2016).

2.3.2 Sifat *Particulate Matter* (PM_{10})

Partikulat (PM_{10}) dapat berbentuk cair atau padat, serta dapat memiliki inti padat yang dikelilingi oleh cairan. Komponen penyusun partikulat ini meliputi ion organik, senyawa logam, elemen karbon, senyawa organik, serta berbagai senyawa lainnya. Beberapa jenis partikulat bersifat higroskopis dan mengandung partikel yang terikat dengan air. Partikulat organik, terutama yang memiliki struktur kompleks, terdiri dari ratusan hingga ribuan senyawa organik. Berdasarkan proses pembentukannya, partikulat primer berasal langsung dari sumber emisi, sedangkan partikulat sekunder terbentuk melalui reaksi kimia di atmosfer dari senyawa gas yang mengalami transformasi (US EPA, 2004).

Sifat toksikologis PM_{10} sangat tergantung pada komposisinya. Partikel yang mengandung logam berat dan senyawa organik tertentu diketahui bersifat karsinogenik dan dapat memicu respons inflamasi dalam jaringan paru-paru manusia. PM_{10} juga mampu membawa mikroorganisme patogenik atau alergen seperti spora jamur dan serbuk sari, sehingga berdampak buruk pada penderita penyakit pernapasan kronis seperti asma dan bronkitis. Menurut Lestari dan Maulana (2014), konsentrasi PM_{10} yang tinggi berkorelasi dengan peningkatan kunjungan rumah sakit akibat gangguan saluran napas di wilayah perkotaan seperti Jakarta dan Palembang.

Dari sisi lingkungan, PM_{10} dapat mengganggu visibilitas udara (*haze*) dan berkontribusi pada pencemaran tanah serta perairan saat mengalami deposisi. Partikel ini juga dapat berinteraksi dengan gas lain di atmosfer dan berperan dalam pembentukan polutan sekunder seperti ozon troposferik. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2020), tingkat konsentrasi PM_{10} di sejumlah kota besar di Indonesia masih melebihi nilai ambang batas baku mutu udara ambien nasional (150 µg/m³ dalam 24 jam), yang mencerminkan pentingnya pemantauan dan pengendalian partikel ini.

2.3.3 Karakteristik *Particulate Matter* (PM_{10})

Particulate Matter dengan diameter aerodinamis kurang dari 10 mikrometer (PM_{10}) merupakan partikel halus yang dapat bertahan di atmosfer dalam waktu yang lama. Ukuran kecil partikel ini memungkinkan mereka untuk terhirup dan mencapai saluran pernapasan bagian bawah, sehingga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan seperti infeksi saluran pernapasan atas (ISPA) serta peningkatan risiko mortalitas dan morbiditas. Studi yang dilakukan di kawasan permukiman Kota Bandung menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{10} mencapai 54,41 µg/Nm³, yang masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah Indonesia, yaitu 150 µg/Nm³ untuk pengukuran 24 jam. Namun, meskipun berada di bawah ambang batas, paparan jangka panjang terhadap PM_{10} tetap berpotensi menimbulkan dampak kesehatan yang signifikan (Leinawati dkk., 2013).

PM_{10} (Particulate Matter dengan diameter ≤10 µm) memiliki komposisi yang cukup beragam, tergantung pada sumber emisi dan kondisi lingkungan sekitarnya. Secara umum, PM_{10} tersusun atas material anorganik kasar seperti silika, aluminosilikat, kalsium, besi, serta partikel mineral lain yang berasal dari debu tanah, proses erosi, maupun aktivitas konstruksi. Selain itu, PM_{10} juga dapat mengandung garam laut (natrium, klorida, sulfat) terutama pada wilayah pesisir, serta logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan seng (Zn) yang banyak dilepaskan dari aktivitas industri dan kendaraan bermotor.

Komponen organik pada PM_{10} biasanya berasal dari pembakaran biomassa, asap kendaraan, maupun degradasi senyawa organik di atmosfer, meskipun jumlahnya relatif lebih kecil dibandingkan $PM_{2.5}$. Dengan komposisi yang heterogen ini, PM_{10} berperan penting dalam menurunkan kualitas udara,

meningkatkan kekeruhan atmosfer, serta menimbulkan potensi bahaya bagi kesehatan manusia, khususnya pada saluran pernapasan bagian atas (WHO, 2021)

2.3.4 Faktor Penyebaran Particulate Matter (PM_{10})

Di Indonesia, penyebaran PM_{10} dipengaruhi oleh kombinasi faktor alamiah dan antropogenik. Studi oleh Sutriyono dkk (2018) menunjukkan bahwa kebakaran hutan dan lahan (karhutla) di Sumatera dan Kalimantan merupakan sumber utama PM_{10}, terutama selama musim kemarau. Kebakaran ini menghasilkan asap tebal yang mengandung partikel halus, termasuk PM_{10}, yang dapat menyebar hingga ke negara tetangga seperti Malaysia dan Singapura. Selain itu, aktivitas vulkanik di Indonesia, seperti letusan Gunung Merapi dan Gunung Sinabung, juga berkontribusi signifikan terhadap peningkatan konsentrasi PM10 di atmosfer (Abidin dkk, 2019).

Faktor antropogenik, seperti emisi dari kendaraan bermotor dan industri, juga menjadi penyebab utama tingginya kadar PM_{10} di kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung. Penelitian oleh Sari dkk (2020) mengungkapkan bahwa di Jakarta, emisi kendaraan bermotor menyumbang lebih dari 50% dari total emisi PM_{10}. Aktivitas industri, terutama di daerah penyangga kota, juga berkontribusi besar terhadap pencemaran udara. Studi oleh Kurniawati dkk (2017) di Surabaya menunjukkan bahwa kawasan industri memiliki konsentrasi PM_{10} yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah permukiman. Selain itu, aktivitas konstruksi dan pembangunan infrastruktur di kota-kota besar juga menjadi sumber PM_{10} yang signifikan (Prasetyawati dkk, 2021).

Partikulat PM_{10} yang dilepaskan ke atmosfer tidak hanya bertahan di sekitar sumber, tetapi dapat mengalami proses transportasi dan transformasi yang kompleks. Proses transportasi terjadi ketika partikel terbawa oleh angin horizontal (adveksi), menyebar karena turbulensi atmosfer (difusi lateral dan vertikal), maupun terdorong oleh konveksi pada kondisi atmosfer labil. Pada akhirnya, partikel akan dikeluarkan dari atmosfer melalui deposisi, baik deposisi kering (dry deposition) akibat gaya gravitasi maupun deposisi basah (wet deposition) ketika partikel terikat dan dicuci oleh presipitasi (Seinfeld & Pandis, 2016).

Sementara itu, proses transformasi melibatkan perubahan fisik dan kimia partikel, antara lain koagulasi (penggabungan antar partikel), kondensasi atau penguapan uap gas pada permukaan partikel, serta reaksi kimia dengan gas pencemar seperti SO_2, NO_x, dan O_3 yang dapat menghasilkan partikulat sekunder. Selain itu, PM_{10} juga bersifat higroskopis, sehingga dapat menyerap uap air dan mengalami pertumbuhan ukuran (hygroscopic growth) yang berpengaruh terhadap sifat dispersi dan deposisinya (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000). Mekanisme transport dan transformasi ini menentukan umur atmosferik PM_{10} (umumnya berkisar jam hingga beberapa hari) serta tingkat risiko kesehatannya pada wilayah yang lebih luas, karena partikel dapat berpindah dari sumber lokal ke area regional sebelum terdeposit (WHO, 2021).

2.3.5 Baku Mutu Particulate Matter (PM_{10})

Baku mutu udara ambien berdasarkan Peraturan *World Health Organization* (WHO)-2021, Baku mutu udara ambien diartikan sebagai batasan jumlah zat, energi, atau komponen lain yang masuk ke udara, serta unsur pencemar yang ada di atmosfer. Secara internasional, baku mutu udara ambien diatur dalam *World Health Organization* (WHO)-2021 dalam waktu pemantauan 24 jam seperti pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Baku Mutu berdasarkan Peraturan World Health Organization (WHO)-2021

Parameter	Baku Mutu
PM_{10} (Partikulat diameter <10 mikron)	45 µg/Nm3

Sedangkan di Indonesia memiliki aturan sendiri terkait baku mutu udara ambien yang diatur dalam Peraturan Pemerintah No. 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dalam waktu pemantauan 24 jam seperti pada Tabel 2.2 :

Tabel 2.2 Baku Mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 tahun 2021

Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu
PM_{10} (Partikulat diameter <10 mikron)	24 Jam	75 µg/Nm3

2.3.5 Dampak *Particulate Matter* (PM_{10})

Dampak kesehatan dari paparan PM_{10} di Indonesia telah menjadi perhatian serius, terutama di daerah dengan tingkat polusi udara yang tinggi. Driejana dkk (2018), di Bandung menunjukkan bahwa paparan PM_{10} berkorelasi dengan peningkatan kasus infeksi saluran pernapasan akut (ISPA) pada anak-anak. Di Jakarta ditemukan bahwa paparan jangka panjang terhadap PM_{10} dapat meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular dan gangguan pernapasan kronis pada populasi dewasa. Kelompok rentan, seperti anak-anak dan lansia, lebih rentan terhadap dampak negatif PM_{10}, terutama di daerah dengan kualitas udara yang buruk (Suryadarma dkk, 2019).

Dampak lingkungan dari PM_{10} juga terlihat jelas di Indonesia. Kebakaran hutan dan lahan tidak hanya menyebabkan peningkatan konsentrasi PM_{10}, tetapi juga mengakibatkan kerusakan ekosistem dan hilangnya keanekaragaman hayati (Page dkk, 2009). Selain itu, PM_{10} yang mengendap di permukaan tanah dan air dapat mempengaruhi kualitas tanah dan perairan, yang pada gilirannya berdampak pada pertanian dan perikanan. Studi oleh Tarigan dkk (2016) menunjukkan bahwa akumulasi PM_{10} pada daun tanaman di daerah perkotaan dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan mengurangi hasil panen.

Dampak ekonomi dari PM_{10} di Indonesia juga signifikan. Biaya kesehatan yang terkait dengan pengobatan penyakit akibat paparan PM_{10}, serta hilangnya produktivitas akibat sakit, menimbulkan beban ekonomi yang besar. World Bank (2019) memperkirakan bahwa biaya ekonomi akibat polusi udara di Indonesia mencapai miliaran dolar setiap tahunnya. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi emisi PM_{10} dan meningkatkan kualitas udara perlu menjadi prioritas dalam kebijakan lingkungan dan kesehatan di Indonesia.

2.4 Pengukuran *Particulate Matter* (PM_{10})

Pengukuran PM_{10} dilakukan menggunakan alat *High Volume Air Sampler* (HVAS), yaitu perangkat yang berfungsi untuk mengumpulkan partikel udara melalui proses filtrasi. Alat ini bekerja dengan menyedot sejumlah besar udara menggunakan pompa vakum berkapasitas tinggi, yang dilengkapi dengan filter serta sistem pengontrol laju aliran udara.

Prinsip kerja HVAS didasarkan pada metode gravimetri, di mana konsentrasi debu di udara ditentukan dengan menggunakan pompa isap. Udara yang terhisap melewati filter, sehingga partikel debu tertahan pada permukaan filter. Konsentrasi debu di udara dapat dihitung berdasarkan jumlah udara yang telah terhisap serta berat debu yang tertangkap di filter. Dalam pengujian, filter serat kaca dipilih karena mampu menangkap partikel dengan rentang diameter 0,1 μm hingga 100 μm, dengan efisiensi pengumpulan mencapai 99,95% untuk partikel berukuran 0,3 μm.

2.5 Metode Gravimetri

Metode gravimetri merupakan metode standar yang banyak digunakan dalam pengukuran konsentrasi partikulat di udara ambien, termasuk partikulat berukuran diameter aerodinamik ≤10 mikrometer (PM_{10}). Prinsip utama metode ini adalah pengumpulan partikel di udara menggunakan media filter yang kemudian ditimbang secara presisi untuk mendapatkan massa total partikulat yang tertangkap selama periode sampling.

Proses pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat pemantau udara seperti High Volume Air Sampler (HVAS) yang telah dilengkapi dengan impactor atau pemisah fraksi untuk memastikan hanya partikel dengan ukuran ≤10 μm yang tertangkap pada filter. Sebelum dan sesudah pengambilan sampel, filter dikondisikan dalam ruangan dengan kelembapan relatif 30–40% dan suhu 20–23°C selama minimal 24 jam untuk mencapai kestabilan massa, kemudian dilakukan penimbangan dengan neraca analitik dengan ketelitian minimal 0,1 mg (SNI 7119.15:2016).

SNI 7119.15:2016 adalah standar nasional yang digunakan untuk mengukur konsentrasi partikel debu halus di udara, khususnya PM_{10} (partikulat dengan diameter kurang dari 10 mikrometer), menggunakan metode manual gravimetri. Dalam metode ini, udara disaring menggunakan alat khusus yang dilengkapi filter, kemudian filter tersebut ditimbang sebelum dan sesudah pengambilan sampel. Selisih berat filter menunjukkan jumlah partikel yang terkumpul, yang kemudian dihitung untuk mengetahui konsentrasi PM_{10} di udara. Pengambilan sampel biasanya dilakukan selama 24 jam agar hasilnya representatif.

Standar ini juga mengatur kondisi laboratorium dan peralatan yang digunakan, seperti suhu, kelembaban, serta jenis dan perlakuan terhadap filter. Meskipun metode ini cukup sederhana dan hasilnya akurat, prosesnya membutuhkan waktu yang cukup lama dan tidak bisa memberikan hasil secara langsung (real-time).

2.6 AERMOD

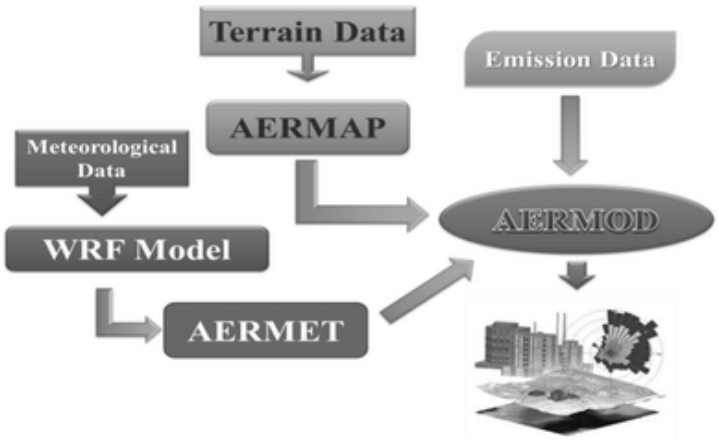
AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model) merupakan model dispersi pencemar udara berbasis *Gaussian plume* yang dikembangkan oleh *American Meteorological Society* (AMS) dan *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). AERMOD telah diadopsi secara luas sebagai model referensi oleh USEPA dan digunakan dalam berbagai studi lingkungan untuk mengevaluasi konsentrasi pencemar di udara, termasuk partikel tersuspensi seperti PM_{10}. Model ini beroperasi pada kondisi steady-state dan dirancang untuk mensimulasikan penyebaran polutan dari berbagai jenis sumber emisi dalam skala lokal hingga sekitar 50 kilometer (Cimorelli dkk, 2005).

AERMOD tersusun atas tiga komponen utama, yaitu:

1. AERMOD sebagai model inti, merupakan komponen utama yang melakukan simulasi proses dispersi polutan di atmosfer. Model ini menghitung sebaran konsentrasi polutan di berbagai titik receptor berdasarkan data masukan yang mencakup informasi meteorologi, topografi, dan karakteristik emisi. Perhitungan dalam AERMOD mengacu pada teori *Gaussian Plume* yang dimodifikasi, dengan mempertimbangkan parameter-parameter penting seperti turbulensi atmosfer, jenis sumber emisi (titik, garis, atau area), ketinggian cerobong, suhu buangan, serta kecepatan buangan.
2. AERMET (AERMOD Meteorological Preprocessor) digunakan untuk mengolah data meteorologi permukaan dan data profil atmosfer atas. Data meteorologi ini diperlukan untuk menggambarkan kondisi atmosfer seperti kecepatan angin, arah angin, suhu potensial, dan parameter turbulensi, termasuk friksi kecepatan (u*) dan panjang Monin-Obukhov (L). Proses pengolahan di AERMET terdiri dari tiga tahap, yaitu ekstraksi data (stage

1), validasi dan kontrol mutu data (stage 2), serta pembentukan file output meteorologi (stage 3) berupa file .SFC (surface) dan .PFL (profile) yang selanjutnya digunakan oleh AERMOD (USEPA, 2015).

3. AERMAP (AERMOD Terrain Preprocessor) berfungsi untuk mengolah data topografi digital dari peta elevasi seperti Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) atau data DEM (Digital Elevation Model). AERMAP menghitung elevasi tiap titik receptor dan ketinggian sumber emisi relatif terhadap permukaan tanah, yang kemudian digunakan AERMOD untuk memperkirakan pengaruh topografi terhadap pergerakan dan dispersi polutan (USEPA, 2019).



Gambar 2.1 Alur Pengolahan AERMOD

Ketiga komponen ini berperan penting dalam menyediakan data masukan yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi dispersi polutan. AERMOD merupakan model pemodelan dispersi udara yang komprehensif dan telah terbukti andal dalam berbagai aplikasi lingkungan, baik untuk kajian ilmiah maupun keperluan regulasi. Integrasi antara AERMOD sebagai model inti, AERMET sebagai pemroses data meteorologi, dan AERMAP sebagai pemroses topografi, memungkinkan pengguna untuk memodelkan penyebaran polutan secara lebih akurat dengan mempertimbangkan kondisi atmosfer dan karakteristik medan yang kompleks.

Kemampuan AERMOD dalam menangani berbagai jenis sumber emisi serta mempertimbangkan faktor meteorologi mikro dan makro menjadikannya sebagai salah satu model yang direkomendasikan oleh USEPA dan banyak digunakan secara global, termasuk dalam studi kualitas udara di Indonesia. (Zhou & Hanna, 2008)

2.7 Penelitian Terdahulu

No	Nama	Tahun	Judul Penelitian	Hasil
1	Laila Nurekawati & Andik Pribadi	2024	Analisis Distribusi Konsentrasi PM10 Menggunakan Model AERMOD di Kampus IPB Dramaga	Penelitian ini menggunakan alat Airmonitor dan Dienmern untuk pengukuran konsentrasi PM10 harian yang kemudian dikalibrasi menggunakan High Volume Air Sampler (HVAS) untuk mendapatkan data yang lebih akurat. Faktor koreksi berkisar antara 0,78–0,82. Jumlah kendaraan dihitung manual untuk menentukan beban emisi kendaraan bermotor. Seluruh parameter input dimasukkan ke dalam AERMOD View. Validasi model dilakukan dengan membandingkan nilai observasi dan prediksi, menghasilkan R^2 sebesar 0,825 yang menunjukkan tingkat akurasi sangat baik. Konsentrasi model cenderung lebih rendah dari lapangan, diduga karena adanya pengaruh lokal yang tidak tertangkap oleh model. Arah angin dominan barat laut mempengaruhi distribusi konsentrasi.
2	Muhammad Tegar Adli & Jesika Febrita	2024	Analisis Sebaran PM10 Menggunakan AERMOD View di Jalan Raya Gunung Putri, Bogor	Studi ini menggunakan pengukuran langsung konsentrasi PM10 di lapangan pada hari kerja dan hari libur. Volume kendaraan dihitung untuk menghitung emisi, yang kemudian dimasukkan ke dalam model AERMOD bersama dengan data meteorologi. Konsentrasi PM10

				berdasarkan model mencapai 238,5 µg/m³ pada hari kerja dan 110,9 µg/m³ pada hari libur. Sebaran mengikuti arah angin dominan Tenggara. Beberapa segmen jalan memiliki nilai PM10 yang melebihi baku mutu harian 75 µg/m³. Validasi menggunakan regresi linier menghasilkan R^2 sebesar 0,721. Studi merekomendasikan pembatasan kendaraan berat di jam sibuk.
3	Muhammad Baihaqi & Andik Pribadi	2023	Analisis Sebaran PM10 di Jalan KH. R. Abdullah Bin Nuh, Bogor	Penelitian menggunakan Air Quality Detector untuk mengukur konsentrasi PM10 dan menghitung volume kendaraan bermotor secara manual. Data meteorologi diperoleh dari Stasiun Klimatologi Dramaga. Input digunakan dalam model AERMOD untuk mensimulasikan sebaran PM10 selama tujuh hari. Hasil menunjukkan konsentrasi PM10 berkisar antara 2–208 µg/m³ dengan nilai tertinggi pada hari Kamis sore. Arah angin dominan ke timur laut mempengaruhi penyebaran polutan. Model tervalidasi dengan R^2 sebesar 0,7204. Sebaran PM_{10} melebihi baku mutu pada segmen tertentu saat lalu lintas padat.
4	Rahmasiwi Tiza Hastari, Dwi Aris Tantri, Ahmad Baihaqi	2021	Prakiraan Dispersi Polutan PM_{10} di Kawasan UGM Menggunakan AERMOD	Studi ini menggunakan data emisi dari aktivitas konstruksi di kawasan Universitas Gadjah Mada. Data meteorologi diperoleh dari BMKG, sedangkan topografi disiapkan menggunakan AERMAP. AERMOD

				digunakan untuk memprediksi sebaran PM_{10} dan polutan lainnya. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi tertinggi PM_{10} terjadi di sekitar Jalan Simanjuntak dan Sardjito, terutama saat kegiatan mobilisasi material. Studi ini juga mengevaluasi dampak lingkungan terhadap kesehatan, pemanasan global, dan toksisitas. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dan observasi di lapangan.
5	Syahid Amrullah Muhammad	2018	Pemodelan Sebaran Emisi PM_{10} Cerobong PLTU Tanjung Jati B Jepara dengan AERMOD	Penelitian ini menggunakan AERMOD untuk memodelkan emisi PM_{10} dari cerobong pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Data meteorologi diperoleh dari BMKG Jepara, sedangkan data topografi disusun melalui AERMAP. Input emisi berasal dari data operasional PLTU. Hasil menunjukkan bahwa penyebaran PM_{10} dominan ke arah tenggara dengan konsentrasi tertinggi di Desa Bucu, yang terletak dekat Gunung Muria. Konsentrasi cenderung lebih luas pada musim kemarau dibanding musim hujan, dengan potensi paparan polusi lebih tinggi. Studi ini menjadi dasar perencanaan mitigasi emisi.
6	Agung R. Dwicahya & Oky H. Cahyono	2024	Analisis Sebaran Emisi TSP Menggunakan AERMOD di Jalan Tandes, Surabaya	Emisi TSP dihitung berdasarkan volume lalu lintas yang diamati secara langsung. Data meteorologi diperoleh dari Stasiun Juanda. AERMOD digunakan untuk mensimulasikan sebaran TSP di sepanjang Jalan Tandes yang padat kendaraan. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi

				TSP tertinggi (184,8 µg/m³) terjadi pada sore hari saat kecepatan angin rendah dan arah angin tidak stabil. Model menunjukkan bahwa arah angin dominan dari selatan-selatan barat turut memperluas sebaran ke permukiman padat. Studi menyarankan penghijauan dan penataan ulang arus lalu lintas.
7	Fiqih Oktaviansyah & Andik Pribadi	2024	Analisis Sebaran PM_{10} dan APTI Tanaman di Tanjung Enim Menggunakan AERMOD dan Caline-4	Studi memanfaatkan dua model pemodelan (AERMOD dan Caline-4) untuk menilai sebaran PM10 dari aktivitas transportasi batubara. Data emisi dihitung dari jumlah truk dan jenis bahan bakar. Data meteorologi diolah menggunakan AERMET. Hasil AERMOD menunjukkan distribusi lebih luas dibanding Caline-4. R^2 pagi = 0,67; siang = 0,61; sore = 0,51. Studi juga mengukur Air Pollution Tolerance Index (APTI) pada tanaman akasia yang menunjukkan kategori toleran, sehingga cocok sebagai vegetasi penahan polusi.
8	Irwan Gunawan, Dini Amelia, Nanda Putri	2023	Sebaran PM10 di Kawasan Industri PT Semen Padang Menggunakan AERMOD	Emisi PM10 dari cerobong industri semen dimasukkan ke dalam AERMOD bersama data meteorologi dari BMKG dan data kontur lahan. Sebaran polutan dianalisis terhadap arah angin dominan dan kepadatan bangunan di sekitar. Konsentrasi tertinggi berada di area pemukiman sekitar pabrik. Kajian ini menunjukkan bahwa pengendali emisi seperti electrostatic precipitator perlu ditingkatkan. Peta hasil

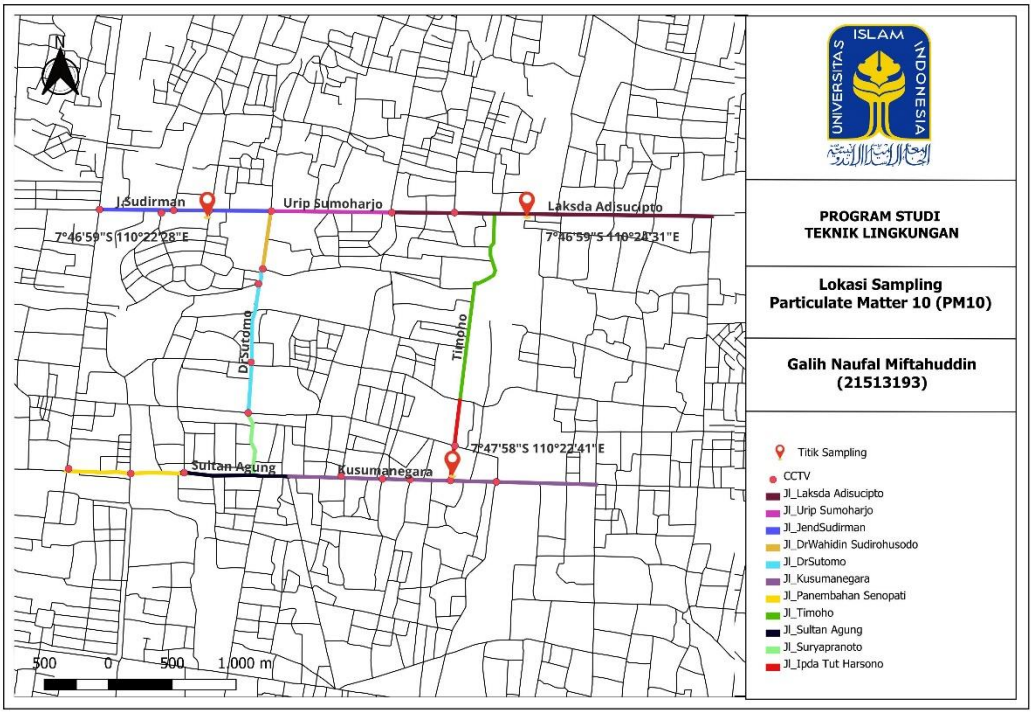
				AERMOD menunjukkan distribusi polutan menjangkau radius hingga 2,5 km dari cerobong.
9	M. Aziz & A. Saputra	2022	Pemodelan Konsentrasi PM_{10} dari Kegiatan Lalu Lintas di Kota Palembang Menggunakan AERMOD	Pengumpulan data lalu lintas dilakukan pada tiga waktu berbeda (pagi, siang, sore), dikonversi ke estimasi emisi. Data meteorologi dari stasiun Kenten digunakan dalam AERMET. AERMOD digunakan untuk memodelkan konsentrasi PM_{10} pada 10 titik pemantauan. Konsentrasi PM10 tertinggi ditemukan di jalan protokol saat jam sibuk. Validasi model menghasilkan deviasi < 20%. Studi ini merekomendasikan pembatasan kendaraan berat dan penerapan jalur hijau untuk mengurangi dampak polusi.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu penelitian

3.1.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah kawasan perkotaan Kota Yogyakarta yang dikenal sebagai pusat aktivitas ekonomi, pendidikan, dan pariwisata dengan tingkat kepadatan penduduk serta lalu lintas kendaraan bermotor yang tinggi, sehingga berpotensi menjadi sumber utama pencemaran udara, khususnya partikulat PM_{10}. Kota Yogyakarta memiliki karakteristik tata guna lahan yang beragam, mulai dari kawasan permukiman padat, pusat perdagangan, hingga koridor jalan utama, yang secara langsung maupun tidak langsung memengaruhi sebaran dan konsentrasi PM_{10} di udara ambien. Titik-titik lokasi pengambilan sampel ditentukan pada area yang merepresentasikan aktivitas urban dengan emisi partikulat signifikan, seperti di sekitar jalan protokol dan area padat kendaraan.



Gambar 3.1 Lokasi Sampling

Lokasi jalan penelitian untuk melakukan pengumpulan data primer dan sekunder yang akan digunakan dalam penelitian ini secara lengkap akan ditunjukkan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Lokasi Jalan Penelitian

No	Nama Jalan	Koordinat
1	Jl Jend. Sudirman	7°46'59"S 110°22'28"E
2	Jl Urip Sumoharjo	7°46'59"S 110°23'1"E
3	Jl Laksda Adisucipto	7°46'59"S 110°24'31"E
4	Jl Timoho	7°47'23"S 110°23'36"E
5	Jl Ipda Tut Harsono	7°47'54"S 110°23'33"E
6	Jl Kusumanegara	7°48'6"S 110°23'29"E
7	Jl Sultan Agung	7°48'5"S 110°22'29"E
8	Jl Suryapranoto	7°47'58"S 110°22'41"E
9	Jl Dr. Sutomo	7°47'36"S 110°22'40"E
10	Jl Dr. Wahidin Sudirohusodo	7°47'13"S 110°22'43"E
11	Jl Panembahan Senopati	7°48'4"S 110°22'8"E

3.1.2 Waktu Penelitian

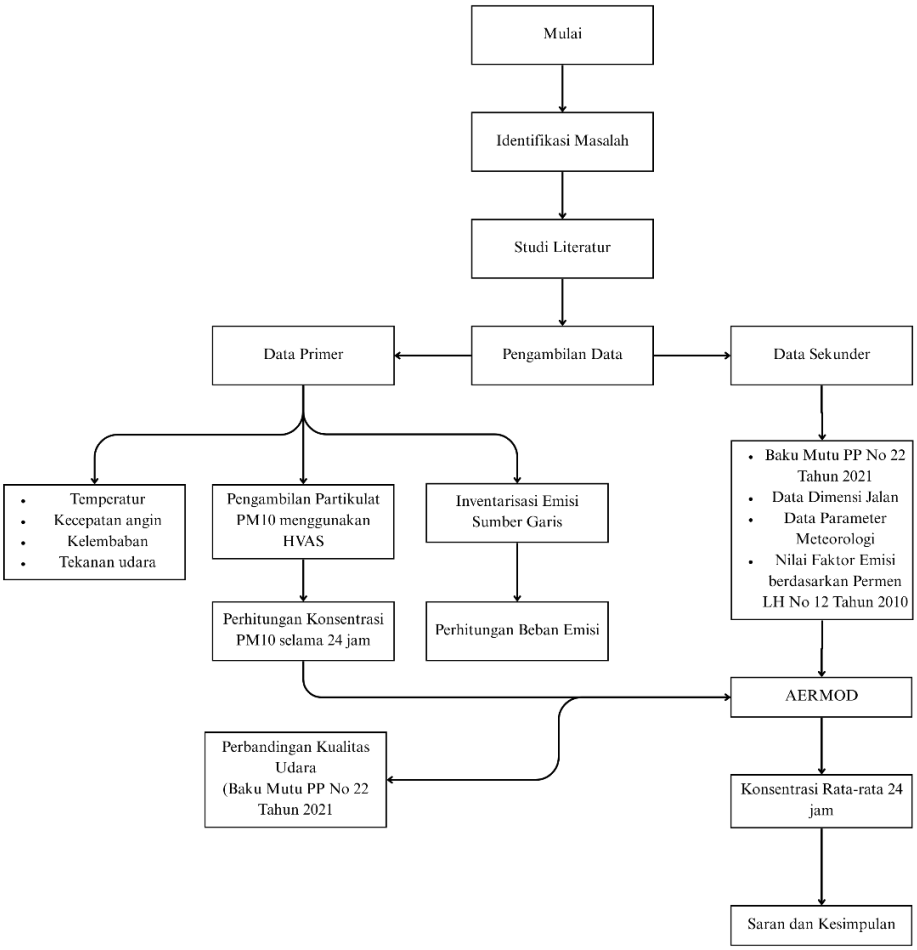
Penelitian ini dimulai pada bulan Februari 2025, dengan rencana pengambilan sampel udara yang dijadwalkan berlangsung pada bulan April hingga Mei 2025. Pengambilan sampel akan dilakukan selama 24 jam penuh sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI), dimulai pukul 08.00 pagi. Jadwal pengambilan sampel udara direncanakan pada hari Minggu, 27 April 2025; Kamis, 1 Mei 2025; dan Selasa, 6 Mei 2025, sehingga mencakup hari libur dan hari kerja (*weekday*).

Waktu pelaksanaan penelitian antara lokasi pertama dan lokasi-lokasi berikutnya tidak dapat dilakukan secara berdekatan karena terkendala oleh proses perizinan tempat. Setiap lokasi memiliki prosedur administratif yang berbeda, dan beberapa di antaranya memerlukan waktu yang cukup lama untuk mendapatkan

persetujuan dari pihak yang berwenang. Hal ini menyebabkan adanya jeda waktu yang tidak singkat antara satu lokasi dengan lokasi lainnya. Meskipun demikian, penyesuaian jadwal dilakukan secara cermat agar kegiatan pengambilan data tetap berjalan sesuai rencana dan tidak mengurangi validitas serta keterbandingan data antar lokasi.

Sementara itu, pengukuran volume kendaraan dilakukan pada waktu - waktu jam sibuk (*rush hour*), yakni pukul 08.00–09.00 pagi, 12.00–13.00 siang, dan 16.00–17.00 sore. Setiap sesi pengukuran kendaraan berlangsung selama satu jam pada masing-masing periode jam sibuk tersebut untuk menangkap kondisi lalu lintas pada waktu dengan kepadatan tertinggi.

3.2 Diagram Alir Peneltian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.3 Pengumpulan data

Dalam penelitian ini, data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung melalui kegiatan lapangan, yang meliputi dua jenis pengukuran utama. Pertama, pengukuran volume kendaraan dilakukan dengan metode pencacahan kendaraan yang melintas pada lokasi dan waktu tertentu untuk mengetahui intensitas lalu lintas. Kedua, dilakukan pengukuran konsentrasi *Particulate Matter* (PM_{10}) di udara ambien guna memperoleh data kualitas udara yang aktual di lokasi penelitian. Berikut adalah adalah tahapan-tahapan yang dilalui saat pengumpulan data primer:

A. Inventarisasi Emisi

   Pengumpulan data inventarisasi emisi dilakukan untuk mengetahui besarnya beban emisi yang dihasilkan oleh masing-masing jenis kendaraan bermotor yang melintas di lokasi penelitian. Kegiatan ini mencakup pengamatan terhadap volume kendaraan yang dibedakan berdasarkan kategori, yaitu sepeda motor, mobil penumpang, truk, dan bus. Pengamatan dilakukan pada tiga rentang waktu yang mewakili kondisi lalu lintas harian, yaitu pagi (sekitar pukul 07.00–08.00 WIB), siang (sekitar pukul 12.00–13.00 WIB), dan sore (sekitar pukul 16.00–17.00 WIB), dengan durasi pengamatan masing-masing selama satu jam. Data volume kendaraan diperoleh melalui dua metode, yaitu pencatatan langsung secara manual oleh pengamat di lapangan serta melalui rekaman kamera pengawas (CCTV) yang tersedia di lokasi. Hasil pengamatan ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan beban emisi dari setiap jenis kendaraan, dengan mengacu pada faktor emisi yang relevan.

Tabel 3.2 Titik Lokasi CCTV Jalan Penelitian

No	Nama Jalan	Titik Kamera CCTV (ATCS)
1	Jl Jend. Sudirman	Simpang Gramedia (PTZ)
2	Jl Urip Sumoharjo	Simpang Demangan (View Timur)
3	Jl Laksda Adisucipto	Simpang Debrito (View Utara)
4	Jl Timoho	Simpang Balaikota (View Utara-Barat)
5	Jl Ipda Tut Harsono	Simpang UST (PTZ)
6	Jl Kusumanegara	Simpang Glagahsari (PTZ)
7	Jl Sultan Agung	Simpang Permata (PTZ)
8	Jl Suryapranoto	Simpang Sentul (PTZ)
9	Jl Dr. Sutomo	Simpang Gayam (PTZ)
10	Jl Dr. Wahidin Sudirohusodo	Simpang UKDW (PTZ)
11	Jl Panembahan Senopati	Simpang Gondomanan (PTZ)

B. Persiapan Filter

Sebelum digunakan dalam proses pengambilan sample PM_{10} , filter harus melalui proses pengkondisian di ruang dengan temperatur 15°C sampai dengan 35°C dan kelembaban relatif < 50 % serta biarkan selama 24 jam dalam desikator. Setelah proses pengkondisian filter ditimbang menggunakan neraca analitik untuk mendapatkan massa awal (W1), kemudian filter disimpan dalam wadah bersih dan tertutup untuk mencegah kontaminasi sebelum dibawa ke lapangan.

C. Pengukuran konsentrasi PM_{10} Menggunakan HVAS

Pengukuran konsentrasi PM_{10} menggunakan HVAS dilakukan pada lokasi yang sama saat pengukuran volume lalu lintas kendaraan, yaitu Jalan Jendral Sudirman, Jalan Laksda Adisucipto dan Jalan Ipda Tut Harsono. Metode pengukuran PM_{10} mengikuti standar SNI 7119.15:2016 yang mengatur tentang prosedur pengukuran dan pengujian partikel PM_{10}. Pengambilan sample pada masing-masing titik berlangsung selama 24 jam untuk mendapatkan data yang akurat.

Tabel 3.3 Titik pengambilan sample

No	Nama Jalan	Koordinat
1	Jl Jend. Sudirman	7°46'59"S 110°22'28"E
2	Jl Ipda Tut Harsono	7°47'54"S 110°23'33"E
3	Jl Laksda Adisucipto	7°46'59"S 110°24'31"E

Untuk data sekunder yang diperlukan dalam penelitian ini menggunakan beberapa data berikut:

1. Data Meteorologi dalam penelitian ini diperoleh dari *Copernicus Climate Data Store* (CDS) melalui produk reanalisis ERA5 yang disediakan oleh ECMWF. Data ini memiliki resolusi spasial sekitar 0.25° dan resolusi temporal per jam, sehingga sesuai untuk pemodelan kualitas udara. Parameter yang digunakan mencakup data permukaan seperti suhu, tekanan, kelembapan, kecepatan dan arah angin.
2. Informasi mengenai dimensi jalan, seperti panjang dan lebar ruas jalan, diperoleh berdasarkan Keputusan Wali Kota Yogyakarta Nomor 71 Tahun 2018 tentang Penetapan Ruas - Ruas Jalan di Kota Yogyakarta, yang dijadikan sebagai referensi dalam proses pemetaan lokasi penelitian.
3. Nilai Faktor Emisi Kendaran, merupakan suatu unit atau nilai rata-rata suatu parameter pencemar udara yang dikeluarkan oleh suatu sumber spesifik (Yanto, 2011). Faktor emisi juga memiliki pengertian sebagai koefisien yang menghubungkan antara aktivitas dengan sumber emisi (Kusuma dkk, 2010). Metode faktor emisi yang digunakan untuk menghitung beban emisi berbasis VKT merupakan ketentuan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 12/2020 tentang Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah Perkotaan.

3.3.1 Pengambilan Sample

Penelitian ini melakukan pengambilan sample untuk pengukuran konsentrasi partikulat PM_{10} menggunakan HVAS pada lokasi yang telah ditentukan yaitu Jalan Jendral Sudirman, Jalan Laksda Adisucipto serta Jalan Ipda Tut Harsono. Dengan alat dan bahan yang digunakan saat pengambilan sample sebagai berikut:

A. Alat
   1. HVAS
   2. Barometer
   3. Desikator
   4. Timbangan Analitik
   5. Termometer
   6. Manometer

B. Bahan
   1. Filter serat kaca (*fiber glass*);
   2. Filter serat kuarsa;
   3. Filter politetrafluoroetilena (PTFE) yang dilapisi serat kaca (fiber glass); dan
   4. Filter membran PTFE.

3.3.2 Metode Pengambilan Data Meteorologi

Data meteorologi yang digunakan yaitu kecepatan angin, temperatur, kelembaban dan tekanan udara dengan menggunakan alat Anemometer, Barometer, dan Higrometer dengan prosedur sampling selama 24 jam dengan interval waktu 1 jam.

3.4 Analisis Data

3.4.1 Inventarisasi Emisi Transportasi

Metode perhitungan yang digunakan dalam inventarisasi emisi kendaraan dalam penelitian ini mengacu pada Pedoman Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara Di Perkotaan. Persamaan yang digunakan untuk menghitung beban emisi kendaraan bermotor dinyatakan sebagai berikut:

$$VKT_{j.line} = \sum_{i=1}^{n} Q_{ji} \times I_i \quad \text{.....3.1}$$

$$E_{cji} = \frac{VKT_{ji} \times EF_{cj} \times (100 - C)}{100} \quad \text{.....3.2}$$

Dimana:

$VKT_{j.line}$ = VKT kategori kendaraan j pada ruas jalan i yang dihitung sebagai sumber garis (km/tahun)

Q_{ji} = Volume kendaraan dalam kategori j pada ruas jalan I (kendaraan/tahun)

I_i = Panjang ruas jalan i (km)

E_{cji} = Emisi pencemar c untuk kendaraan kategori j pada ruas jalan i

C = Efisiensi peralatan pengendali emisi (%)

C = 0, jika tidak terpasang peralatan pengendali

Perhitungan inventarisasi emisi sektor transportasi diawali dengan mengidentifikasi jumlah kendaraan yang melintasi setiap lokasi penelitian selama periode tertentu. Setelah itu, kendaraan yang teridentifikasi dikelompokkan berdasarkan jenisnya, yaitu sepeda motor, mobil penumpang, kendaraan ringan (pickup dan minibus), kendaraan berat (truk dan bus), serta angkutan umum. Data lalu lintas yang dikumpulkan mencakup volume kendaraan serta jarak tempuh rata-rata pada waktu pengamatan. Pengelompokan ini penting untuk menentukan faktor emisi yang sesuai untuk masing-masing kategori kendaraan. Data volume lalu lintas dan jarak tempuh tersebut digunakan dalam perhitungan total emisi dengan mengalikan jumlah kendaraan masing-masing jenis dengan faktor emisi yang relevan dan rata-rata jarak tempuhnya, sehingga diperoleh estimasi emisi polutan PM_{10} dari setiap ruas jalan yang dianalisis. Faktor emisi merujuk pada nilai faktor emisi yang ditetapkan dalam peraturan nasional, yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 12/2010 tentang Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut :

Tabel 3.4 Faktor emisi gas buang kendaraan untuk kota metropolitan dan kota besar

Kategori untuk perhitungan beban pencemar udara	**CO (g/km)**	**HC (g/km)**	**NO_x (g/km)**	**PM_{10} (g/km)**	**CO_2 (g/km)**	**SO_2 (g/km)**
Sepeda Motor	14	5,9	0,29	0,24	3180	0,08
Mobil (bensin)	40	4	2	0,01	3180	0,026
Mobil (solar)	2,8	0,2	3,5	0,53	3172	0,44
Mobil	32,4	3,2	2,3	0,12	3178	0,11
Bis	11	1,3	11,9	1,4	3172	0,93
Truk	8,4	1,8	17,7	1,4	3172	0,82

Sumber : Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.12/2010

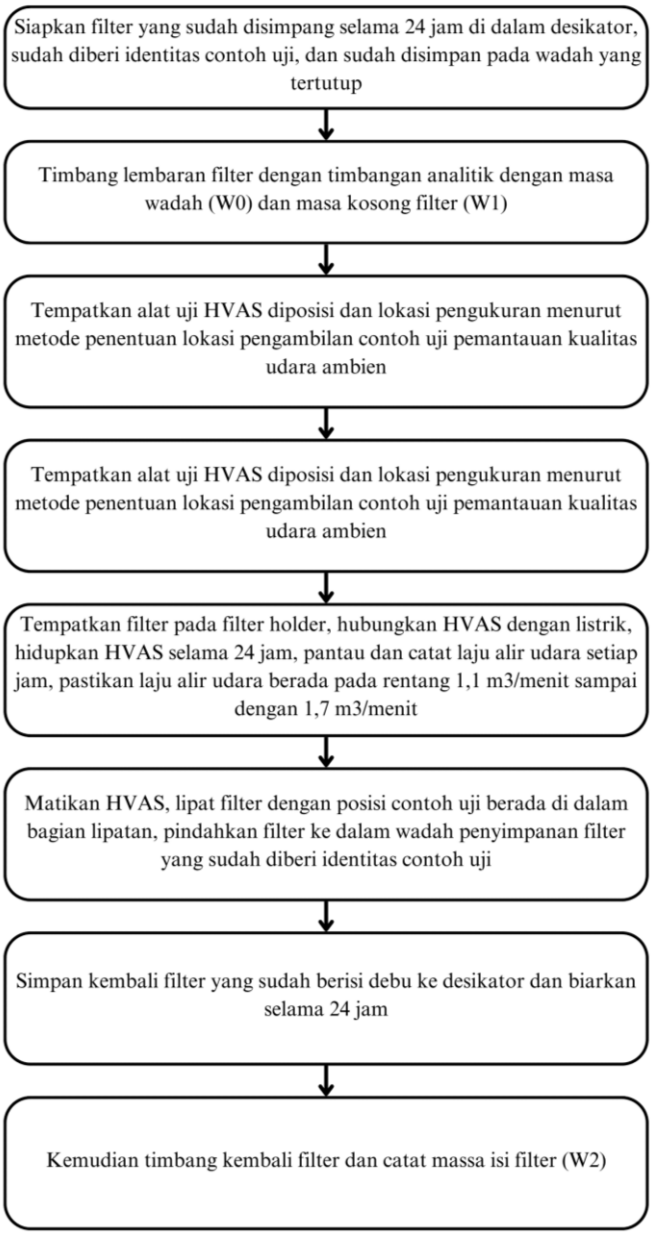
3.4.2 Analisis Konsentrasi PM_{10}

Konsentrasi PM_{10} di udara ambien akan dianalisis menggunakan prosedur pengujian di SNI 7119.15:2016 dengan metode gravimetri menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS) pada 3 titik lokasi yang telah di tentukan.

a. Prinsip Kerja

High Volume Air Sampler (HVAS) bekerja dengan prinsip mengisap udara dalam volume besar melalui media filter selama periode waktu tertentu. Udara ditarik menggunakan pompa berkapasitas tinggi melalui inlet yang dirancang untuk menyaring partikel dengan ukuran tertentu, dalam hal ini partikel yang berukuran ≤10 mikron (PM_{10}). Partikel-partikel ini kemudian tertahan pada filter fiber glass atau media serupa, sementara udara bersih dilepaskan kembali ke lingkungan.

b. Pengambilan Sample



Gambar 3.3 Alur Pengambilan Sample

c. Koreksi Laju Alir

Gas merupakan zat yang volumenya berubah dengan perubahan temperatur dan tekanan. Maka dalam menyatakan konsentrasi zat pencemar dalam udara digunakan kondisi standar yaitu, kondisi dimana volume udara ditetapkan dan kondisi tertentu , yang dinyatakan dengan kondisi standar. Koreksi laju alir berfungsi untuk mengoreksi laju alir terukur di lapangan dengan laju alir

standar (T=298 K). Contoh perhitungan koreksi laju alir udara ambien (SNI 7119.15:2016)

$$Q_S = Q_0 \times (\frac{T_S \times P_0}{T_0 \times P_S})^{\frac{1}{2}}$$ 3.3

Dimana:

Q_S = laju alir volume dikoreksi pada kondisi standar (Nm3/menit);

Q_0 = laju alir volume uji (m3/menit);

T_S = temperatur standar, 298 K;

T_0 = temperatur rata-rata aktual (273 + T ukur) dimana Q_0 ditentukan;

P_S = tekanan barometrik standar, 101.3 kPa (760 mmHg);

P_0 = tekanan barometrik rata-rata aktual dimana Q_0 ditentukan.

Kemudian dihitung dengan volume contoh uji udara, dengan rumus sebagai berikut:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{n} Qi}{n} \times t$$.....3.4

Dimana:

V = volume udara yang diambil (Nm^3)

Q_i = pencatatan laju alir ke-i (Nm^3/menit)

n = jumlah pencatatan laju alir

t = durasi pengambilan contoh uji (menit)

d. Perhitungan Konsentrasi PM_{10}

$$C = \frac{(W_2 - W_1) \times 10^6}{V}$$.....3.5

Dimana:

C = konsentrasi massa partikel tersuspensi (µg/Nm3);

W_1 = berat filter awal (g);

W_2 = berat filter akhir (g);

V = volume contoh uji udara (Nm3);

10^6 = konversi gram (g) ke mikrogram(µg).

3.4.3 Pengolahan AERMOD

AERMOD (American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model) merupakan model dispersi udara berbasis Gaussian yang digunakan untuk memprediksi sebaran polutan di atmosfer dari sumber titik, area, maupun garis. Model ini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:

a. AERMET (*Meteorological Preprocessor*)

AERMET berfungsi untuk mengolah data meteorologi, baik data permukaan (*surface*) maupun data profil udara atas (*upper air*), menjadi file standar yang dapat digunakan dalam pemodelan AERMOD. Proses ini mencakup koreksi suhu, tekanan, kecepatan dan arah angin, serta stabilitas atmosfer. AERMET sangat penting karena hasilnya menentukan bagaimana atmosfer memengaruhi sebaran polutan.

b. AERMAP (*Terrain Preprocessor*)

AERMAP digunakan untuk mengolah data topografi wilayah studi berdasarkan data elevasi dari Digital Elevation Model (DEM), seperti SRTM atau ASTER. Komponen ini menghitung ketinggian dari masing-masing receptor (titik penerima polutan) dan memperhitungkan pengaruh kontur medan terhadap pergerakan dan dispersi polutan. Output AERMAP akan digunakan langsung oleh AERMOD untuk memperbaiki akurasi hasil model di wilayah berbukit atau tidak datar

c. AERMOD (Model Inti Pemodelan)

AERMOD merupakan inti dari sistem pemodelan yang mengintegrasikan data emisi, meteorologi, dan topografi untuk mensimulasikan sebaran polutan di udara ambien. Model ini menghasilkan output berupa peta sebaran dan nilai konsentrasi rata-rata polutan (dalam $\mu g/m^3$) di berbagai titik receptor. AERMOD dapat digunakan untuk mengevaluasi kepatuhan terhadap baku mutu udara ambien serta untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan kualitas udara.

3.4.4 Uji Validasi Model

Validasi model adalah proses untuk mengevaluasi seberapa baik model yang dibangun dapat memprediksi data aktual. Untuk membandingkan hasil model dengan hasil sampling digunakan rumus valdasi RMSPE (*Root Mean Square*

Percent Error). Metode ini digunakan untuk mengkuantifikasi beasa dan sifat error yang terjadi, RMSPE mengukur rata-rata prosentase perbedaan antara data aktual dan hasil simulasi model. Berikut adalah rumus RMSPE:

$$RSMPE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{St-At}{At}\right)^2} \times$$

100% 3.6

Dimana:

St = Nilai konsentrasi simulasi pada waktu t

At = Nilai konsentrasi aktual pada waktu t

n = Jumlah titik pengukuran

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Kondisi Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah perkotaan Kota Yogyakarta dengan cakupan wilayah utama di pusat kota dan sekitarnya. Secara administratif, terdapat sebelas ruas jalan yang menjadi fokus lokasi penelitian, yaitu: Jalan Jend. Sudirman, Jalan Urip Sumoharjo, Jalan Laksda Adisucipto, Jalan Timoho, Jalan Ipda Tut Harsono, Jalan Kusumanegara, Jalan Sultan Agung, Jalan Suryopranoto, Jalan Dr. Sutomo, Jalan Dr. Wahidin Sudirohusodo, dan Jalan Panembahan Senopati. Dari keseluruhan lokasi tersebut, satu ruas jalan, yakni Jalan Laksda Adisucipto, sebagian besar berada dalam wilayah administratif Kabupaten Sleman, sedangkan sisanya terletak di wilayah Kota Yogyakarta. Pemilihan lokasi ini mempertimbangkan karakteristik kawasan yang representatif terhadap kondisi lalu lintas, tata ruang perkotaan, serta tingkat aktivitas antropogenik yang tinggi.

Dari sebelas ruas jalan yang menjadi fokus penelitian, tiga diantaranya dipilih menjadi lokasi untuk pengambilan sample partikulat PM_{10} secara langsung menggunakan HVAS, yakni;

1. Jalan Jend. Sudirman, merupakan salah satu koridor utama lalu lintas di pusat Kota Yogyakarta yang menghubungkan berbagai titik penting seperti Malioboro, kawasan bisnis, serta area perkantoran dan pendidikan. Aktivitas kendaraan bermotor di sepanjang jalan ini sangat tinggi, terutama pada jam sibuk pagi dan sore hari. Kepadatan lalu lintas yang konstan menjadikan lokasi ini sangat representatif untuk pengambilan sampel udara, khususnya dalam mengamati emisi dari transportasi. Selain itu, keberadaan persimpangan besar dan banyaknya lampu merah juga berkontribusi pada peningkatan konsentrasi polutan akibat akumulasi emisi kendaraan yang berhenti dan berjalan secara berulang.
2. Jalan Laksda Adisucipto, adalah jalur utama penghubung antara Kota Yogyakarta dengan Bandara Internasional Adisutjipto serta kawasan Sleman di sebelah timur. Jalan ini merupakan jalan protokol dengan volume kendaraan berat dan ringan yang sangat tinggi karena menjadi

akses utama ke luar kota. Selain kendaraan pribadi dan angkutan umum, jalur ini juga dilewati oleh kendaraan logistik dan travel antar-kota. Tingginya intensitas lalu lintas sepanjang hari, termasuk malam, menjadikan lokasi ini sangat penting untuk menggambarkan karakteristik polusi udara dari aktivitas transportasi regional.

3. Jalan Suryopranoto, dekat dengan kawasan perkantoran pemerintahan dan fasilitas umum seperti Stadion Mandala Krida, fasilitas pendidikan baik itu SMA dan Universitas serta kantor-kantor dinas provinsi. Meskipun tidak sepadat Jalan Jend. Sudirman, jalan ini tetap mengalami lonjakan volume kendaraan, terutama saat jam berangkat dan pulang kerja. Lingkungannya yang semi-perkotaan, dengan perpaduan antara kawasan pemukiman, ruang terbuka, dan aktivitas kendaraan yang cukup padat, menjadikannya ideal untuk melihat perbedaan konsentrasi polutan pada area yang memiliki mobilitas tinggi namun tidak sepadat pusat kota

Ketiga lokasi ini dipilih berdasarkan survei yang telah dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa hal seperti tempat yang strategis, biaya, ketersediaan atau perizinan tempat untuk penempatan alat dan pengambilan sample, durasi pengambilan sample, serta keterbatasan sumber listrik.

4.2 Hasil Sampling Perhitungan Volume Kendaraan

Pengumpulan data volume lalu lintas dilakukan pada 3 hari berbeda, yaitu Minggu, 27 April 2025; Kamis, 1 Mei 2025; serta Minggu, 4 Mei 2025. Pengamatan ini dilaksanakan bertepatan dengan kegiatan pengambilan sampel PM_{10} pada waktu-waktu sibuk atau jam padat kendaraan, yaitu pukul 08.00–09.00, 12.00–13.00, dan 16.00–17.00. Data volume kendaraan dihitung secara manual melalui analisis rekaman CCTV yang terpasang di berbagai titik di wilayah Kota Yogyakarta.

Total terdapat 11 lokasi pemantauan, terdiri dari 3 titik jalan primer dan 8 titik jalan sekunder. Klasifikasi jenis kendaraan mengacu pada ketentuan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 12 Tahun 2010 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, yang mencakup lima kategori: sepeda motor, mobil berbahan bakar bensin, mobil berbahan bakar solar, truk, dan bus. Rata-rata volume

kendaraan selama periode pemantauan tiga hari tersebut ditampilkan pada Tabel 4.1

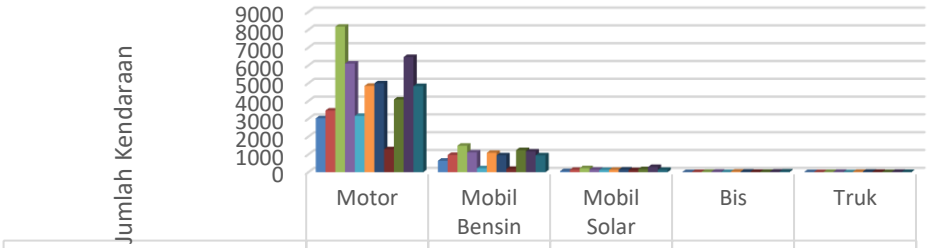
Tabel 4.1 Volume Kendaraan

Nama titik	Waktu	Tipe Kendaraan					Jumlah	Nama titik	Waktu	Tipe Kendaraan					Jumlah
		1	2	3	4	5				1	2	3	4	5	
		Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bis	Truk				Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bis	Truk	
Jl Ipda Tut Harsono	Pagi	3445	719	57	10	10	4241	Jl Sultan Agung	Pagi	4726	765	84	20	15	5610
	Siang	2652	583	60	5	3	3303		Siang	4929	977	177	29	32	6144
	Sore	2984	634	53	9	7	3687		Sore	5325	1109	182	45	32	6693
	Total	9081	1936	170	24	20	11231		Total	14980	2851	443	94	79	18447
Jl Urip Sumoharjo	Pagi	6272	1022	132	17	11	7454	Jl Suryapranopto	Pagi	1324	275	136	17	14	1766
	Siang	2630	1218	220	13	7	4088		Siang	1132	121	97	23	19	1392
	Sore	1495	663	54	17	2	2231		Sore	1423	164	105	26	19	1737
	Total	10397	2903	406	47	20	13773		Total	3879	560	338	66	52	4895
Jl Laksda Adisucipto	Pagi	8198	1597	240	23	16	10074	Jl Dr. Sutomo	Pagi	4153	1321	142	17	6	5639
	Siang	7768	1267	185	17	11	9248		Siang	3822	1112	176	15	8	5133
	Sore	8567	1602	263	23	17	10472		Sore	4278	1291	193	18	7	5787
	Total	24533	4466	688	63	44	29794		Total	12253	3724	511	50	21	16559
Jl Timoho	Pagi	6578	1325	165	32	20	8120	Jl Dr. Wahidin	Pagi	7203	1235	326	35	26	8825
	Siang	5136	986	127	27	16	6292		Siang	5624	1065	258	25	18	6990
	Sore	6602	1012	138	30	15	7797		Sore	6584	1198	294	31	22	8129
	Total	18316	3323	430	89	51	22209		Total	19411	3498	878	91	66	23944
Jl Jendral Sudirman	Pagi	3127	227	114	8	3	3479	Jl Panembahan Senopati	Pagi	6634	891	103	27	11	7666
	Siang	2528	146	98	9	6	2787		Siang	4992	1168	192	54	29	6435
	Sore	3826	286	164	12	0	4288		Sore	2898	781	104	38	4	3825
	Total	9481	659	376	29	9	10554		Total	14524	2840	399	119	44	17926
Jl Kusumanegara	Pagi	6623	1232	132	43	33	8063								
	Siang	3253	899	145	24	19	4340								
	Sore	4678	1143	120	39	16	5996								
	Total	14554	3274	397	106	68	18399								

Berdasarkan data yang ditampilkan pada tabel, volume kendaraan tertinggi tercatat di Jalan Laksda Adisucipto dengan total 29.794 kendaraan selama waktu pengamatan. Jumlah ini disusul oleh Jalan Dr. Wahidin dengan 23.944 kendaraan, serta Jalan Timoho dengan 22.209 kendaraan. Tingginya volume kendaraan di ruas-ruas jalan ini mencerminkan peran strategis sebagai jalur utama yang menghubungkan kawasan penting di Kota Yogyakarta, seperti area kampus, rumah sakit, area wisata, serta pusat perbelanjaan. Oleh karena itu, intensitas lalu lintas di ketiga ruas ini cenderung tinggi, khususnya pada jam-jam sibuk pagi dan sore hari.

Sebaliknya, volume kendaraan terendah ditemukan di Jalan Suryapranoto, dengan total hanya 4.895 kendaraan selama periode pengamatan. Rendahnya volume ini dapat dikaitkan dengan fungsi jalan tersebut yang kemungkinan besar bukan merupakan jalur utama atau hanya berfungsi sebagai jalan lokal dengan lalu lintas terbatas. Distribusi volume kendaraan yang tidak merata ini menunjukkan adanya konsentrasi lalu lintas pada jalan-jalan utama, sementara jalan-jalan sekunder cenderung lebih sepi.

Pemahaman terhadap pola ini sangat penting dalam konteks pemodelan pencemaran udara, khususnya untuk gas buang kendaraan bermotor. Lokasi dengan volume tinggi akan menjadi titik penting yang berpotensi memiliki konsentrasi polutan lebih besar, sehingga perlu diprioritaskan dalam strategi pengendalian emisi dan perencanaan transportasi berkelanjutan di Kota Yogyakarta.. Rekapitulasi rata-rata volume kendaraan selama 3 hari ditampilkan pada gambar 4.1 berikut.



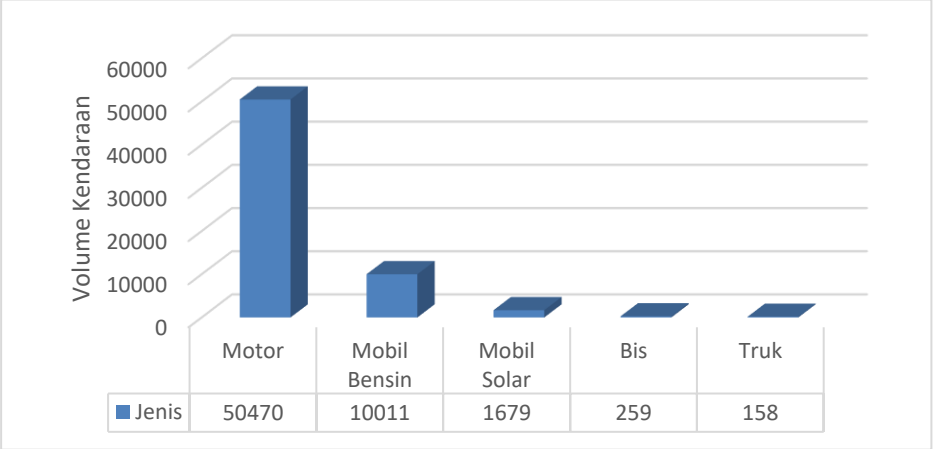
	Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bis	Truk
1 Jl Ipda Tut S	3027	645	57	8	7
2 Jl Urip Sumoharjo	3466	968	135	16	7
3 Jl Laksda Adisucipto	8178	1489	229	21	15
4 Jl Timoho	6105	1108	143	30	17
5 Jl Jend Sudirman	3160	220	125	10	3
6 Jl Kusumanegara	4851	1091	132	35	23
7 Jl Sultan Agung	4993	950	148	31	26
8 Jl Suryapranoto	1293	187	113	22	17
9 Jl Dr. Sutomo	4084	1241	170	17	7
10 Jl Dr wahidin	6470	1166	293	30	22
11 Jl Panembahan Senopati	4841	947	133	40	15

Gambar 4.1 Rekapitulasi rata-rata volume kendaraan

Berdasarkan data terbaru yang diperoleh dari dashboard *Electronic Registration and Identification* (ERI) Korlantas Polri per tanggal 21 Juli 2025, jumlah total kendaraan bermotor tercatat sebanyak 717.604 unit. Jumlah tersebut didominasi oleh sepeda motor sebanyak 596.717 unit, diikuti oleh mobil penumpang sebanyak 104.551 unit, mobil beban sebanyak 14.836 unit, bus sebanyak 1.136 unit, dan kendaraan khusus (ransus) sebanyak 326 unit. Sementara itu, dalam publikasi Buku Yogyakarta dalam Angka 2024, tercatat bahwa jumlah kendaraan di Yogyakarta pada tahun 2023 mencapai 298.139 unit, dengan dominasi tertinggi juga berasal dari sepeda motor sebanyak 237.505 unit, kemudian mobil penumpang sebanyak 52.586 unit, mobil beban sebanyak 7.255 unit, dan bus sebanyak 793 unit.

Peningkatan jumlah kendaraan dari tahun ke tahun merupakan hal yang umum terjadi seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan ekonomi, serta meningkatnya mobilitas masyarakat. Kendaraan roda dua tetap menjadi pilihan utama masyarakat karena harganya yang lebih terjangkau, kemudahan dalam operasional, serta lebih fleksibel digunakan di wilayah perkotaan yang memiliki tingkat kepadatan tinggi. Sementara itu, jumlah kendaraan roda empat, seperti mobil penumpang dan mobil beban, cenderung lebih sedikit karena

keterkaitan dengan daya beli masyarakat, kebutuhan spesifik, serta infrastruktur pendukung yang terbatas, seperti lahan parkir dan jalan yang sempit. Perbandingan jumlah kendaraan berdasarkan jenis dapat dilihat pada gambar



Gambar 4.2 Perbandingan Jumlah Kendaraan Berdasarkan Jenis

Informasi mengenai jumlah dan jenis kendaraan yang melintas memberikan indikasi nyata terhadap tingkat aktivitas transportasi di suatu wilayah. Data ini sangat penting dalam proses inventarisasi emisi karena menjadi dasar untuk mengidentifikasi potensi pelepasan polutan, termasuk partikulat PM_{10}, dari sektor transportasi. Dengan mengetahui volume kendaraan yang melintas, terutama pada jam-jam sibuk, peneliti dapat memperkirakan besarnya emisi yang dihasilkan dan menggunakannya sebagai input dalam pemodelan sebaran konsentrasi PM_{10} di udara ambien. Hasil pemodelan ini kemudian dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas udara di wilayah penelitian serta mengkaji potensi dampaknya terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan.

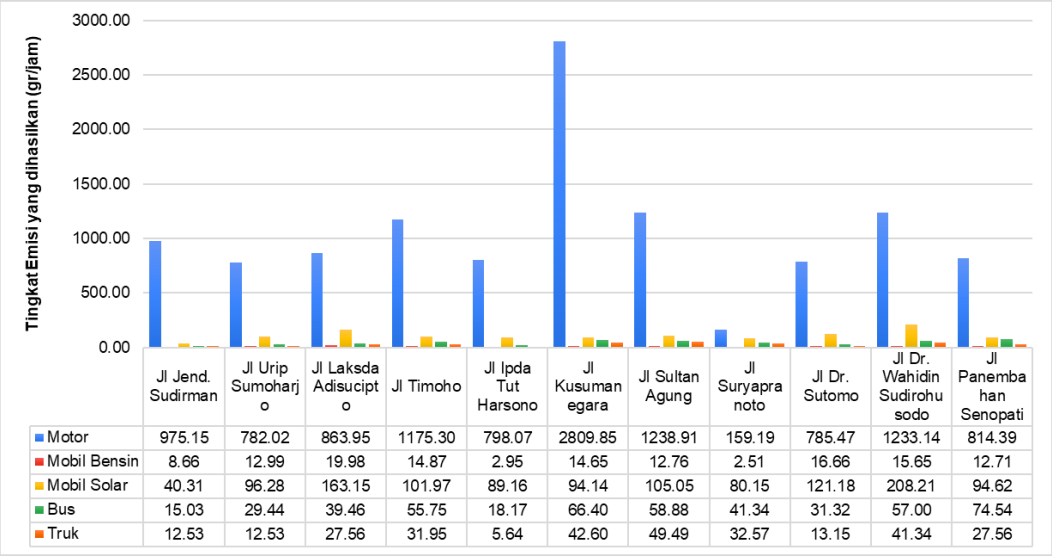
Dalam analisis konsentrasi PM_{10} pada jalan primer, perhitungan jumlah kendaraan dilakukan secara bersamaan dengan kegiatan pengambilan sampel di tiga titik lokasi utama yang telah ditetapkan, yaitu di Jalan Jendral Sudirman, Jalan Laksda Adisucipto, dan Jalan Ipda Tut Harsono, sebagaimana ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 4.2 Inventarisasi Emisi Lokasi

Nama titik	Waktu	Tipe Kendaraan					Jumlah
		1	2	3	4	5	
		Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bis	Truk	
Minggu, 27 April 2025							
Jl Jendral Sudirman	Pagi	3127	227	114	8	3	3479
	Siang	2528	146	98	9	6	2787
	Sore	3826	286	164	12	0	4288
	Total	9481	659	376	29	9	10554
Kamis, 1 Mei 2025							
Jl Laksda Adisucipto	Pagi	8198	1597	240	23	16	10074
	Siang	7768	1267	185	17	11	9248
	Sore	8567	1602	263	23	17	10472
	Total	24533	4466	688	63	44	29794
Selasa, 6 Mei 2025							
Jl Ipda Tut Sudarsono	Pagi	3445	719	57	10	10	4241
	Siang	2652	583	60	5	3	3303
	Sore	2984	634	53	9	7	3687
	Total	9081	1936	170	24	20	11231

4.3 Inventarisasi Emisi

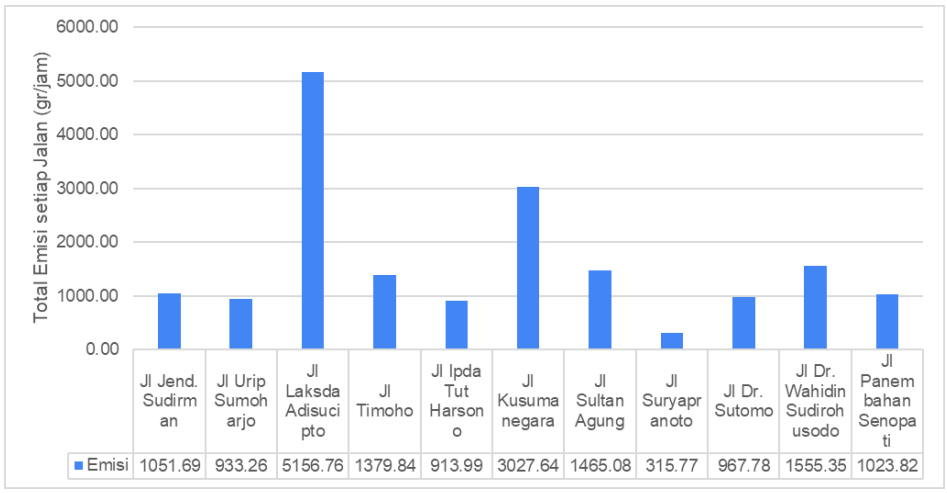
Metode yang digunakan adalah dengan menghitung beban emisi berdasarkan jumlah kendaraan yang melintasi lokasi pengamatan dan dikalikan dengan faktor emisi dari masing-masing jenis kendaraan. Data volume lalu lintas diperoleh melalui survei langsung di lapangan, sehingga mencerminkan kondisi aktual. Faktor emisi sendiri merupakan nilai representatif yang menunjukkan banyaknya partikel pencemar yang dilepaskan ke udara akibat suatu aktivitas, dalam hal ini kendaraan bermotor, sebagaimana tercantum pada tabel 3.4. Acuan faktor emisi mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, yang menjadi dasar resmi dalam pelaksanaan inventarisasi emisi di Indonesia. Dengan menggabungkan data jumlah kendaraan dan nilai faktor emisinya, maka beban emisi PM_{10} dapat dihitung dan dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui potensi kontribusinya terhadap kualitas udara. Berikut merupakan hasil dari perhitungan inventarisasi emisi di setiap jalan penelitian dengan faktor emisi masing-masing jenis kendaraan yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 dibawah ini.



	Jl Jend. Sudirman	Jl Urip Sumoharjo	Jl Laksda Adisucipto	Jl Timoho	Jl Ipda Tut Harsono	Jl Kusumanegara	Jl Sultan Agung	Jl Suryapranoto	Jl Dr. Sutomo	Jl Dr. Wahidin Sudirohusodo	Jl Panembahan Senopati
Motor	975.15	782.02	863.95	1175.30	798.07	2809.85	1238.91	159.19	785.47	1233.14	814.39
Mobil Bensin	8.66	12.99	19.98	14.87	2.95	14.65	12.76	2.51	16.66	15.65	12.71
Mobil Solar	40.31	96.28	163.15	101.97	89.16	94.14	105.05	80.15	121.18	208.21	94.62
Bus	15.03	29.44	39.46	55.75	18.17	66.40	58.88	41.34	31.32	57.00	74.54
Truk	12.53	12.53	27.56	31.95	5.64	42.60	49.49	32.57	13.15	41.34	27.56

Gambar 4.3 Nilai Hasil Faktor Emisi Berdasarkan Jenis Kendaraan

Mengacu pada Gambar 4.3, perhitungan emisi dari semua kategori kendaraan mulai dari sepeda motor, mobil berbahan bakar bensin, mobil diesel, bus, hingga truk dilakukan dengan pendekatan seragam, yaitu mengalikan nilai *Vehicle Kilometers Traveled* (VKT) dengan faktor emisi (FE) spesifik untuk masing-masing jenis kendaraan. Setelah itu, jumlah total emisi PM_{10} diperoleh dengan menjumlahkan kontribusi emisi dari setiap tipe kendaraan yang melintas di tiap ruas jalan, sebagaimana dapat dilihat dalam Gambar 4.4.



	Jl Jend. Sudirman	Jl Urip Sumoharjo	Jl Laksda Adisucipto	Jl Timoho	Jl Ipda Tut Harsono	Jl Kusumanegara	Jl Sultan Agung	Jl Suryapranoto	Jl Dr. Sutomo	Jl Dr. Wahidin Sudirohusodo	Jl Panembahan Senopati
Emisi	1051.69	933.26	5156.76	1379.84	913.99	3027.64	1465.08	315.77	967.78	1555.35	1023.82

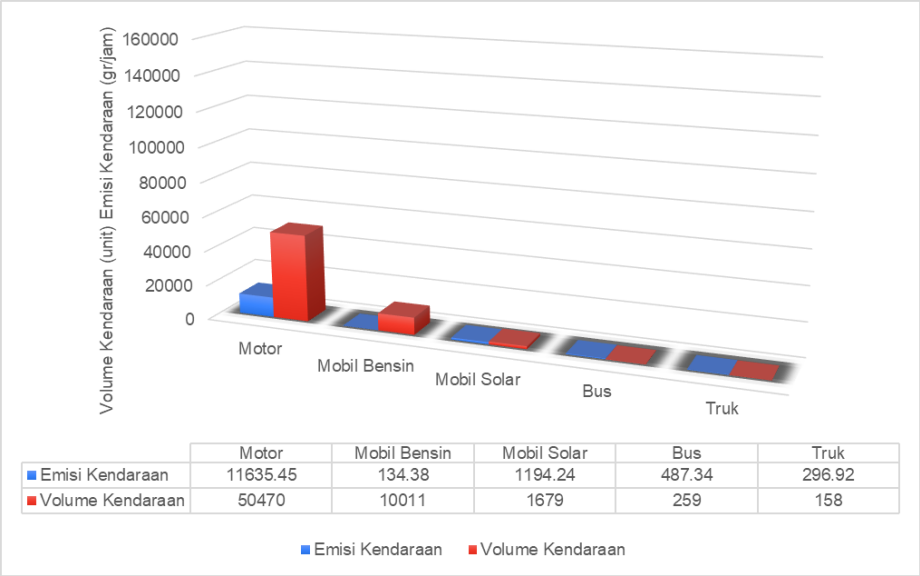
Gambar 4.4 Total Emisi Setiap Jalan

Dari hasil analisis, total emisi yang dihasilkan dari berbagai ruas jalan di wilayah penelitian menunjukkan variasi yang mencolok. Ruas jalan dengan kontribusi emisi tertinggi adalah Jl. Laksda Adi Sucipto dengan nilai mencapai 5156.76 gr/jam, yang jauh melampaui ruas jalan lainnya. Tingginya emisi pada jalan ini mengindikasikan adanya volume lalu lintas yang padat, serta dominasi kendaraan bermotor terutama sepeda motor dan mobil berbahan bakar solar, yang dikenal menghasilkan emisi partikulat (PM_{10}) lebih tinggi. Jalan ini juga merupakan jalur penghubung utama dengan aktivitas komersial yang tinggi, sehingga lalu lintas kendaraan logistik seperti truk dan mobil beban turut berkontribusi pada besarnya nilai emisi.

Ruas-ruas jalan lain dengan emisi tinggi antara lain Jl. Kusumanegara (3027,64 gr/jam), Jl. Dr. Wahidin Sudirohusodo (1555,35 gr/jam), Jl. Sultan Agung (1465,08 gr/jam) . Ketiganya merupakan koridor yang cukup aktif, dilalui oleh kombinasi kendaraan pribadi dan angkutan umum, serta memiliki arus lalu lintas dua arah yang padat selama jam sibuk. Di lokasi-lokasi ini, sepeda motor masih menjadi kendaraan paling dominan, sesuai dengan data volume kendaraan sebelumnya, namun kehadiran kendaraan berbahan bakar solar juga turut memengaruhi besaran emisi.

Sebaliknya, ruas seperti Jl. Suryopranoto mencatatkan nilai emisi paling rendah, yakni 315,77 gr/jam. Rendahnya emisi di jalan ini kemungkinan besar disebabkan oleh arus lalu lintas yang lebih terbatas, jenis kendaraan yang didominasi oleh mobil penumpang atau motor dalam jumlah sedang, serta tidak adanya jalur angkutan berat. Demikian pula, Jl. Ipda Tut Harsono (913.99 gr/jam) dan Jl. Urip Sumoharjo (933.26 gr/jam) juga menunjukkan angka emisi yang relatif lebih rendah dibandingkan rata-rata, mengindikasikan bahwa aktivitas kendaraan di sana lebih terkendali atau bersifat lokal.

Distribusi total emisi ini memberikan gambaran nyata mengenai tingkat pencemaran udara dari sektor transportasi di berbagai titik strategis. Selain itu, dominasi kendaraan sepeda motor yang jumlahnya sangat besar namun menghasilkan emisi dalam skala yang tetap signifikan, dapat dilihat pada gambar



	Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bus	Truk
Emisi Kendaraan	11635.45	134.38	1194.24	487.34	296.92
Volume Kendaraan	50470	10011	1679	259	158

Gambar 4.5 Perbandingan Volume Kendaraan dengan Emisi Kendaraan

Berdasarkan data perbandingan antara volume kendaraan dan total emisi yang dihasilkan, terlihat bahwa sepeda motor merupakan jenis kendaraan dengan volume tertinggi, yakni sebanyak 50470 unit, namun emisi yang dihasilkan sebesar 11635,45 gr/jam relatif masih sebanding dengan jumlahnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sepeda motor umumnya menghasilkan emisi lebih rendah per unit dibanding kendaraan berbahan bakar solar, dominasi jumlahnya secara keseluruhan menyebabkan kontribusinya terhadap total emisi menjadi yang tertinggi. Di sisi lain, mobil bensin dan mobil solar masing-masing berjumlah 10011 unit dan 1679 unit, namun menghasilkan emisi yang cukup berbeda secara signifikan, yakni 134,38 gr/jam untuk mobil bensin dan 1194,24 gr/jam untuk mobil solar.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa mobil berbahan bakar solar memiliki faktor emisi yang jauh lebih tinggi, meskipun volume kendaraannya jauh lebih sedikit. mobil solar yang jumlahnya hanya 1679 unit, menghasilkan emisi 1194,24 gram, yakni hampir 9 kali lipat emisi mobil bensin. Ini mengindikasikan bahwa faktor emisi mesin diesel jauh lebih tinggi. Sektor transportasi khususnya kendaraan diesel menyumbang peningkatan kadar partikulat seperti PM_{10} karena karakteristik pembakaran tidak sempurna dan kandungan sulfur bahan bakar yang tinggi . (Haryanto, 2018),

Selain itu, kendaraan berat seperti bus dan truk, meskipun volumenya relatif sangat kecil dibandingkan jenis kendaraan lain (masing-masing hanya 259 dan 158

unit), justru menyumbang emisi yang cukup besar yaitu 487,34 gr/jam dan 296,92 gr/jam. Hal ini disebabkan oleh faktor emisi kendaraan berat yang sangat tinggi, karena penggunaan mesin diesel berkapasitas besar dan durasi operasional yang lama. Dalam konteks ini, kontribusi emisi tidak selalu bergantung pada kuantitas kendaraan, tetapi sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakar, teknologi mesin, dan pola operasional. Hal ini diperkuat dalam studi oleh Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (BAPEDAL) dan Kementerian Lingkungan Hidup yang menyebutkan bahwa meskipun kendaraan diesel hanya menyumbang sekitar 20% dari populasi kendaraan.

4.4 Hasil Sampling Meteorologi

Pengambilan data meteorologi pada saat sampling partikulat PM_{10} dilakukan untuk mengetahui kondisi atmosfer yang dapat memengaruhi penyebaran dan konsentrasi polutan di udara. Parameter meteorologi yang diamati meliputi suhu udara (°C), tekanan udara (mmHg), kelembaban relatif (%), arah dan kecepatan angin (m/s), serta waktu dan lokasi pengambilan sampel. Pengamatan dilakukan di tiga titik lokasi utama, yaitu Jalan Jenderal Sudirman, Jalan Laksda Adisucipto, dan Jalan Ipda Tut Harsono, pengukuran dilakukan dengan thermo-hygro-barometer, dengan interval 1 jam selama 24 jam.

Kondisi meteorologis sangat penting diperhatikan dalam proses sampling karena dapat mempengaruhi akurasi pengukuran konsentrasi PM_{10}. Misalnya, suhu dan tekanan udara digunakan dalam rumus koreksi standar (Qs) untuk menyesuaikan laju alir udara pada kondisi standar, sehingga hasil perhitungan konsentrasi partikulat menjadi lebih representatif. Selain itu, kecepatan dan arah angin yang tidak terkontrol berpotensi mendispersikan atau mengakumulasi partikel di udara ambien. Oleh karena itu, pemantauan data meteorologi secara bersamaan dengan pengambilan sampel partikulat memberikan gambaran menyeluruh terkait kondisi kualitas udara dan mendukung validitas hasil penelitian.

Berikut adalah hasil rata-rata data meteorologi yang diambil dari tiga lokasi primer:

Tabel 4.2 Hasil Rata-rata Data Meteorologi

Titik Lokasi	Kelembaban (%RH)	Suhu (C)	Tekanan Udara (mmHg)	Kecepatan Angin (m/s)
Jl Jendral Sudirman	76.16	29.1	744.2	1.1
Jl IpdaTut Harsono	100.48	28.1	746.39	3.6
Jl Laksda Adisucipto	65.01	29.47	755.67	0.95

Berdasarkan hasil sampling meteorologi yang dilakukan di tiga lokasi, yaitu Jl. Jendral Sudirman, Jl. Ipda Tut Harsono, dan Jl. Laksda Adisucipto, terdapat variasi nilai kelembaban relatif, suhu udara, tekanan udara, dan kecepatan angin yang dapat memengaruhi konsentrasi PM_{10} di atmosfer. Lokasi Jl. Ipda Tut Harsono menunjukkan kelembaban tertinggi sebesar 100,48% dan kecepatan angin 3,6 m/s, sedangkan lokasi dengan kelembaban terendah adalah Jl. Laksda Adisucipto sebesar 65,01%. Kelembaban udara yang tinggi cenderung meningkatkan higroskopisitas partikel, menyebabkan partikel tersuspensi seperti PM_{10} membesar dan bertahan lebih lama di udara. Namun, kecepatan angin yang tinggi di lokasi ini dapat memberikan efek sebaliknya, yaitu membantu proses difusi dan dispersi partikel, sehingga dapat menurunkan konsentrasi lokal PM_{10} (Mahapatra & Biswal, 2018).

Selain itu, hasil pengukuran tekanan udara juga menunjukkan perbedaan signifikan, dengan nilai tertinggi tercatat di Jl. Laksda Adisucipto (755,67 mmHg) dan terendah di Jl. Jendral Sudirman (744,2 mmHg). Tekanan udara yang tinggi dapat mengindikasikan stabilitas atmosfer yang lebih kuat, sehingga memperlambat pencampuran vertikal dan menyebabkan akumulasi polutan di lapisan bawah atmosfer (Yang dkk, 2017). Kecepatan angin yang rendah pada Jl. Laksda Adisucipto (0,95 m/s) mendukung kondisi ini, yang memungkinkan peningkatan konsentrasi PM_{10} akibat stagnasi udara. Sebaliknya, kondisi angin yang lebih cepat di Jl. Ipda Tut Harsono memungkinkan peningkatan ventilasi atmosfer yang lebih baik, sehingga berdampak pada penurunan konsentrasi PM_{10} di wilayah tersebut (Ziernicka dkk, 2024). Oleh karena itu, interaksi antara parameter-parameter meteorologi secara kolektif memengaruhi perilaku sebaran PM_{10} di atmosfer.

4.5 Hasil Perhitungan PM_{10}

Pengukuran konsentrasi PM_{10} di lapangan dilakukan menggunakan alat High Volume Air Sampler (HVAS), yang berfungsi untuk mengumpulkan partikel tersuspensi dari udara ambien selama periode waktu tertentu. Sampel partikel yang tertangkap ditampung pada media filter (biasanya berupa kertas fiberglass), yang kemudian dianalisis di laboratorium. Analisis dilakukan dengan metode gravimetri, yaitu dengan menimbang berat filter sebelum dan sesudah sampling untuk mengetahui massa partikel yang tertangkap.

Selisih massa tersebut kemudian digunakan dalam perhitungan konsentrasi PM_{10} di udara ambien, dengan mempertimbangkan volume udara yang telah disaring oleh alat selama proses pengambilan sampel. Konsentrasi PM_{10} dinyatakan dalam satuan mikrogram per meter kubik (µg/Nm³). Proses ini sesuai dengan metode pengujian yang tertuang dalam SNI 7119.15:2016 mengenai pengukuran partikulat total di udara ambien.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan PM_{10} Konsentrasi pada Lokasi Sampling

Titik Lokasi	Koordinat	V (m^3)	W_1 (g)	W_2 (g)	ΔW (g)	Konsentrasi (µg/Nm^3)	Baku Mutu
Jl Jendral Sudirman	7°46'59"S 110°22'28"E	1728	3.53	3.632	0.099	57.23	75
Jl IpdaTut Harsono	7°47'54"S 110°23'33"E	1728	3.55	3.661	0.113	65.10	75
Jl Laksda Adisucipto	7°46'59"S 110°24'31"E	1728	3.51	3.722	0.215	124.31	75

Pengukuran konsentrasi PM_{10} di lakukan pada tiga titik lokasi, yakni, Jl. Jendral Sudirman, Jl. Ipda Tut Harsono dan Jl. Laksda Adisucipto. Nilai konsentrasi PM_{10} masing-masing adalah 57,23 µg/Nm^3 dan 65,10 µg/Nm^3 untuk Jl. Jendral Sudirman, Jl. Ipda Tut Harsono, masih berada di bawah ambang batas baku mutu PM_{10} harian sebesar 75 µg/Nm^3 sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 22 tahun 2021. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas udara di kedua lokasi tersebut masih tergolong memenuhi standar kualitas udara ambien nasional dan belum memberikan dampak signifikan terhadap kesehatan masyarakat dalam jangka pendek.

Namun, berbeda dengan kondisi di Jl. Laksda Adisucipto, yang menunjukkan nilai konsentrasi sebesar 124,31 µg/Nm³. Angka ini telah melebihi baku mutu yang ditetapkan, yaitu 75 µg/Nm³, yang mengindikasikan terjadinya pencemaran udara oleh partikulat PM_{10}. Konsentrasi yang melebihi ambang batas ini dapat disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor meteorologis, seperti stagnasi udara akibat kecepatan angin yang rendah (0,95 m/s), tekanan udara yang tinggi (755,67 mmHg), serta kelembaban yang relatif rendah (65,01%) yang memperlambat proses pengendapan partikel di udara (Mahapatra & Biswal, 2018). Selain itu, kondisi riil di lapangan menunjukkan bahwa Jl. Laksda Adisucipto merupakan koridor transportasi utama yang menghubungkan kawasan kota dengan bandara dan pusat kegiatan komersial, sehingga volume kendaraan yang melintas relatif tinggi, termasuk kendaraan berat seperti bus dan truk logistik.

Selain itu, lingkungan sekitar yang dikelilingi bangunan yang padat pemukiman menyebabkan terbatasnya ruang sirkulasi udara, sehingga polutan cenderung terperangkap di lapisan bawah atmosfer. Akumulasi partikel-partikel halus ini berpotensi meningkatkan risiko gangguan pernapasan dan penyakit kardiovaskular, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit kronis. Oleh karena itu, diperlukan upaya mitigasi seperti pembatasan kendaraan emisi tinggi, pengaturan waktu operasional kendaraan berat, penghijauan tepi jalan, serta pemantauan kualitas udara secara berkala di wilayah tersebut



Gambar 4.6 Perbandingan Konsentrasi PM_{10} dan Baku Mutu di lokasi sampling

Berdasarkan hasil pengukuran konsentrasi PM_{10} di tiga lokasi, yaitu Jl. Jendral Sudirman, Jl. Ipda Tut Harsono, dan Jl. Laksda Adisucipto, diperoleh nilai konsentrasi sebesar 57,23 µg/Nm³, 65,10 µg/Nm³, dan 124,31 µg/Nm³ secara berturut-turut. Dari ketiga lokasi tersebut, hanya Jl. Laksda Adisucipto yang menunjukkan nilai konsentrasi PM_{10} melebihi baku mutu udara ambien harian berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, yaitu sebesar 75 µg/Nm³.

Perbedaan konsentrasi PM_{10} ini dapat dijelaskan dengan mempertimbangkan dua faktor utama, yaitu kondisi meteorologi dan volume kendaraan bermotor. Data meteorologi menunjukkan bahwa lokasi Jl. Laksda Adisucipto memiliki kecepatan angin paling rendah (0,95 m/s), sementara suhu dan kelembaban relatifnya juga menunjukkan kisaran yang mendukung kestabilan atmosfer. Kecepatan angin rendah menyebabkan dispersi polutan yang terbatas, sehingga emisi partikel cenderung mengendap dan bertahan di udara lebih lama (Seinfeld & Pandis, 2016). Selain itu, tekanan udara di titik ini tercatat paling tinggi, yaitu 755,67 mmHg. Tekanan udara tinggi berasosiasi dengan kondisi atmosfer stabil, di mana vertikal mixing udara terbatas dan distribusi polutan terkonsentrasi di permukaan (Arya, 1999). Hal ini menguatkan bahwa parameter meteorologi memiliki kontribusi penting terhadap dinamika penyebaran polutan partikulat.

Di sisi lain, pengaruh volume kendaraan terhadap konsentrasi PM_{10} juga sangat signifikan. Dari data volume kendaraan yang dikumpulkan, terlihat bahwa sepeda motor mendominasi jumlah kendaraan dengan total 50470 unit. Sepeda motor juga tercatat menghasilkan emisi PM_{10} terbesar, yaitu sebesar 11635.45 g/jam dibandingkan dengan jenis kendaraan lain seperti mobil bensin (134.38 g/jam), mobil solar (1194,24), bus (487,34 g/jam), dan truk (296,92 g/jam). Jumlah kendaraan yang tinggi meningkatkan laju emisi langsung ke udara, terlebih lagi di ruas-ruas jalan padat dan sempit dengan sirkulasi udara terbatas, seperti yang sering ditemukan di perkotaan.

Khususnya pada lokasi Jl. Laksda Adisucipto, meskipun volume kendaraan tidak secara eksplisit disebutkan sebagai yang tertinggi, dapat diasumsikan bahwa

ruas jalan ini merupakan jalur utama dengan aktivitas lalu lintas padat, termasuk kendaraan berat yang menyumbang PM_{10} dalam jumlah signifikan. Korelasi antara kondisi meteorologi tidak mendukung dispersi dan volume kendaraan tinggi menyebabkan akumulasi konsentrasi PM_{10} yang melampaui baku mutu.

Sebaliknya, di Jl. Ipda Tut Harsono yang memiliki konsentrasi PM_{10} sebesar 65,10 µg/Nm^3, kecepatan angin mencapai 3,6 m/s tertinggi di antara tiga lokasi. Ini mengindikasikan bahwa proses pengenceran dan penyebaran polutan berlangsung lebih optimal. Studi oleh Salma dkk (2020) menyatakan bahwa kecepatan angin di atas 2 m/s sudah cukup efektif dalam mengurangi konsentrasi partikel PM_{10} melalui proses dispersi horizontal. Di Jl. Jendral Sudirman, kecepatan angin juga sedikit lebih tinggi dibanding Jl. Laksda Adisucipto, yaitu 1,1 m/s, dan berkontribusi pada konsentrasi yang masih berada di bawah baku mutu.

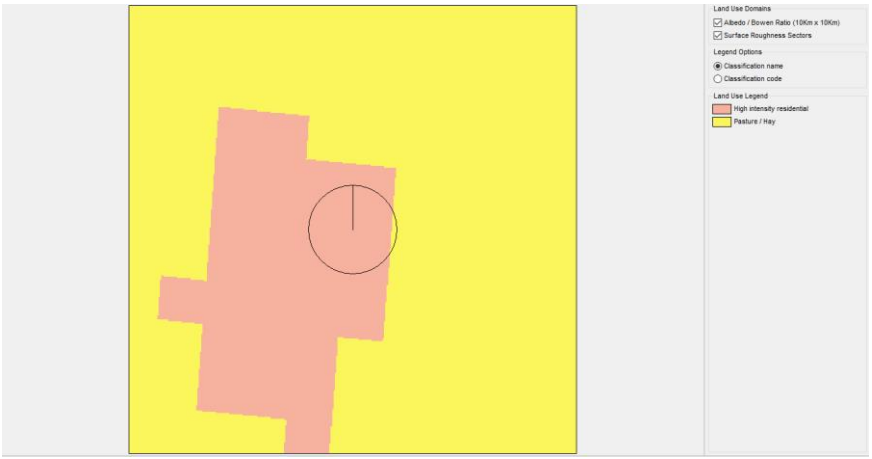
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi PM_{10} tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya volume kendaraan, tetapi sangat tergantung pada parameter meteorologis seperti kecepatan angin dan tekanan udara. Oleh karena itu, upaya pengendalian pencemaran udara harus mempertimbangkan pendekatan spasial dan temporal yang memperhitungkan faktor cuaca dan kondisi lalu lintas secara holistik.

4.6 Visualisasi Persebaran PM_{10}

Visualisasi sebaran konsentrasi partikulat PM_{10} pada area jalan yang menjadi sumber emisi dari aktivitas kendaraan bermotor dilakukan menggunakan perangkat lunak AERMOD. Proses ini diawali dengan pengumpulan data meteorologi dari situs ERA5, yang merupakan produk reanalisis atmosfer keluaran *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Data tersebut kemudian diproses menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV) dan diekspor ke dalam format Excel dengan parameter meliputi *cloud cover*, suhu udara, kelembapan relatif, tekanan udara, arah dan kecepatan angin, presipitasi, serta radiasi matahari.

Data tersebut menjadi input awal untuk diproses dalam aplikasi AERMET, yang akan menghasilkan file meteorologi permukaan (.SFC file). File ini mencakup sejumlah parameter penting seperti *surface temperature, wind speed and direction*

pada ketinggian 10 meter, cloud cover, solar radiation, precipitation, air pressure, relative humidity, serta beberapa parameter turunan seperti *Monin-Obukhov length, friction velocity, mixing height, surface roughness, Bowen ratio,* dan *albedo*. Namun, karena tidak seluruh parameter tersedia dalam dataset ERA5, maka beberapa variabel yang hilang dilengkapi menggunakan nilai default sesuai ketentuan AERMOD.



Gambar 4.6 Peta Penggunaan Lahan

Peta penggunaan lahan (*land use*) yang digunakan sebagai dasar dalam penentuan parameter permukaan untuk pemodelan dispersi polutan menggunakan AERMOD. Dalam gambar tersebut, terdapat dua warna utama: merah muda dan kuning. Warna merah muda menunjukkan wilayah yang merupakan permukiman padat atau kawasan perumahan dengan aktivitas tinggi (*high intensity residential*), seperti daerah pusat kota yang banyak terdapat bangunan, jalan, dan aktivitas kendaraan. Sementara itu, warna kuning menggambarkan area terbuka seperti padang rumput atau lahan pertanian ringan (*pasture/hay*) yang biasanya memiliki sedikit bangunan dan aktivitas manusia.

Peta ini penting karena jenis lahan di suatu wilayah sangat memengaruhi pola penyebaran polusi udara. Wilayah yang padat bangunan biasanya menyebabkan angin lebih sulit bergerak bebas dan menimbulkan turbulensi, sehingga penyebaran polusi bisa terhambat atau terperangkap di suatu tempat. Sebaliknya, area terbuka seperti padang rumput memungkinkan udara dan polusi lebih mudah tersebar karena tidak banyak hambatan.

Lingkaran hitam di tengah gambar menunjukkan radius wilayah yang dihitung oleh sistem untuk menentukan karakteristik permukaan tanah, seperti

kekasaran permukaan, refleksi sinar matahari (albedo), dan keseimbangan panas di udara (Bowen ratio). Dalam pemodelan AERMOD, parameter permukaan seperti albedo, Bowen ratio, dan surface roughness merupakan komponen penting yang dihasilkan dari pemrosesan data penggunaan lahan menggunakan perangkat lunak AERSURFACE. Ketiga parameter ini memberikan kontribusi terhadap karakteristik dispersi polutan, khususnya PM_{10}. Berdasarkan data yang ditampilkan, nilai albedo sebesar 0,18, Bowen ratio 0,7, dan surface roughness 0,962 mencerminkan kondisi permukaan wilayah penelitian yang didominasi oleh area permukiman padat dengan tekstur permukaan yang kasar dan penyerapan panas yang cukup tinggi.

Nilai albedo yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar radiasi matahari diserap oleh permukaan tanah atau bangunan, yang berkontribusi pada peningkatan suhu permukaan dan proses konveksi udara. Bowen ratio sebesar 0,7 menunjukkan kondisi permukaan yang relatif seimbang antara penguapan dan pemanasan udara, menandakan adanya kelembapan yang sedang di area tersebut. Sementara itu, surface roughness yang tinggi (0,962) menggambarkan banyaknya rintangan fisik seperti bangunan tinggi dan vegetasi yang padat, yang secara langsung memengaruhi turbulensi atmosfer dan pencampuran vertikal polutan

AERMOD sangat responsif terhadap perubahan nilai surface roughness, karena parameter ini sangat menentukan pola turbulensi dan seberapa luas polutan seperti PM_{10} tersebar di atmosfer. Di sisi lain, albedo dan Bowen ratio dinilai memiliki pengaruh yang lebih kecil terhadap konsentrasi permukaan PM_{10}. Dengan demikian, pemahaman terhadap ketiga parameter ini sangat krusial dalam memastikan hasil pemodelan dispersi PM_{10} mendekati kondisi atmosferik yang sebenarnya, terutama dalam wilayah perkotaan dengan kompleksitas penggunaan lahan yang tinggi (Karvounis dkk,2007)

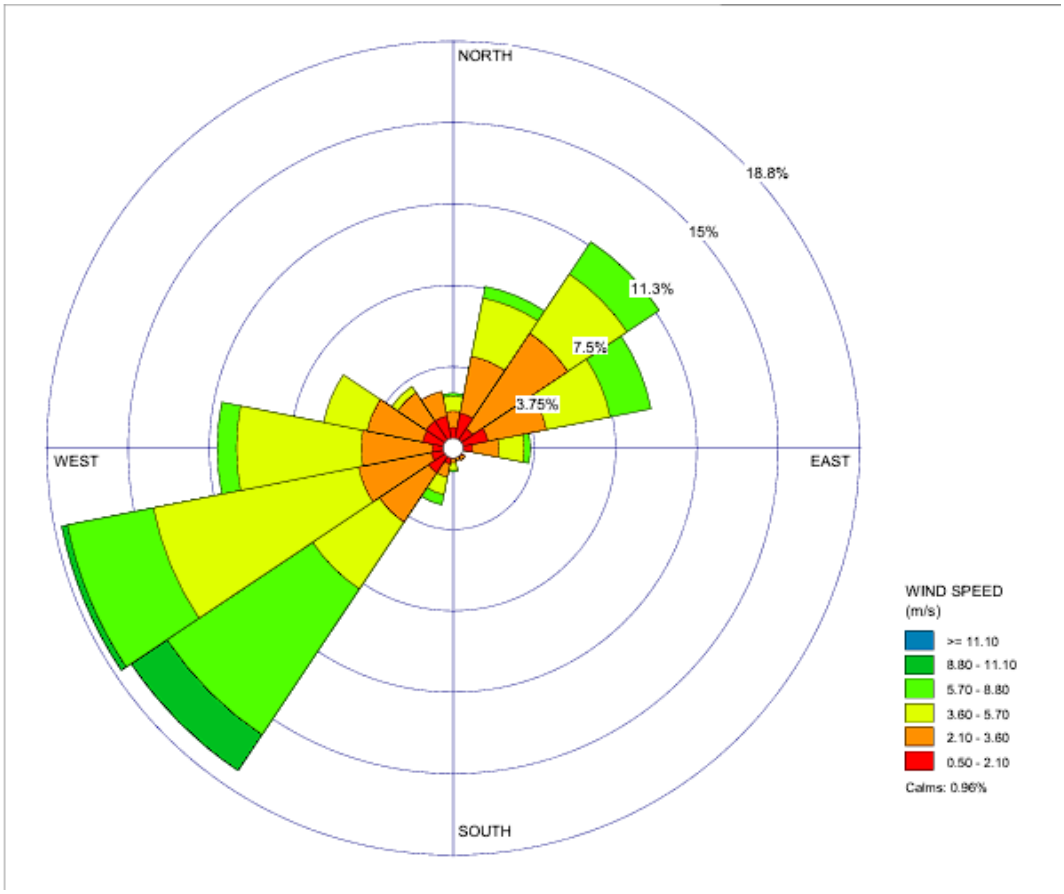
Tabel 4.4 Data Line Source

Source ID	Source Type	X Coord. (m)	Y Coord. (m)	Base Elevation (m)	Release Height (m)	Deskripsi Lokasi
JLN1	LINE AREA	430213.1	9139659	125.88	3	Jendral Sudirman
JLN2	LINE AREA	431553.6	9139643	128.07	3	Urip Sumoharjo
JLN3	LINE AREA	432497.5	9139637	129.96	3	Laksda Adisucipto
JLN4	LINE AREA	433306.7	9139611	127.92	3	Timoho
JLN6	LINE AREA	431722.9	9137566	107.95	3	Kusumanegara
JLN5	LINE AREA	432970.4	9137545	106.06	3	Ipda Tut Harsono
JLN7	LINE AREA	430636.2	9137588	104.02	3	Sultan Agung
JLN8	LINE AREA	431419.8	9137585	111.12	3	Suryanopanoto
JLN9	LINE AREA	431382.4	9138069	115.45	3	Dr Sutomo
JLN10	LINE AREA	431467.9	9139059	120.01	3	Dr Wahidin Sudirohusodo
JLN11	LINE AREA	429961.3	9137605	110.47	3	Panembahan Senopati

Data ketinggian permukaan (*terrain*) diperoleh dari citra elevasi SRTM1/SRTM3 dan kemudian diproses menggunakan perangkat lunak AERMAP yang terintegrasi dalam sistem AERMOD. Visualisasi pola arah dan kecepatan angin berupa mawar angin (*wind rose*) dibuat dengan memanfaatkan data dari Profile Data File (.pf) yang telah diproses dalam perangkat lunak WRPLOT View. Selanjutnya, data faktor emisi PM_{10} yang dihitung melalui pendekatan inventarisasi emisi dengan sumber tipe garis (*line source*) dimasukkan ke dalam AERMOD dengan konfigurasi *line area source*. Parameter input yang digunakan dalam tipe sumber ini meliputi panjang sisi (*length of side*), dimensi vertikal awal (*initial vertical dimension*), laju emisi (*emission rate*), rasio aspek (*ratio 1*), total panjang (*total length*), elevasi dasar (*base elevation*), serta tinggi pelepasan emisi (*release height*) sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.4.

Data tersebut digunakan untuk melakukan pemodelan arah dan frekuensi angin di lokasi studi serta untuk menggambarkan distribusi spasial konsentrasi PM_{10} yang bersumber dari aktivitas lalu lintas di 10 ruas jalan utama sekitar kawasan Kota Yogyakarta. Hasil visualisasi dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan 4.10

yang memperlihatkan pola penyebaran polutan berdasarkan kondisi meteorologi setempat.



Gambar 4.7 Mawar Angin (*Wind Rose)*

Berdasarkan gambar mawar angin di atas, arah angin dominan di lokasi penelitian menunjukkan pola bertiup dari arah timur ke barat daya hingga barat. Distribusi frekuensi angin paling besar berada pada sektor timur–barat daya, dengan kontribusi yang cukup signifikan juga dari arah timur laut–barat. Hal ini menandakan bahwa pergerakan massa udara di wilayah Yogyakarta cenderung dipengaruhi oleh sistem monsun yang berganti setiap musim, di mana pada periode tertentu angin lebih banyak berhembus dari arah timur (Monsun Timur) dan pada periode lain dari barat (Monsun Barat).

Kondisi ini menunjukkan bahwa wilayah di sebelah timur sumber pencemar berpotensi lebih banyak menerima sebaran polutan, sesuai dengan arah angin yang dominan mendorong pergerakan udara ke timur. Dari segi kecepatan, angin di Yogyakarta umumnya berada pada rentang 2–8 m/s, dengan sebagian besar kejadian terekam dalam kategori 2,10–5,70 m/s (kuning hingga hijau muda pada

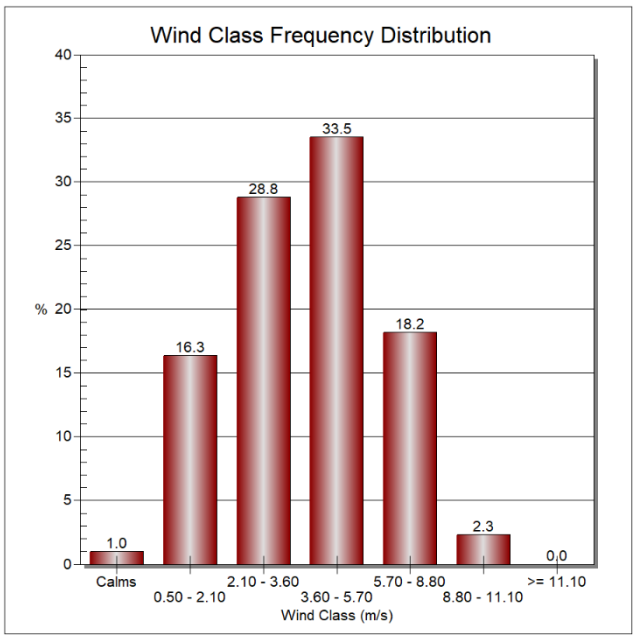
grafik). Kondisi ini menunjukkan bahwa angin di kawasan Yogyakarta memiliki kekuatan yang cukup untuk membantu proses dispersi polutan, meskipun tidak terlalu kuat sehingga polutan bisa tetap terakumulasi pada area tertentu. Secara klimatologis, kecepatan angin rata-rata di Yogyakarta berada di kisaran 2–3 m/s, sesuai dengan karakteristik iklim tropis dataran rendah yang dipengaruhi oleh angin muson. Hal ini berarti kualitas dispersi polutan di daerah perkotaan Yogyakarta akan sangat dipengaruhi oleh arah angin dominan dari barat serta intensitas kecepatan angin yang relatif sedang

Grafik distribusi frekuensi kelas kecepatan angin pada gambar 4.8, dapat dilihat bahwa kecepatan angin di wilayah penelitian paling dominan berada pada kisaran 3,60–5,70 m/s dengan frekuensi sebesar 33,5%, diikuti oleh kelas kecepatan 2,10–3,60 m/s sebesar 28,8%, serta 5,70–8,80 m/s sebesar 18,2%. Sementara itu, angin tenang (calm) hanya tercatat sebesar 1,0%, dan kecepatan angin di atas 8,80 m/s relatif jarang terjadi dengan frekuensi 2,3%, bahkan tidak ditemukan angin dengan kecepatan ≥11,10 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum, kondisi angin di lokasi penelitian berada pada kategori sedang, sehingga memiliki kemampuan cukup untuk menyebarkan polutan udara secara horizontal dan mengurangi potensi akumulasi pencemar di udara ambien.

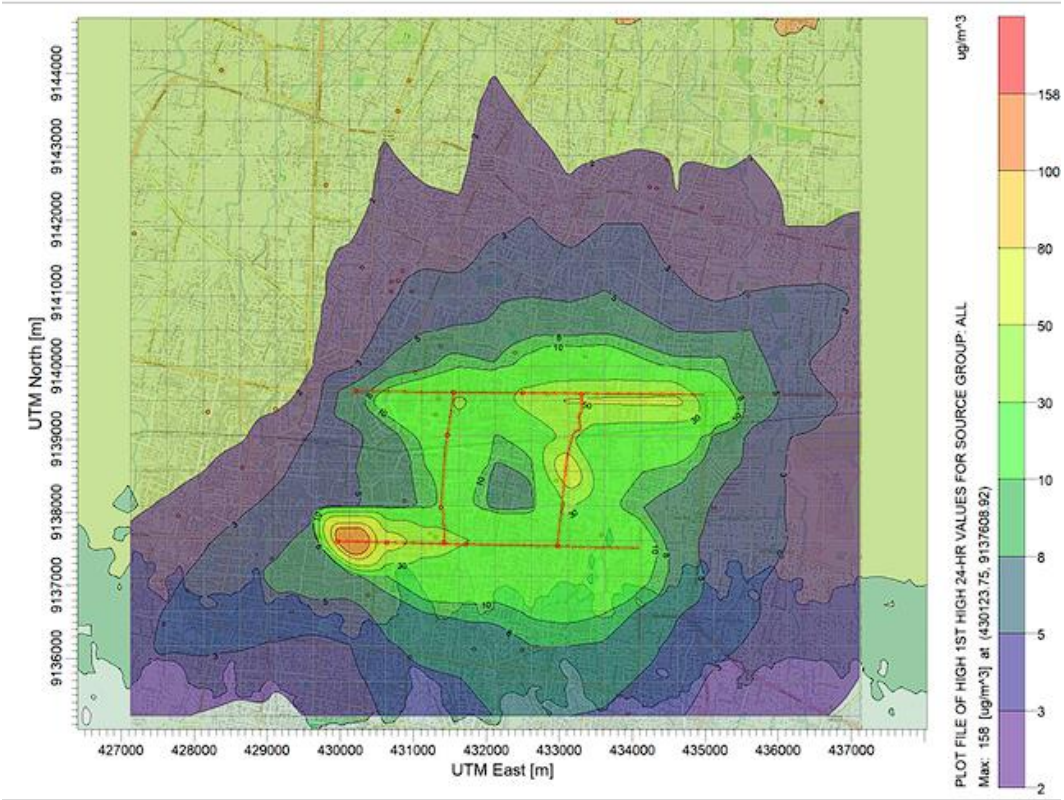
Kondisi kecepatan angin di Yogyakarta umumnya dipengaruhi oleh iklim tropis monsun, di mana terdapat perbedaan pola angin antara musim hujan dan musim kemarau. Pada musim kemarau (Juni–September), angin dominan bertiup dari arah timur-tenggara dengan kecepatan relatif lebih tinggi akibat pengaruh angin pasat tenggara. Sebaliknya, pada musim hujan (Desember–Maret), angin dominan dari barat-laut dengan kecepatan yang cenderung lebih rendah (BMKG, 2023). Secara umum, rata-rata kecepatan angin di Yogyakarta berkisar antara 2–5 m/s, sehingga data distribusi frekuensi angin yang ditampilkan pada grafik sejalan dengan karakteristik iklim setempat.

Kondisi ini penting untuk diperhatikan dalam analisis dispersi polutan, karena kecepatan angin yang moderat cenderung mendukung proses pencampuran udara, namun pada kondisi angin lemah polutan dapat lebih lama bertahan di atmosfer sehingga berpotensi meningkatkan konsentrasi pencemar di permukaan tanah.Secara keseluruhan, karakteristik kecepatan angin di lokasi studi ini perlu

menjadi perhatian dalam interpretasi model dispersi AERMOD, karena kondisi meteorologis seperti ini dapat memengaruhi tingkat paparan masyarakat terhadap pencemar udara, khususnya PM_{10} yang bersumber dari aktivitas kendaraan bermotor.



Gambar 4.8 Grafik Distribusi Kelas Angin



Gambar 4.9 Peta Sebaran Polutan PM_{10}

Gambar di atas menyajikan hasil visualisasi sebaran spasial konsentrasi PM_{10} maksimum harian pertama selama 24 jam yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak AERMOD. Konsentrasi ditampilkan dalam satuan µg/m³, dengan gradasi warna yang menunjukkan intensitas polusi mulai dari hijau muda (konsentrasi rendah) hingga merah tua (konsentrasi sangat tinggi). Peta hasil pemodelan dispersi PM_{10} menunjukkan distribusi konsentrasi polutan di wilayah penelitian dengan variasi spasial yang dipengaruhi oleh faktor meteorologi, khususnya arah dan kecepatan angin. Konsentrasi tertinggi tercatat mencapai 158 µg/Nm³, terpusat di sekitar sumber emisi yang ditandai dengan area berwarna merah–oranye. Nilai ini melebihi baku mutu harian PM_{10} yang ditetapkan pemerintah, yaitu 75 µg/Nm³ (PP No. 22 Tahun 2021), sehingga mengindikasikan adanya potensi pencemaran udara di titik tersebut. Sebaran polutan meluas ke arah tertentu dengan pola yang mengikuti dominasi arah angin lokal, dimana konsentrasi menurun secara bertahap dari pusat sumber emisi (zona merah–kuning) menuju wilayah sekitarnya (zona hijau–biru).

Hasil ini konsisten dengan distribusi kecepatan angin yang sebelumnya dianalisis, yaitu dominan pada kisaran 3–6 m/s, yang termasuk kategori sedang. Kondisi angin semacam ini cukup efektif untuk membawa dan menyebarkan partikel polutan secara horizontal, namun tidak sepenuhnya mampu mencegah akumulasi di sekitar sumber. Oleh karena itu, meskipun sebagian besar wilayah menunjukkan konsentrasi di bawah ambang batas, terdapat titik-titik kritis dengan konsentrasi tinggi akibat keterbatasan dispersi. Selain itu, komposisi PM_{10} yang terdiri dari partikel debu mineral, karbon, logam berat, hingga senyawa organik, menjadikan keberadaannya berpotensi menimbulkan risiko kesehatan, terutama pada daerah dengan konsentrasi yang terakumulasi.

Titik konsentrasi tertinggi berdasarkan hasil pemodelan terletak di sekitar Jl. Panembahan Senopati, meskipun data lapangan menunjukkan bahwa volume kendaraan di ruas jalan tersebut tidak terlalu padat dibandingkan jalan arteri lain. Hal ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, lokasi jalan ini merupakan akses langsung menuju titik 0 km Yogyakarta, sehingga aktivitas kendaraan meskipun tidak dominan tetap berperan dalam menambah emisi. Kedua, arah angin

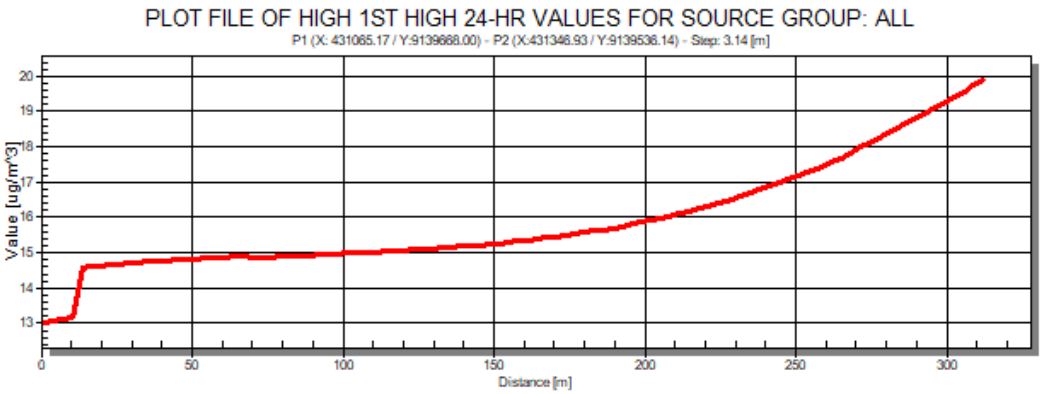
dominan membawa polutan dari jalan-jalan besar di sekitarnya dan kemudian mengalami akumulasi di kawasan tersebut. Ketiga, kondisi fisik perkotaan seperti kepadatan bangunan dan efek street canyon membuat sirkulasi udara terbatas sehingga polutan terperangkap lebih lama. Dengan demikian, konsentrasi tinggi di Jl. Panembahan Senopati bukan semata akibat emisi lokal, melainkan kombinasi faktor meteorologi, posisi strategis, dan kondisi lingkungan perkotaan yang membatasi dispersi.

Topografi atau elevasi permukaan tanah juga memegang peran penting dalam penyebaran polutan. Daerah yang berada di cekungan atau dataran rendah cenderung menjadi tempat penumpukan partikel udara, terutama saat suhu udara stabil dan tidak terjadi pengangkatan udara ke atas. Sebaliknya, wilayah yang berada di dataran tinggi atau memiliki kemiringan yang cukup dapat membantu pergerakan aliran udara dan mempercepat penyebaran partikel. Faktor lain seperti suhu udara, kelembaban, tekanan atmosfer, dan radiasi matahari ikut berkontribusi terhadap perilaku PM_{10} di atmosfer. Misalnya, pada suhu rendah dan kelembaban tinggi di pagi hari, partikel cenderung menetap di lapisan udara bawah karena lapisan inversi yang menghambat pencampuran udara secara vertikal. Sementara itu, peningkatan suhu dan radiasi matahari pada siang hari dapat memperkuat pencampuran udara dan membantu menyebarkan polutan ke area yang lebih luas.

Secara keseluruhan, sebaran PM_{10} di udara merupakan hasil interaksi kompleks antara aktivitas manusia (seperti lalu lintas), kondisi cuaca, dan bentuk permukaan bumi. Oleh karena itu, pengendalian pencemaran udara perlu mempertimbangkan semua aspek tersebut, termasuk pengaturan lalu lintas, peningkatan ruang terbuka hijau, serta pemantauan rutin terhadap kualitas udara, terutama di wilayah dengan konsentrasi PM_{10} yang tinggi.

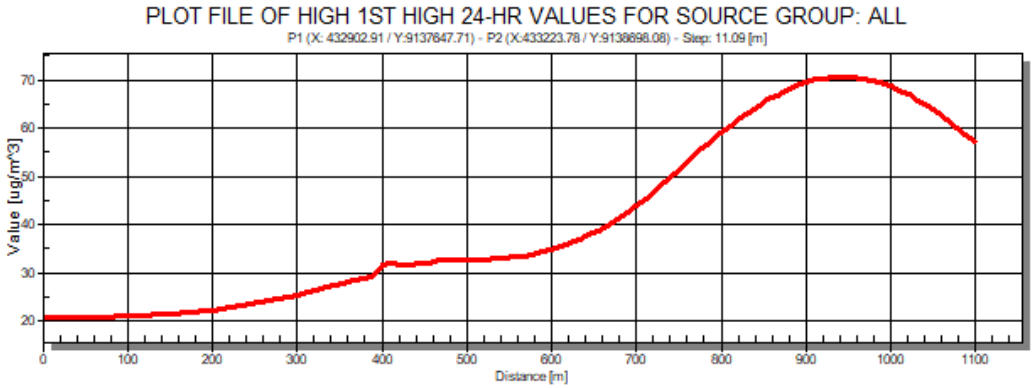
Paparan tinggi terhadap partikulat PM_{10} terbukti menimbulkan risiko signifikan pada kesehatan pernapasan dan sistem kardiovaskular masyarakat. Sebuah studi di Kota Bandung menemukan bahwa konsentrasi PM_{10} di atas baku mutu secara signifikan berkorelasi dengan peningkatan kasus Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) pada anak-anak, dengan peluang kejadian hingga tiga kali lebih tinggi dibanding mereka yang terpapar pada tingkat lebih rendah (Kurniatiningsih & Hartono, 2022)

c



Gambar 4.10 Pola Sebaran Polutan Menuju Rumah Sakit Bethasda

Gambar di atas memperlihatkan grafik sebaran konsentrasi PM_{10} hasil Hasil pemodelan menunjukkan pola peningkatan konsentrasi PM_{10} sepanjang jalur menuju Rumah Sakit Bethesda. Grafik menampilkan tren kenaikan konsentrasi secara bertahap dari sekitar 13 µg/Nm³ pada titik awal hingga mencapai lebih dari 20 µg/Nm³ pada jarak sekitar 300 meter. Pola ini mengindikasikan adanya akumulasi polutan di sepanjang lintasan, terutama akibat pergerakan emisi dari sumber transportasi yang terdispersi mengikuti arah angin dominan. Meskipun kenaikan konsentrasi relatif moderat pada jarak awal, akumulasi yang lebih signifikan mulai terjadi setelah 200 meter, yang menandakan keterbatasan dispersi akibat kondisi meteorologi serta pengaruh tata ruang perkotaan di sekitar kawasan padat aktivitas tersebut. Lokasi Rumah Sakit Bethesda yang berada di area dengan lalu lintas padat dan bangunan tinggi di sekitarnya turut memperkuat kemungkinan terperangkapnya polutan, sehingga konsentrasi di kawasan ini berpotensi memberikan dampak terhadap kualitas udara yang dihirup masyarakat maupun pasien di lingkungan rumah sakit. Oleh karena itu, sebaran PM_{10} menuju area tersebut perlu menjadi pertimbangan dalam kebijakan pengendalian pencemaran udara di kawasan perkotaan.

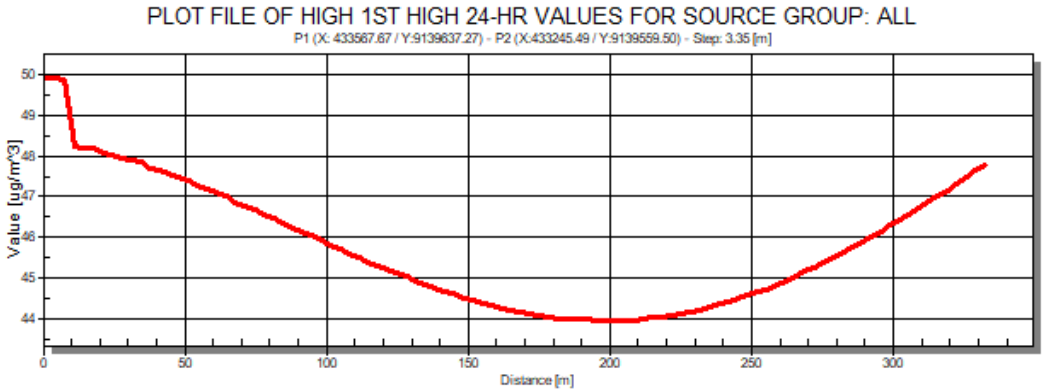


Gambar 4.11 Pola Sebaran Polutan Menuju Sekolah Tinggi Pembangunan Masyarakat Desa

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{10} pada jalur menuju Sekolah Tinggi Pembangunan Masyarakat Desa mengalami peningkatan yang cukup signifikan seiring bertambahnya jarak dari titik sumber emisi. Pada jarak awal sekitar 0–400 meter, konsentrasi relatif stabil di kisaran 20–30 µg/Nm³. Namun setelah melewati 400 meter, konsentrasi mulai menunjukkan tren kenaikan yang konsisten, dan pada kisaran 700–900 meter peningkatannya semakin tajam, mencapai lebih dari 60 µg/Nm³. Nilai puncak terlihat mendekati 70 µg/Nm³ pada jarak sekitar 950 meter, sebelum akhirnya menurun kembali setelah melewati 1000 meter. Pola ini menggambarkan adanya akumulasi polutan di titik tertentu, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh kondisi meteorologi seperti kecepatan angin sedang dan arah dominan yang membawa emisi menuju kawasan pendidikan tersebut.

Fenomena peningkatan konsentrasi menuju area kampus juga dapat dikaitkan dengan karakteristik tata ruang di sekitarnya. Jalan yang mengarah ke Sekolah Tinggi Pembangunan Masyarakat Desa berfungsi sebagai koridor transportasi dengan lalu lintas campuran, baik kendaraan pribadi maupun angkutan umum. Selain itu, keberadaan bangunan di kiri–kanan jalan berpotensi menciptakan efek kanalisasi udara, yang membatasi dispersi horizontal polutan. Hal ini menyebabkan emisi yang terbawa angin dapat terakumulasi di sepanjang jalur sebelum mencapai titik maksimum konsentrasi. Kondisi tersebut menegaskan bahwa meskipun polutan berasal dari sumber transportasi dengan distribusi menyebar, adanya faktor lingkungan lokal dan keterbatasan dispersi angin dapat mengarahkan polutan untuk

menumpuk pada area tertentu, sehingga meningkatkan risiko paparan polutan di kawasan pendidikan ini.



Gambar 4.12 Pola Sebaran Polutan Menuju Gedung Rektorat Universitas Islam Negeri (UIN) Sunan Kalijaga

Grafik sebaran konsentrasi PM_{10} menunjukkan adanya variasi konsentrasi polutan sepanjang lintasan menuju Gedung Rektorat Universitas Islam Negeri (UIN) Sunan Kalijaga. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa konsentrasi polutan PM_{10} menuju Gedung Rektorat UIN Sunan Kalijaga memiliki pola yang fluktuatif. Pada awal jalur (0–50 meter), konsentrasi relatif tinggi yaitu sekitar 49–50 µg/Nm³, lalu menurun secara bertahap hingga mencapai titik minimum sekitar 43–44 µg/Nm³ pada jarak 150–200 meter. Setelah itu, konsentrasi kembali meningkat secara perlahan hingga mendekati 47–48 µg/Nm³ pada jarak lebih dari 300 meter. Pola ini menggambarkan adanya proses dispersi polutan di tengah jalur, tetapi kemudian terjadi akumulasi kembali akibat faktor lingkungan seperti arah angin dominan, aktivitas lalu lintas di sekitar kawasan kampus, atau keberadaan bangunan yang berfungsi sebagai penghalang aliran udara.

Jika dibandingkan dengan baku mutu PM_{10} harian yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 sebesar 75 µg/Nm³, maka konsentrasi PM_{10} pada seluruh titik jalur menuju rektorat masih berada di bawah ambang batas. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas udara di sekitar jalur tersebut masih memenuhi standar yang diperbolehkan. Namun demikian, tren kenaikan konsentrasi pada segmen akhir jalur tetap perlu diperhatikan karena berpotensi meningkat jika terjadi

intensitas lalu lintas yang lebih tinggi atau kondisi meteorologi yang kurang mendukung dispersi polutan.

Faktor meteorologi seperti arah angin dominan dari barat daya turut berperan dalam membawa polutan ke arah timur laut, yaitu ke area UIN Sunan Kalijaga. Selain itu, topografi lokal dan permukaan jalan yang cenderung menurun dari area penelitian ke arah kampus juga berpotensi memerangkap polutan di dekat permukiman atau fasilitas umum. Ketiadaan hambatan vegetasi atau ruang terbuka hijau di sepanjang jalur tersebut memperparah akumulasi partikulat di udara. Tingginya konsentrasi PM_{10} ini dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan, terutama bagi mahasiswa, staf, dan masyarakat sekitar kampus.

4.7 Hasil Validasi Model

Perbandingan antara konsentrasi PM_{10} hasil pemodelan AERMOD dengan nilai rata-rata hasil pengukuran lapangan di jalan utama dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi model dalam memprediksi sebaran partikel di udara ambien. Nilai konsentrasi PM_{10} dari AERMOD diperoleh melalui simulasi dispersi menggunakan tipe sumber line area yang merepresentasikan emisi dari lalu lintas kendaraan. Hasil dari perbandingan ini bertujuan untuk mengidentifikasi sejauh mana prediksi model mendekati kondisi aktual di lapangan, sebagaimana ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Konsentrasi

Titik Lokasi	Konsentrasi		
	Sampling	**Model**	**Satuan**
Jl Jendral Sudirman	57.23	13	(µg/Nm³)
Jl IpdaTut Harsono	65.10	20.8	(µg/Nm³)
Jl Laksda Adisucipto	124.31	49.7	(µg/Nm³)

Validasi model merupakan proses penting dalam pemodelan kualitas udara untuk memastikan bahwa hasil simulasi mendekati kondisi nyata di lapangan. Proses ini dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi model, seperti AERMOD, dengan data observasi aktual yang diperoleh melalui pengukuran

langsung. Tujuan utama dari validasi adalah untuk mengukur kinerja model dalam merepresentasikan sebaran dan konsentrasi polutan secara spasial dan temporal, serta menilai seberapa baik model mampu mereplikasi pola variabilitas lingkungan yang kompleks. Validasi juga memungkinkan pengguna model untuk melakukan penyesuaian atau kalibrasi terhadap parameter input yang digunakan, sehingga model dapat menghasilkan estimasi yang lebih akurat.

Root Mean Square Percentage Error (RMSPE), yang menilai kesalahan prediksi dalam bentuk persentase secara simetris antara nilai observasi dan prediksi. Performa model dispersi udara dapat dikategorikan "baik" apabila menghasilkan galat prediksi di bawah 50%. Hal ini sangat relevan dalam konteks studi perencanaan kualitas udara, di mana ketelitian prediksi sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti, khususnya dalam penetapan zonasi emisi, pengendalian pencemaran, serta evaluasi dampak terhadap kesehatan masyarakat. Dalam sistem atmosfer yang kompleks, adanya galat hingga 50% masih dapat diterima mengingat ketidakpastian dalam data input seperti emisi, kondisi meteorologi, dan topografi lokal (Boylan dan Russell, 2006).

Tabel 4.6 Perhitungan Validasi Model dengan Metode RMSPE

Titik Lokasi	**Konsentrasi**				
	Sampling	**Model**	**Satuan**	**RMSPE Tiap Jalan (%)**	**RMSPE (%)**
Jl Jendral Sudirman	57.23	13	(µg/Nm³)	77	68
Jl IpdaTut Harsono	65.10	20.8	(µg/Nm³)	68	
Jl Laksda Adisucipto	124.31	49.7	(µg/Nm³)	60	

Berdasarkan hasil validasi model dispersi AERMOD terhadap konsentrasi PM_{10} dari data pengukuran lapangan, diperoleh nilai *Root Mean Square Percentage Error* (RMSPE) rata-rata sebesar 68%. Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun masih terdapat deviasi yang cukup besar, model AERMOD tetap dapat memberikan gambaran sebaran konsentrasi polutan secara umum. Jika dilihat per lokasi, perbedaan antara hasil model dan hasil sampling bervariasi. Pada Jalan Jendral Sudirman, hasil sampling sebesar 57,23 µg/Nm³ sedangkan model 13,00 µg/Nm³, dengan RMSPE tertinggi yaitu 77%, yang menunjukkan bahwa model cenderung

under-prediction di lokasi ini. Pada Jalan Ipda Tut Harsono, hasil sampling 65,10 µg/Nm³ dan model 20,80 µg/Nm³, dengan RMSPE sebesar 68%, menunjukkan deviasi cukup besar namun masih dalam kisaran rata-rata. Sementara itu, pada Jalan Laksda Adisucipto, hasil sampling 124,31 µg/Nm³ dan model 49,70 µg/Nm³, menghasilkan RMSPE terendah yaitu 60%, sehingga dapat dikatakan model relatif lebih mendekati kondisi aktual dibandingkan lokasi lainnya.

Secara umum, model AERMOD dianggap representatif apabila nilai RMSPE berada di bawah 50% (Boylan & Russell, 2006). Dengan nilai rata-rata 68%, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa akurasi model masih perlu ditingkatkan. Variasi galat antar lokasi kemungkinan besar dipengaruhi oleh faktor meteorologi lokal, kepadatan lalu lintas, serta keterbatasan parameter masukan pada model seperti kecepatan angin dan resolusi data meteorologi. Oleh karena itu, penyempurnaan data input, khususnya penggunaan data meteorologi dengan resolusi temporal yang lebih tinggi serta penyesuaian parameter lokal, diharapkan dapat meningkatkan performa prediksi AERMOD di masa mendatang (Zhang dkk., 2012). Hasil validasi model dispersi udara dapat dipengaruhi oleh metode dan waktu pelaksanaan sampling konsentrasi polutan di lapangan. Salah satu faktor penting adalah jarak waktu antar sampling.

Apabila sampling dilakukan dengan interval waktu yang terlalu berjauhan, maka hasil pengukuran konsentrasi PM_{10} berpotensi tidak representatif terhadap kondisi rata-rata yang sebenarnya. Hal ini disebabkan oleh adanya variasi temporal konsentrasi polutan, di mana fluktuasi terjadi secara signifikan berdasarkan jam, hari, bahkan musim. Misalnya, pada jam sibuk (rush hour) konsentrasi PM_{10} cenderung tinggi akibat peningkatan volume kendaraan, sementara pada malam hari konsentrasi bisa menurun. Ketidaksesuaian ini dapat menimbulkan bias saat membandingkan hasil pengukuran dengan prediksi model AERMOD, yang menggunakan data meteorologi bersifat kontinyu harian atau jam-jaman.

Meskipun AERMOD merupakan salah satu model dispersi udara yang direkomendasikan oleh U.S. EPA dan banyak digunakan dalam penelitian maupun kajian kualitas udara, model ini tetap memiliki sejumlah keterbatasan. AERMOD dibangun berdasarkan konsep steady-state Gaussian plume dengan asumsi kondisi meteorologi yang relatif homogen dan stabil dalam satu periode waktu tertentu. Hal

ini dapat menimbulkan ketidakakuratan ketika diaplikasikan pada kondisi atmosfer yang bersifat sangat dinamis atau kompleks. Selain itu, AERMOD lebih sesuai digunakan pada skala lokal hingga regional dengan jangkauan sekitar 50 km dari sumber emisi, sehingga kurang optimal apabila diterapkan untuk pemodelan jarak yang lebih jauh (Cimorelli et al., 2005).

Tingkat akurasi model ini juga sangat bergantung pada kualitas data meteorologi, baik yang diperoleh dari stasiun pengamatan maupun hasil pemrosesan melalui AERMET. Pada wilayah dengan topografi yang kompleks atau lingkungan dengan kepadatan bangunan tinggi, hasil pemodelan dapat mengalami keterbatasan walaupun AERMOD telah dilengkapi dengan modul PRIME untuk pengaruh bangunan serta algoritma penyesuaian topografi (Perry dkk, 2005). Oleh karena itu, hasil pemodelan AERMOD perlu dianalisis secara hati-hati serta sebaiknya divalidasi menggunakan data pemantauan lapangan agar memberikan gambaran yang lebih akurat (U.S. EPA, 2019).

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Analisis Dispersi *Particulate Matter* di Perkotaan Kota Yogyakarta menggunakan pemodelan AERMOD, dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil inventarisasi menunjukkan bahwa total emisi PM_{10} tertinggi terjadi pada ruas Jl. Laksda Adisucipto, dengan nilai emisi sebesar 5156,76 gr/h**,** seiring dengan tingginya volume kendaraan dan karakteristik fisik jalan yang padat serta tertutup bangunan. Sebaliknya, emisi terendah tercatat pada Jl. Suryapranopto, dengan nilai emisi sebesar 315,77 gr/h**,** seiring dengan volume kendaraan yang lebih rendah dan kondisi lingkungan yang relatif terbuka. Sepeda motor tetap menjadi penyumbang terbesar di seluruh ruas jalan yang diteliti, baik dalam hal volume maupun total emisi, diikuti oleh kendaraan berbahan bakar solar seperti truk dan bus.
2. Hasil pengukuran menggunakan alat High Volume Air Sampler (HVAS), diperoleh nilai konsentrasi sebagai berikut: Jl. Jendral Sudirman sebesar 57,23 µg/Nm³, Jl. Ipda Tut Harsono sebesar 65,10 µg/Nm³, dan Jl. Laksda Adisucipto sebesar 124,31 µg/Nm³. Jika dibandingkan dengan baku mutu PM_{10} menurut PP No. 22 Tahun 2021 (75 µg/Nm³ dalam 24 jam), maka hanya Jl. Laksda Adisucipto yang melebihi ambang batas tersebut, sementara dua lokasi lainnya masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan. Hal ini menunjukkan adanya konsentrasi tinggi polutan partikulat di lokasi dengan kepadatan lalu lintas dan struktur bangunan tinggi yang menyebabkan akumulasi.
3. Hasil pemodelan sebaran PM_{10} selama 24 jam menunjukkan bahwa pola konsentrasi mengikuti arah angin dominan, kondisi penggunaan lahan, serta kontur wilayah. Berdasarkan hasil simulasi AERMOD, konsentrasi tertinggi teridentifikasi di Jalan Panembahan Senopati dan

Jalan Timoho, dengan nilai puncak mencapai 158 µg/Nm³ di Jalan Panembahan Senopati. Validasi model dilakukan menggunakan metode *Root Mean Square Percentage Error* (RMSPE), dengan nilai kesalahan sebesar 77% pada Jalan Jendral Sudirman, 68% pada Jalan Ipda Tut Harsono, dan 60% pada Jalan Laksda Adisucipto. Secara keseluruhan, nilai RMSPE rata-rata sebesar 68%. Nilai ini menunjukan bahwa terdapat deviasi yang cukup tinggi antara hasil prediksi model dan data aktual dari pengukuran lapangan, yang kemungkinan dipengaruhi oleh keterbatasan data meteorologi, kompleksitas taat guna lahan, serta variabilitas aktivitas lalu lintas harian.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat di usulkan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan jumlah titik sampling PM_{10} yang lebih luas dan representatif, sehingga sebaran konsentrasi dapat digambarkan secara lebih rinci dan akurat di seluruh kawasan perkotaan Yogyakarta.
2. Penggunaan model AERMOD dapat dilengkapi dengan input meteorologi dari stasiun pengamatan lokal secara langsung agar ketelitian model terhadap kondisi riil di lapangan semakin meningkat, terutama dalam menangkap variasi angin, suhu, dan kelembaban secara harian.
3. Memanfaatkan perangkat lunak atau sistem digital dalam pencatatan volume kendaraan dapat membantu proses identifikasi jenis kendaraan secara otomatis, sehingga estimasi emisi yang dihasilkan dari tiap kategori kendaraan menjadi lebih akurat dan efisien.
4. Dalam pemodelan dispersi polutan udara, penting untuk mempertimbangkan faktor-faktor lingkungan seperti keberadaan bangunan tinggi, kontur atau topografi wilayah, serta vegetasi di sekitar area studi. Ketiga unsur ini memiliki pengaruh besar terhadap dinamika aliran udara, turbulensi, dan pola penyebaran polutan di permukaan. Model seperti AERMOD cenderung menggunakan asumsi permukaan

yang seragam jika tidak dilengkapi data topografi dan penggunaan lahan yang detail.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., & Wibowo, I. R. (2019). *Environmental impacts of volcanic eruptions in Indonesia: A case study of Mount Sinabung. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 382, 1-12

Adli, M. T. D., & Febrita, J. (2024). Analisis Sebaran PM10 menggunakan Model AERMOD View pada Jalan Raya Gunung Putri, Kabupaten Bogor. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, 9(2), 167-178.

Afriani, F., Wijayanti, I. D., & Mahfudz, M. K. (2021). Kualitas Udara dan Kadar PM_{10} di Beberapa Wilayah Indonesia. Jurnal Ilmu Lingkungan, 19(2), 45–53.

Arya, S. P. (1999). *Air pollution meteorology and dispersion* (Vol. 310). New York: Oxford University Press.

Boylan, J. W., & Russell, A. G. (2006). PM and its precursors: model performance evaluation. Atmospheric Environment, 40(26), 4946–4959. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.057

Chaudhari, M. K., Baikerikar, A., Varade, S., & Bawase, M. (2011). PM10 Chemical Profiles of Vehicular Exhaust for Source Identification in Ambient Air (No. 2011-28-0041). SAE Technical Paper.

Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., et al. (2005). AERMOD: *A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. Journal of Applied Meteorology*, 44(5), 682–693. https://doi.org/10.1175/JAM2227.1

Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil JC, Paine RJ, Wilson RB, Lee RF, Peters WD, Brode RW, Paumier JO (2004) AERMOD: *Description of Model Formulation*. EPA-454/R-03-004, USEPA, USA

Darmawan, F. S. M., Cholissodin, I., & Adikara, P. P. (2022). Klasifikasi Pengaruh Polusi Udara Di Indonesia Terhadap Kesehatan Menggunakan Algoritme Kernel Modified K-nearest Neighbor. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, *6*(6), 2617-2624.

Driejana, R., Sari, D. K., & Sutriyono, E. (2018). Dampak partikel (PM10) terhadap kesehatan pernapasan di perkotaan: Studi kasus di Bandung, Indonesia. Journal of Environmental Health, 10(2), 123-134.

Dominici, F., Peng, R. D., Barr, C. D., & Bell, M. L. (2014). *Protecting human health from air pollution: shifting from a single-pollutant to a multi-pollutant approach. Epidemiology*, 25(4), 473–481.

Dwicahya, A. R., & Cahyonugroho, O. H. (2024). Analisis Sebaran Emisi Total Suspended Particulate Menggunakan Software Aermod di Jalan Raya Tandes. Jurnal Serambi Engineering, 9(3), 9907-9912.

Guttikunda, S. K., & Jawahar, P. (2014). *Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India. Atmospheric Environment*, 92, 449–460.

Haruna, H., Lahming, L., Amir, F., & Asrib, A. R. (2019). Pencemaran Udara Akibat Gas Buang Kendaraan Bermotor Dan Dampaknya Terhadap Kesehatan. UNM Environmental Journals, 2(2), 57.

Haryanto, Budi. (2018). *Climate Change and Urban Air Pollution Health Impacts in Indonesia*. 10.1007/978-3-319-61346-8_14.

Holton, J., Curry, J., & Pyle, J. (2002). *Encyclopedia of atmospheric sciences. Environmental Science and Pollution Research*, 9, 422.

Holmes, N. S., & Morawska, L. (2016). *A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particle*s: *An overview of different dispersion models available. Atmospheric Environment*, 40(30), 5902-5928.

Hoesodo, D. (2004). Permodelan Pencemaran Udara Akibat Lalu Lintas Di Jalan Arteri (Studi Kasus Ruas Jalan Soekarno-Hatta Di Kota Bandung). Tesis Program Pascasarjana Ilmu Lingkungan. Universitas Diponegoro. Semarang.

Iqbal, Z., & Hermanto, L. (2019). Sistem Monitoring Tingkat Pencemaran Udara Berbasis Teknologi Jaringan Sensor Nirkabel. Jurnal Ilmiah Informatika Komputer, 22(1).

Iriani, L., & Pribadi, A. (2023). Analisis sebaran konsentrasi pm2,5 menggunakan model aermod di jalur protokol kota bogor. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, 8(3), 213-222.

Jacob, D. J. (1999). Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton University Press.

Karvounis, D., Symeonidis, P., & Tsiros, I. (2007). *Sensitivity of AERMOD to changes in surface roughness length*

Khasanah, U., Huboyo, H. S., & Andarani, P. (2018). Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca (CO2) dan Polutan Udara (NOx, SOx, HC, CO dan PM10) Beserta Dipersinya Menggunakan Software Aermod pada Sektor Transportasi No Road di Kota Semarang. Jurnal Teknik Lingkungan, 1-9.

KLHK (2020). Laporan Status Lingkungan Hidup Indonesia 2020. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia

Kumar, Awkash & Patil, Rashmi & Dikshit, A. & Kumar, Rakesh. (2016). *Comparison of Predicted Vehicular Pollution Concentration with Air Quality Standards for Different Time Periods. Clean Technologies and Environmental Policy*. 18. 10.1007/s10098-016-1147-6.

Kurniawati, S., Prasetyawati, D., & Suryadarma, D. (2017). Emisi industri dan kualitas udara di Surabaya: Studi kasus polusi PM10. Indonesian Journal of Environmental Management, 5(1), 45-56.

Lakes Environmental Software. (2022). AERMOD View User Guide.

Lawrence, S., Sokhi, R., & Ravindra, K. (2016). Quantification of vehicle fleet PM10 particulate matter emission factors from exhaust and non-exhaust sources using tunnel measurement techniques. Environmental Pollution, 210, 419-428.

Leinawati, T., Soemirat, J., & Dirgawati, M. (2013). Studi Identifikasi Karakteristik Anorganik PM10 terhadap Mortalitas dan Morbiditas di Udara Ambien pada Kawasan Pemukiman. Jurnal Reka Lingkungan, 1(1), 35-45.

Lestari, P., & Maulana, T. (2014). Distribusi dan Komposisi Kimia PM10 di Wilayah Perkotaan. Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan, 6(1), 12–21.

Mahapatra, P. S., & Biswal, A. (2018). Meteorological influence on ambient PM10 concentration during wintertime in an urban environment. Environmental Monitoring and Assessment, 190(1), 36.

Nurfadillah, A. R. (2023). Penilaian Risiko Pajanan Total Suspended Particulate Pada Masyarakat. *Jambura Health And Sport Journal*, *5*(2), 104-113.

Ohorella, D. F. (2023). Analisis Dispersi Konsentrasi CO, NOx, dan PM10 dari Kendaraan Truk di Jalan Kabupaten Gowa= Dispersion Analysis of CO, NOx, and PM10 Concentrations from Truck Vehicles on Gowa Regency Roads (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).

Prasetyawati, D., Sari, D. K., & Kurniawati, S. (2021). *Construction activities and their contribution to PM10 pollution in urban areas: A case study in Jakarta. Journal of Urban Planning and Development*, 147(3), 04021025.

Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H. D. V., Jaya, A., & Limin, S. (2009). *The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997*. Nature, 420(6911), 61-65.

Rangga, B. (2014). Analisis Dispersi Gas Karbon Monoksida (CO) Dari Sumber Transportasi Menggunakan Model Meti-Lis. Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah, 2(1).

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change (3rd ed.). Wiley.

Sutriyono, E., Abidin, H. Z., & Driejana, R. (2018). *Forest and land fires as a source of PM_{10} pollution in Indonesia: A case study of Sumatra and Kalimantan. Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4), 234-245.

Suryadarma, D., Kurniawati, S., & Prasetyawati, D. (2019). *Long-term exposure to PM10 and its health impacts in Jakarta: A case study. Journal of Public Health in Developing Countries*, 5(1), 12-23.

Sari, D. K., Driejana, R., & Sutriyono, E. (2020). Vehicle emissions and their contribution to PM_{10} pollution in Jakarta: A case study. Journal of Air Pollution and Health, 5(2), 89-100.

Tarigan, S. D., Page, S. E., & Suryadarma, D. (2016). Dampak PM_{10} terhadap produktivitas pertanian di Indonesia: Studi kasus pertanian perkotaan di Jakarta. *Journal of Agricultural Science*, 8(3), 45-56.

Tiarani, Velida L., dkk "Kajian Beban Emisi Pencemar Udara (Tsp, Nox, So2, Hc, Co) dan Gas Rumah Kaca (Co2, Ch4, N2o) Sektor Transportasi Darat Kota YOGYAKARTA Dengan Metode Tier 1 Dan Tier 2." Jurnal Teknik Lingkungan, vol. 5, no. 1, 2016, pp. 1-10.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2022). *User's Guide for th*e AERMOD *Meteorological Preprocessor* (AERMET). *Research Triangle Park*, NC: USEPA.

USEPA (2015). User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET). EPA-454/B-15-002.

USEPA (2019). User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP). EPA-454/B-16-003.

Wangsa, D., Bachtiar, V. S., & Raharjo, S. (2022). Uji Model AERMOD Terhadap Sebaran Particulate Matter 10 µm (PM10) di Sekitar Kawasan PT Semen Padang. Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(2), 291-301.

Wardhana, W. A. 2004. Dampak Pencemaran Lingkungan. Yogyakarta: Andi World Health Organization (WHO). (2021). Air quality guidelines: global update 2021. Geneva: WHO Press.

Wijayanti, R. N. 2010. Analisis Pengaruh Kepadatan Lalu Lintas Terhadap Konsentrasi PM10. Teknik Lingkungan. Universitas Diponegoro. Semarang.

WHO (2021). WHO *Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. World Health Organization.*

Yang, Y., Wang, H., Zhang, L., Wang, Y., & Chen, J. (2017). The relationships between PM2.5 and meteorological factors in China: Seasonal and regional variations. Atmospheric Research, 198, 201–210.

Yu, S., Mathur, R., Pleim, J., Wong, D., Eder, B., & Kang, D. (2006). Comparison of the Eta-CMAQ air quality forecasts with measurements and analysis of the precipitation bias in CMAQ. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 45(4), 554–573. https://doi.org/10.1175/JAM2363.1

Yasir, M. (2021). Pencemaran Udara Di Perkotaan Berdampak Bahaya Bagi Manusia, Hewan, Tumbuhan dan Bangunan.

Ziernicka-Wojtaszek, A., Morga, R., & Bąk, J. (2024). Assessment of the Effect of Meteorological Conditions on the Concentration of Suspended PM2.5 Particulate Matter in Central Europe. Sustainability, 16(11), 4797. https://doi.org/10.3390/su16114797

Zellner, R. (2000). John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis: *Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change. Journal of Atmospheric Chemistry*, 37, 212214.

Zhou, Y., & Hanna, S. R. (2008). *Evaluation of the AERMOD dispersion model using field measurements. Atmospheric Environmen*t, 42(4), 854–865.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Contoh Perhitungan Inventarisasi Emisi

Diketahui :

- Panjang jalan (I) = 1,34 km
- Volume kendaraan per jam (Q) = 9081 kendaraan/jam
- Faktor emisi sepeda motor = 0,24 g/km
- Efisiensi peralatan pengendali (C) = 0 (karena tidak ada alat pengendali)

Maka,

1. VKT untuk kendaraan sepeda motor

   $VKT_{j,line}$ = 9081 kendaraan/jam x 1,34 km

   $VKT_{j,line}$ = 12189,4 km/jam

2. Perhitungan emisi (sepeda motor dengan asumsi C = 0)

   E_{cji} = 12189,4 km/jam x 0,24 g/km

   E_{cji} = 2925.46 g/jam

Lampiran 2 Contoh Perhitungan Sampling Partikulat PM_{10}

Diketahui :

- Laju alir volume (Q_0) = 1,2 m^3/menit
- Temperatur Standar (T_s) = 298 K
- Temperatur rata rata + tempetatur ukur (T_0) = 274+29,47 = 303,47 K
- Tekanan barometik standar (P_s) = 760 mmHg
- Tekanan barometik rata rata aktual (P_0) = 755,67 mmHg
- Pencatatan laju alir ke-i (Q_i) = 1.2 m^3/menit
- Jumlah pencatatan laju alir (n) = 24
- Durasi pengambilan contoh uji (t) = 1440 menit
- Berat Kertas Awal (W_1) = 3.5334 g
- Berat Kertas Akhir (W_2) = 3.6323 g

Maka:

1. Koreksi Laju Alir

$$Q_S = 1.2 \times \left(\frac{298 \times 755{,}67}{303{,}47 \times 760}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1.2 \times \left(\frac{225189.66}{230940.67}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1.2 \times (0.9750)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1.185 = 1.19\, m^3/menit$$

2. Volume udara yang terhisap

$$V = \frac{1.2 \times 24}{24} \times 1440\ menit$$

$$= 1.2 \times 1440\ menit$$

$= 1782\ Nm^3/menit$

3. Konsentrasi Partikulat PM_{10}

$$C = \frac{(3.6323 - 3.5334) \times 10^6}{1782}$$

$= 57.23\ \mu g/Nm^3$

Lampiran 3 Contoh Perhitungan RMSPE

Lampiran 4 Data Inventarisasi

No	Nama Jalan	P	L	A	P	$V_{kendaraan}$					VKT Garis				
		m	m	m^2	km	Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bis	Truk	Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bis	Truk
						(kendaraan/jam)					(km/jam)				
1	Jl Jend. Sudirman	1342.3	22.5	30201.75	1.34	3027	645	57	8	7	4063.1	866.2	76.1	10.7	8.9
2	Jl Urip Sumoharjo	940.2	11.5	10812.3	0.94	3466	968	135	16	7	3258.4	1298.9	181.7	21.0	8.9
3	Jl Laksda Adisucipto	2500	15	37500	2.50	8178	1489	229	21	15	20444.2	1998.2	307.8	28.2	19.7
4	Jl Timoho	802.1	7.4	5935.54	0.80	6105	1108	143	30	17	4897.1	1486.8	192.4	39.8	22.8
5	Jl Ipda Tut Harsono	1052.2	7.4	7786.28	1.05	3160	220	125	10	3	3325.3	294.9	168.2	13.0	4.0
6	Jl Kusumanegara	2413.3	10.2	24615.66	2.41	4851	1091	132	35	23	11707.7	1464.9	177.6	47.4	30.4
7	Jl Sultan Agung	1033.8	12	12405.6	1.03	4993	950	148	31	26	5162.1	1275.6	198.2	42.1	35.3
8	Jl Suryapranoto	513	8	4104	0.51	1293	187	113	22	17	663.3	250.6	151.2	29.5	23.3
9	Jl Dr. Sutomo	801.3	7	5609.1	0.80	4084	1241	170	17	7	3272.8	1666.2	228.6	22.4	9.4
10	Jl Dr. Wahidin Sudirohusodo	794.1	9	7146.9	0.79	6470	1166	293	30	22	5138.1	1565.1	392.8	40.7	29.5
11	Jl Panembahan Senopati	700.9	15	10513.5	0.70	4841	947	133	40	15	3393.3	1270.7	178.5	53.2	19.7

No	Nama Jalan	Faktor Emisi PM_{10}					Emisi Garis PM_{10}					$E_{garis\ Pm10}$ Total	$E_{garis\ Pm10}$ Total	$E_{garis\ Total}$ / luas jalan
		Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bus	Truk	Motor	Mobil Bensin	Mobil Solar	Bus	Truk			
		gr/km					gr/jam					gr/jam	gr/s	$g/sec/m^2$
1	Jl Jend. Sudirman	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	975.15	8.66	40.31	15.03	12.53	1051.69	0.292	0.000010
2	Jl Urip Sumoharjo	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	782.02	12.99	96.28	29.44	12.53	933.26	0.259	0.000024
3	Jl Laksda Adisucipto	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	4906.60	19.98	163.15	39.46	27.56	5156.76	1.432	0.000038
4	Jl Timoho	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	1175.30	14.87	101.97	55.75	31.95	1379.84	0.383	0.000065
5	Jl Ipda Tut Harsono	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	798.07	2.95	89.16	18.17	5.64	913.99	0.254	0.000033
6	Jl Kusumanegara	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	2809.85	14.65	94.14	66.40	42.60	3027.64	0.841	0.000034
7	Jl Sultan Agung	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	1238.91	12.76	105.05	58.88	49.49	1465.08	0.407	0.000033
8	Jl Suryapranoto	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	159.19	2.51	80.15	41.34	32.57	315.77	0.088	0.000021
9	Jl Dr. Sutomo	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	785.47	16.66	121.18	31.32	13.15	967.78	0.269	0.000048
10	Jl Dr. Wahidin Sudirohusodo	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	1233.14	15.65	208.21	57.00	41.34	1555.35	0.432	0.000060
11	Jl Panembahan Senopati	0.24	0.01	0.53	1.4	1.4	814.39	12.71	94.62	74.54	27.56	1023.82	0.284	0.000027
							15678.10	134.38	1194.24	487.34	296.92			

Lampiran 5 Data Meteorologi Sampling Lapangan

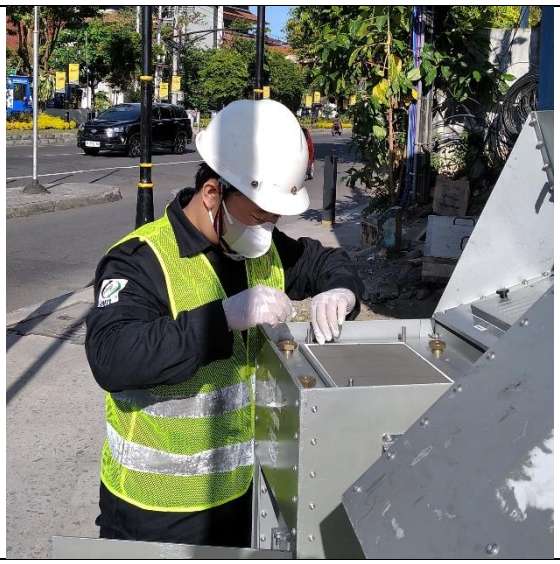
	Waktu (WIB)	Kelembaban (%RH)		Suhu (C)		Tekanan Udara (mmHg)		Kecepatan Angin (m/s)	
		Rata-rata		Rata-rata		Rata-rata		Rata-rata	
27/04/2025 (Jalan Jendral Sudirman)	08.00	64.8	65.01	31.3	29.47	746.7	755.67	1.2	0.95
	09.00	62.3		31.1		746.7		2.2	
	10.00	60.7		32.1		755.311		1.8	
	11.00	58.8		33.5		746.7		1.8	
	12.00	55		32		758.29		2.7	
	13.00	51		32.9		756.812		1.2	
	14.00	57		32.6		756.062		1.8	
	15.00	60.1		32.7		756.062		1.7	
	16.00	56.9		32.1		755.311		1.9	
	17.00	58.1		31		756.812		0.9	
	18.00	56.9		29		756.812		1.7	
	19.00	63.4		29		756.062		0.7	
	20.00	64.8		29.8		756.812		0.7	
	21.00	71.1		28		757.562		1.3	
	22.00	73.2		28.8		757.562		0	
	23.00	65.7		28.9		757.562		0	
	00.00	67.9		28.9		758.29		0	
	01.00	67.5		28.3		757.562		0	
	02.00	70.9		27.9		758.29		0	
	03.00	73.5		24		756.812		0	
	04.00	74.1		24		758.29		0	
	05.00	74.6		25.2		756.812		0	
	06.00	76.3		26		757.562		0	
	07.00	75.6		28.2		755.311		1.3	

	Waktu (WIB)	Kelembaban (%RH)		Suhu (C)		Tekanan Udara (mmHg)		Kecepatan Angin (m/s)	
		Rata-rata		Rata-rata		Rata-rata		Rata-rata	
01/05/2025 (Ipda Tut Harsono)	08.00	72.5	100.48	28.9	28.10	747.6	746.39	1.2	3.6
	09.00	71.5		29.2		747.5		2	
	10.00	67.1		31.2		747.5		1.2	
	11.00	67.2		30		746.8		1.9	
	12.00	65.7		31		746		2.8	
	13.00	66.2		30		745.7		1.5	
	14.00	66.4		31		745.4		2.2	
	15.00	65.4		31.3		745.1		1.3	
	16.00	68.5		30.3		745.5		1.5	
	17.00	70.2		30.1		746.0		1.1	
	18.00	71.7		29.5		746.1		1.5	
	19.00	73.2		29.5		746.8		0	
	20.00	80.1		28.5		747		0	
	21.00	77.5		28.8		747.2		0	
	22.00	76.1		28.9		747.1		0	
	23.00	77.3		28.3		747		0	
	00.00	76.2		28		746		0	
	01.00	77.1		28.2		746.2		0	
	02.00	76.3		28.5		747		0	
	03.00	74.3		27		745		0	
	04.00	745		27		745.3		0	
	05.00	74.9		26.9		745.7		0	
	06.00	76.4		26.7		746		0	
	07.00	74.8		28.3		746.5		1.7	

	Waktu (WIB)	Kelembaban (%RH)		Suhu (C)		Tekanan Udara (mmHg)		Kecepatan Angin (m/s)	
		Rata-rata		Rata-rata		Rata-rata		Rata-rata	
04/05/2025 (Laksda Adisucipto)	08.00	73.5	76.16	29.7	29.1	746	744.20	1.1	1.1
	09.00	73.9		30.7		745.9		1.3	
	10.00	63.4		34		745.7		1.1	
	11.00	62.5		34		745		2.1	
	12.00	59		34		743		2.2	
	13.00	67		33.3		743.3		1.6	
	14.00	80		29		743		1.5	
	15.00	72		29.7		743.5		1	
	16.00	75.9		29.8		743.8		1.8	
	17.00	71		29		744		1.3	
	18.00	73.3		28.6		744.6		2.8	
	19.00	74.1		28.4		743.2		0.7	
	20.00	73.4		28.3		743.6		0.9	
	21.00	77.7		28.2		745.5		1.4	
	22.00	81.5		27.6		745.3		1.7	
	23.00	80.8		28		745.1		1.3	
	00.00	81.7		28.2		744.5		1.4	
	01.00	83.6		27.8		744.1		0	
	02.00	87.6		27		743.5		1.1	
	03.00	87		27		743.5		1.2	
	04.00	84.1		27.6		743.3		1.4	
	05.00	85		27.2		743.4		0	
	06.00	82.1		27.7		743.5		1.7	
	07.00	77.8		28.7		744.4		1.7	

Lampiran 6 Dokumentasi Kegiatan Sampling

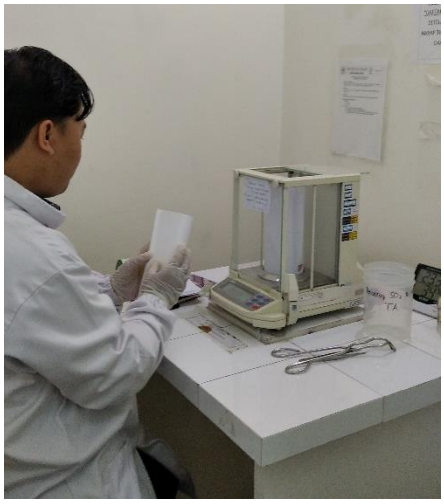
No	Tanggal	Foto
1	27 April 2025	 

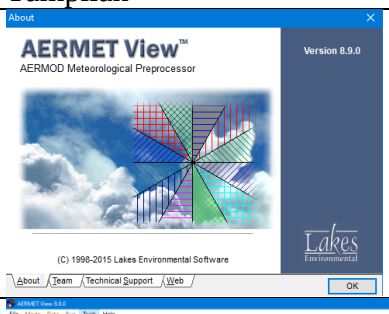
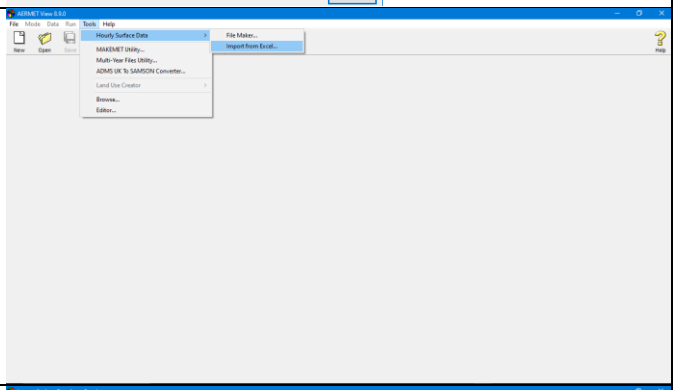
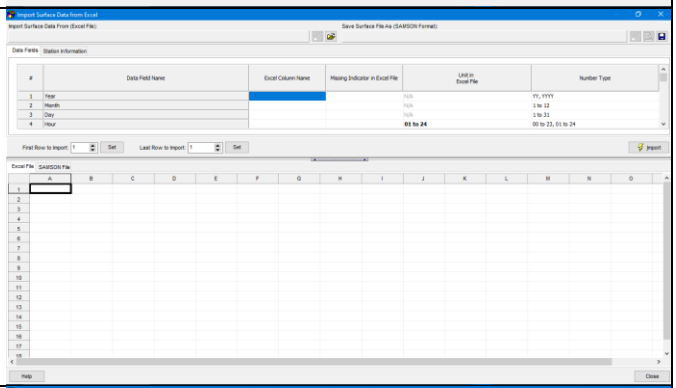
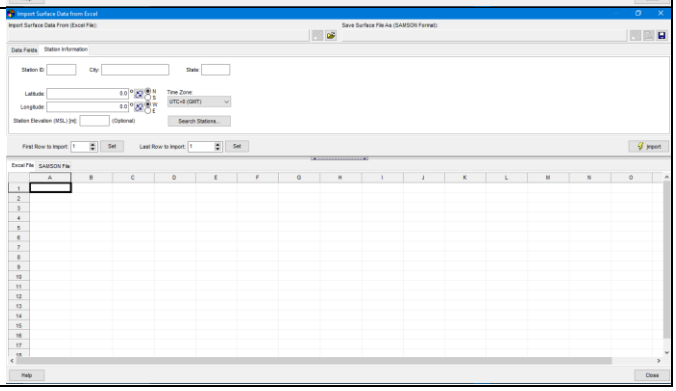
	01 Mei 2025	 

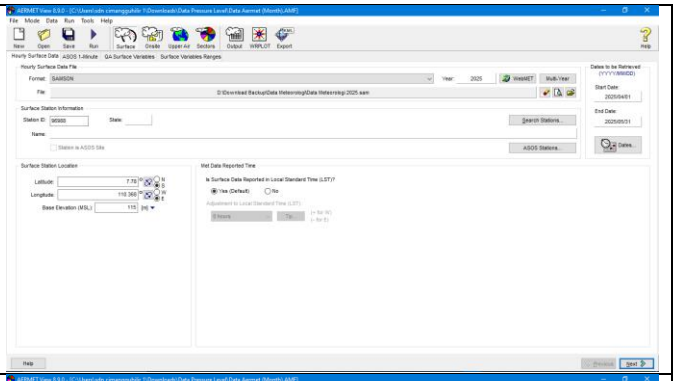
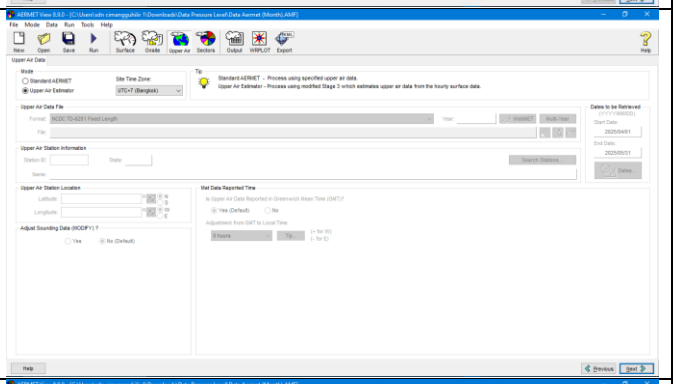
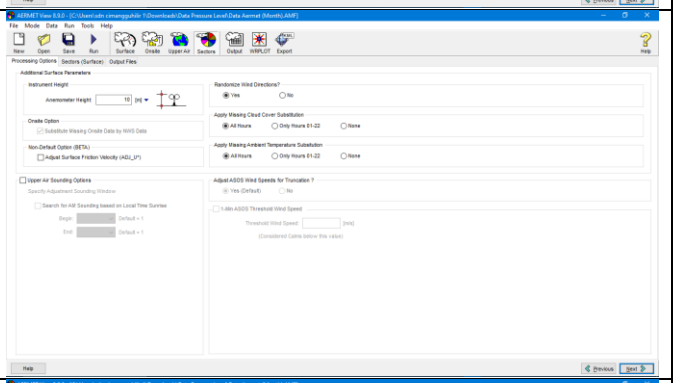
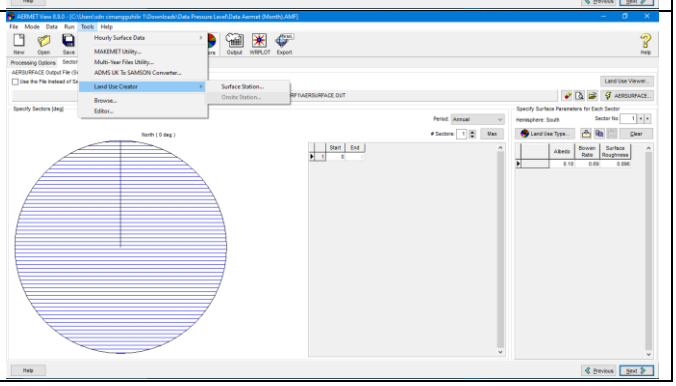
	06 Mei 2025	 	

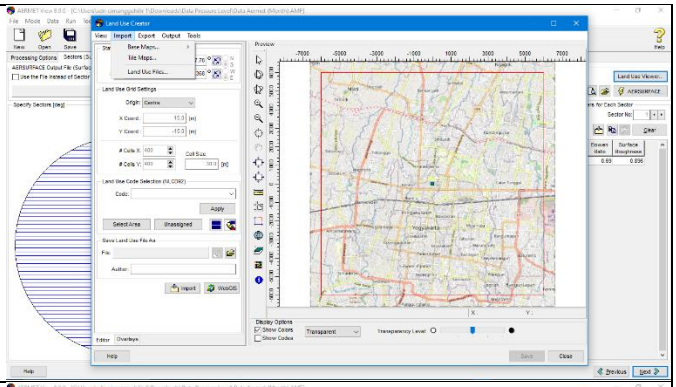
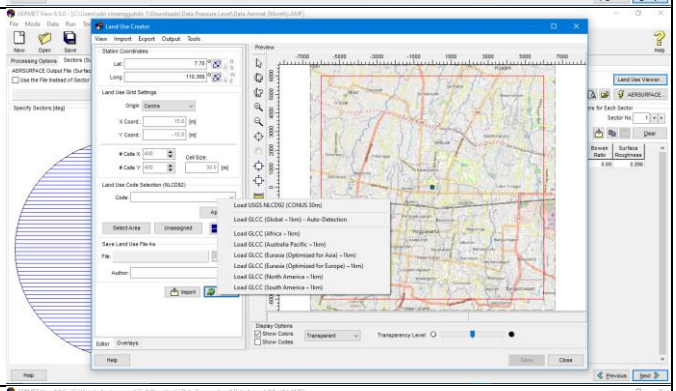
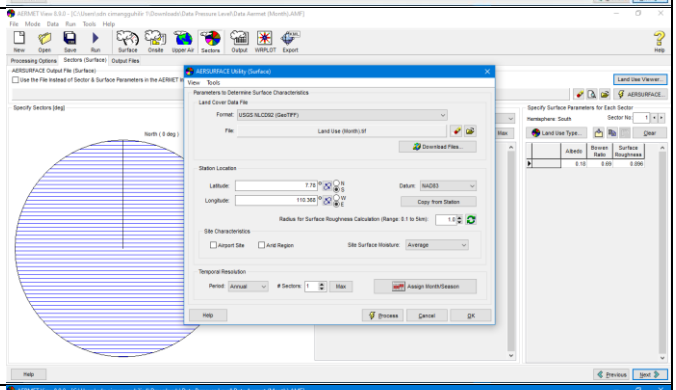
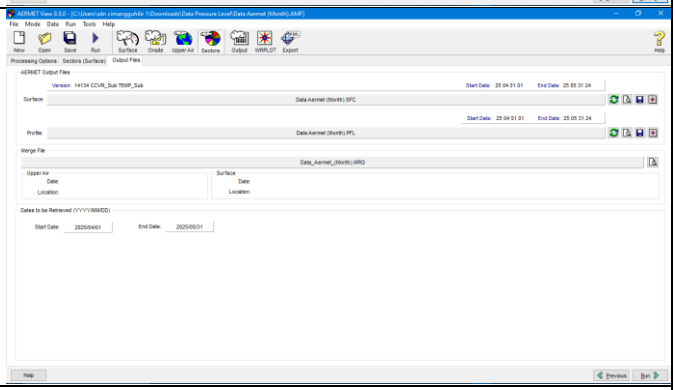
Lampiran 7 Dokumentasi Kegiatan Laboratorium

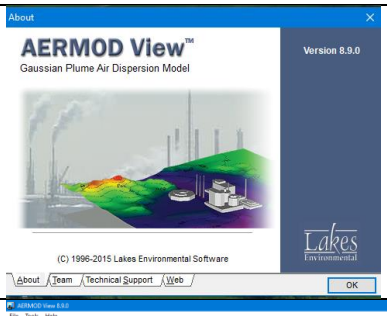
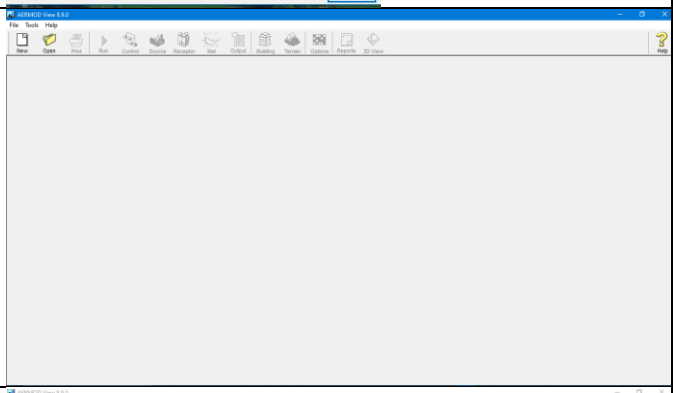
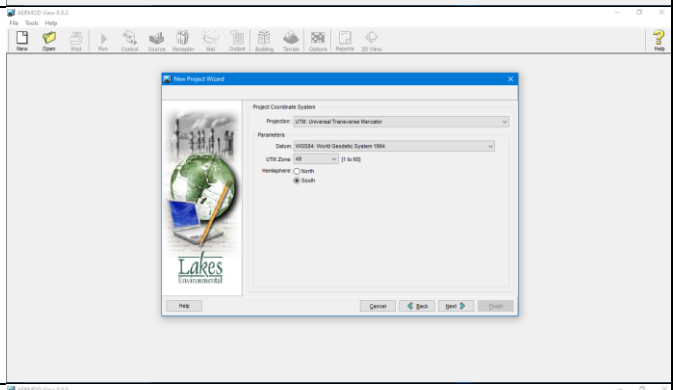
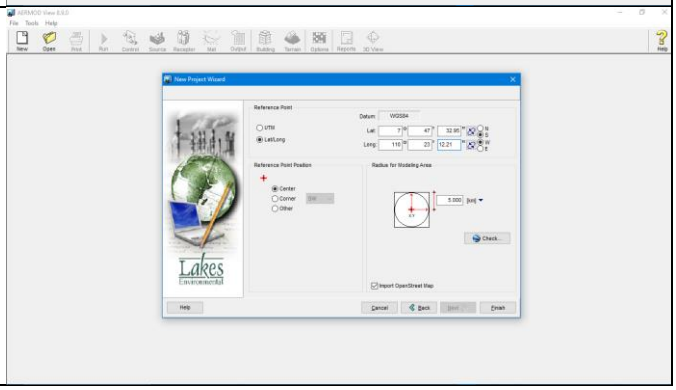


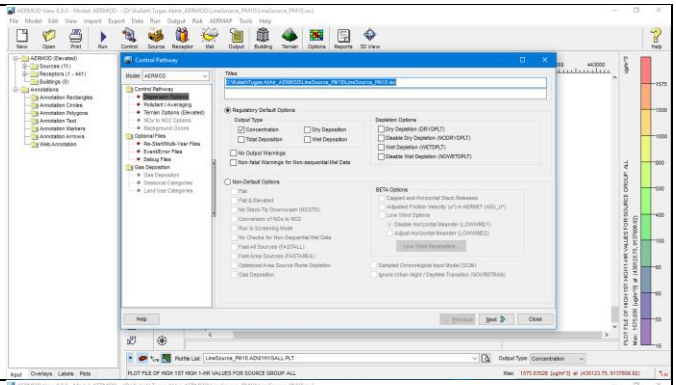
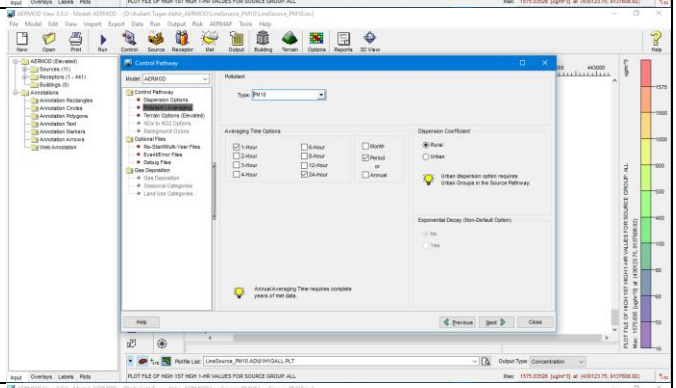
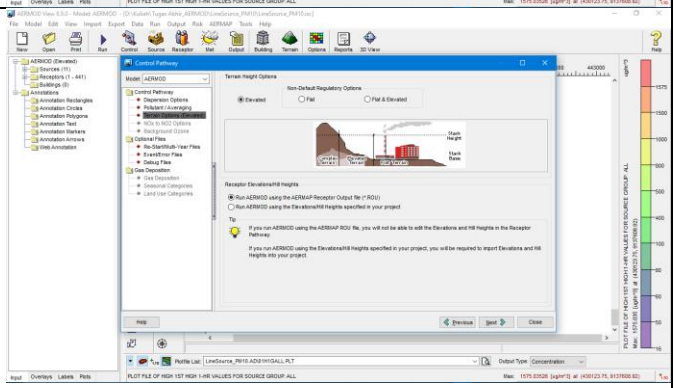
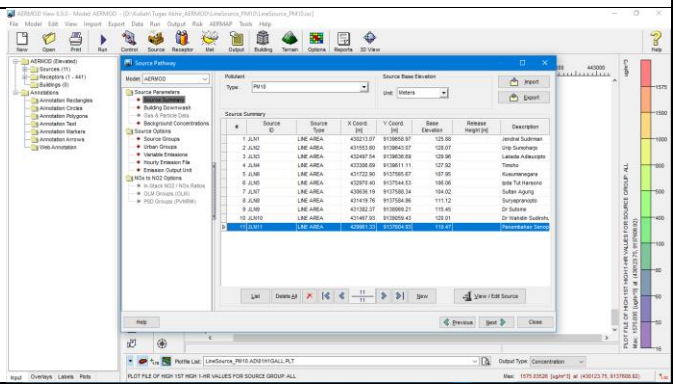


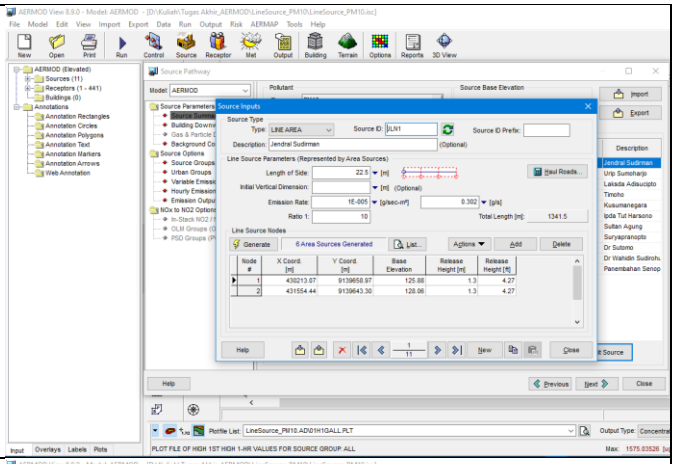
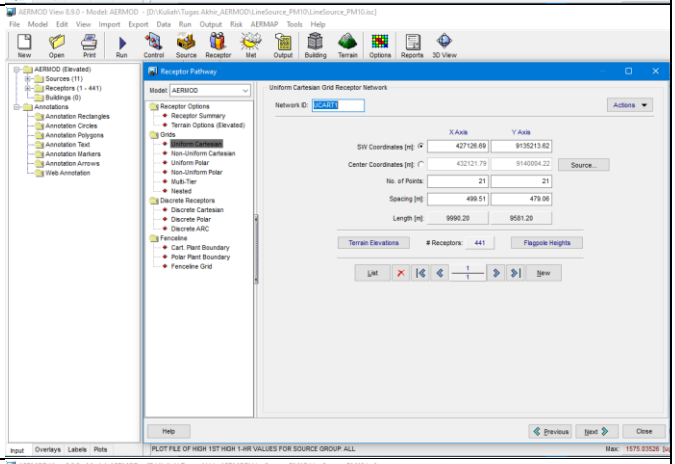
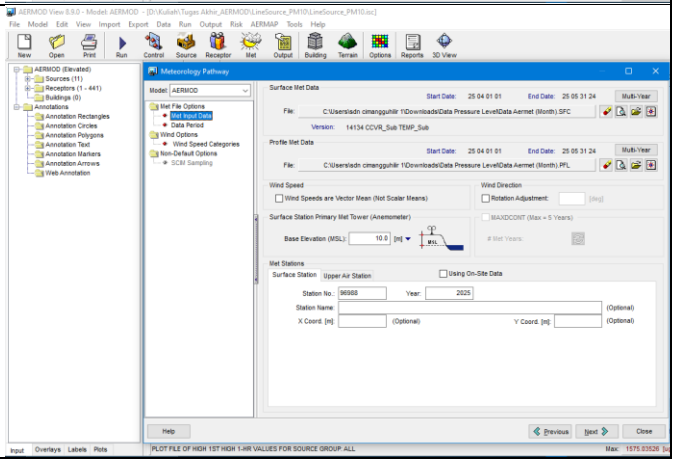
No		Tampilan
1	Tampilan depan AERMET	
	Masukan data meteorologi, berupa kelembaban, suhu, kecpatan angin, dan tekanan yang telah diolah dalam bentuk file excel. (Data Meteorologi dapat diunduh di Website CDS ERA5)	
	Isi kolom data sesuai kolom yang ada di excel, untuk *missing indicator* bisa diisi dengan nilai 9999	
	Untuk informasi stasiun bisa diisi dengan titik tengah dari lokasi sampling, untuk time zone disesuaikan. Setelah itu klik import	

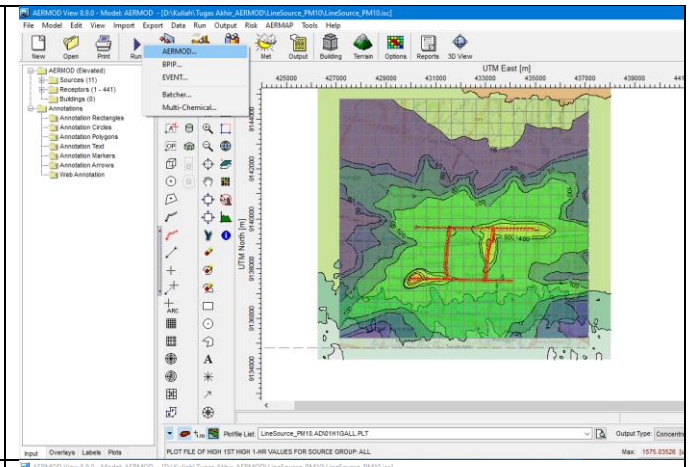
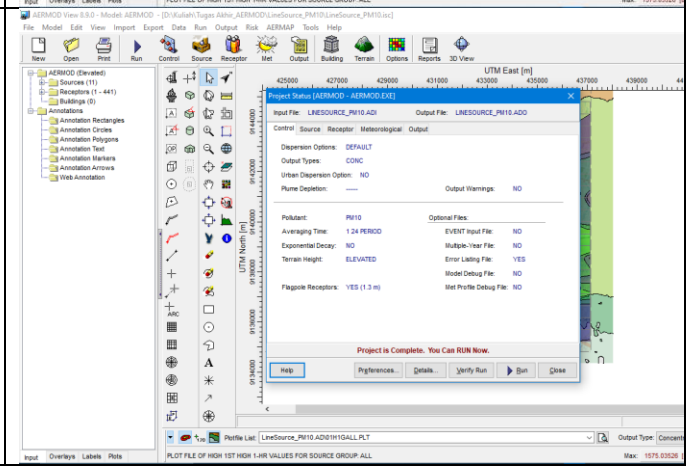
	Buat file baru, dan ubah format menjadi SAMSON, yang nanti diisi dengan data excel yang sebelumnya sudah diimport	
	Pilih Upper Air yang telah disediakan AERMOD dan sesuaikan time zone	
	Untuk *Anemometer High* diisi dengan nilai 10	
	Klik menu tools, land use creator dan surface station	

	Klik import dan pilih menu tile maps, nanti setelah muncul tnggal apply	
	Untuk WebGis pilih yang Auto-Detection, setelah itu save	
	Tekan tombol AERSURFACE, masukan file land use yang telah dibuat tadi dan klik process	
	Diakhir tinggal tekan tombol run	

	Tampilan depan AERMOD	
	Buat file baru	
	Untuk UTM zone disesuaikan dengan lokasi penelitian, dalam penelitian ini Yogyakarta berada pada zona 49 S	
	Masukan koordinat tengah dari wilayah sampling, dengan radius 5 km, untuk melihat keakuratan koordinat bisa menekan tombol check	

	Pilih Control pathway, Type outputnya concentration	
	Pilih polutan yang akan dimodelkan, dalam penelitian ini adalah PM10, pilih juga rata rata waktunya, serta pilih antara perkotaan atau pedesaan	
	Pilih kondisi geografi wilayah, datar, elevasi, atau keduanya	
	Pilih menu source pathway dan sesuaikan type outputnya	

	Tinggal masukan data yang telah disiapkan pada source input	
	Reseptor pathway bisa menggunakan alat berupa grid	
	Untuk meteorologi, masukan file type SFC dan PFL yang sebelumnya telah disiapkan di AERMET	

	Tekan tombol run dan pilih AERMOD	
	Terakhir tekan tombol run, jika pemberitahuan menunjukan status Complete	

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Majalengka pada tanggal 06 Januari 2003. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Sarkosi dan Nenah. Pendidikan formal dimulai di RA Nurul Fathah, Dusun Cibeurih. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan dasar di SD Negeri 2 Bantarujeg dari tahun 2009 hingga 2015. Setelah lulus SD, penulis melanjutkan ke MTsN 5 Majalengka dari tahun 2015 hingga 2018, kemudian menempuh pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Bantarujeg dari tahun 2018 hingga lulus pada tahun 2021. Saat ini, penulis sedang menyelesaikan pendidikan Strata 1 (S1) di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan kampus seperti acara jurusan, organisasi kemahasiswaan, serta bergabung dalam unit *Students Staff Marketing Communcation*, di mana penulis bertugas sebagai Video Editor, Dokumentasi, dan Operator *Streaming*. Penulis aktif dalam himpunan mahasiswa program studi sejak semester 4 hingga semester 6, dan pernah menjabat sebagai Kepala Departemen Informasi dan Komunikasi pada periode tahun 2023. Penulis juga beberapa kali mengikuti lomba video, baik di tingkat internal kampus maupun eksternal, sebagai bentuk pengembangan diri di bidang video editing. Pada bulan April 2024, penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Pertamina Gheotermal Energi Area Kamojang sebagai bagian dari syarat akademik. Topik kerja praktik yang diangkat adalah Analisa Pemanfaatan Limbah Bekas *Filler Cooling Tower* Untuk Kegiatan Pertanian di PT. PGE Area Kamojang. Penulis juga telah melaksanakan penelitian Tugas Akhir dari bulan Februari hingga Juli 2025, dan menyelesaikan penulisan penelitian tersebut pada bulan Juli 2025 sebagai bagian dari syarat kelulusan di Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia.