



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Pemodelan Kualitas Udara Ambien Parameter *Particulate Matter* 2,5 (PM_{2,5}) Menggunakan *Software* AERMOD di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya

Baiq Amanda Mustika Utari
21513118

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

Modeling of Ambient Air Quality for Particulate Matter 2,5 (PM_{2,5}) Using AERMOD Software in Yogyakarta and Its Surrounding Regions

Baiq Amanda Mustika Utari
21513118

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

**Pemodelan Kualitas Udara Ambien Parameter *Particulate Matter*
2,5 (PM_{2,5}) Menggunakan *Software* AERMOD di Kota Yogyakarta
dan Sekitarnya**

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.

Baiq Amanda Mustika Utari
21513118

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


Noviani Ima Wardiputri, S.T., M.T.

(Pembimbing 1)


Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

(Pembimbing 2)


Ir. Luqman Hakim, S.T., M.Si.

(Penguji)

Mengetahui,
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

  19/9-25
Arsyad Hani, 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, 29 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,



Baiq Amanda Mustika Utari
21513118

PRAKATA

Alhamdulillahirabbil'alamin, rasa syukur kepada Allah SWT atas berkat rahmat, karunia, dan hidayah-Nya yang telah memberikan penulis kesehatan, kemudahan, kelancaran dan kesabaran untuk menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Pemodelan Kualitas Udara Ambien Parameter *Particulate Matter* 2,5 (PM_{2,5}) Menggunakan *Software* AERMOD di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya”**. Tugas akhir ini disusun sebagai syarat untuk lulus jenjang Strata-1 serta memperoleh gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Proses penyusunan laporan ini tentunya tidaklah mudah, karena memerlukan waktu, tenaga, konsistensi, dan kesabaran, serta dukungan oleh berbagai pihak yang telah memberikan bantuan baik secara moral, akademik, maupun teknis. Dengan segala kerendahan hati serta teriring kasih dan sayang, penulis ingin menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan segala nikmat-Nya baik berupa kesehatan, kemudahan, kelancaran dan kesabaran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua yang sangat penulis cintai, Bapak Dr. H. Lalu Mukhtar, M.Pd. dan Ibu Nurmayati Amd.Keb. yang selalu memberikan doa, dukungan, kasih sayang yang tiada henti, memberi kecukupan materi, semoga penulis bisa menjadi anak yang shalehah dan menjadi investasi ke surga karena sudah memperjuangkan penulis untuk menjadi orang yang berilmu, baik dunia maupun akhirat. Serta kakak yang paling penulis sayangi, Baiq Alma Nurma Utari, terimakasih atas segala bentuk dukungan, semangat, dan perhatian yang senantiasa diberikan selama penulis menjalani proses penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih telah menjadi sosok yang selalu hadir kapan pun penulis membutuhkan tempat untuk berbagi cerita dan keluh kesah. Kehadiran kakak sebagai

pendengar setia dan penyemangat 24/7 merupakan anugerah yang sangat berarti dan menjadi kekuatan tersendiri bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

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 memberikan arahan, masukan, bimbingan, serta semangat kepada penulis sejak awal hingga selesainya penyusunan laporan ini.
4. Ir. Luqman Hakim, S.T., M.Si. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran serta masukan selama proses sidang tugas akhir.
5. Seluruh Dosen dan staff prodi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia yang telah dengan penuh dedikasi membimbing, menginspirasi, serta membagikan ilmu pengetahuan dan pengalaman selama masa studi.
6. Seluruh keluarga besar H. Sayuti Akhyar dan keluarga besar H. Lalu Badlah, terimakasih atas segala doa, dukungan, serta kasih sayang yang tiada henti, yang telah diberikan selama penulis menempuh pendidikan hingga menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Sepupu-sepupu yang penulis sayangi, Icak, Mina, Ami dan Nava, yang selalu menjadi 24/7 dan menjadi tempat berbagi keluh kesah penulis. Kehadiran kalian sebagai teman berbagi, pendengar setia, dan penyemangat 24/7 telah menjadi salah satu kekuatan emosional yang sangat berarti dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih atas tawa, perhatian, dan kehadiran kalian yang tak ternilai.
8. Teman-teman seperjuangan selama masa kuliah, TL'21 dan Rencang-Rencang VT.280, yang telah mewarnai hari-hari selama masa kuliah dan memberikan dukungan serta semangat kepada penulis.
9. Last but not least, terimakasih untuk diri sendiri, Baiq Amanda Mustika Utari, apresiasi yang sebesar-besarnya karena sudah mampu bertahan, berjuang dan berusaha untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai dengan menikmati segala proses yang bisa dibilang tidak mudah. Seperti yang terselip dalam lirik berikut "You gave me the best of me, so you'll

give you the best of you." Maka terima kasih, untuk diriku sendiri, karena telah berani memberi versi terbaik dari diri ini, bahkan di masa yang tidak mudah. Tetap semangat, masih banyak wishlist yang belum tercentang!. Love me so much. Proud of me.

Sleman, 29 Juli 2025

Baiq Amanda Mustika Utari

Pemodelan Kualitas Udara Ambien Parameter Particulate Matter 2,5 (PM_{2,5}) Menggunakan *Software* AERMOD di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya

Mahasiswa : Baiq Amanda Mustika Utari
NIM : 21513118
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing I : Noviani Ima Wantoputr, S.T., M.T.
Pembimbing II : Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Abstrak

Peningkatan aktivitas transportasi di Kota Yogyakarta dan sekitarnya berkontribusi signifikan terhadap pencemaran udara, khususnya konsentrasi *Particulate Matter 2,5* (PM_{2,5}). Penelitian ini bertujuan untuk menghitung beban emisi sektor transportasi, menghitung konsentrasi PM_{2,5} melalui pengukuran langsung, menganalisis model sebaran PM_{2,5} menggunakan perangkat lunak AERMOD, serta memvalidasi hasil model dengan hasil pengukuran. Inventarisasi emisi menghasilkan nilai beban emisi PM_{2,5} tertinggi yang berasal dari kendaraan roda dua (motor). Pengukuran langsung menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS) menunjukkan konsentrasi PM_{2,5} tertinggi sebesar 53,2 µg/m³ di Jalan Laksda Adisucipto, sedangkan pemodelan AERMOD menunjukkan konsentrasi tertinggi sebesar 113,551 µg/m³ di Jalan Laksda Adisucipto. Pola sebaran dari hasil model menunjukkan distribusi polutan dominan mengarah ke utara. Validasi hasil model terhadap data lapangan menggunakan metode *Root Mean Square Percentage Error* (RMSPE) didapat sebesar 98,626 % yang artinya nilai ini termasuk dalam kategori kurang merepresentasikan hasil yang mendekati kondisi aktual.

Kata kunci: AERMOD, Beban Emisi, Kota Yogyakarta dan Sekitarnya, *Particulate Matter 2,5* (PM_{2,5}).

***Modeling of Ambient Air Quality for Particulate Matter 2.5
(PM_{2.5}) Using AERMOD Software in Yogyakarta and Its
Surrounding Regions***

Student : Baiq Amanda Mustika Utari
Student Number : 21513118
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

Increased transportation activity in Yogyakarta City and its surrounding areas contributes significantly to air pollution, particularly the concentration of Particulate Matter 2,5 (PM_{2,5}). This study aims to calculate the emission load of the transportation sector, measure PM_{2,5} concentrations through direct measurements, analyze PM_{2,5} dispersion models using AERMOD software, and validate model results with measurement data. The emission inventory revealed the highest PM_{2,5} emission load originating from two-wheeled vehicles (motorcycles). Direct measurements using a High Volume Air Sampler (HVAS) showed the highest PM_{2,5} concentration of 53,2 µg/m³ on Jalan Laksda Adisucipto, while AERMOD modeling indicated the highest concentration of 113,551 µg/m³ on Jalan Laksda Adisucipto. The distribution pattern from the model results shows that the dominant pollutant distribution is toward the north. Validation of the model results against field data using the Root Mean Square Percentage Error (RMSPE) method yielded a value of 98,626 %, which means this value falls into the category of not adequately representing results close to actual conditions.

Key words: AERMOD, Emission Load, Particulate Matter 2,5 (PM_{2,5}), Yogyakarta City and Surrounding Areas

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
Abstrak.....	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Pencemaran Udara	6
2.1.1 Sumber Pencemaran Udara.....	6
2.2 Particulate Matter 2,5 (PM _{2,5})	8
2.2.1 Karakteristik PM _{2,5}	9
2.2.2 Sumber <i>Particulate Matter</i> 2,5 (PM _{2,5})	11
2.2.3 Dampak <i>Particulate Matter</i> 2,5 (PM _{2,5}) Terhadap Kesehatan	13
2.2.4 Dampak <i>Particulate Matter</i> 2,5 (PM _{2,5}) Terhadap lingkungan.....	14
2.2.5 Baku Mutu Udara Ambien <i>Particulate Matter</i> 2,5 (PM _{2,5})	14
2.2.6 Faktor yang Mempengaruhi Persebaran Polutan.....	15
2.3 <i>High Volume Air Sampler</i> (HVAS)	17
2.4 Pemodelan AERMOD.....	19
2.5 Penelitian Terdahulu	23

BAB III METODE PENELITIAN	26
3.1 Diagram Alir Penelitian	26
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	27
3.2.1 Lokasi Penelitian	27
3.2.2 Waktu Penelitian.....	29
3.3 Pengumpulan Data	29
3.3.1 Jenis Data.....	29
3.3.2 Pengambilan Sampel	32
3.3.3 Pengujian Laboratorium	32
3.4 Analisis Data	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
4.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian	40
4.2 Inventarisasi Emisi Kendaraan.....	41
4.2.1 Perhitungan Volume Kendaraan.....	41
4.2.2 Perhitungan Inventarisasi Emisi Kendaraan.....	45
4.3 Pengambilan Konsentrasi PM _{2,5} di Lapangan.....	51
4.3.1 Hasil Sampling Data Meteorologi	51
4.3.2 Hasil Pengukuran Konsentrasi PM _{2,5} di Lapangan.....	56
4.4 Visualisasi Penyebaran Konsentrasi PM _{2,5} Menggunakan Aplikasi AERMOD	61
4.5 Perbandingan Konsentrasi Hasil Sampling dengan Konsentrasi Hasil Software AERMOD	70
4.6 Uji Hasil Validasi Model	72
BAB V PENUTUP	74
5.1 Kesimpulan	74
5.2 Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	84
RIWAYAT HIDUP	102

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Baku Mutu Udara Ambien untuk PM _{2,5}	15
Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu	23
Tabel 3. 1 Lokasi Jalan Penelitian	27
Tabel 3. 2 Lokasi CCTV untuk Volume Kendaraan.....	30
Tabel 3. 3 Pengumpulan Data Primer dan Data Sekunder.....	31
Tabel 3. 4 Faktor Emisi Kendaraan Umum	34
Tabel 4. 1 Volume Kendaraan	41
Tabel 4. 2 Beban Emisi di Setiap Jalan.....	46
Tabel 4. 3 Data Meteorologi di Lokasi Sampling.....	53
Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Konsentrasi PM _{2,5} di Lapangan.....	56
Tabel 4. 5 Data <i>Line Area Source</i>	65
Tabel 4. 6 Perbandingan Konsentrasi PM _{2,5} Hasil Pemodelan dan Hasil Sampling	70
Tabel 4. 7 Uji Validitas Model	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perbandingan ukuran $PM_{2,5}$ dan PM_{10}	10
Gambar 2. 2 High Volume Air Sampler (HVAS).....	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3. 2 Lokasi Penelitian.....	28
Gambar 3. 3 Alur Persiapan Filter	35
Gambar 3. 4 Alur Pengambilan Contoh Uji.....	35
Gambar 3. 5 Alur Penimbangan Contoh Uji.....	36
Gambar 3. 6 Tahapan Pengolahan Data Pemodelan AERMOD.....	37
Gambar 4. 1 Rekapitulasi Rata-Rata Volume kendaraan di Setiap Jalan	44
Gambar 4. 2 Perbandingan Volume Kendaraan Berdasarkan Jenis	44
Gambar 4. 3 Tingkat Emisi Jenis Kendaraan di Lokasi Pengukuran	47
Gambar 4. 4 Akumulasi Total Emisi di Setiap Jalan	47
Gambar 4. 5 Perbandingan Rerata Volume dan Emisi Kendaraan	48
Gambar 4. 6 Rerata Konsentrasi $PM_{2,5}$ di Lapangan	57
Gambar 4. 7 Tutupan Lahan di Lokasi Penelitian	62
Gambar 4. 8 <i>Windrose</i> Berdasarkan Data Meteorologi	64
Gambar 4. 9 Distribusi Frekuensi Kelas Kecepatan Angin Lokasi Pengukuran	64
Gambar 4. 10 Peta Sebaran Konsentrasi $PM_{2,5}$ Selama 24 Jam	66
Gambar 4. 11 Pola Sebaran Polutan $PM_{2,5}$ Menuju SMA 8 Yogyakarta.....	68
Gambar 4. 12 Pola Sebaran Polutan $PM_{2,5}$ Menuju Ambarukmo Plaza.....	68
Gambar 4. 13 Pola Sebaran Polutan $PM_{2,5}$ Menuju RS Panti Rapih	68

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Contoh Perhitungan Inventarisasi Emisi	84
Lampiran 2 Contoh Perhitungan Konsentrasi Sampling PM _{2,5}	84
Lampiran 3 Contoh Perhitungan RMSPE.....	85
Lampiran 4 Data Inventarisasi Emisi.....	86
Lampiran 5 Data Meteorologi Saat Sampling	88
Lampiran 6 Tahapan Detail Pemodelan AERMOD	90
Lampiran 7 Dokumentasi Sampling	99

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Udara adalah elemen krusial bagi kehidupan manusia dan berfungsi sebagai media yang langsung terhubung dengan sistem pernapasan. Udara yang dihirup seharusnya dalam kondisi bersih dan bebas dari polutan (Hasbiah dkk., 2016). Menurut data dari *Index Quality Air (IQ Air)*, pada tahun 2023, Indonesia menduduki peringkat ke-14 sebagai salah satu negara dengan tingkat polusi udara tertinggi di dunia. Pencemaran udara dapat berasal dari berbagai sumber, baik yang alami maupun buatan yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Sumber alami termasuk letusan gunung berapi dan kebakaran hutan, sedangkan sumber buatan meliputi kegiatan industri, pembangkit listrik, pembakaran sampah, serta emisi dari kendaraan bermotor dan lainnya. Menurut Andrian (2019), menyatakan bahwa sekitar 60-70% pencemaran udara berasal dari sektor transportasi, yang memberikan kontribusi secara signifikan. Sementara itu, 10-15% berasal dari sektor industri, dan sisanya berasal dari rumah tangga, kebakaran hutan, serta pembakaran sampah terbuka.

Daerah Istimewa Yogyakarta merupakan salah satu wilayah metropolitan di Indonesia dengan tingkat aktivitas yang sangat tinggi. Daerah Istimewa Yogyakarta berperan sebagai pusat pariwisata, pendidikan, transportasi, dan perdagangan, sehingga mobilitas kendaraan di kota ini sangat padat. Peningkatan jumlah kendaraan bermotor seiring dengan pertumbuhan penduduk berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan polusi udara. Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Yogyakarta menunjukkan bahwa pada tahun 2024 terdapat sekitar 3,53 juta unit kendaraan yang beroperasi di seluruh Daerah Istimewa Yogyakarta (BPS Yogyakarta, 2025).

Menurut Tarigan dkk. (2014), emisi dari pembakaran bahan bakar fosil oleh kendaraan bermotor adalah salah satu penyebab utama pencemaran udara yang dapat meningkatkan kadar partikel halus. *Particulate Matter* 2,5 μm (PM_{2,5}) merupakan salah satu jenis polutan yang sangat berbahaya, berbentuk partikel yang sangat halus dengan ukuran yang sangat kecil yaitu kurang dari atau sama dengan

2,5 mikrometer. $PM_{2,5}$ cenderung lebih mudah terhirup dan dapat mencapai saluran pernapasan bagian dalam, sehingga memiliki efek yang lebih signifikan dibandingkan dengan partikel yang lebih besar. Paparan jangka panjang terhadap $PM_{2,5}$ dapat menyebabkan infeksi saluran pernapasan akut dikarenakan ukuran dari partikel ini yang sangat kecil sehingga memiliki tingkat toksisitas yang lebih tinggi. Hal ini membuat $PM_{2,5}$ lebih mudah masuk ke dalam tubuh manusia dan berpotensi menimbulkan berbagai masalah kesehatan.

Polusi udara, khususnya yang disebabkan oleh $PM_{2,5}$, diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan perkembangan kota dan bertambahnya jumlah kendaraan bermotor. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang tepat untuk memprediksi dan memahami pola penyebaran polutan di atmosfer. Misalnya dengan adanya stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU) yang digunakan untuk mengukur, memantau serta menganalisis kondisi udara di suatu wilayah secara real time maupun berkala. Adapun stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU) yang berada di Daerah Istimewa Yogyakarta berjumlah 2 stasiun yang terletak di Gondokusuman dan Sleman yang merupakan milik dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Yogyakarta. Akan tetapi, jika hanya mengandalkan beberapa stasiun ini untuk mengukur, memantau serta menganalisis kondisi udara, tidak akan bisa mencakup keseluruhan Kota Yogyakarta dan Sekitarnya. Dikarenakan adanya keterbatasan jumlah dan lokasi dari stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU) ini, maka digunakanlah suatu model yang dapat melihat secara spasial atau secara luas bagaimana konsentrasi polutan $PM_{2,5}$ di udara. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk memodelkan kualitas udara adalah dengan *American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model* (AERMOD). *American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model* (AERMOD) merupakan perangkat lunak pemodelan yang telah direkomendasikan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) untuk mensimulasikan penyebaran polutan di atmosfer dari berbagai sumber, termasuk sumber titik, garis, dan area.

Pada penelitian sebelumnya yang berjudul “Penggunaan AERMOD Untuk Kajian Simulasi Dampak Pencemaran Karbon Monoksida di Kota Yogyakarta Akibat Emisi Kendaraan Bermotor” telah menggunakan AERMOD untuk mengkaji

simulasi dampak pencemaran karbon monoksida (CO) akibat emisi kendaraan bermotor di Kota Yogyakarta. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi CO dari aktivitas transportasi yang disimulasikan dengan AERMOD masih berada di bawah baku mutu berdasarkan Keputusan Gubernur Daerah Istimewa Yogyakarta No. 153 Tahun 2002. Konsentrasi CO berdasarkan simulasi tahun 2025 di lokasi penelitian mencapai $\pm 16.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (16 ppm). Namun, penelitian terkait pemodelan penyebaran polutan udara di Kota Yogyakarta dan sekitarnya masih terbatas pada parameter $\text{PM}_{2,5}$. Oleh karena itu, sangat diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui, memprediksi, serta memahami pola penyebaran polutan $\text{PM}_{2,5}$ menggunakan perangkat lunak AERMOD. Mengingat bahwa penelitian sebelumnya belum membahas persebaran polutan $\text{PM}_{2,5}$ di wilayah Kota Yogyakarta dan sekitarnya, penelitian ini menjadi sangat penting untuk memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai kualitas udara ambien. Sebagai mahasiswa Teknik Lingkungan, saya sangat tertarik untuk mendalami pemodelan kualitas udara, khususnya untuk parameter $\text{PM}_{2,5}$, guna mendukung upaya mitigasi pencemaran udara dan meningkatkan kualitas lingkungan di kawasan perkotaan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, maka dirumuskanlah beberapa masalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimana nilai beban emisi yang dihasilkan dari kegiatan sektor transportasi di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya?
- 2) Bagaimana nilai konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ dari kegiatan sektor transportasi di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya?
- 3) Bagaimana pola sebaran $\text{PM}_{2,5}$ di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya berdasarkan pemodelan menggunakan *software* AERMOD?
- 4) Bagaimana tingkat akurasi hasil uji validasi menggunakan hasil pemodelan AERMOD dibandingkan dengan sampling langsung menggunakan HVAS?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Menghitung nilai beban emisi yang dihasilkan dari sektor transportasi di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya.
- 2) Menghitung nilai konsentrasi $PM_{2,5}$ hasil pengukuran HVAS dari kegiatan sektor transportasi di Kota Yogyakarta dan sekitarnya.
- 3) Menganalisis pola sebaran konsentrasi $PM_{2,5}$ di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya berdasarkan pemodelan menggunakan *software American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model* (AERMOD).
- 4) Menganalisis tingkat akurasi hasil model dengan hasil sampling menggunakan HVAS.

1.4 Manfaat Penelitian

Diharapkan pada penelitian ini dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- 1) Memberikan informasi terkait konsentrasi $PM_{2,5}$ dan juga persebaran $PM_{2,5}$ menggunakan *software* AERMOD di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya.
- 2) Dapat mengasah kemampuan peneliti dalam penerapan ilmu dan materi yang telah didapatkan selama proses perkuliahan yang disesuaikan dengan kondisi di lapangan.
- 3) Dapat memberikan manfaat bagi penelitian selanjutnya dan bisa digunakan sebagai sumber dan bahan kajian untuk peneliti selanjutnya menggunakan *software* AERMOD.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Lokasi penelitian dibagi menjadi dua kategori yakni jalan primer dan jalan sekunder. Jalan primer merupakan jalan yang digunakan untuk pengambilan konsentrasi $PM_{2,5}$ secara langsung tepatnya berada di 3 titik lokasi yakni lokasi pertama berada di Jalan Jendral Sudirman, lokasi kedua berada di Jalan Ipda Tut Harsono dan lokasi ketiga berada di Jalan Laksda Adisucipto. Sedangkan jalan sekunder merupakan jalan yang digunakan

untuk menghitung jumlah kendaraan guna menghitung nilai inventarisasi emisi melalui CCTV yang ada di beberapa jalan berikut yakni Jalan Urip Sumoharjo, Jalan Timoho, Jalan Kusumanegara, Jalan Sultan Agung, Jalan Panembahan Senopati, Jalan Suryopranoto, Jalan Dr. Sutomo dan Jalan Dr. Wahidin Sudirohusodo.

- 2) Parameter pencemar udara yang diteliti yaitu $PM_{2,5}$.
- 3) Waktu pengambilan sampel $PM_{2,5}$ dilakukan dari bulan April 2025 hingga Mei 2025. Selama 3 hari yakni hari minggu (27 April 2025), Kamis (1 Mei 2025) dan Rabu (6 Mei 2025). Masing masing dilakukan selama 24 jam penuh.
- 4) Melakukan sampling parameter $PM_{2,5}$ menggunakan *High Volume Air Sampler* (HVAS) yang telah ditetapkan sesuai dengan SNI 7119.14 : 2016 tentang Cara Uji $PM_{2,5}$ menggunakan Metode Gravimetri dengan waktu pengambilan sampel selama 24 jam.
- 5) Menghitung jumlah kendaraan untuk inventarisasi beban emisi sumber garis di jalan primer dan jalan sekunder, masing-masing selama 1 jam di pagi hari pukul 07.00–08.00 (awal aktivitas), siang hari pukul 12.00–13.00 (waktu istirahat), dan sore hari pukul 17.00–18.00 (akhir aktivitas).
- 6) Jenis kendaraan yang dihitung yakni motor, mobil bensin, mobil solar, bus dan truk.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan zat, energi, dan/atau komponen lain masuk ke dalam udara ambien akibat aktivitas manusia, sehingga melebihi standar kualitas udara yang telah ditetapkan. Udara ambien merupakan udara bebas yang berada di permukaan bumi, terletak di lapisan troposfer, dan berada dalam wilayah hukum Republik Indonesia. Udara ini sangat penting bagi kehidupan makhluk hidup serta unsur lingkungan hidup lainnya. Baku Mutu Udara Ambien mengacu pada tingkat pencemaran yang masih dapat diterima di lingkungan sekitar. Sementara itu, Baku Mutu Emisi adalah nilai batas maksimum pencemar udara yang diizinkan untuk masuk ke dalam Udara Ambien (PP No 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup).

Udara merupakan salah satu komponen lingkungan yang memiliki karakteristik khusus, yaitu mobilitas yang tinggi. Menurut Sianturi (2004), perhatian terhadap udara sangat penting karena beberapa alasan berikut:

1. Kemampuan udara yang terbatas dalam menerima, menetralkan, dan mendaur ulang unsur pencemar yang masuk.
2. Penurunan fungsi udara dapat menyebabkan dampak negatif yang meluas, mempengaruhi kesehatan dan lingkungan sekitar
3. Penurunan kualitas udara akan memerlukan biaya yang cukup besar untuk pemulihannya.

2.1.1 Sumber Pencemaran Udara

Berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Sumber Pencemar Udara merupakan setiap aktivitas manusia yang melepaskan pencemar ke dalam udara ambien. Berikut adalah beberapa jenis sumber pencemar udara:

1. Sumber Alami

Sumber alami merupakan sumber yang muncul dengan dirinya sendiri tanpa ada campur tangan dari manusia. Salah satu contoh sumber pencemar alami antara lain abu dari letusan gunung berapi yang bisa saja mengemisikan SO_2 , H_2S , CH_4 dan partikulat lainnya, kemudian terjadinya kebakaran hutan yang mampu mengemisikan parameter HC, CO serta partikulat berupa asap.

2. Sumber Antropogenik

Sumber antropogenik merupakan salah satu sumber pencemar yang berasal dan diakibatkan karena aktivitas manusia. Dimana sumber pencemar antropogenik ini terdiri dari dua jenis yakni sumber antropogenik bergerak dan juga sumber antropogenik tidak bergerak. Sumber pencemar antropogenik bergerak bisa berasal dari hasil pembakaran bahan bakar transportasi lebih tepatnya dari kendaraan bermotor. Sedangkan untuk sumber pencemar antropogenik tidak bergerak bisa berasal dari kawasan dan cerobong industri. Jadi berdasarkan dari aktivitasnya sumber antropogenik dapat diklasifikasikan menjadi transportasi, domestik atau rumah tangga dan juga industri (Anjarsari, 2019).

Selain itu, sumber pencemar dapat dibagi menjadi tiga kategori utama yaitu:

1. Sumber Pencemar Udara Menetap (*Point Sources*)

Sumber Pencemar Udara Menetap (*Point Sources*) merupakan sumber pencemar udara yang mencakup emisi dari pabrik, pembangkit listrik, asap dapur, pembakaran sampah di rumah tangga dan lain sebagainya.

2. Sumber Pencemar Udara Tidak Menetap (*Non-Point Sources*)

Sumber Pencemar Udara Tidak Menetap (*Non-Point Sources*) merupakan sumber pencemar udara yang meliputi gas buang dari kendaraan, pesawat, kereta api serta aktivitas lain yang menghasilkan emisi gas yang berpindah-pindah

3. Sumber Pencemar Udara Campuran (*Compound Sources*)

Sumber Pencemar Udara Campuran (*Compound Sources*) merupakan sumber pencemar yang berasal dari kombinasi antara titik tetap dan tidak tetap,

contohnya seperti bandara, terminal, transportasi, pelabuhan, serta kawasan industri (Rahman, 2004).

Pengelompokan tersebut sejalan dengan klasifikasi yang telah ditetapkan oleh WHO pada tahun 2005, yang terdiri dari

1. Sumber Titik (*Point Source*): merupakan sumber yang bersifat individual dan juga tetap, dengan area yang tidak lebih dari 1km², termasuk di dalamnya industri rumah tangga.
2. Sumber Garis (*Line Source*): merupakan sumber pencemar yang berasal dari kendaraan bermotor dan kereta api.
3. Sumber Area (*Area Source*): merupakan sumber pencemar yang berasal dari kombinasi sumber titik dan garis.

2.2 Particulate Matter 2,5 (PM_{2,5})

Particulate Matter (PM) adalah istilah umum yang digunakan untuk mengelompokkan partikel fisik yang terdapat di atmosfer, termasuk debu, kotoran, jelaga, dan asap. *Particulate Matter* (PM) tidak merujuk pada satu jenis zat kimia tertentu, melainkan merupakan campuran dari berbagai partikel yang berasal dari berbagai sumber, baik yang alami maupun yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Partikel-partikel ini memiliki karakteristik yang bervariasi, seperti ukuran, komposisi, dan sifat, yang dapat memengaruhi dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Vallero, 2014). Dengan demikian, PM mencakup berbagai jenis partikel yang dihasilkan oleh aktivitas manusia maupun proses alami, dan keberadaannya di udara dapat memengaruhi kualitas udara serta kesehatan masyarakat.

Menurut Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (U.S. *Environmental Protection Agency* atau EPA), *Particulate Matter* (PM) dibagi menjadi dua kategori berdasarkan ukuran, yaitu partikel debu dengan ukuran ≤ 10 μm dan partikel debu dengan ukuran $\leq 2,5$ μm . Selain itu, partikel juga terdiri dari dua jenis yakni partikel *inhalable* dan *respirable*. Partikel *inhalable* dan *respirable* merupakan jenis partikel debu atau polutan yang bisa masuk ke saluran pernapasan manusia, tetapi keduanya berbeda dari segi ukuran dan seberapa dalam mereka dapat menembus tubuh. Partikel *inhalable* berukuran lebih besar, hingga sekitar 10 μm , dan biasanya terhirup melalui hidung atau mulut, namun sebagian besar hanya

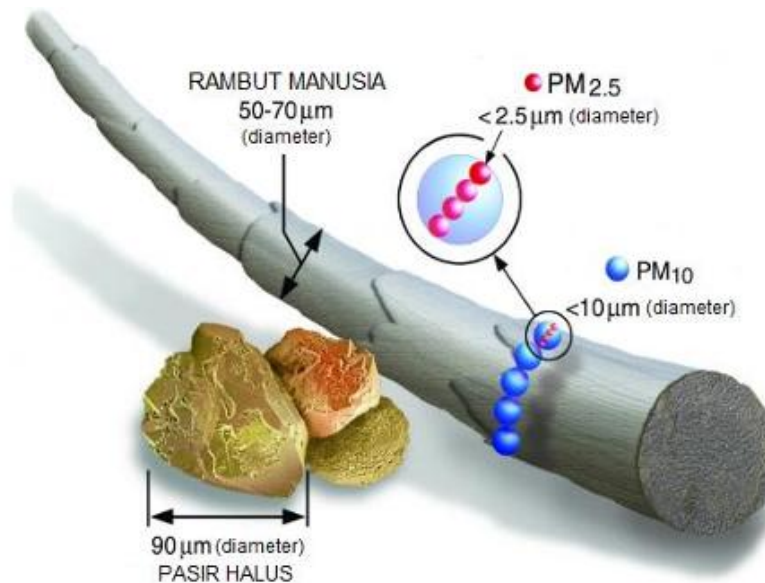
sampai di bagian atas saluran pernapasan seperti hidung, tenggorokan (*faring*), dan batang tenggorokan (*trachea*) (WHO, 2021). Sebaliknya, partikel *respirable* jauh lebih kecil, sekitar 4 μm atau kurang, sehingga mampu menembus lebih dalam hingga ke alveoli, yaitu kantung-kantung kecil di paru-paru tempat pertukaran oksigen dan karbon dioksida berlangsung. $\text{PM}_{2,5}$ termasuk ke dalam contoh partikel *respirable* dengan ukuran sangat kecil, yaitu 2,5 μm atau lebih kecil, yang memungkinkan partikel ini masuk jauh ke dalam paru-paru bahkan sampai ke aliran darah. Karena kemampuannya menembus jauh ke dalam tubuh, $\text{PM}_{2,5}$ berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan serius seperti masalah pada jantung dan sistem pernapasan (Pope & Dockery, 2006).

Klasifikasi ini bertujuan untuk membedakan partikel berdasarkan karakteristiknya, termasuk dampaknya terhadap kualitas udara dan potensi risiko bagi kesehatan manusia. Partikel yang lebih kecil cenderung lebih mudah terhirup dan dapat mencapai saluran pernapasan yang lebih dalam, sehingga memiliki dampak yang lebih signifikan dibandingkan dengan partikel yang lebih besar..

2.2.1 Karakteristik $\text{PM}_{2,5}$

Particulate Matter 2,5 ($\text{PM}_{2,5}$) memiliki karakteristik unik yang menjadikannya fokus utama dalam isu masalah pencemaran udara. Komponen utama penyusun $\text{PM}_{2,5}$ terdiri dari karbon hitam, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), aryl hydrocarbons, volatile organic hydrocarbons (VOC), logam berat, senyawa organik, mineral, ion organik, dan bahkan bahan biologis seperti bakteri dan jamur. Selain itu, $\text{PM}_{2,5}$ tersusun dari beberapa komposisi kimia yang kompleks diantaranya karbon organik, sulfat, nitrat, logam berat (timbal dan merkuri) serta amonia (Zhang dkk., 2019). $\text{PM}_{2,5}$ merupakan salah satu jenis polutan yang sangat berbahaya, terutama karena ukurannya yang sangat kecil, yaitu kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer (Fauzan dkk., 2024).

Particulate Matter 2,5 ($\text{PM}_{2,5}$) juga memiliki sifat yang sangat ringan dan mudah menyebar di atmosfer, dimana partikel-partikel ini memiliki konsentrasi yang lebih tinggi di daerah perkotaan akibat dari emisi kendaraan dan juga emisi industri. *Particulate Matter* 2,5 ($\text{PM}_{2,5}$) jika tersuspensi di atmosfer dalam kurun waktu yang lama dapat dengan mudah terhirup oleh manusia.



Gambar 2. 1 Perbandingan ukuran PM_{2,5} dan PM₁₀

Sumber: EPA, 2022

Perbedaan antara partikel debu, PM_{2,5}, PM₁₀, serta gas polutan yakni memiliki perbedaan utama terkait ukuran, sifat fisik, dan dampak kesehatannya. Debu merupakan istilah umum untuk partikel padat yang tersebar di udara, yang berasal dari sumber seperti tanah, aktivitas konstruksi, atau proses mekanis lainnya, dengan ukuran yang sangat beragam (Long dkk., 2016). PM₁₀ mengacu pada partikel udara dengan diameter aerodinamis kurang dari atau sama dengan 10 mikrometer, yang biasanya terdiri dari campuran partikel kasar dan halus. Partikel ini dapat memasuki saluran pernapasan bagian atas dan sebagian dapat mencapai paru-paru (WHO, 2021). Sementara itu, PM_{2,5} adalah partikel yang lebih kecil dengan diameter maksimal 2,5 mikrometer, termasuk dalam kategori partikel halus.

Karena ukurannya yang kecil, PM_{2,5} mampu menembus lebih dalam ke saluran pernapasan hingga alveoli, dan beberapa komponennya bahkan dapat masuk ke dalam aliran darah, sehingga memiliki potensi bahaya kesehatan yang lebih tinggi dibandingkan PM₁₀ (Brook et al., 2010). Berbeda dengan partikel padat tersebut, gas polutan seperti nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), ozon (O₃), dan senyawa organik volatil (VOCs) berbentuk molekul gas atau uap. Gas-gas ini biasanya dihasilkan dari proses pembakaran atau reaksi kimia di atmosfer (Kim dkk., 2015). Konsentrasi gas polutan diukur dalam satuan seperti ppm, ppb, atau μg/m³, dan mereka dapat memberikan efek toksik

langsung pada jaringan pernapasan serta berperan dalam pembentukan partikel sekunder di udara (Dominici dkk., 2006). Dengan demikian, istilah debu mencakup partikel padat secara umum, sedangkan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ adalah klasifikasi debu berdasarkan ukuran partikelnya. Sebaliknya, gas polutan merupakan zat pencemar yang berbentuk molekul gas dengan karakteristik berbeda dari partikel padat.

2.2.2 Sumber *Particulate Matter* 2,5 ($PM_{2,5}$)

Particulate Matter 2,5 ($PM_{2,5}$) merupakan salah satu jenis polutan berbentuk partikel yang sangat halus yang umumnya terbentuk dari berbagai proses pembakaran, termasuk pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara dan minyak bumi, serta pembakaran bahan organik seperti biomassa. Selain itu, pembakaran material sintetis seperti karet dan plastik juga berkontribusi pada pembentukan $PM_{2,5}$. *Particulate Matter* 2,5 ($PM_{2,5}$) bersumber dari pembakaran bahan bakar fosil seperti kendaraan bermotor terutama dari knalpot kendaraan maupun pembangkit listrik, aktivitas industri yang dihasilkan dari berbagai proses manufaktur, kebakaran hutan dan lahan, reaksi kimia di atmosfer dan lain sebagainya (Heinzerling dkk., 2016). *Particulate Matter* 2,5 ($PM_{2,5}$) dapat berasal dari polutan primer maupun polutan sekunder. Adapun penjelasannya sebagai berikut:

- a. $PM_{2,5}$ primer dilepaskan langsung ke atmosfer melalui aktivitas pembakaran dan mekanis, misalnya emisi kendaraan bermotor yang berasal dari emisi knalpot menghasilkan karbon elementer, logam berat, dan partikel organik. Pembakaran biomassa yang berasal dari hasil pembakaran kayu bakar, limbah pertanian, dan kebakaran hutan. Serta pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar fosil dan proses industri yang dapat menghasilkan partikel abu terbang (fly ash).
- b. $PM_{2,5}$ sekunder merupakan partikel halus yang tidak langsung dilepaskan, tetapi terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia antara gas prekursor, seperti:
 - Sulfur dioksida (SO_2) yang teroksidasi menjadi sulfat (SO_4^{2-})
Proses pembentukan $PM_{2,5}$ dimana SO_2 dioksidasi oleh oksidator atmosfer (OH di siang hari, O_3 atau H_2O_2 di malam hari) kemudian terbentuk asam sulfat (H_2SO_4) yang akan terkondensasi membentuk partikel sulfat (SO_4^{2-}). Reaksi sederhana: $SO_2 + OH \rightarrow H_2SO_4$ (aerosol sulfat) dengan partikel sulfat sebagai komponen utama $PM_{2,5}$ sekunder (Huang dkk., 2014).

- NO_x (Nitrogen oksida: NO , NO_2) yang teroksidasi menjadi nitrat (NO_3^-). NO_2 akan dioksidasi oleh OH membentuk asam nitrat (HNO_3) yang kemudian HNO_3 akan bereaksi dengan NH_3 membentuk garam ammonium nitrat (NH_4NO_3). Reaksi sederhana: $\text{NO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$ (partikel nitrat) (Seinfeld dan Pandis, 2016).
- VOCs akan teroksidasi oleh OH (siang hari) serta O_3 , atau NO_3 (malam hari) menghasilkan senyawa organik dengan volatilitas rendah yang akan mengembun membentuk aerosol organik sekunder (SOA) kemudian yang teroksidasi menjadi aerosol organik sekunder (SOA) (Hallquist dkk., 2009).

Dengan kata lain, gas prekursor dari kendaraan bermotor seperti nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), dan *volatile organic compounds* (VOC) dapat bertransformasi menjadi partikulat halus $\text{PM}_{2,5}$ sekunder melalui serangkaian proses kimia dan fisika di atmosfer. Setelah dilepaskan ke udara, gas-gas ini mengalami oksidasi oleh oksidan atmosfer seperti radikal hidroksil (OH), ozon (O_3), maupun hidrogen peroksida (H_2O_2), terutama dengan bantuan energi radiasi matahari. Reaksi ini menghasilkan senyawa baru yang bersifat lebih polar, lebih berat, higroskopis (mudah menarik air), dan memiliki tekanan uap rendah sehingga tidak stabil untuk tetap berada dalam fase gas. Akibatnya, senyawa tersebut mengalami kondensasi pada partikel halus yang sudah ada (seperti jelaga, debu, atau garam laut) atau bahkan membentuk inti partikel baru melalui proses nukleasi (proses terbentuknya inti partikel baru dari gas atau uap yang sangat jenuh di atmosfer).

Contoh umum dari proses ini adalah pembentukan asam sulfat (H_2SO_4) dari oksidasi SO_2 yang selanjutnya membentuk partikel sulfat, pembentukan asam nitrat (HNO_3) dari oksidasi NO_x yang selanjutnya membentuk partikel nitrat, serta pembentukan *secondary organic aerosol* (SOA) dari oksidasi senyawa organik volatil. Dengan cara ini, gas yang awalnya tidak tampak dan bersifat molekul bebas dapat “berubah wujud” menjadi partikel halus berukuran $\leq 2,5$ mikrometer yang melayang di udara. Proses inilah yang menjelaskan mengapa emisi kendaraan bermotor tidak hanya menghasilkan partikel primer secara langsung dari

pembakaran mesin, tetapi juga memicu terbentuknya PM_{2,5} sekunder yang berkontribusi besar terhadap konsentrasi partikulat ambien di wilayah perkotaan.

2.2.3 Dampak *Particulate Matter* 2,5 (PM_{2,5}) Terhadap Kesehatan

Ambang batas yang ditetapkan untuk *Particulate Matter* 2,5 (PM_{2,5}) adalah sebesar 55 µg/m³. Partikel ini dapat dengan mudah terhirup ke dalam sistem pernapasan dan mengendap di paru-paru. Paparan jangka pendek dari PM_{2,5} dapat menyebabkan iritasi pada mata, hidung serta tenggorokan. Sementara itu, paparan jangka panjang dari PM_{2,5} terhadap manusia, dapat menyebabkan infeksi saluran pernapasan akut, mengingat bahwa partikel dengan ukuran <2,5 µg memiliki tingkat toksisitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel yang lebih besar. Hal ini membuat PM_{2,5} lebih mudah masuk ke dalam tubuh manusia dan berpotensi menimbulkan berbagai masalah kesehatan (Gusnita dan Cholianawati, 2019). Selain itu, PM_{2,5} juga dapat masuk ke dalam aliran darah dan berkontribusi terhadap peningkatan risiko penyakit jantung, hipertensi, stroke serta diabetes (Brook dkk., 2010).

Adapun jalur pajanan dari PM_{2,5} masuk ke dalam tubuh yang menjadi penyebab masalah kesehatan yakni dimana partikel PM_{2,5} berasal dari berbagai sumber emisi, seperti asap kendaraan bermotor, aktivitas industri, dan pembakaran sampah atau kayu yang menghasilkan partikel halus di udara (Pope & Dockery, 2006). Ketika kita menghirup udara, partikel ini masuk melalui hidung atau mulut, kemudian melewati faring (tenggorokan), laring (pangkal tenggorokan), dan trakea (batang tenggorokan). Selanjutnya, partikel tersebut bergerak ke saluran pernapasan yang lebih kecil, yaitu bronkus dan bronkiolus, hingga akhirnya mencapai alveoli, yaitu kantung udara kecil di dalam paru-paru yang menjadi tempat utama penumpukan PM_{2,5} (Schraufnagel, 2020; Brook dkk., 2010). Karena ukurannya yang sangat kecil, kurang dari 2,5 mikrometer, partikel ini tidak dapat sepenuhnya disaring oleh sistem pernapasan bagian atas dan mampu menembus jauh ke dalam paru-paru. Di alveoli, PM_{2,5} dapat memicu reaksi peradangan dan sebagian partikel bahkan dapat menembus dinding alveoli untuk masuk ke dalam aliran darah (Oberdörster dkk., 2005).

Setelah memasuki sirkulasi darah, partikel atau zat peradangan yang dihasilkan dapat menyebar ke seluruh tubuh dan memengaruhi organ-organ penting, terutama jantung dan otak. Dampak pada jantung meliputi peningkatan risiko penyakit kardiovaskular, sedangkan pada otak, partikel ini dapat menyebabkan peradangan dan gangguan fungsi saraf (Block & Calderón-Garcidueñas, 2009). Dengan demikian, perjalanan PM_{2.5} dimulai dari udara yang kita hirup, melewati berbagai bagian saluran pernapasan, mencapai paru-paru, kemudian masuk ke dalam darah, dan akhirnya dapat menimbulkan gangguan kesehatan pada paru-paru, jantung, serta otak.

2.2.4 Dampak *Particulate Matter* 2,5 (PM_{2.5}) Terhadap lingkungan

Selain mempengaruhi kesehatan manusia, PM_{2.5} juga bisa berdampak pada lingkungan. Salah satunya adalah timbulnya fenomena kabut asap (*haze*) dimana hal ini terjadi karena kurangnya visibilitas. Fenomena ini sering terjadi di daerah yang memiliki tingkat polusi udara tinggi. Kabut asap ini terjadi akibat partikel halus yang menyerap dan menyebarkan cahaya, sehingga mengurangi kualitas udara dan dapat menyebabkan gangguan transportasi akibat dari jarak pandang yang terbatas. Selain itu, PM_{2.5} yang mengandung senyawa kimia reaktif dapat menyebabkan hujan asam dengan bereaksi bersama uap air di atmosfer. Hujan asam dapat menyebabkan kerusakan ekosistem perairan, pengasaman tanah dan juga dapat merusak bangunan serta monumen bersejarah yang terbuat dari batu kapur maupun marmer (Seinfeld dan Pandis, 2016).

2.2.5 Baku Mutu Udara Ambien *Particulate Matter* 2,5 (PM_{2.5})

Berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021 tentang tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, mutu udara adalah ukuran dari kondisi udara pada waktu dan tempat tertentu dengan metode tertentu berdasarkan ketentuan perundang-undangan. Sedangkan baku mutu udara ambien merupakan nilai dari pencemar udara yang ditenggang keberadaannya di dalam udara ambien. Berdasarkan lampiran VII PP No. 22 Tahun 2021 tentang tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, baku mutu udara ambien untuk PM_{2.5} dapat dilihat pada Tabel 2.1:

Tabel 2. 1 Baku Mutu Udara Ambien untuk PM_{2,5}

No.	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Sistem Pengukuran
1.	Partikulat Debu <2,5 µg (PM _{2,5})	24 jam	55 µg/m ³	Aktif kontinu
		1 tahun	15 µg/m ³	Aktif manual

2.2.6 Faktor yang Mempengaruhi Persebaran Polutan

Faktor yang mempengaruhi persebaran polutan di udara yakni faktor meteorologi. Beberapa faktor meteorologi yang termasuk diantaranya sebagai berikut:

a. Curah hujan

Curah hujan merupakan salah satu faktor meteorologi yang dapat mempengaruhi konsentrasi persebaran PM_{2,5} di atmosfer. Terjadinya hujan ini memiliki efek mencuci udara (*wet deposition*) dimana PM_{2,5} yang tersuspensi di udara akan dibawa turun bersamaan dengan tetesan air hujan. Hal ini dapat mengurangi konsentrasi PM_{2,5} di atmosfer dan dapat meningkatkan kualitas udara (Larson, 2017). Selain itu tingginya intensitas dan juga lamanya durasi hujan dapat menentukan efektivitas dari proses pembersihan suhu udara. Hujan yang lebat cenderung lebih efektif dalam menghilangkan polutan dibandingkan dengan hujan ringan maupun gerimis terutama di daerah perkotaan yang memiliki tingkat polusi tinggi.

b. Suhu

Suhu di udara dapat mempengaruhi aktivitas kimia maupun Fisika dari partikel PM_{2,5} di mana dengan suhu yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan volatilitas senyawa organik yang terdapat di dalam PM_{2,5}. Pada musim panas konsentrasi dari PM_{2,5} biasanya lebih tinggi dikarenakan sinar matahari yang kuat dapat mempercepat reaksi fotokimia (Liu dkk., 2018). Di sisi lain, jika suhu rendah terutama pada musim dingin seringkali dikaitkan dengan fenomena inversi suhu di mana dalam kondisi normal suhu udara akan menurun seiring dengan meningkatnya ketinggian akan tetapi saat inversi suhu terjadi lapisan udara hangat di atas udara dingin akan memerangkap polutan termasuk PM_{2,5}

yang ada di dekat permukaan bumi Hal ini biasanya terjadi di wilayah perkotaan yang akan mengakibatkan peningkatan konsentrasi polutan terutama di daerah yang memiliki emisi kendaraan dan industri yang tinggi.

c. Kelembaban udara

Kelembaban udara juga berperan penting dalam menentukan konsentrasi dan juga distribusi $PM_{2,5}$ di atmosfer. Di mana pada saat kondisi kelembaban yang tinggi $PM_{2,5}$ akan menyerap uap air dan mengalami proses higroskopis yang dapat meningkatkan ukuran partikel (Korhonen dkk., 2008) dengan peningkatan ukuran partikel ini lebih mudah diendapkan oleh gravitasi ataupun terbawa turun saat hujan sehingga konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara juga akan menurun. Akan tetapi kelembaban tinggi ini juga dapat mengakibatkan peningkatan pembentukan $PM_{2,5}$ sekunder yang melalui proses reaksi kimia basah di atmosfer, di mana senyawa seperti SO_2 dan NO_x akan bereaksi dengan air membentuk aerosol sekunder Oleh karena itu pengaruh kelembaban udara terhadap $PM_{2,5}$ sangat bergantung pada kondisi kimia dan juga Polusi yang ada di atmosfer (Liu dkk., 2018)

d. Tekanan udara

Tekanan udara yang rendah biasanya akan berhubungan dengan kondisi cuaca yang buruk misalnya kemungkinan adanya hujan dan angin kencang. Dalam situasi ini polutan $PM_{2,5}$ akan mudah terdispersi sehingga konsentrasinya di udara relatif menurun belinya apabila tekanan udara tinggi maka sering dikaitkan dengan kondisi atmosfer yang stabil dimana gerakan udara ini menjadi vertikal dan terbatas dan juga polutan yang akan terperangkap di dekat permukaan bumi (Jacob dan Winner, 2009). Kondisi tekanan udara yang stabil ini cara bersamaan terjadi dengan fenomena inversi suhu di mana hal ini dapat memperburuk akumulasi $PM_{2,5}$ di atmosfer. Dengan demikian pemantauan dari tekanan udara ini menjadi penting dalam prediksi pola distribusi dari $PM_{2,5}$ terutama dalam konteks perkotaan (Larson dkk., 2017)

e. Kecepatan angin

Kecepatan angin dapat mempengaruhi dari penyebaran $PM_{2,5}$ di atmosfer. Angin yang kencang dapat membantu mengurangi konsentrasi $PM_{2,5}$ di suatu wilayah dan akan terbawa ke wilayah lainnya sehingga dapat meningkatkan kualitas udara lokal (Zhang dkk., 2024). Selama itu akan tetapi angin juga dapat berkontribusi dalam penyebaran polutan lintas batas di mana pada kondisi tertentu angin dapat membawa $PM_{2,5}$ dengan jarak yang sangat jauh termasuk dari sumber polusi seperti kebakaran hutan maupun daerah industri di negara lainnya. Misalnya polusi dari kebakaran hutan yang ada di Indonesia seringkali terbawa oleh angin ke negara tetangga seperti Malaysia dan juga Singapura (Kopplitz dkk., 2016)

2.3 *High Volume Air Sampler (HVAS)*

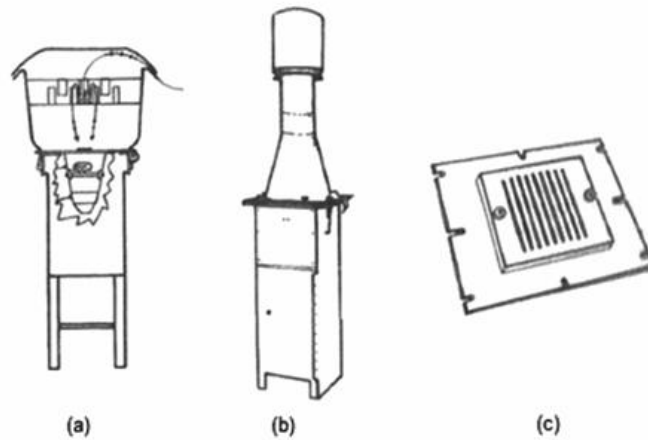
High Volume Air Sampler (HVAS) merupakan alat yang digunakan untuk mengambil sampel partikel udara, khususnya partikel dengan ukuran kurang dari 100 μm . Alat ini mengumpulkan partikel melalui proses filtrasi dari sejumlah volume yang ada di atmosfer dengan bantuan pompa vakum berkapasitas tinggi dilengkapi dengan filter, alat ukur dan juga kontrol laju alir (SNI 7119.14, 2016). HVAS banyak digunakan dalam pemantauan kualitas udara karena kemampuannya untuk mengumpulkan partikel dalam jumlah besar. Selain itu, HVAS telah diakui sebagai metode standar untuk pengambilan sampel partikulat sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) serta *National Ambient Air Quality Standard (NAAQS)* (IAEA, 1992).

Prinsip kerja dari HVAS adalah dengan menghisap udara melalui inlet selektif PM dan mengarahkannya ke filter berukuran 20,3 cm x 25,4 cm (8 inci x 10 inci) yang memiliki efisiensi penyaringan minimal 98,5% dan tingkat porositas 0,3 μm . Proses ini dilakukan pada laju aliran udara antara 1,1 m^3 /menit hingga 1,7 m^3 /menit selama 24 ± 1 jam. Partikel yang terperangkap pada filter kemudian dianalisis menggunakan metode gravimetri, dan hasilnya dinyatakan dalam satuan massa partikulat yang terendap per satuan volume udara sampel, yaitu $\mu g/Nm^3$ (SNI 7119.14, 2016).

HVAS beroperasi dengan cara menghisap udara dari lingkungan sekitarnya dan menangkap partikel menggunakan filter yang terletak di bagian atas alat. Sebelum digunakan, filter tersebut ditimbang untuk mengetahui beratnya tanpa adanya sampel yang terperangkap. Bagian penutup di bagian atas HVAS berfungsi sebagai pelindung, mirip dengan atap rumah, yang melindungi filter dari hujan dan mencegah masuknya partikel berukuran besar. Ukuran partikel yang terakumulasi sangat dipengaruhi oleh arah angin di lokasi pengambilan sampel. Salah satu modifikasi yang umum dilakukan adalah dengan menggunakan filter berukuran tertentu, sehingga hanya partikel dengan ukuran tertentu yang dapat terakumulasi di dalamnya (Wedding dkk., 1977).

High Volume Air Sampler (HVAS) menggunakan metode gravimetri untuk mengukur partikulat udara dikarenakan dapat memberikan hasil yang akurat dalam jangka panjang. Banyak penelitian yang telah menggunakan metode ini untuk penelitian kualitas udara dan pemantauan lingkungan. Metode gravimetri bekerja dengan mengumpulkan partikel melalui filter dengan aliran udara berkecepatan tinggi. HVAS bekerja dengan menyedot udara dalam volume besar melalui filter serat kaca atau membran dengan ukuran tertentu selama periode waktu yang telah ditentukan. Partikel yang terbawa udara akan tertahan di permukaan filter, sementara udara bersih akan melewati filter tersebut. Setelah proses pengambilan sampel selesai, filter yang telah mengandung partikel ditimbang sebelum dan sesudah pengambilan sampel menggunakan timbangan analitik dengan ketelitian tinggi. Perbedaan massa sebelum dan sesudah pengambilan sampel digunakan untuk menghitung konsentrasi partikulat dalam udara berdasarkan volume udara yang telah diambil.

HVAS yang digunakan untuk mengukur $PM_{2.5}$ dapat dilihat pada Gambar 2.2:



Gambar 2. 2 High Volume Air Sampler (HVAS)

Keterangan gambar:

- (a) Merupakan HVAS dengan inlet *opposed jet*;
- (b) Merupakan HVAS dengan inlet aliran siklonik (*cyclonic flow*)
- (c) Merupakan inlet *cascade impactor*.

2.4 Era5

Data ERA5 merupakan data reanalisis yang disediakan oleh *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Sumber datanya berasal dari gabungan observasi satelit, stasiun cuaca darat, pesawat, kapal, hingga balon udara, yang kemudian diproses dengan model numerik atmosfer global. Proses reanalisis ini memungkinkan untuk menghasilkan dataset yang konsisten secara spasial dan temporal sejak tahun 1950 hingga saat ini. Karena berbasis satelit dan pengukuran darat yang dikombinasikan dengan pemodelan atmosfer, ERA5 sering dikategorikan sebagai data sekunder yang mewakili kondisi atmosfer di berbagai titik bumi.

Secara teknis, satelit pengamatan bumi yang berperan dalam penyediaan data ERA5 antara lain adalah satelit meteorologi seperti Meteosat, NOAA, dan satelit polar orbiting lainnya yang dilengkapi sensor untuk menangkap radiasi, suhu permukaan, kelembaban udara, kecepatan serta arah angin. Data mentah hasil pengukuran satelit ini tidak langsung digunakan, melainkan dipadukan dengan

observasi permukaan dan dimasukkan ke dalam sistem asimilasi data ECMWF. Mekanisme ini memungkinkan untuk menghasilkan variabel meteorologi dengan resolusi temporal hingga hourly dan resolusi spasial tertentu, sehingga dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk input pemodelan dispersi polutan dengan AERMET.

Ketika peneliti atau praktisi mendownload data ERA5, misalnya dari platform *Copernicus Climate Data Store (CDS)*, data yang diambil sebenarnya merupakan hasil pengolahan gabungan observasi dan pemodelan numerik yang sudah divalidasi. ERA5 menyediakan data historis hingga real-time dengan format yang seragam, sehingga pengguna dapat mengakses variabel meteorologi seperti kecepatan angin, arah angin, suhu, tekanan, kelembaban relatif, hingga radiasi. Hal inilah yang membuat data ERA5 sangat penting sebagai input AERMET dalam AERMOD, karena kualitas data meteorologi yang dihasilkan mendekati kondisi aktual dengan cakupan temporal yang panjang dan detail spasial yang cukup tinggi.

2.5 Metode Gaussian

Metode Gaussian merupakan sebuah model matematis dispersi atmosferik yang berfungsi untuk mensimulasikan perilaku kepulan polutan yang dilepaskan dari sumber emisi, baik yang berada di permukaan maupun pada ketinggian tertentu. Model ini berasumsi bahwa distribusi konsentrasi polutan di udara mengikuti fungsi Gaussian (normal) dengan bentuk kurva lonceng yang simetris pada arah horizontal dan vertikal. Asumsi tersebut memungkinkan penentuan sebaran konsentrasi polutan berdasarkan jarak sumber, arah angin, serta kondisi stabilitas atmosfer. Dengan formulasi sederhana, metode Gaussian telah banyak digunakan dalam pemodelan kualitas udara karena mampu memberikan perkiraan awal yang cukup baik terkait pola penyebaran polutan (Stockie, 2011; Turner, 1994).

Dalam perkembangannya, AERMOD mengadopsi prinsip dasar Gaussian namun mengembangkannya menjadi lebih kompleks dengan mempertimbangkan faktor-faktor meteorologi dan karakteristik medan lokal. AERMOD memanfaatkan data meteorologi permukaan dan profil atmosfer atas (upper air), termasuk parameter kecepatan dan arah angin, suhu, stabilitas atmosfer, hingga fluks panas permukaan untuk menghasilkan distribusi polutan yang lebih realistis. Selain itu, AERMOD mampu menangani berbagai tipe sumber emisi, seperti sumber titik

(point source), area (area source), maupun garis (line source) sehingga sesuai digunakan untuk pemodelan pencemar dari industri maupun lalu lintas kendaraan (Cimorelli dkk., 2004; Arif dkk., 2020).

Selain itu, AERMOD dapat diterapkan pada berbagai kondisi medan, baik datar maupun kompleks, serta digunakan pada wilayah pedesaan maupun perkotaan. Dengan demikian, metode Gaussian tidak hanya menjadi konsep dasar, tetapi juga pijakan penting dalam pengembangan perangkat pemodelan kualitas udara modern seperti AERMOD. Adapaun untuk persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \left[\exp - \left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \left\{ \exp \left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \dots (2.1)$$

Keterangan:

C = Konsentrasi Pencemar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Q = Laju Emisi Pencemar ($\mu\text{g}/\text{s}$)

v = Kecepatan rerata angin pada ketinggian efektif cerobong (m/s)

σ_y = Standar deviasi konsentrasi pencemar dalam arah y (m)

σ_z = Standar deviasi konsentrasi pencemar dalam arah z (m)

y = Jarak horizontal reseptor dari sumber dalam arah y (m)

z = Jarak horizontal reseptor dari sumber dalam arah z (m)

H = Jarak downwind sepanjang centerline flume dari titik sumber (m)

2.6 Pemodelan AERMOD

Untuk mengendalikan tingkat emisi polusi udara dan jenis pencemaran lainnya di suatu wilayah, sangat penting untuk menerapkan metode yang tepat dalam mengukur dan mengevaluasi dampak polusi tersebut. Penilaian kualitas udara dan prediksi kondisi atmosfer dapat dilakukan dengan memanfaatkan data yang diperoleh dari pengukuran kualitas udara serta informasi meteorologi yang relevan di wilayah tersebut. Hasil dari analisis ini dapat membantu merumuskan strategi yang efektif untuk mengurangi emisi dan pencemaran udara di area tersebut (Goletic dan N, 2013).

AERMOD adalah sebuah model yang digunakan untuk memprediksi sebaran polutan di atmosfer. Model ini dikembangkan oleh *American Meteorological Society* (AMS)/*Environmental Protection Agency* (EPA). AERMOD merupakan perangkat lunak yang menerapkan pendekatan *Gaussian plume* untuk

mensimulasikan kualitas udara. Tujuan dari AERMOD adalah untuk membantu dalam menganalisis distribusi polutan di atmosfer serta menilai dampak emisi dari berbagai sumber terhadap kualitas udara di sekitarnya (EPA, 2005; Rood, 2014).

AERMOD adalah model dispersi polutan yang menggunakan pendekatan *Gaussian plume* dalam kondisi *steady-state*. Model ini dirancang untuk mensimulasikan penyebaran polusi udara dalam jarak dekat, yaitu kurang dari 50 kilometer, dari berbagai jenis sumber emisi, termasuk sumber titik, area, dan volume. Dalam kondisi lapisan batas yang stabil, model AERMOD mengasumsikan bahwa distribusi konsentrasi polutan mengikuti pola Gaussian secara vertikal dan horizontal. Meskipun menggunakan pendekatan yang relatif sederhana, AERMOD mampu mengintegrasikan konsep aliran dan dispersi di medan yang kompleks. Selain itu, AERMOD dapat mengkarakterisasi teori dalam Lapisan Batas Planet (*Planetary Boundary Layer/PBL*) dan dapat diterapkan di berbagai wilayah, baik pedesaan maupun perkotaan, dengan medan yang datar maupun kompleks, serta untuk berbagai jenis sumber emisi (Cimorelli dkk., 2004).

AERMOD terdiri dari tiga komponen utama yang mendukung sistem pemodelannya, yaitu:

- a. AERMET: komponen yang berfungsi menyiapkan data meteorologi untuk digunakan dalam AERMOD. Data meteorologi dan karakteristik permukaan sangat diperlukan untuk menghitung parameter lapisan batas, seperti tinggi pencampuran, kecepatan gesekan, dan lainnya yang diperlukan oleh AERMOD. Data yang disiapkan harus mencerminkan kondisi meteorologi di dalam area pemodelan.
- b. AERMAP: komponen yang berfungsi untuk menyiapkan data kontur permukaan. Komponen ini digunakan untuk mengkarakterisasi medan dan menghasilkan jaringan reseptor yang diperlukan dalam model dispersi AERMOD. AERMAP memanfaatkan data grid medan untuk area pemodelan guna menghitung dampak ketinggian medan yang berkaitan dengan lokasi reseptor.
- c. AERMOD: komponen yang berfungsi untuk mengintegrasikan atau menggabungkan kedua informasi tersebut (Cimorelli dkk., 2004)

2.7 Penelitian Terdahulu

Dalam melaksanakan suatu penelitian, penting untuk memiliki acuan yang dapat dijadikan sebagai referensi dari penelitian-penelitian sebelumnya. Adapun penelitian-penelitian terdahulu terkait dengan pemodelan udara dapat dilihat pada Tabel 2.2:

Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul	Hasil
1.	Natsir, Pembarep, Susetyaningsih, Setyanto, & Triastianti.	Penggunaan AERMOD Untuk Kajian Simulasi Dampak Pencemaran Karbon Monoksida Di Kota Yogyakarta Akibat Emisi Kendaraan Bermotor	Penelitian ini menyimpulkan bahwa AERMOD dapat digunakan untuk memprediksi polutan udara dari aktivitas transportasi. Konsentrasi CO di lokasi penelitian pada tahun 2014 masih di bawah baku mutu menurut Keputusan Gubernur Daerah Istimewa Yogyakarta No. 153 Tahun 2002. Semakin meningkat jumlah kendaraan bermotor, semakin meningkat pula konsentrasi CO di udara ambien. Berdasarkan simulasi pada tahun 2025, konsentrasi tertinggi CO akibat aktivitas transportasi di lokasi penelitian berada di jalan Cik di Tiro dengan konsentrasi CO mencapai $\pm 16.000 \text{ Pg/m}^3$ (16 ppm).
2.	Levina Iriani & Andik Pribadi	Analisis Sebaran Konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ Menggunakan Model	Penelitian ini menyimpulkan bahwa nilai konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ terbesar didapatkan dari hasil pengukuran di lapangan yakni pada reseptor 5 dimana hasilnya sebesar $53,68 \mu\text{g/m}^3$ dan konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ terendah yakni di reseptor 4 dimana hasilnya sebesar $23,75 \mu\text{g/m}^3$. Sedangkan untuk pengukuran nilai

No.	Peneliti	Judul	Hasil
		AERMOD di Jalur Protokol Kota Bogor	konsentrasi PM _{2,5} dengan menggunakan pemodelan, nilai tertinggi yakni di reseptor 3 dimana hasilnya sebesar 57,20 µg/m ³ dan nilai terendahnya yakni di reseptor 6 dimana hasilnya sebesar 3,70 µg/m ³
3.	Gunawan, Sumeru, & Sutandi	Analisis Konsentrasi PM ₁₀ dan PM _{2,5} pada Moda Transportasi Kereta Api, Bus, Angkutan Kota, Mobil Baru, dan Mobil Lama	Penelitian ini menyimpulkan bahwa konsentrasi tertinggi dari PM _{2,5} dan PM ₁₀ moda transportasi terdapat pada angkutan kota, dimana hal ini dipengaruhi oleh kondisi kendaraan yang memiliki banyak jendela dan pintu terbuka, serta penumpang dan aktifitas di dalamnya mempengaruhi tingginya partikulat tersebut, sedangkan untuk konsentrasi terendah berada pada moda transportasi mobil baru
4.	Masese, M., Fikruddin, M. Akrim, D. & Syaiful, A.Z.	Analisis Konsentrasi Polutan PM _{2,5} dan PM ₁₀ Kendaraan Bermotor pada Fly Over Ruas Jalan Urip Sumoharjo, Kota Makassar	Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengukuran konsentrasi partikulat terendah berada pada titik pengukuran PM ₁₀ di hari libur. Yakni di ruas jalan Urip Sumoharjo, yang artinya pada titik ini kondisi udara tergolong bagus dan tidak membahayakan para pengguna transportasi, pejalan kaki, dan lingkungan sekitar.
5.	Jumadil	Analisis Kualitas Udara (Nilai Parameter PM _{2,5} dan Karbon Monoksida)	Penelitian ini menyimpulkan bahwa konsentrasi PM _{2,5} dan Karbon Monoksida di sekitar wilayah kampus masih memenuhi standar baku mutu. Dimana Kadar PM _{2,5} yang didapat di lokasi pengukuran pertama yakni di pintu masuk sekitar

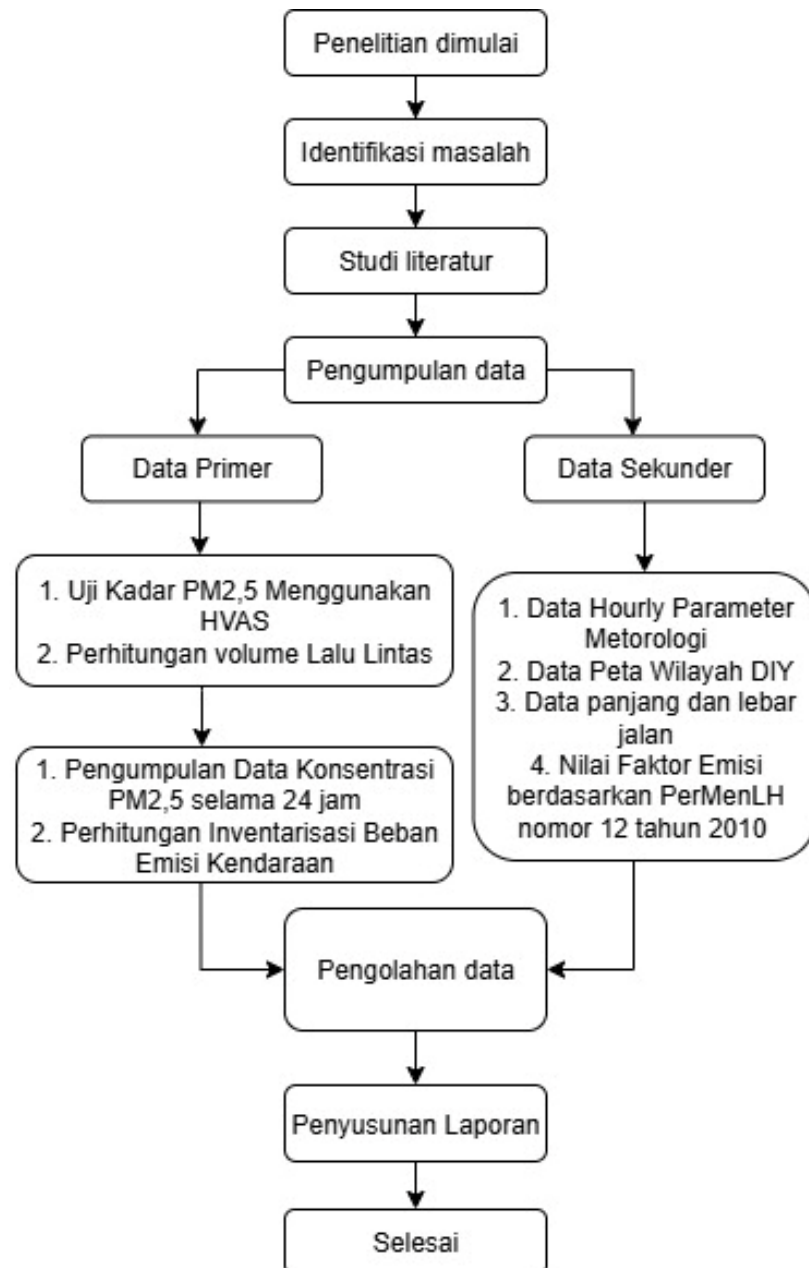
No.	Peneliti	Judul	Hasil
		di Sekitar Kampus Universitas Bosowa Makassar	12,31 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$, di pintu keluar sekitar 8,26 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ dan untuk baku mutu $\text{PM}_{2,5}$ sendiri yakni 55 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$, artinya konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ di sekitar wilayah kampus masih memenuhi standar baku mutu. Sedangkan untuk konsentrasi CO yang didapat di lokasi pengukuran pertama yakni di pintu masuk sekitar 1717 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, di pintu keluar sekitar 1717 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ dan untuk baku mutu CO sendiri yakni 10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, artinya konsentrasi CO di sekitar wilayah kampus masih memenuhi standar baku mutu.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan alur dari penelitian yang akan dilakukan mengacu pada diagram alir seperti Gambar 3.1:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.2.1 Lokasi Penelitian

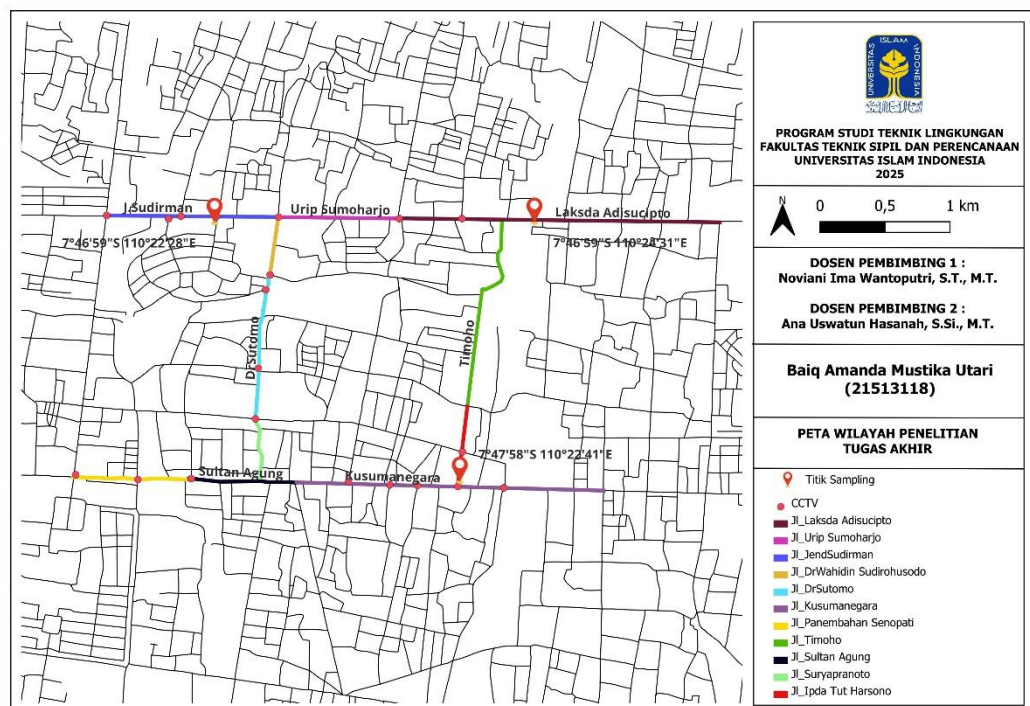
Penelitian ini dilaksanakan di Kota Yogyakarta dan sekitarnya. Pemilihan lokasi penelitian didasari oleh tingginya tingkat kepadatan lalu lintas di kawasan tersebut, yang merupakan salah satu area dengan aktivitas transportasi yang padat setiap harinya. Lokasi penelitian terletak di pusat kota dan sekitarnya yang mana di sekitar kawasan tersebut, terdapat berbagai reseptor sensitif seperti sekolah, universitas, perkantoran, fasilitas kesehatan, serta area permukiman padat penduduk. Keberadaan reseptor-reseptor sensitif inilah yang dapat meningkatkan urgensi untuk mengetahui tingkat pencemaran udara, khususnya konsentrasi *Particulate Matter 2,5* (PM_{2,5}).

Lokasi penelitian dibagi menjadi dua kategori yaitu jalan primer dan jalan sekunder. Jalan primer merupakan jalan yang digunakan untuk pengambilan sampling konsentrasi PM_{2,5} secara langsung, dengan 3 titik lokasi yakni lokasi pertama berada di Jalan Jendral Sudirman, lokasi kedua berada di Jalan Ipda Tut Harsono dan lokasi ketiga berada di Jalan Laksda Adisucipto. Sedangkan jalan sekunder merupakan jalan yang digunakan untuk menghitung jumlah kendaraan yang berfungsi untuk menghitung nilai inventarisasi emisi, melalui CCTV yang ada di beberapa jalan berikut yakni Jalan Urip Sumoharjo, Jalan Timoho, Jalan Kusumanegara, Jalan Sultan Agung, Jalan Panembahan Senopati, Jalan Suryopranoto, Jalan Dr. Sutomo dan Jalan Dr. Wahidin Sudirohusodo. Adapun peta lokasi pengambilan sampel parameter PM_{2,5} dan pengambilan data inventarisasi emisi melalui CCTV dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan Tabel 3.1:

Tabel 3. 1 Lokasi Jalan Penelitian

No.	Nama Jalan	Koordinat	Panjang (m)	Lebar (m)	Jenis Jalan
1.	Jl. Ipda Tut Harsono	7°47'58"S 110°22'41"E	1052,2	7,4	Primer
2.	Jl. Urip Sumoharjo	7°46'58.4"S 110°22'45.7"E	940,2	11,5	Sekunder
3.	Jl. Laksda Adisucipto	7°46'59"S 110°24'31"E	440,2	15	Primer

No.	Nama Jalan	Koordinat	Panjang (m)	Lebar (m)	Jenis Jalan
4.	Jl. Timoho	7°47'40.3"S 110°23'34.5"E	802,1	7,4	Sekunder
5.	Jl Jendral Sudirman	7°46'59"S 110°22'28"E	1342,3	22,5	Primer
6.	Jl.Kusumanegara	7°48'07.5"S 110°23'42.5"E	2413,3	10,2	Sekunder
7.	Jl. Sultan Agung	7°48'05.4"S 110°22'23.4"E	1033,8	12	Sekunder
8.	Jl. Suryopranoto	7°47'50.5"S 110°22'39.1"E	513	8	Sekunder
9.	Jl. Dr. Sutomo	7°47'38.1"S 110°22'40.1"E	801,3	7	Sekunder
10.	Jl. Dr. Wahidin Sudirohusodo	7°47'17.3"S 110°22'42.1"E	794,1	9	Sekunder
11.	Jl. Panembahan Senopati	7°48'05.5"S 110°22'08.4"E	700,9	15	Sekunder



Gambar 3. 2 Lokasi Penelitian

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai dari bulan februari hingga agustus. Dalam kurun waktu tersebut, dilakukan pengambilan sampel $PM_{2,5}$ di bulan April hingga Mei 2025 selama tiga hari, yaitu pada hari Minggu (27 April 2025), Kamis (1 Mei 2025) dan Rabu (6 Mei 2025). Pengambilan sampel dilakukan selama 24 jam penuh pada setiap harinya. Hal ini disesuaikan dengan ketentuan dalam Standar Nasional Indonesia (SNI), yang mensyaratkan bahwa pengukuran $PM_{2,5}$ dilakukan selama 24 jam untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Sementara itu, pengukuran volume kendaraan dilakukan hanya selama satu hari pada jam-jam tertentu, yaitu saat periode *rush hour*. Pemilihan waktu ini didasarkan pada tingginya volume lalu lintas yang umumnya terjadi karena meningkatnya aktivitas masyarakat, baik di sektor pendidikan, ekonomi, maupun perkantoran dan lainnya. Adapun waktu pengukuran volume kendaraan dilakukan pada tiga rentang waktu, yaitu pagi hari pukul 07.00–08.00 (awal aktivitas), siang hari pukul 12.00–13.00 (waktu istirahat), dan sore hari pukul 17.00–18.00 (akhir aktivitas). Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai kepadatan lalu lintas sebagai salah satu faktor yang memengaruhi konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara.

3.3 Pengumpulan Data

3.3.1 Jenis Data

Penelitian kali ini menggunakan dua jenis data yakni data primer dan data sekunder. Adapun data primer yang dimaksud yakni perhitungan volume kendaraan dan pengukuran konsentrasi $PM_{2,5}$ pada udara ambien. Adapun pengumpulan data primer dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

a. Inventarisasi emisi

Inventarisasi emisi dilakukan dengan menghitung volume kendaraan berdasarkan jenisnya antara lain sepeda motor, mobil bensin, mobil solar, bus dan truk. Waktu perhitungan volume kendaraan dibagi menjadi 3 selama 1 jam dan 1 hari saja. Yakni pada pagi, siang dan sore hari. Perhitungan volume kendaraan dilakukan secara manual baik langsung di lapangan maupun melalui CCTV yang mencakup jalan yang masuk ke dalam lokasi penelitian. Adapun CCTV yang mencakup jalan yang diteliti dapat dilihat pada Tabel 3.2:

Tabel 3. 2 Lokasi CCTV untuk Volume Kendaraan

No.	Nama Jalan	Titik CCTV	Keterangan
1.	Jl. Ipda Tut Harsono	Langsung di Lokasi	Jalan Primer
2.	Jl. Urip Sumoharjo	Simpang Demangan View Timur	Jalan Sekunder
3.	Jl. Laksda Adisucipto	Langsung di Lokasi	Jalan Primer
4.	Jl. Timoho	Simpang Balaikota view utara-barat	Jalan Sekunder
5.	Jl Jendral Sudirman	Langsung di Lokasi	Jalan Primer
6.	Jl.Kusumanegara	Simpang SGM (PTZ)	Jalan Sekunder
7.	Jl. Sultan Agung	Simpang Permata (PTZ)	Jalan Sekunder
8.	Jl. Suryopranoto	Simpang Gayam (PTZ)	Jalan Sekunder
9.	Jl. Dr. Sutomo	Simpang Tunjung (PTZ)	Jalan Sekunder
10.	Jl. Dr. Wahidin Sudirohusodo	Simpang Atmosukarto (PTZ)	Jalan Sekunder
11.	Jl. Panembahan Senopati	Simpang Gondomanan (PTZ)	Jalan Sekunder

b. Pengukuran $PM_{2,5}$ menggunakan HVAS

Pengukuran konsentrasi $PM_{2,5}$ di udara ambien dilakukan di lokasi yang sama dengan perhitungan volume kendaraan yakni di Jalan Jendral Sudirman, Jalan Laksda Adisucipto dan Jalan Ipda Tut Harsono. Pengukuran konsentrasi $PM_{2,5}$ ini mengacu pada standar yang berlaku yakni SNI 7119.14:2016, dimana dalam SNI ini menggunakan HVAS untuk menangkap *Particulate Matter 2,5* dengan metode gravimetri.

Sedangkan untuk data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian kali ini sebagai berikut:

- a. Data meteorologi yang diperoleh dari website Copernicus. Dimana data ini berupa data reanalysis dan juga data satelit. Adapun data yang dihasilkan yakni data temporal atau spasial, yang nantinya akan didapat data berupa suhu, tekanan, arah angin, kecepatan angin, kelembapan, tutupan awan, tinggi awan (*ceiling*

height), radiasi matahari permukaan, serta parameter turunan lainnya seperti *friction velocity*.

- b. Data dimensi jalan yang didapat dari Keputusan Walikota Yogyakarta Nomor 71 Tahun 2018 tentang Penetapan Ruas-Ruas Jalan Kota Yogyakarta, dimana dengan KepWalJogja ini digunakan untuk memenuhi data yang akan digunakan pada saat proses penelitian dengan mengambil data panjang dan lebar jalan yang termasuk dalam lokasi penelitian.
- c. Nilai faktor emisi kendaraan yang mengacu pada PerMenLH No. 12 Tahun 2010 mengenai pelaksanaan pengendalian pencemaran udara di daerah. Dalam peraturan ini, menjelaskan tentang standar yang ditetapkan untuk emisi gas buang kendaraan. Dimana nilai ini digunakan untuk menghitung inventarisasi emisi kendaraan.

Adapun untuk data primer dan sekunder selengkapnya dianalisis menggunakan beberapa perangkat yang terdapat pada tabel 3.3

Tabel 3. 3 Pengumpulan Data Primer dan Data Sekunder

No.	Proses	Kebutuhan Data	Jenis Perangkat
1.	Inventarisasi Emisi	Volume kendaraan di jalan sesuai dengan jenis kendaraanya.	Microsoft Excel, QGIS
		Faktor emisis kendaraan berdasarkan kategori bahan bakar	Microsoft excel
		Koordinat jalan, panjang jalan dan lebar jalan	Microsoft excel, QGIS, AERMOD
2.	Pemodelan Dispersi Pencemaran Udara	Data meteorologi; elevasi; anemometer height; arah dan kecepatan angin; suhu; kelembapan; tekanan; presipitasi; radiasi dan cloud cover	Microsoft Excel. WRPLLOT, AERMET, ODV
		Peta tata guna lahan	AERMAP
		Peta kontur	AERMAP
3.	Uji Validasi Model	Uji korelasi	Microsoft Excel

3.3.2 Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel pada penelitian kali ini hanya dilakukan pada saat pengukuran atau pengecekan konsentrasi $PM_{2,5}$ yang menggunakan HVAS di Jalan Jendral Sudirman, Jalan Adisucipto dan Jalan Ipda Tut Harsono. Adapun alat dan bahan yang digunakan yakni sebagai berikut:

a. Alat

Alat yang dibutuhkan pada penelitian kali ini dapat dilihat sebagai berikut:

1. HVAS
2. Timbangan analitik
3. Barometer
4. Anemometer
5. Hygrometer
6. Termometer
7. Stopwatch/ timer
8. Desikator
9. Pinset
10. Genset
11. Sarung tangan latex
12. Wadah penyimpanan filter
13. Amplop

b. Bahan

1. Kertas Saring

3.3.3 Pengujian Laboratorium

Pada penelitian kali ini, pengujian sampel di laboratorium dilakukan untuk mengetahui konsentrasi $PM_{2,5}$ yang telah diukur dari tiga jalan tersebut selama 24 jam yang mengacu pada SNI 7119.14:2016 tentang udara ambien-bagian 14: cara uji vertikal dengan ukuran $\leq 2,5 \mu m$ ($PM_{2,5}$) menggunakan peralatan *High Volume Air Sampler* (HVAS) dengan metode gravimetri. Adapun secara umum langkah-langkah yang harus diterapkan sebagai berikut:

1. Persiapan kertas saring yang akan digunakan sebagai bahan untuk menangkap udara atau partikel $PM_{2,5}$.

2. Menimbang kertas saring hingga menemukan berat konstan sebelum dibawa ke lapangan.
3. Pengambilan contoh uji di lapangan yang dilakukan selama 24 jam non stop.
4. Pengujian contoh uji dilakukan dengan penimbangan kertas saring hasil uji di lapangan hingga menemukan berat konstan.

3.4 Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk memahami hasil dari penelitian yang dilakukan. Adapun dalam analisis kali ini digunakan pendekatan secara kuantitatif dengan menghitung konsentrasi polutan dari emisi kendaraan bermotor yang ada di udara ambien. Tahapan yang dilakukan dalam analisis data kali ini sebagai berikut:

1. Inventarisasi Emisi Sektor Transportasi (Sumber Garis/*Line Source*)

Inventarisasi emisi dari sektor transportasi ini dapat dihitung setelah menentukan volume atau jumlah kendaraan yang ada di jalan yang telah ditentukan. Adapun perhitungan yang dilakukan mengacu pada rumus yang tertera pada Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Perkotaan. Persamaan yang digunakan yakni sebagai berikut:

$$VKT_{j,line} = \sum_{i=1}^n Q_{ji} \cdot l_i \dots\dots\dots (3.1)$$

$$E_{cji} = VKT_{ji} \cdot EF_{cj} (100-C)/100 \dots\dots\dots (3.2)$$

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)

l_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

Faktor emisi yang digunakan mengacu pada peraturan yang telah ditetapkan yakni Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 Tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara Di Daerah, dapat dilihat pada tabel 3.4:

Tabel 3. 4 Faktor Emisi Kendaraan Umum

Kategori	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	0,008
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 Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010

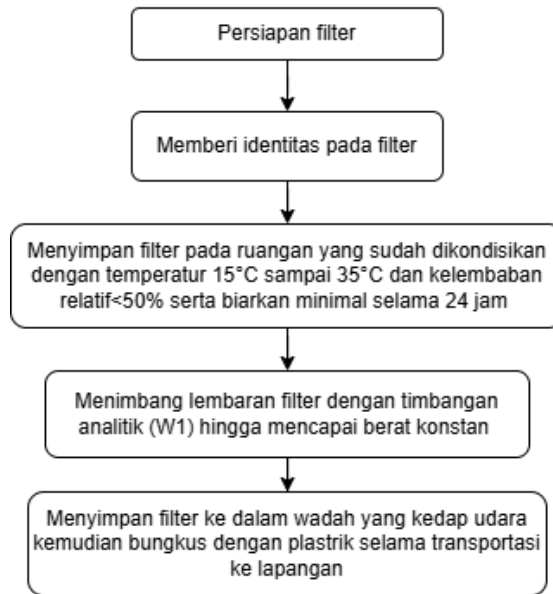
2. Analisis Konsentrasi PM_{2,5}

Analisis konsentrasi PM_{2,5} akan dilakukan berdasar dengan SNI yang telah ditetapkan yakni SNI 7119.14:2016 tentang Udara ambien – Bagian 14: Cara uji pertikel dengan ukuran $\leq 2,5\mu\text{m}$ (PM_{2,5}) menggunakan peralatan *High Volume Air Sampler* (HVAS) dengan metode gravimetri.

a. Prinsip Kerja

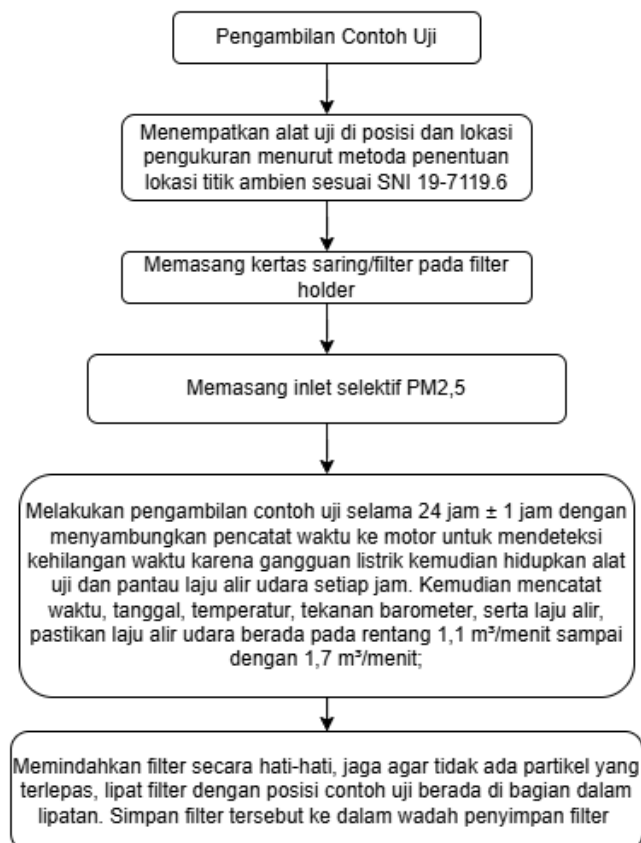
Udara yang dihisap melalui inlet selektif PM_{2,5} akan dialirkan ke filter berukuran 20,3 cm x 25,4 cm (8 in x 10 in) dengan efisiensi penyaringan minimum 98,5%, yang setara dengan porositas 0,3 μm . Proses ini berlangsung pada kecepatan aliran antara 1,1 m³/menit hingga 1,7 m³/menit selama 24 jam $\pm$ 1 jam. Jumlah partikel yang terakumulasi di dalam filter kemudian dianalisis menggunakan metode gravimetri. Hasil analisis ini dinyatakan dalam satuan massa partikulat yang terkumpul per satuan volume udara sampel, yaitu $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

b. Persiapan dan Penimbangan Kertas Saring



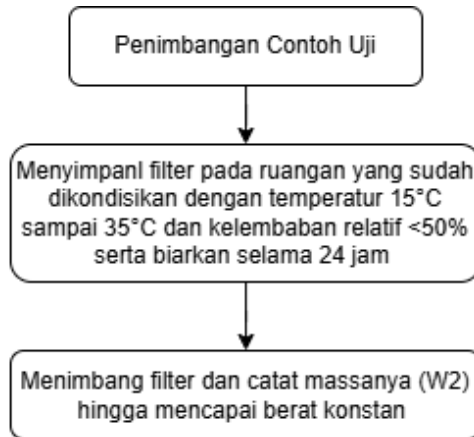
Gambar 3. 3 Alur Persiapan Filter

c. Pengambilan Contoh Uji



Gambar 3. 4 Alur Pengambilan Contoh Uji

d. Penimbangan Contoh Uji



Gambar 3. 5 Alur Penimbangan Contoh Uji

e. Perhitungan Koreksi Laju Alir pada Kondisi Standar

Adapun perhitungan Koreksi Laju Alir pada Kondisi Standar menggunakan rumus yang berdasar pada SNI 7119.14:2016 sebagai berikut:

$$Q_s = Q_0 \times \left[\frac{T_s \times P_0}{T_0 \times P_s} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Keterangan:

Q_s adalah laju alir volume dikoreksi pada kondisi standar (Nm³/menit);

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

T_s adalah temperatur standar, 298 K;

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

P_0 adalah tekanan barometrik standar, 101,3 kPa (760 mmHg);

P_s adalah tekanan barometrik rata-rata aktual dimana Q_0 ditentukan.

f. Perhitungan Volume Udara yang diambil

Adapun perhitungan volume udara yang diambil menggunakan rumus yang berdasar pada SNI 7119.14:2016 sebagai berikut:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \times t \dots\dots\dots (3.4)$$

Keterangan:

V adalah volume udara yang diambil (Nm³);

Q_i adalah pencatatan laju alir ke-i (Nm³/menit);

n adalah jumlah pencatatan laju alir;

t adalah durasi pengambilan contoh uji (menit);

- g. Perhitungan konsentrasi PM_{2,5} dalam udara ambien

Adapun perhitungan Konsentrasi PM_{2,5} dalam udara ambien menggunakan rumus yang berdasar pada SNI 7119.14:2016 sebagai berikut:

$$C = \frac{(W2-W1) \times 10^6}{V_{std}} \dots\dots\dots (3.5)$$

Keterangan :

C adalah konsentrasi massa partikel (µg/Nm³);

W1 adalah berat filter awal (g);

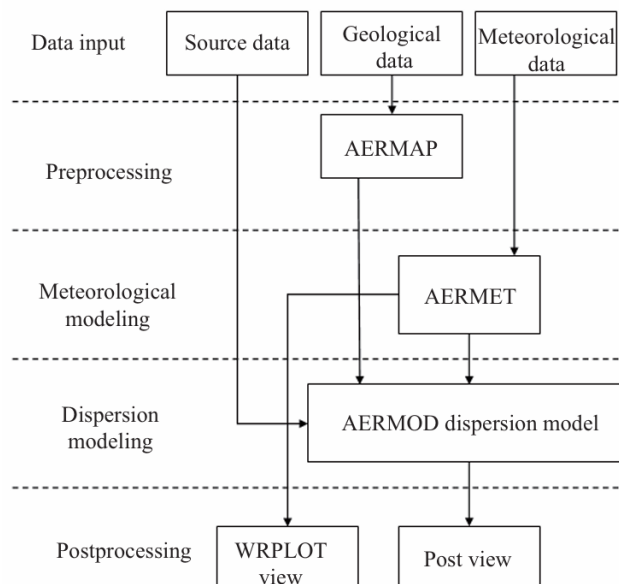
W2 adalah berat filter akhir (g);

Vstd adalah volume contoh uji udara dalam keadaan standar (Nm³)

10⁶ adalah konversi gram (g) ke mikrogram (µg)

3. Model AERMOD

Adapun setelah dilakukannya sampling, maka tahap selanjutnya yakni memodelkan menggunakan *software* AERMOD. Untuk tahapan mendetail dimulai dari proses AERMET, AERMAP serta AERMOD dapat dilihat pada Lampiran 6. Berikut merupakan tahapan dari penggunaan AERMOD:



Gambar 3. 6 Tahapan Pengolahan Data Pemodelan AERMOD

Sumber: Sayad dkk., 2022

a. AERMET

Pada tahapan pengolahan pada bagian AERMET membutuhkan data meteorologi yang diperoleh dari website *Copernicus*. Data yang digunakan meliputi kecepatan angin, arah angin, suhu udara ambien, kelembaban relatif, serta tutupan awan (*cloud cover*). Setelah data diperoleh, dilakukan proses ekstraksi dan konversi menggunakan *Ocean Data View* (ODV) untuk menghasilkan file berformat Excel (.xlsx) yang selanjutnya dapat diolah dan dijadikan input dalam pemrosesan model AERMET. Adapun data dari AERMET yang sudah didapat berperan penting dalam menentukan pola penyebaran polutan di udara ambien dan menjadi salah satu komponen yang penting dalam memastikan akurasi hasil dalam simulasi model dispersi menggunakan AERMOD.

b. AERMAP

Pada tahapan pengolahan AERMAP, berfungsi untuk menyiapkan data elevasi suatu medan dari reseptor dan juga sumber emisi. Dimana tujuannya untuk menentukan elevasi *absolute* (dpl) dari masing-masing reseptor dan sumber emisi, menghitung *terrain height scale* untuk setiap reseptor, yang dibutuhkan AERMOD dalam memodelkan efek medan naik turun (*hill and valley effect*). Serta mengintegrasikan data koordinat lokasi dengan data elevasi dari model elevasi digital (*Digital Elevation Model/DEM*) seperti SRTM atau USGS NED. Adapun AERMAP dapat meningkatkan akurasi prediksi konsentrasi polutan terutama di wilayah dengan kontur tanah yang bervariasi.

c. AERMOD

Lalu untuk tahapan pengolahan AERMOD yang merupakan komponen utama (*main processor*) dari sistem ini, menggunakan pendekatan Gaussian steady-state, dengan mempertimbangkan faktor meteorologi (output dari AERMET), mempertimbangkan topografi (output dari AERMAP) serta memperhitungkan efek *plume rise*, *building downwash*, dan *deposition*.

4. Uji Validasi Model

Untuk menguji validitas hasil pemodelan AERMOD terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$, dilakukan perbandingan antara hasil pemodelan dengan data pengukuran langsung di lapangan. Setelah data yang diperoleh dari pengukuran lapangan selanjutnya akan dibandingkan dengan output model AERMOD untuk menilai tingkat akurasi dan validitas pemodelan. Jika hasil model mendekati dengan pengukuran di lapangan, maka model yang dijalankan itu bagus dikarenakan mendekati kondisi yang sebenarnya, akan tetapi jika hasil model semakin jauh dengan pengukuran di lapangan, maka model yang dijalankan bisa dikatakan error nya tinggi.

Validasi ini penting untuk memastikan bahwa model AERMOD dapat merepresentasikan kondisi nyata di lapangan dengan baik, sehingga hasil pemodelan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan kualitas udara dan penentuan kebijakan lingkungan. Adapun untuk memvalidasi model hasil AERMOD ini menggunakan metode *Root Mean Square Percentage Error* (RMSPE) dengan persamaan berikut:

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \left(\frac{St - At}{At} \right)^2} \times 100\% \dots\dots\dots (3.6)$$

Keterangan:

n : Jumlah titik data yang digunakan untuk perbandingan

St : Nilai hasil model/prediksi pada waktu ke-t

At : Nilai observasi atau data aktual pada waktu ke-t

Nilai dari *Root Mean Square Percentage Error* (RMSPE) ini dinyatakan akurat apabila memenuhi $<25\%$ yang artinya nilai rata-rata observasi dianggap dapat diterima jika $<25\%$ dan jika berada di bawah 10% dari nilai rata-rata maka termasuk dalam kategori yang baik (Reed dkk., 2015).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Penelitian kali ini dilaksanakan di Kota Yogyakarta dan sekitarnya, mencakup beberapa ruas jalan diantaranya Jalan Jendral Sudirman, Jalan Ipda Tut Harsono, Jalan Laksda Adisucipto, Jalan Urip Sumoharjo, Jalan Timoho, Jalan Kusumanegara, Jalan Sultan Agung, Jalan Panembahan Senopati, Jalan Suryopranoto, Jalan Dr. Sutomo dan Jalan Dr. Wahidin Sudirohusodo. Pemilihan jalan-jalan ini didasarkan pada tingkat kepadatan lalu lintas yang tergolong tinggi, terutama pada saat jam puncak di pagi, siang dan juga sore hari. Volume kendaraan yang sangat padat ini merupakan sumber utama dari timbulnya polutan, baik dalam bentuk gas maupun partikulat yang berasal dari emisi bahan bakar kendaraan. Selain itu, kawasan ini merupakan pusat berbagai aktivitas di Yogyakarta, termasuk perkantoran, sekolah, pusat perbelanjaan, pusat wisata dan lain sebagainya, menjadikan daerah tersebut memiliki banyak reseptor sensitif. Keberadaan dari reseptor sensitif tersebut dapat meningkatkan urgensi untuk mengetahui seberapa tinggi tingkat pencemaran udara, khususnya konsentrasi *Particulate Matter 2,5* (PM_{2,5}) yang ada di kawasan tersebut.

Pengambilan sampel udara secara langsung dalam penelitian ini dilakukan di tiga lokasi utama, yaitu di Jalan Jendral Sudirman sebagai lokasi pertama, Jalan Ipda Tut Harsono sebagai lokasi kedua, dan Jalan Laksda Adisucipto sebagai lokasi ketiga. Pemilihan ketiga titik ini didasarkan pada pertimbangan beberapa faktor, salah satunya adalah keberadaan reseptor sensitif seperti kawasan pendidikan, perkantoran, dan pemukiman, serta tingginya volume lalu lintas yang berpotensi memengaruhi konsentrasi PM_{2,5} di udara. Selain itu, lokasi-lokasi tersebut juga dipilih karena dinilai mampu merepresentasikan karakteristik kawasan dengan sumber emisi transportasi yang padat, sesuai dengan fokus penelitian. Pengukuran dilakukan menggunakan alat *High Volume Air Sampler* (HVAS) untuk memperoleh data konsentrasi PM_{2,5} secara langsung di lapangan. Hasil dari pengukuran ini kemudian digunakan sebagai data pembanding terhadap hasil estimasi konsentrasi PM_{2,5} yang diperoleh dari pemodelan menggunakan perangkat lunak AERMOD.

Alasan pengambilan sampel tidak dilakukan di seluruh ruas jalan yang termasuk dalam cakupan studi adalah karena adanya keterbatasan dalam hal sumber daya, baik dari segi ketersediaan alat, dana operasional, maupun jumlah personel di lapangan. Selain itu, tidak semua lokasi memiliki titik yang layak atau memungkinkan untuk dilakukan pemasangan alat sampling. Oleh karena itu, tiga ruas jalan tersebut ditetapkan sebagai lokasi sampling utama, sedangkan ruas jalan lainnya hanya digunakan sebagai referensi dalam pemodelan tanpa dilakukan pengukuran langsung.

4.2 Inventarisasi Emisi Kendaraan

Inventarisasi emisi dilakukan sebagai upaya untuk memperkirakan jumlah polutan yang dilepaskan ke atmosfer dalam suatu wilayah dan periode tertentu. Dalam proses perhitungannya, diperlukan beberapa data penting sebagai berikut:

4.2.1 Perhitungan Volume Kendaraan

Dalam menghitung inventarisasi emisi kendaraan, volume kendaraan digunakan untuk mendapat nilai inventarisasi emisi yang dihasilkan oleh kendaraan yang melintas pada ruas jalan yang diteliti. Menghitung volume atau jumlah kendaraan dilakukan secara manual baik dengan mengamati secara langsung di tempat pengambilan sampel konsentrasi PM_{2,5} maupun melalui CCTV yang terpasang di sekitar jalan yang termasuk dalam lokasi penelitian. Waktu pengukuran volume kendaraan dilakukan pada tiga rentang waktu selama satu jam, yakni pagi, siang dan sore hari. Jenis kendaraan yang akan dihitung jumlahnya telah tercantum pada PerMenLH No. 12 Tahun 2010 antara lain sepeda motor, mobil bensin, mobil solar, bis dan truk. Adapun hasil dari perhitungan volume kendaraan di 11 jalan dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan untuk contoh perhitungan volume kendaraan dapat dilihat pada Lampiran 1 bagian A:

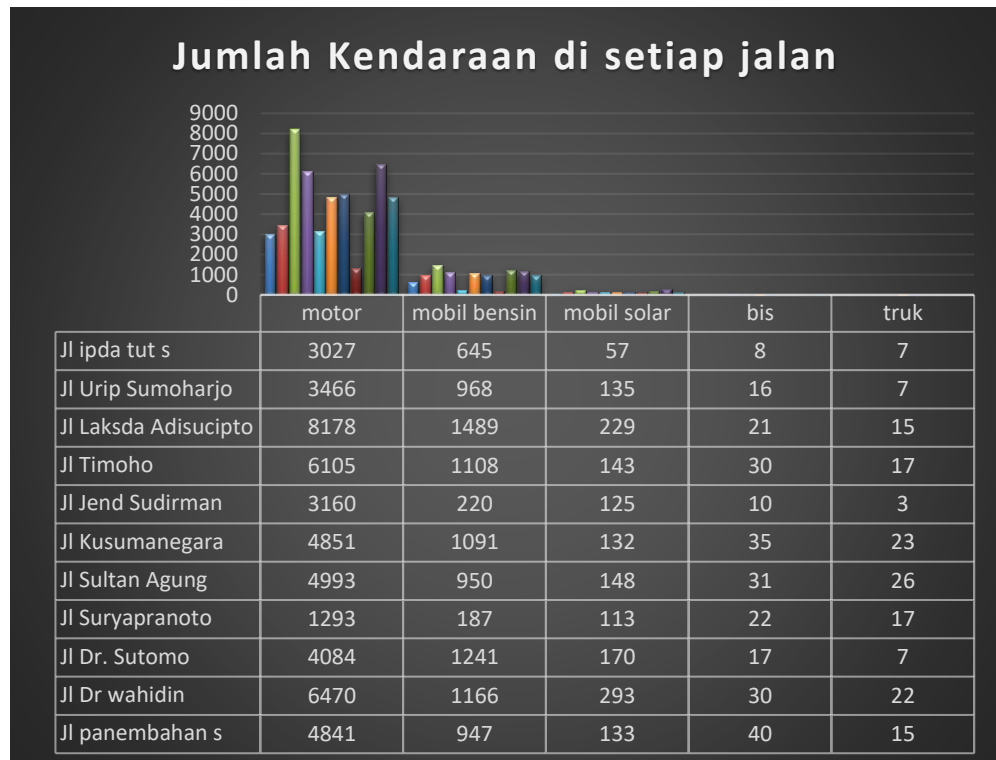
Tabel 4. 1 Volume Kendaraan

Jumlah Volume Kendaraan							
No	Jalan	Waktu	motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk
1	Jl Ipda Tut Harsono	Pagi	3445	719	57	10	10
		Siang	2652	583	60	5	3
		Sore	2984	634	53	9	7
		Rerata jumlah kendaraan	3027	645	57	8	7

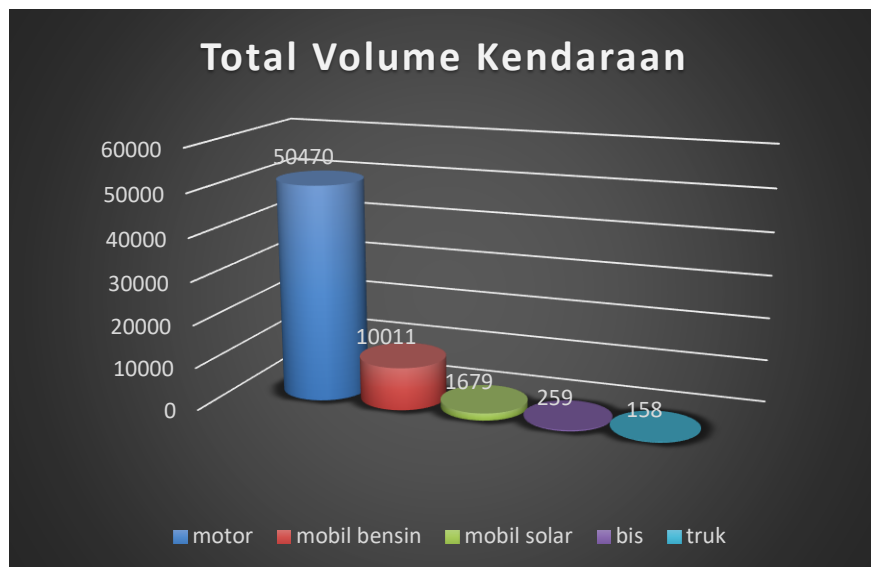
Jumlah Volume Kendaraan							
No	Jalan	Waktu	motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		3744				
2	Jl Urip Sumoharjo	Pagi	6272	1022	132	17	11
		Siang	2630	1218	220	13	7
		Sore	1495	663	54	17	2
		Rerata jumlah kendaraan	3466	968	135	16	7
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		4591				
3	Jl Laksda Adisucipto	Pagi	8198	1597	240	23	16
		Siang	7768	1267	185	17	11
		Sore	8567	1602	263	23	17
		Rerata jumlah kendaraan	8178	1489	229	21	15
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		9931				
4	Jl Timoho	Pagi	6578	1325	165	32	20
		Siang	5136	986	127	27	16
		Sore	6602	1012	138	30	15
		Rerata jumlah kendaraan	6105	1108	143	30	17
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		7403				
5	Jl Jendral Sudirman	Pagi	3127	227	114	8	3
		Siang	2528	146	98	9	6
		Sore	3826	286	164	12	0
		Rerata jumlah kendaraan	3160	220	125	10	3
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		3518				
6	Jl Kusumanegara	Pagi	6623	1232	132	43	33
		Siang	3253	899	145	24	19
		Sore	4678	1143	120	39	16
		Rerata jumlah kendaraan	4851	1091	132	35	23
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		6133				
7	Jl Sultan Agung	Pagi	4726	765	84	20	15
		Siang	4929	977	177	29	32
		Sore	5325	1109	182	45	32

Jumlah Volume Kendaraan							
No	Jalan	Waktu	motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk
		Rerata jumlah kendaraan	4993	950	148	31	26
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		6149				
8	Jl Suryapranoto	Pagi	1324	275	136	17	14
		Siang	1132	121	97	23	19
		Sore	1423	164	105	26	19
		Rerata jumlah kendaraan	1293	187	113	22	17
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		1632				
9	Jl Dr. Sutomo	Pagi	4153	1321	142	17	6
		Siang	3822	1112	176	15	8
		Sore	4278	1291	193	18	7
		Rerata jumlah kendaraan	4084	1241	170	17	7
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		5520				
10	Jl Dr Wahidin Sudirohusodo	Pagi	7203	1235	326	35	26
		Siang	5624	1065	258	25	18
		Sore	6584	1198	294	31	22
		Rerata jumlah kendaraan	6470	1166	293	30	22
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		7981				
11	Jl Panembahan Senopati	Pagi	6634	891	103	27	11
		Siang	4992	1168	192	54	29
		Sore	2898	781	104	38	4
		Rerata jumlah kendaraan	4841	947	133	40	15
	Total Seluruh Kendaraan seluruh waktu		5975				
Total Kendaraan di Semua Jalan			50470	10011	1679	259	158

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)



Gambar 4. 1 Rekapitulasi Rata-Rata Volume kendaraan di Setiap Jalan



Gambar 4. 2 Perbandingan Volume Kendaraan Berdasarkan Jenis

Berdasarkan hasil pengamatan arus lalu lintas yang telah dilakukan dan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1, tercatat bahwa volume kendaraan tertinggi berada di Jalan Laksda Adisucipto, dengan rata-rata sekitar 9.931 unit kendaraan yang melintas. Sebaliknya, volume kendaraan terendah ditemukan di Jalan Suryopranoto, yaitu sebesar 1.632 unit kendaraan. Dari seluruh jenis

kendaraan yang melintas di ketiga ruas jalan, sepeda motor merupakan kendaraan yang paling dominan dengan total mencapai 50.470 unit selama periode pengamatan. Sementara itu, kendaraan yang paling jarang melintas adalah truk, dengan total sebanyak 158 unit. Perbedaan signifikan dalam jumlah kendaraan ini paling terlihat di Jalan Laksda Adisucipto, meskipun Jalan Jendral Sudirman dan Jalan Ipda Tut Harsono merupakan kawasan pusat kota yang memiliki tingkat aktivitas tinggi karena terdapat fasilitas pendidikan, perkantoran, pusat perbelanjaan dan lainnya, namun Jalan Laksda Adisucipto juga merupakan kawasan strategis. Jalan Laksda Adisucipto tidak hanya merupakan kawasan pendidikan, perkantoran, pusat perbelanjaan, tetapi juga berfungsi sebagai jalur utama penghubung antara Daerah Istimewa Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah. Faktor inilah yang menyebabkan volume kendaraan di Jalan Laksda Adisucipto lebih tinggi dibandingkan dengan dua ruas jalan lainnya.

4.2.2 Perhitungan Inventarisasi Emisi Kendaraan

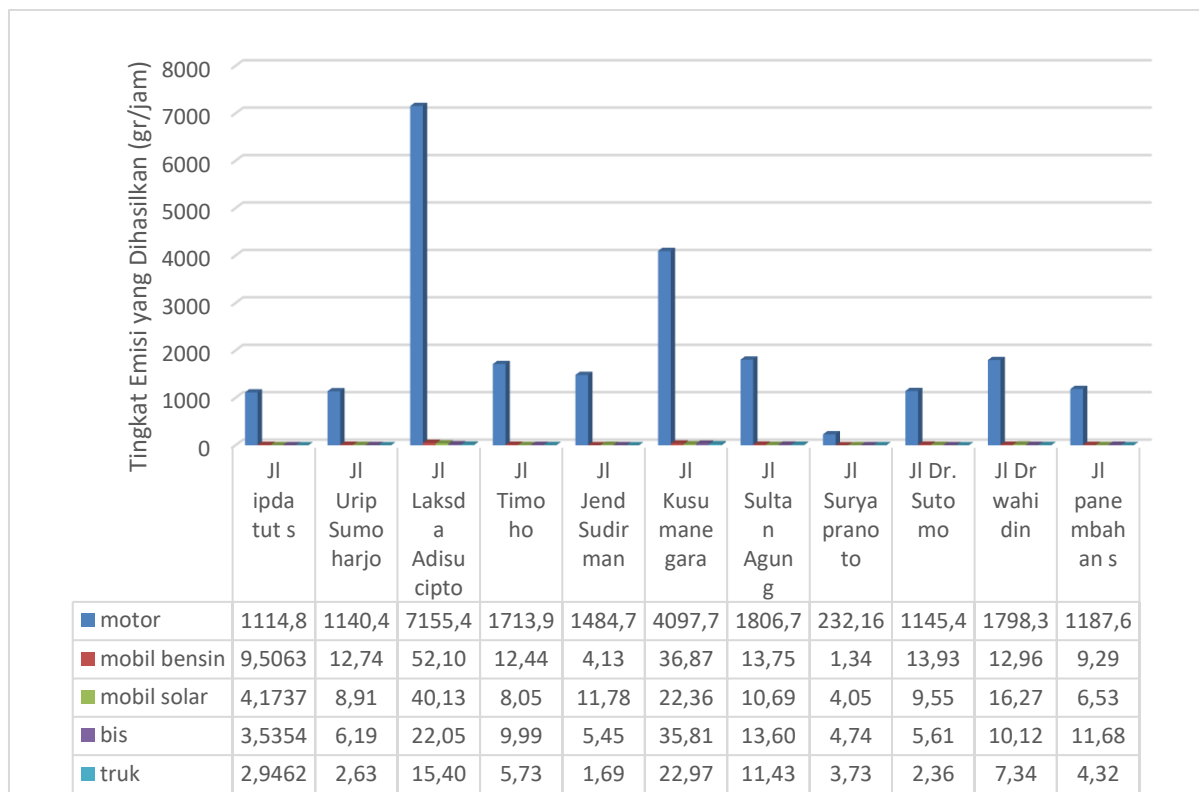
Dalam penelitian ini, perhitungan inventarisasi emisi dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kontribusi emisi yang dihasilkan dari sektor transportasi khususnya di jalan raya. Perhitungan beban emisi menggunakan pendekatan *Vehicle Kilometers Traveled (VKT)*, dimana jumlah kilometer tempuh dari tiap jenis kendaraan dikalikan dengan nilai faktor emisinya. Faktor emisi sendiri merupakan angka yang menunjukkan rata-rata jumlah polutan yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dalam kondisi tertentu. Dalam perhitungan ini, faktor emisi yang digunakan mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2020 tentang Pengendalian Pencemaran Udara di Wilayah Perkotaan. Metode ini digunakan karena cukup umum dan dapat memberikan gambaran mengenai jumlah polutan yang dilepaskan ke udara dari aktivitas transportasi.

Hasil perhitungan beban emisi disajikan pada Tabel 4.2 yang menunjukkan kontribusi masing-masing jenis kendaraan di setiap ruas jalan serta untuk contoh perhitungan inventarisasi emisi kendaraan dapat dilihat pada Lampiran 1 bagian B, Secara umum, sepeda motor memberikan kontribusi emisi paling besar dibandingkan kendaraan lainnya. Visualisasi distribusi emisi per jenis kendaraan dan total akumulasi tiap ruas jalan ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.

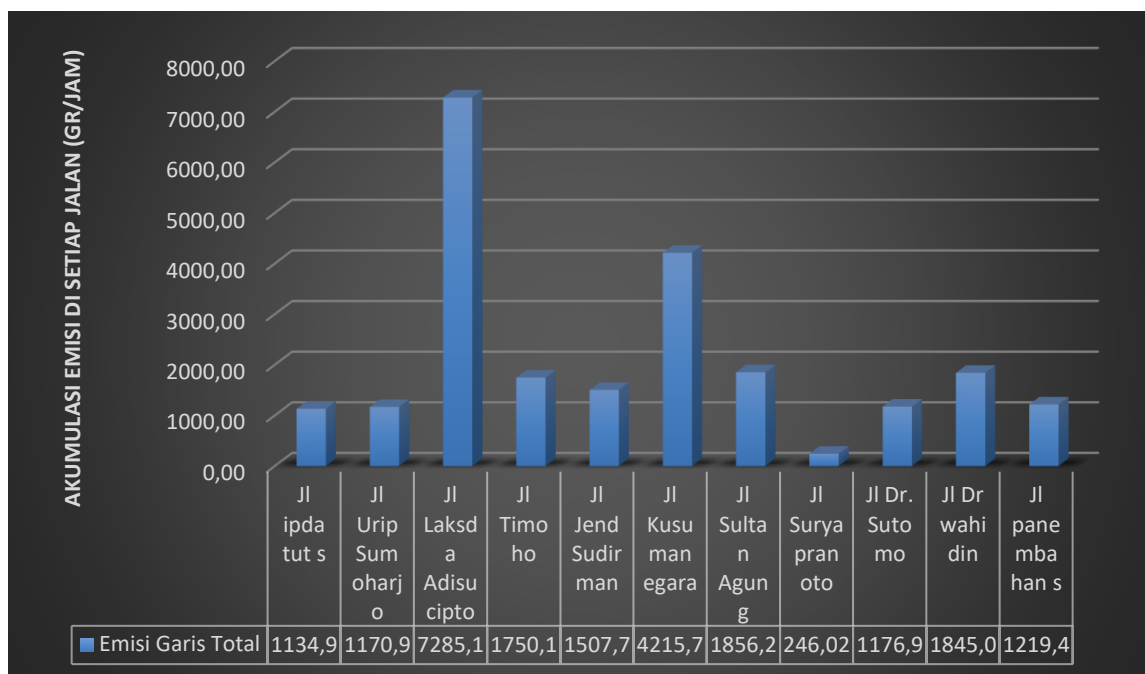
Tabel 4. 2 Beban Emisi di Setiap Jalan

No	Jalan	Beban Emisi Garis					Emisi Garis Total	Emisi Garis Total	Emisi Garis Total
		motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk			
		gr/jam					gr/jam	gr/s	gr/s/m2
1	Jl Ipda Tut Harsono	1114,75	9,51	4,17	3,54	2,95	1134,91	0,32	0,00004
2	Jl Urip Sumoharjo	1140,45	12,74	8,91	6,19	2,63	1170,91	0,33	0,00003
3	Jl Laksda Adisucipto	7155,46	52,10	40,13	22,05	15,40	7285,15	2,02	0,00005
4	Jl Timoho	1713,98	12,44	8,05	9,99	5,73	1750,19	0,49	0,00008
5	Jl Jendral Sudirman	1484,74	4,13	11,78	5,45	1,69	1507,79	0,42	0,00001
6	Jl Kusumanegara	4097,70	36,87	22,36	35,81	22,97	4215,72	1,17	0,00005
7	Jl Sultan Agung	1806,74	13,75	10,69	13,60	11,43	1856,22	0,52	0,00004
8	Jl Suryapranoto	232,16	1,34	4,05	4,74	3,73	246,02	0,07	0,00002
9	Jl Dr. Sutomo	1145,47	13,93	9,55	5,61	2,36	1176,92	0,33	0,00006
10	Jl Dr Wahidin Sudirohusodo	1798,33	12,96	16,27	10,12	7,34	1845,02	0,51	0,00007
11	Jl Panembahan Senopati	1187,65	9,29	6,53	11,68	4,32	1219,46	0,34	0,00003

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)



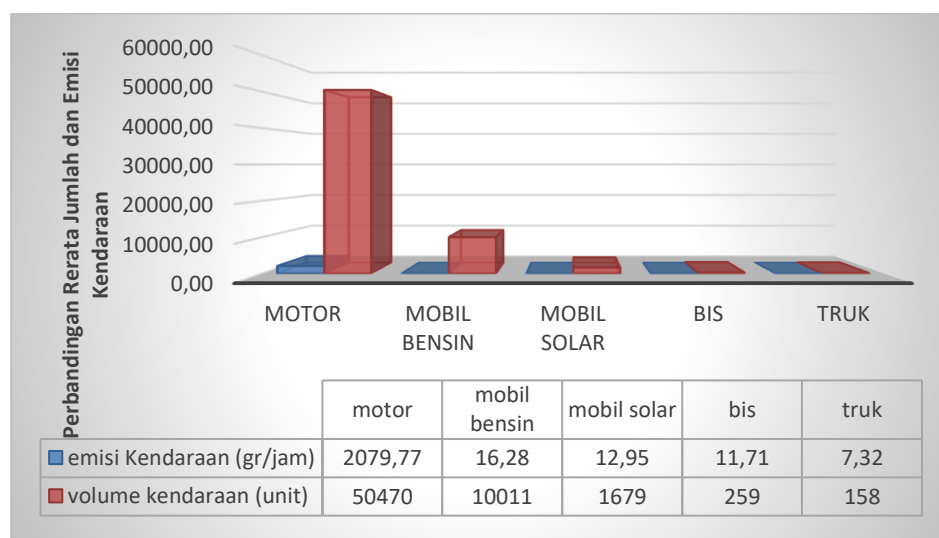
Gambar 4. 3 Tingkat Emisi Jenis Kendaraan di Lokasi Pengukuran



Gambar 4. 4 Akumulasi Total Emisi di Setiap Jalan

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditampilkan pada Gambar 4.4, beban emisi total tertinggi tercatat di Jalan Laksda Adisucipto, yaitu sebesar 7285,1 gr/jam. Nilai ini didominasi oleh emisi dari kendaraan roda dua (sepeda motor), yang menyumbang sekitar 7155,46 gr/jam sebagaimana yang tertera pada Gambar 4.3. Sebaliknya, nilai emisi terendah ditemukan di Jalan Suryopranoto dengan total beban emisi sebesar 246,02 gr/jam, yang juga sebagian besar berasal dari motor yang menyumbang sekitar 232,16 gr/jam. Perbedaan tingkat emisi antar ruas jalan ini tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah kendaraan dan faktor emisi dari masing-masing jenis kendaraan, tetapi juga oleh karakteristik fisik jalan, seperti panjang dan lebar ruas jalan yang berpengaruh terhadap nilai *Vehicle Kilometers Traveled* (VKT).

Semakin panjang suatu jalan, maka semakin besar potensi VKT yang terjadi, yang secara langsung meningkatkan nilai beban emisi. Hal ini sesuai dengan kondisi Jalan Laksda Adisucipto yang merupakan ruas jalan terpanjang di antara lokasi lainnya dalam penelitian ini. Temuan ini mencerminkan tingginya aktivitas kendaraan bermotor, terutama sepeda motor pada beberapa ruas jalan yang padat. Kondisi tersebut berdampak langsung pada meningkatnya emisi partikulat halus ($PM_{2,5}$) di udara. Dengan kata lain, terdapat korelasi antara emisi yang dihasilkan dengan jumlah kendaraan yang melintas. Adapun perbandingan antara rerata volume kendaraan dan emisi kendaraan di seluruh jalan yang termasuk ke dalam ruang lingkup penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Perbandingan Rerata Volume dan Emisi Kendaraan

Menurut Adiningrum dkk. (2020), disebutkan bahwa di wilayah DKI Jakarta, sektor transportasi menyumbang sekitar 2,1 kiloton dari total 4,6 kiloton emisi PM_{2,5}, dengan kontribusi terbesar berasal dari kendaraan berat seperti truk. Namun berbeda dengan hasil penelitian ini, kontribusi terbesar terhadap emisi justru berasal dari sepeda motor, bukan dari kendaraan berat. Hal ini bisa terjadi karena disebabkan oleh tingginya volume sepeda motor yang melintas di lokasi pengamatan, serta besarnya nilai VKT yang dihasilkan oleh sepeda motor, sehingga meskipun faktor emisinya per unit lebih kecil dibandingkan truk, total beban emisi dari motor tetap menjadi yang paling dominan, hal ini juga dapat disebabkan oleh faktor emisi dari jenis kendaraannya yang lebih kecil.

Pembakaran bahan bakar pada kendaraan bermotor, termasuk sepeda motor, merupakan salah satu sumber utama pencemar udara di wilayah perkotaan. Proses pembakaran ini tidak pernah berlangsung sempurna, sehingga selain menghasilkan gas buang berupa Karbon Dioksida (CO₂), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO_x), dan Hidrokarbon, juga melepaskan partikel halus yang dapat langsung masuk ke atmosfer. Partikel-partikel halus tersebut termasuk dalam kategori *particulate matter* dengan ukuran aerodinamik $\leq 2,5$ mikrometer (PM_{2,5}) yang disebut sebagai *primary* PM_{2,5}, karena dilepaskan langsung dari proses pembakaran mesin ke udara.

Menurut Janssen dkk. (2011), menunjukkan bahwa kendaraan bermotor secara langsung menghasilkan partikel primer PM_{2,5} dari proses pembakaran bahan bakar. Partikel ini terutama berupa *black carbon* atau *elemental carbon* (EC), disertai kandungan lain seperti *organic carbon*, logam, dan senyawa organik kompleks (PAHs). Berdasarkan pengukuran di tepi jalan, sekitar 55% dari peningkatan konsentrasi PM_{2,5} di dekat jalan raya berasal dari elemental carbon, yang merupakan indikator utama emisi langsung dari kendaraan bermotor. Bahkan, untuk kendaraan berat seperti truk, kontribusi EC mencapai 52–64% dari total PM_{2,5} yang dihasilkan. Dengan kata lain, partikel primer yang dihasilkan dari pembakaran kendaraan terutama berupa jelaga (*soot* atau *black carbon*), karbon organik, serta partikel logam dari residu bahan bakar dan pelumas. Partikel ini bersifat stabil di udara, berukuran sangat kecil, dan dapat dengan mudah masuk ke

saluran pernapasan manusia hingga ke alveolus, sehingga berimplikasi besar terhadap kesehatan masyarakat.

Selain menghasilkan partikel primer, emisi kendaraan bermotor juga mengandung sejumlah besar gas prekursor yang berpotensi membentuk PM_{2,5} setelah mengalami transformasi di atmosfer. Gas prekursor utama dari kendaraan adalah nitrogen oksida (NO_x) dan *volatile organic compounds* (VOC), sedangkan sulfur dioksida (SO₂) juga dapat muncul terutama dari bahan bakar dengan kandungan sulfur tinggi. Gas-gas ini tidak langsung berupa partikel, tetapi melalui reaksi fotokimia di atmosfer dapat membentuk PM_{2,5} sekunder. Misalnya, NO_x dapat bertransformasi menjadi aerosol nitrat, SO₂ teroksidasi menjadi aerosol sulfat, sedangkan VOC melalui oksidasi menghasilkan *secondary organic aerosol* (SOA). Zhao dkk. (2017) membuktikan melalui studi *chamber experiment* bahwa emisi kendaraan, ketika terpapar radiasi matahari dan oksidan atmosfer, dapat meningkatkan massa SOA secara signifikan sehingga berkontribusi besar terhadap konsentrasi PM_{2,5} ambien.

Jenis bahan bakar yang digunakan juga berpengaruh terhadap karakteristik emisi. Pada pembakaran bensin, pertalite, maupun pertamax, dihasilkan partikel halus berupa *black carbon*, *organic carbon*, serta senyawa logam dan hidrokarbon kompleks yang keluar melalui knalpot. Kandungan sulfur dalam bahan bakar dapat menghasilkan gas SO₂ yang kemudian teroksidasi di atmosfer membentuk partikulat sekunder berupa sulfat (SO₄²⁻). Dengan demikian, baik bensin, pertalite, maupun pertamax berpotensi menghasilkan PM_{2,5} meskipun kadar sulfur yang lebih rendah pada pertamax menjadikan emisi partikelnya relatif lebih kecil dibandingkan pertalite atau bensin biasa.

Perbedaan antara PM_{2,5} primer dan sekunder ini juga menentukan distribusi spasial dan temporal konsentrasinya. PM_{2,5} primer umumnya dominan di dekat jalan raya atau sumber emisi langsung, karena partikel dilepaskan secara langsung melalui knalpot kendaraan. Oleh karena itu, area dengan kepadatan lalu lintas tinggi akan memperlihatkan konsentrasi PM_{2,5} primer yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah yang jauh dari jalan raya. Sebaliknya, PM_{2,5} sekunder lebih dominan pada skala kota atau regional, karena pembentukannya memerlukan waktu reaksi kimia di atmosfer. Srivastava dkk. (2022) menegaskan bahwa kontribusi

sekunder, khususnya sulfat, nitrat, dan SOA, sangat signifikan dalam menentukan konsentrasi PM_{2,5} perkotaan. Dengan demikian, walaupun kendaraan menghasilkan partikel langsung, dampak total terhadap kualitas udara jauh lebih besar ketika memperhitungkan kontribusi gas prekursor.

Kondisi lingkungan juga memengaruhi efisiensi pembentukan PM_{2,5} sekunder. Suhu, kelembapan, dan intensitas sinar matahari berperan penting dalam mempercepat proses kimia di atmosfer. Di daerah tropis seperti Indonesia yang memiliki radiasi matahari tinggi sepanjang tahun, pembentukan aerosol organik sekunder dari emisi kendaraan dapat berlangsung lebih intensif. Hal ini menjelaskan mengapa meskipun kendaraan bermotor berjarak jauh dari titik pengukuran, konsentrasi PM_{2,5} ambien tetap tinggi karena adanya transportasi atmosferik dan reaksi kimia lanjutan. Studi Kheirbek dkk. (2016) menunjukkan bahwa di kawasan perkotaan padat, emisi transportasi berkontribusi besar terhadap paparan PM_{2,5} penduduk, baik dalam bentuk primer maupun sekunder, sehingga berdampak nyata pada kesehatan pernapasan dan kardiovaskular.

4.3 Pengambilan Konsentrasi PM_{2,5} di Lapangan

Proses pengambilan dan pengukuran sampel dilakukan secara langsung di tiga lokasi dan hari yang berbeda, dimana pengukuran dilakukan selama 24 jam *full* atau satu hari penuh. Pengambilan sampel ini dilakukan di Jalan Jendral Sudirman, Jalan Ipda Tut Harsono, dan Jalan Laksda Adisucipto. Dengan waktu secara berturut yakni tanggal 27 April, 1 Mei dan 6 Mei 2025. Pengambilan sampel secara langsung ini bertujuan untuk membandingkan konsentrasi PM_{2,5} di lapangan dengan hasil pemodelan menggunakan *software* AERMOD.

4.3.1 Hasil Sampling Data Meteorologi

Sebagai bagian dari upaya dalam memahami faktor apa saja yang mempengaruhi konsentrasi PM_{2,5} di lokasi penelitian, dilakukan juga pengambilan data meteorologi secara langsung di lapangan. Pengukuran ini dilakukan secara bersamaan pada saat proses sampling PM_{2,5} di lapangan dengan rentang 24 jam. Data meteorologi yang dikumpulkan antara lain suhu, kecepatan angin, kelembaban dan tekanan udara, keseluruhan data ini diukur untuk mengetahui kondisi aktual atmosfer selama periode pengambilan sampel. Alat yang digunakan untuk

mengukur data-data tersebut antara lain *thermo-hygro-barometer* dan *anemometer*.
Data meteorologi dapat dilihat pada Tabel 4.3:

Tabel 4. 3 Data Meteorologi di Lokasi Sampling

No	Jam	Jalan Jendral Sudirman				Jalan Ipda Tut Harsono				Jalan Laksda Adisucipto			
		Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)
1	08.00	31,3	1,2	64,8	746,7	28,9	1,2	72,5	747,6	29,7	1,1	73,5	746
2	09.00	31,1	2,2	62,3	746,7	29,2	2	71,5	747,5	30,7	1,3	73,9	745,9
3	10.00	32,1	1,8	60,7	755,311	31,2	1,2	67,1	747,5	34	1,1	63,4	745,7
4	11.00	33,5	1,8	58,8	746,7	30	1,9	67,2	746,8	34	2,1	62,5	745
5	12.00	32	2,7	55	758,29	31	2,8	65,7	746	34	2,2	59	743
6	13.00	32,9	1,2	51	756,812	30	1,5	66,2	745,7	33,3	1,6	67	743,3
7	14.00	32,6	1,8	57	756,062	31	2,2	66,4	745,4	29	1,5	80	743
8	15.00	32,7	1,7	60,1	756,062	31,3	1,3	65,4	745,1	29,7	1	72	743,5
9	16.00	32,1	1,9	56,9	755,311	30,3	1,5	68,5	745,5	29,8	1,8	75,9	743,8
10	17.00	31	0,9	58,1	756,812	30,1	1,1	70,2	746	29	1,3	71	744
11	18.00	29	1,7	56,9	756,812	29,5	1,5	71,7	746,1	28,6	2,8	73,3	744,6
12	19.00	29	0,7	63,4	756,062	29,5	0	73,2	746,8	28,4	0,7	74,1	743,2
13	20.00	29,8	0,7	64,8	756,812	28,5	0	80,1	747	28,3	0,9	73,4	743,6
14	21.00	28	1,3	71,1	757,562	28,8	0	77,5	747,2	28,2	1,4	77,7	745,5
15	22.00	28,8	0	73,2	757,562	28,9	0	76,1	747,1	27,6	1,7	81,5	745,3
16	23.00	28,9	0	65,7	757,562	28,3	0	77,3	747	28	1,3	80,8	745,1
17	00.00	28,9	0	67,9	758,29	28	0	76,2	746	28,2	1,4	81,7	744,5
18	01.00	28,3	0	67,5	757,562	28,2	0	77,1	746,2	27,8	0	83,6	744,1
19	02.00	27,9	0	70,9	758,29	28,5	0	76,3	747	27	1,1	87,6	743,5
20	03.00	24	0	73,5	756,812	27	0	74,3	745	27	1,2	87	743,5

No	Jam	Jalan Jendral Sudirman				Jalan Ipda Tut Harsono				Jalan Laksda Adisucipto			
		Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)
21	04.00	24	0	74,1	758,29	27	0	74,5	745,3	27,6	1,4	84,1	743,3
22	05.00	25,2	0	74,6	756,812	26,9	0	74,9	747,7	27,2	0	85	743,4
23	06.00	26	0	76,3	757,562	26,7	0	76,4	746	27,7	1,7	82,1	743,5
24	07.00	28,2	1,3	75,6	755,311	28,3	1,7	74,8	746,5	28,7	1,7	77,8	744,4
Rerata		29,5	1,0	65,0	755,7	29,0	0,8	72,5	746,4	29,3	1,3	76,2	744,2

Sumber: Data Pengamatan Faktor Meteorologi di Lokasi Sampling

Berdasarkan hasil pengamatan dan data meteorologi yang telah diperoleh selama periode pengukuran pada tiga ruas jalan yaitu Jalan Jendral Sudirman, Jalan Ipda Tut Harsono, dan Jalan Laksda Adisucipto, meskipun ketiganya berada dalam wilayah kota yang sama, setiap lokasi menunjukkan karakteristik meteorologi yang berbeda, yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar seperti kepadatan bangunan, vegetasi, aktivitas lalu lintas, dan arah angin lokal. Di Jalan Jendral Sudirman, suhu udara tercatat berada pada rentang 24°C hingga 33,5°C. Kecepatan angin di lokasi ini berkisar antara 0 m/s (kondisi angin tenang) hingga 2,7 m/s. Kelembaban udara tercatat antara 51%RH hingga 76,3%RH, sedangkan tekanan udara berada dalam kisaran 746,7 mmHg hingga 758,29 mmHg.

Sementara itu, di Jalan Ipda Tut Harsono, suhu berada pada rentang 26,7°C hingga 31,3°C. Kecepatan angin tercatat berkisar antara 0 m/s hingga 2,8 m/s, dengan kelembaban udara antara 65,7%RH hingga 80,1%RH. Tekanan udara di lokasi ini berkisar antara 745 mmHg hingga 758,29 mmHg. Adapun di Jalan Laksda Adisucipto, suhu udara berkisar dari 27°C hingga 33,3°C, kecepatan angin dari 0 m/s hingga 2,2 m/s, kelembaban antara 59%RH hingga 87,6%RH, serta tekanan udara berkisar antara 743 mmHg hingga 746 mmHg. Tujuan dari pengambilan data meteorologi di lokasi sampling yakni sebagai data pelengkap yang akan digunakan untuk menghitung konsentrasi PM_{2,5} berdasarkan SNI 7119.14 : 2016 tentang Cara Uji PM_{2,5} menggunakan Metode Gravimetri dengan waktu pengambilan sampel selama 24 jam.

Hasil pengamatan suhu menunjukkan pola harian yang umum terjadi, dimana suhu udara mengalami peningkatan dari pagi hingga menjelang siang akibat meningkatnya intensitas sinar matahari. Setelah mencapai puncaknya pada siang hari, suhu mulai menurun perlahan dari sore hingga malam dan terus menurun hingga pagi hari berikutnya. Sementara itu, kelembaban udara menunjukkan pola yang berbanding terbalik dengan suhu. Ketika suhu udara rendah seperti pada malam hingga dini hari, kelembaban cenderung meningkat. Sebaliknya, saat suhu udara tinggi, terutama pada siang hingga sore hari, kelembaban relatif akan menurun. Kondisi ini terjadi karena udara panas memiliki kemampuan menyerap uap air lebih besar sehingga terasa lebih kering. Adapun tekanan udara yang terukur selama pengamatan menunjukkan fluktuasi, kadang meningkat, kadang menurun,

yang umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu dan elevasi lokasi pengukuran. Pada dasarnya, semakin tinggi suhu udara, maka tekanan udara cenderung menurun karena molekul-molekul udara menjadi lebih aktif dan menyebar, menyebabkan massa jenis udara berkurang. Sebaliknya, saat suhu lebih rendah, tekanan udara meningkat karena molekul udara menjadi lebih rapat. Selain itu, faktor ketinggian tempat juga berpengaruh terhadap tekanan udara. Semakin tinggi suatu lokasi dari permukaan laut, maka tekanan udaranya semakin rendah, sedangkan di daerah yang lebih rendah atau dataran, tekanan udara akan lebih tinggi karena jumlah kolom udara di atasnya lebih besar. (Mulyani, T., dan Ainingsih, S. N, 2024)

4.3.2 Hasil Pengukuran Konsentrasi PM_{2,5} di Lapangan

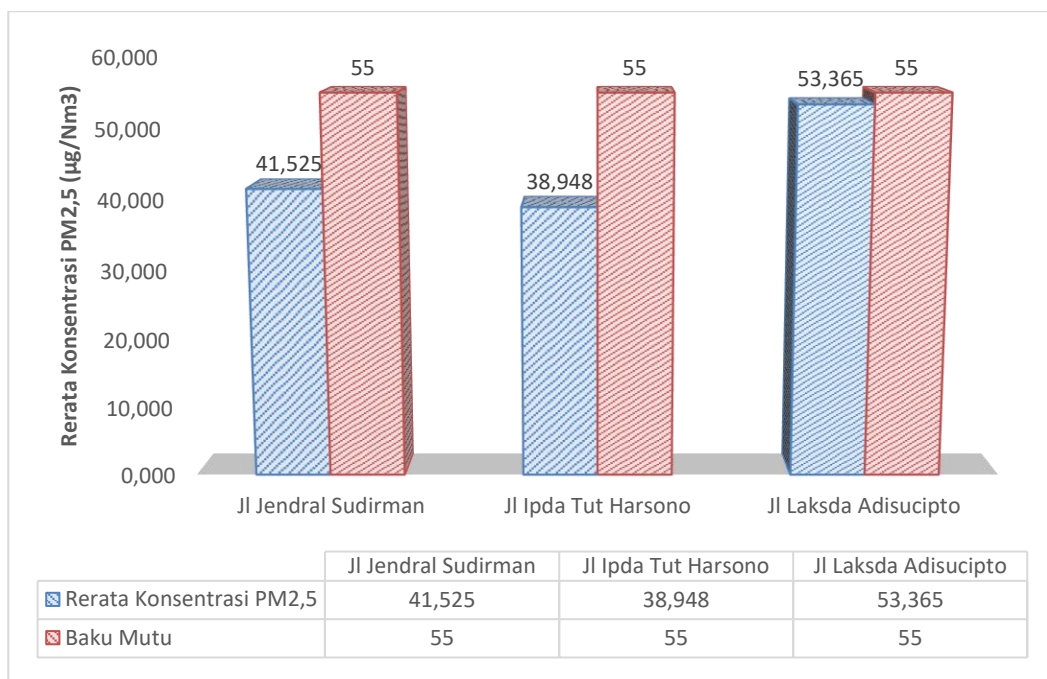
Pengukuran konsentrasi PM_{2,5} dilakukan di 3 lokasi dan hari yang berbeda, yakni di Jalan Jendral Sudirman, Jalan Ipda Tut Harsono dan Jalan Lakda Adisucipto. Dilakukan berturut-turut tanggal 27 April 2025, 1 Mei 2025 dan 6 Mei 2025. Untuk mengetahui nilai konsentrasi PM_{2,5} yang didapat, diperlukan perhitungan berdasarkan dengan SNI 7119.14:2016 yang tertera pada persamaan 3.5. Adapun hasil konsentrasi sampling PM_{2,5} dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.6 serta untuk contoh perhitungan konsentrasi sampling PM_{2,5} dapat dilihat pada Lampiran 2:

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Konsentrasi PM_{2,5} di Lapangan

No	Jam	Jalan Jendral Sudirman Pos Polisi (27 April 2025)	Jalan Ipda Tut Harsono Damkar (1 Mei 2025)	Jalan Lakda Adisucipto K24 (6 Mei 2025)	Baku Mutu
		($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)
1	08.00	41,900	38,908	53,336	55
2	09.00	41,886	38,930	53,428	55
3	10.00	41,715	39,058	53,724	55
4	11.00	42,051	39,000	53,749	55
5	12.00	41,626	39,085	53,822	55
6	13.00	41,728	39,028	53,750	55
7	14.00	41,729	39,101	53,382	55
8	15.00	41,735	39,128	53,426	55
9	16.00	41,715	39,053	53,424	55
10	17.00	41,599	39,027	53,346	55
11	18.00	41,462	38,986	53,289	55
12	19.00	41,482	38,967	53,321	55

No	Jam	Jalan Jendral Sudirman Pos Polisi (27 April 2025)	Jalan Ipda Tut Harsono Damkar (1 Mei 2025)	Jalan Lakda Adisucipto K24 (6 Mei 2025)	Baku Mutu
		($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)
13	20.00	41,516	38,898	53,298	55
14	21.00	41,372	38,912	53,221	55
15	22.00	41,427	38,921	53,176	55
16	23.00	41,434	38,885	53,218	55
17	00.00	41,414	38,891	53,257	55
18	01.00	41,393	38,899	53,236	55
19	02.00	41,346	38,898	53,187	55
20	03.00	41,117	38,853	53,187	55
21	04.00	41,077	38,845	53,247	55
22	05.00	41,200	38,776	53,208	55
23	06.00	41,235	38,807	53,249	55
24	07.00	41,448	38,898	53,305	55
RERATA		41,525	38,948	53,365	55

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)



Gambar 4. 6 Rerata Konsentrasi PM_{2,5} di Lapangan

Berdasarkan dari data nilai konsentrasi PM_{2,5} yang telah didapat, nilai dari konsentrasi PM_{2,5} terendah terdapat di Jalan Ipda Tut Harsono yang diukur pada tanggal 1 mei 2025, tercatat konsentrasi yang didapat dalam rentang 38,776 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 39,1277 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, dengan rerata konsentrasi PM_{2,5} sebesar 38,948 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

Kemudian disusul di jalan Jendral Sudirman yang diukur pada tanggal 27 April 2025, tercatat konsentrasi yang didapat dalam rentang $41,0768 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga $42,0511 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, dengan rerata konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ sebesar $42,0511 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dan nilai konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ yang tertinggi terdapat di Jalan Laksda Adisucipto tercatat konsentrasi yang didapat dalam rentang $53,1756 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga $53,8218 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, dengan rerata konsentrasi sebesar $53,365 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Dari hasil rerata konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ yang didapatkan pada ketiga ruas jalan tersebut, hasilnya masih tergolong aman dikarenakan tidak melebihi baku mutu yang berlaku yakni sebesar $55 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

Perbedaan hasil konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ di 3 lokasi ini dapat terjadi karena beberapa faktor, antara lain faktor meteorologi serta jumlah kendaraan yang melintas. Jalan Ipda Tut Harsono menjadi lokasi dengan konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ terendah yakni dengan nilai rerata $38,948 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Dimana suhu rerata yang ada disana yakni sekitar $29,0^\circ\text{C}$, kecepatan angin rerata $0,8 \text{ m/s}$, kelembaban rerata sekitar $72,5 \text{ \%RH}$, tekanan udara rerata $746,42 \text{ mmHg}$, serta jumlah kendaraan yang melintas rata-rata sebanyak 3744 kendaraan, selain itu dapat dipengaruhi oleh banyaknya pepohonan dan bangunan yang membuat polutan tersebar dan tereduksi.

Jalan Jendral Sudirman menjadi lokasi dengan konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ tengah-tengah diantara terendah dan tertinggi yakni dengan nilai rerata $41,525 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Dimana suhu rerata yang ada disana yakni sekitar $29,5^\circ\text{C}$, kecepatan angin rerata $1,0 \text{ m/s}$, kelembaban rerata sekitar $65 \text{ \%RH}$, tekanan udara rerata $755,7 \text{ mmHg}$, serta jumlah kendaraan yang melintas rata-rata sebanyak 3518 kendaraan. Jalan Laksda Adisucipto menjadi lokasi dengan konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ tertinggi yakni dengan nilai rerata $53,365 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Dimana suhu rerata yang ada disana yakni sekitar $29,3^\circ\text{C}$, kecepatan angin rerata $1,3 \text{ m/s}$, kelembaban rerata sekitar $76,2 \text{ \%RH}$, tekanan udara rerata $744,20 \text{ mmHg}$, serta jumlah kendaraan yang melintas rata-rata sebanyak 9931 kendaraan. Penyebab Jalan Ipda Tut Harsono mendapatkan nilai konsentrasi yang paling rendah bisa saja berasal dari faktor meteorologi maupun jumlah kendaraan yang melintas.

Menurut Perdana dkk. (2023), faktor-faktor meteorologi seperti kelembaban udara, suhu, dan kecepatan angin turut memengaruhi distribusi maupun akumulasi $\text{PM}_{2,5}$ di lokasi penelitian. Ketika kelembaban udara meningkat, proses pembentukan dan penyerapan partikel di atmosfer juga cenderung lebih tinggi,

sehingga konsentrasi $PM_{2,5}$ ikut naik karena adanya dukungan dari kadar air di udara. Selain itu, kelembaban yang tinggi dapat memicu terbentuknya lapisan inversi di dekat permukaan tanah, yang menyebabkan partikel polutan seperti $PM_{2,5}$ tertahan di lapisan bawah atmosfer dan sulit terdispersi ke lapisan yang lebih tinggi. Kondisi ini mendorong akumulasi partikulat di sekitar alat pengukuran. Jika dilihat dari hasil sampling kelembaban udara di Jalan Laksda Adisucipto memiliki nilai tinggi, hal ini dapat memicu tingginya konsentrasi $PM_{2,5}$ yang didapat di jalan tersebut.

Kecepatan angin yang rendah atau angin yang cenderung lemah juga memberikan peluang terjadinya penumpukan $PM_{2,5}$, sebab angin berperan dalam penyebaran partikel ke wilayah yang lebih luas. Di sisi lain, aktivitas lalu lintas yang padat dan pergerakan kendaraan yang relatif lambat membuat durasi kendaraan berada di satu ruas jalan lebih lama, sehingga emisi $PM_{2,5}$ yang dilepas ke udara semakin terkonsentrasi. Jika dilihat dari hasil sampling kecepatan angin di Jalan Ipda Tut Harsono memiliki nilai rendah yang seharusnya hal ini dapat memicu tingginya konsentrasi $PM_{2,5}$. Akan tetapi, konsentrasi $PM_{2,5}$ yang didapat di jalan ini merupakan hasil terendah dibanding dengan dua lokasi lainnya. Rendahnya konsentrasi $PM_{2,5}$ biasanya terjadi ketika jumlah kendaraan yang melintas sedikit atau tidak terjadi kemacetan di area pos pemantauan, sehingga pelepasan emisi ke udara lebih minim. Selain itu konsentrasi $PM_{2,5}$ ini tidak hanya dipengaruhi oleh kecepatan angin saja, akan tetapi dipengaruhi banyak faktor meteorologi lainnya.

Sedangkan menurut Serlina dkk. (2023), terdapat hubungan yang cukup jelas antara kondisi meteorologi dan konsentrasi. $PM_{2,5}$ di udara. Semakin tinggi temperatur udara, maka konsentrasi $PM_{2,5}$ cenderung menurun. Sebaliknya, ketika temperatur menurun, konsentrasi $PM_{2,5}$ justru meningkat. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh rendahnya pencampuran vertikal udara pada suhu rendah yang membuat polutan terperangkap di lapisan bawah atmosfer. Jika dilihat dari hasil sampling suhu di tiga lokasi penelitian, Jalan Ipda Tut Harsono mendapatkan suhu rerata terendah. Akan tetapi, suhu yang rendah ini tidak terlalu berpengaruh terhadap hasil konsentrasi $PM_{2,5}$ yang didapat, dimana hasil konsentrasi $PM_{2,5}$ di Jalan Ipda Tut Harsono merupakan hasil terendah. Dengan kata lain konsentrasi

PM_{2,5} ini tidak hanya dipengaruhi suhu saja, akan tetapi dipengaruhi banyak faktor meteorologi dan faktor lainnya.

Tekanan udara juga menunjukkan korelasi yang serupa. Peningkatan tekanan udara cenderung disertai penurunan konsentrasi PM_{2,5} sementara tekanan udara yang lebih rendah dapat menyebabkan akumulasi polutan, sehingga konsentrasi PM_{2,5} meningkat. Sementara itu, kecepatan angin memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam menyebarkan partikel PM_{2,5} di udara. Ketika kecepatan angin tinggi, partikel lebih cepat tersebar sehingga konsentrasinya menurun. Sebaliknya, jika kecepatan angin rendah, pergerakan udara menjadi terbatas dan menyebabkan akumulasi PM_{2,5} di suatu wilayah, sehingga konsentrasinya meningkat. Dari hasil sampling tekanan udara di tiga lokasi penelitian, Jalan Jendral Sudirman mendapatkan tekanan udara rerata yang paling tinggi diantara lokasi lainnya. Akan tetapi, jika tekanan udaranya saja yang tinggi, tidak terlalu berpengaruh terhadap hasil konsentrasi PM_{2,5} yang didapat. Dengan kata lain konsentrasi PM_{2,5} ini tidak hanya dipengaruhi tekanan udara saja, akan tetapi banyak faktor meteorologi dan faktor lainnya yang dapat mempengaruhi tingginya konsentrasi PM_{2,5} di suatu lokasi.

Curah hujan memiliki peran penting dalam menurunkan konsentrasi PM_{2,5} di udara melalui mekanisme deposisi basah, yaitu proses dimana partikel-partikel halus di atmosfer ikut terbawa turun bersama air hujan. Semakin deras intensitas hujan dan semakin lama durasinya, maka proses pencucian udara akan semakin efektif dalam mengurangi polutan. Akan tetapi pada ruas Jalan Laksda Adisucipto, meskipun terjadi hujan yang seharusnya membantu menurunkan konsentrasi PM_{2,5}, hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi di lokasi ini masih tergolong tinggi. Dikarenakan durasi hujan pada saat sampling di Jalan Laksda Adisucipto relatif singkat. Hasil pengukuran konsentrasi PM_{2,5} yang masih tergolong tinggi ini kemungkinan besar dapat disebabkan oleh tingginya volume kendaraan bermotor yang melintas setiap harinya, sehingga jumlah emisi yang dihasilkan tetap besar dan mengurangi efektivitas hujan dalam menurunkan konsentrasi polutan di udara.

Selain itu, jarak hari sampling PM_{2,5} yang cukup jauh dan tidak dilakukan secara berturut-turut kemungkinan besar dapat mempengaruhi hasil data. Hal ini karena konsentrasi PM_{2,5} di udara sangat dipengaruhi oleh faktor waktu (jam, hari,

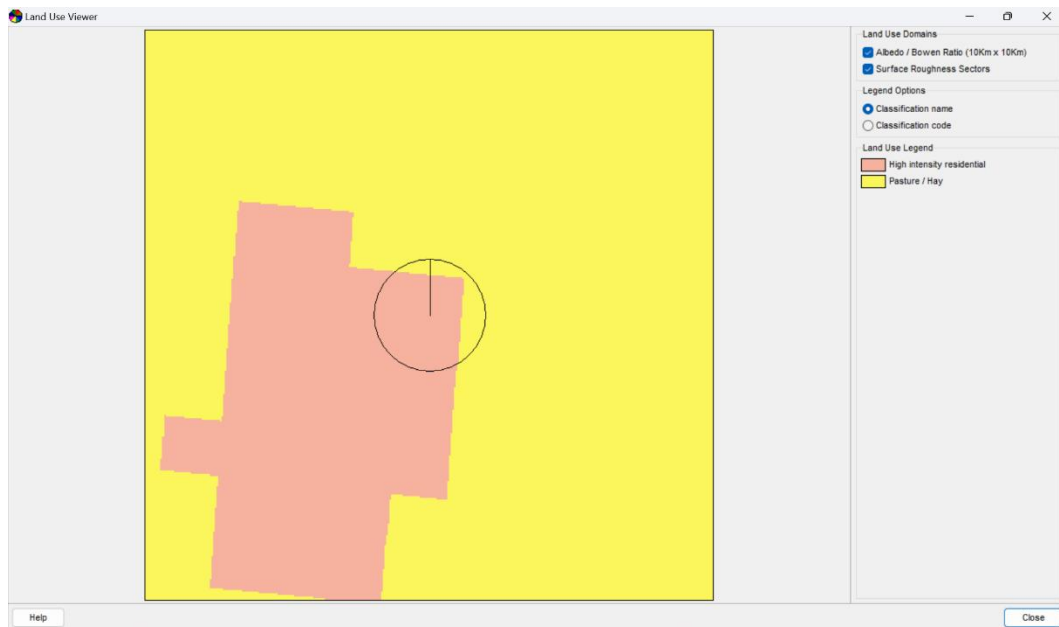
bahkan musim), sehingga jika sampling dilakukan tidak berurutan, ada kemungkinan fluktuasi alami harian tidak sepenuhnya tertangkap. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa frekuensi sampling yang jarang atau tidak konsisten bisa menurunkan keandalan data, meningkatkan variabilitas (fluktuasi terlihat lebih besar), dan membuat analisis statistik menjadi kurang kuat.

4.4 Visualisasi Penyebaran Konsentrasi PM_{2,5} Menggunakan Aplikasi AERMOD

Pada tahap ini, dilakukan pemodelan sebaran konsentrasi PM_{2,5} menggunakan perangkat lunak AERMOD. Dalam proses ini, salah satu komponen utama yang diperlukan adalah data emisi kendaraan, karena kendaraan menjadi sumber utama polutan dalam penelitian ini. Data emisi tersebut kemudian digunakan sebagai input utama dalam simulasi AERMOD untuk memproyeksikan sebaran konsentrasi PM_{2,5} di lokasi penelitian. Dalam penelitian ini, sumber polutan berasal dari line area, yaitu lintasan kendaraan bermotor yang bergerak di sepanjang ruas jalan. Sebelum pemodelan dilakukan, diperlukan data meteorologi yang valid. Data ini diperoleh dari ERA5, yaitu basis data cuaca dan iklim global yang dikelola oleh *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) melalui platform *Copernicus Data Store*.

Data dari ERA5 digunakan sebagai input awal dalam proses pra-pemodelan meteorologi menggunakan perangkat lunak AERMET, yang merupakan bagian dari sistem AERMOD. Dalam sistem pemodelan dispersi AERMOD, terdapat pemrosesan pra-pemodelan meteorologi dan topografi atau yang biasanya disebut meteorological and terrain pre-processors, yaitu AERMET dan AERMAP. AERMET bertugas mengolah data cuaca mentah menjadi parameter atmosferik yang diperlukan dalam pemodelan, seperti kecepatan dan arah angin, suhu, tutupan awan, kelembapan, tinggi awan (*ceiling height*), radiasi matahari permukaan, serta parameter turunan lainnya seperti *friction velocity*, *Monin-Obukhov length*, *convective velocity scale*, *temperature scale*, *mixing height*, dan *surface heat flux*. Untuk mempermudah konversi data meteorologi dari ERA5, digunakan aplikasi *Ocean Data View (ODV)* agar data dapat diubah menjadi format Excel sebelum diproses lebih lanjut di AERMET.

Setelah itu, AERMET akan menghasilkan file data meteorologi berupa *Surface Data File (.sfc)*, yang akan digunakan sebagai input utama dalam simulasi AERMOD. Namun perlu dicatat, tidak semua parameter yang dibutuhkan tersedia lengkap di ERA5, sehingga beberapa parameter yang hilang harus diisi menggunakan nilai default (standar) yang sudah ditentukan. Dalam AERMET, terdapat tiga parameter penting yang berasal dari klasifikasi tutupan lahan (*Land Use*), yaitu *Albedo*, *Bowen Ratio*, dan *Surface Roughness length*. Ketiganya diperoleh berdasarkan karakteristik tutupan lahan di sekitar lokasi studi, dan sangat memengaruhi proses transfer energi di permukaan bumi. Albedo adalah proporsi radiasi matahari yang dipantulkan kembali oleh permukaan tanah saat matahari berada tepat di atas kepala. Semakin tinggi albedo, semakin banyak cahaya yang dipantulkan. Bowen ratio menggambarkan jumlah kelembapan di permukaan tanah. Nilai ini berperan dalam menentukan seberapa besar energi digunakan untuk pemanasan udara dibandingkan penguapan. Surface roughness menggambarkan tingkat kekasaran permukaan tanah terhadap aliran angin. Nilai ini memengaruhi ketinggian di mana polutan dari atmosfer mulai mengalami deposisi ke permukaan tanah (U.S. EPA, 2018).



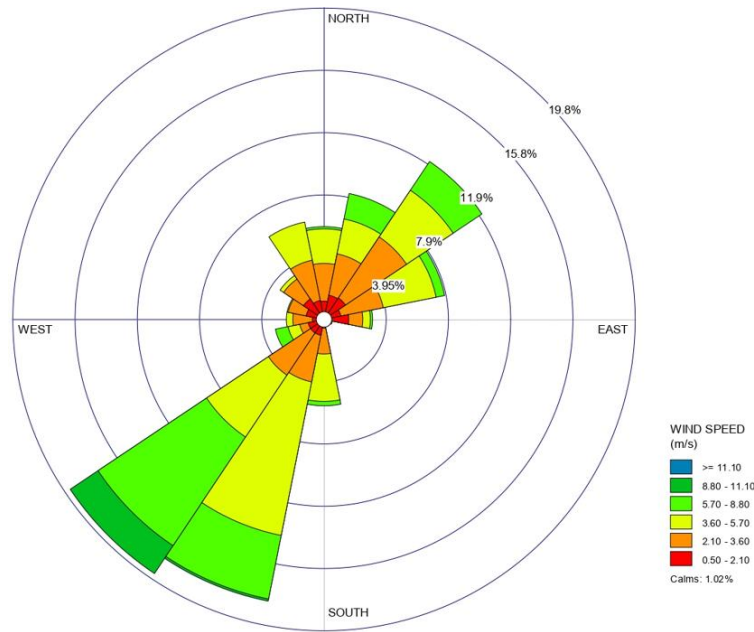
Gambar 4. 7 Tutupan Lahan di Lokasi Penelitian

Berdasarkan hasil identifikasi tutupan lahan di lokasi penelitian, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.7, terdapat dua kategori utama, yaitu *high intensity residential* dan *pasture/hay*. Kategori *high intensity residential* merepresentasikan

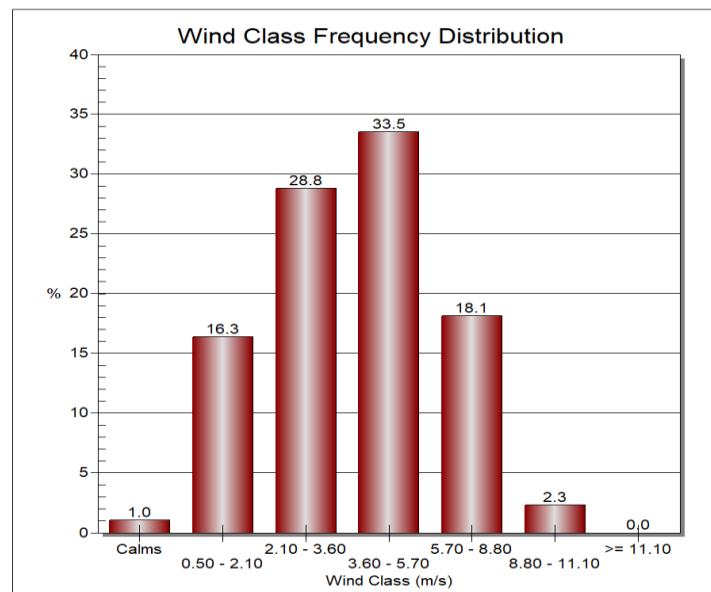
kawasan pemukiman padat dengan bangunan permanen, jalan, dan fasilitas perkotaan yang cukup rapat. Sementara itu, *pasture/hay* menggambarkan lahan terbuka seperti padang rumput atau area terbuka yang digunakan untuk penggembalaan maupun pertanian ringan. Dari hasil pengolahan data, diketahui bahwa jenis tutupan lahan yang mendominasi di lokasi penelitian adalah *pasture/hay*, sedangkan sisanya merupakan *high intensity residential*. Komposisi ini secara langsung mempengaruhi nilai-nilai parameter lingkungan yang dibutuhkan dalam AERMET.

Nilai *Albedo* yang diperoleh sebesar 0,18, yang menunjukkan bahwa sebagian besar radiasi matahari yang diterima diserap oleh permukaan tanah, bukan dipantulkan kembali ke atmosfer. Hal ini umum terjadi pada permukaan dengan vegetasi rendah atau tanah terbuka. Kemudian, nilai *Bowen ratio* sebesar 0,7 menunjukkan bahwa kondisi kelembaban di sekitar lokasi cenderung kering, dengan lebih banyak energi yang digunakan untuk pemanasan udara dibandingkan proses penguapan. Sementara itu, nilai *surface roughness length* sebesar 0,67 mengindikasikan adanya hambatan fisik yang cukup tinggi terhadap aliran angin, yang biasanya disebabkan oleh vegetasi sedang hingga tinggi atau bangunan padat. Nilai ini juga menunjukkan bahwa permukaan di sekitar lokasi studi mampu menghasilkan tingkat turbulensi udara yang cukup signifikan, yang pada akhirnya akan berpengaruh terhadap proses penyebaran polutan di atmosfer.

Berdasarkan data meteorologi yang telah diolah menggunakan AERMET, data tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *software* WRPLOT untuk dianalisis lebih lanjut. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui pola sebaran arah angin dan kecepatan angin di sekitar lokasi penelitian melalui visualisasi mawar angin (*windrose*). Hasil visualisasi dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9, yang menunjukkan arah dan distribusi kecepatan angin selama periode pemantauan.



Gambar 4. 8 *Windrose* Berdasarkan Data Meteorologi



Gambar 4. 9 Distribusi Frekuensi Kelas Kecepatan Angin Lokasi Pengukuran

Berdasarkan hasil tersebut, arah angin yang dominan bertiup dari arah barat daya menuju timur laut, yang terlihat dari panjang batang windrose ke arah tersebut. Warna-warna yang muncul dalam plot windrose merepresentasikan berbagai rentang kecepatan angin. Adapun rincian pembagian kecepatan angin berdasarkan warna yakni warna merah dengan kecepatan 0,50–2,10 m/s sebesar 16,3%. Warna orange dengan kecepatan 2,10–3,60 m/s sebesar 28,8%. Warna kuning dengan

kecepatan 3,60–5,70 m/s sebesar 33,5%. Warna hijau muda dengan kecepatan 5,70–8,80 m/s sebesar 18,1%. Warna hijau tua dengan kecepatan 8,80–11,10 m/s sebesar 2,3%.

Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebaran kecepatan angin paling dominan berada pada rentang 3,60–5,70 m/s dengan persentase sebesar 33,5%. Kecepatan angin yang relatif tinggi ini berpotensi memperluas area sebaran polutan dari titik sumber emisi, sejalan dengan prinsip dasar penyebaran polutan di atmosfer dimana peningkatan kecepatan angin akan mempercepat proses transportasi dan dispersi polutan. Semakin besar kecepatan angin, semakin cepat dan jauh partikel polutan terbawa, sehingga konsentrasi polutan seperti PM_{2,5} cenderung menurun di sekitar titik emisi akibat efek dispersi yang lebih intensif (Eka Suryana, 2022).

Namun demikian, dalam konteks pemodelan menggunakan AERMOD, nilai dominan kecepatan angin pada kisaran 3,60–5,70 m/s masih tergolong tinggi, terutama untuk wilayah perkotaan seperti Kota Yogyakarta. Berdasarkan data klimatologi BMKG, kecepatan angin rata-rata di wilayah ini umumnya berkisar antara 0,5–2 m/s, sedangkan kecepatan di atas 5 m/s biasanya terjadi pada kondisi cuaca ekstrem atau di daerah terbuka luas seperti pesisir dan perbukitan. Nilai kecepatan angin yang cukup tinggi dapat menyebabkan model memprediksi dispersi polutan yang berlebihan, sehingga hasil pemodelan belum dapat merepresentasikan kondisi lapangan yang sebenarnya. Tingginya kecepatan angin ini dapat disebabkan oleh *human error* (kesalahan input data meteorologi, penggunaan data yang tidak sesuai lokasi, atau proses konversi data yang kurang tepat sebelum dimasukkan ke dalam AERMOD).

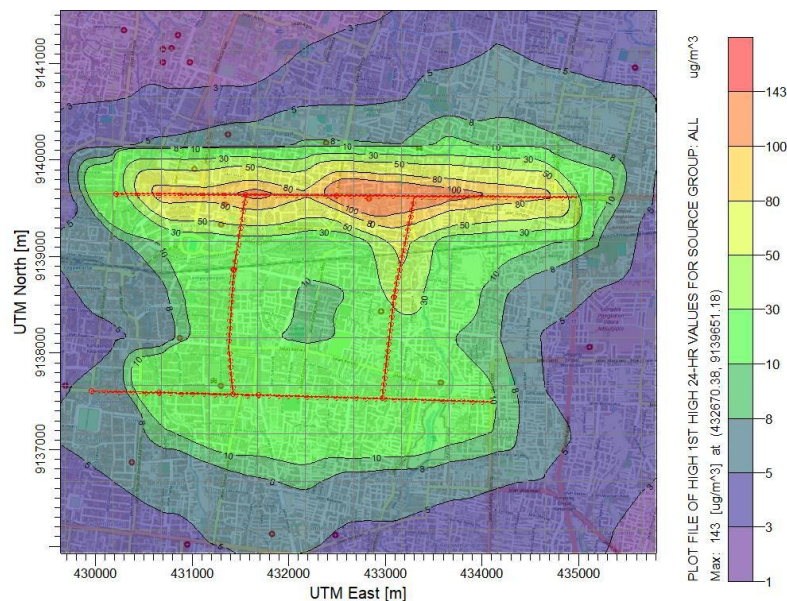
Setelah proses pengolahan data meteorologi dilakukan menggunakan *software* AERMET, diperoleh file hasil berupa *Surface Data File* (.sfc) yang berisi parameter-parameter cuaca harian yang dibutuhkan untuk pemodelan dispersi udara. File tersebut selanjutnya digunakan sebagai input dalam *software* AERMOD untuk proses pemodelan kualitas udara, khususnya untuk menghitung sebaran konsentrasi partikulat halus PM_{2,5} di area studi. Selain data meteorologi, pada tahap ini juga dimasukkan data sumber emisi ke dalam AERMOD, yang dalam penelitian ini berbentuk line area source yang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Data *Line Area Source*

Source ID	X Coord. (m)	Y Coord. (m)	Base Elevation (m)	Release Height (m)	Emission Rate (g/s m ²)	Side Length (m)	Description
JL1	432968	9137536	106,06	1,3	0,00004	7,4	Jl Ipda Tut Harsono
JL2	431555	9139642	128,06	1,3	0,00003	11,5	Jl Urip Sumoharjo
JL3	432494	9139634	129,94	1,3	0,00005	15	Jl Laksda Adisucipto
JL4	433089	9138580	113,7	1,3	0,00008	7,4	Jl Timoho
JL5	430213	9139650	125,88	1,3	0,00001	22,5	Jl Jendral Sudirman
JL6	431690	9137565	107,77	1,3	0,00005	10,2	Jl Kusumanegara
JL7	430657	9137592	104,04	1,3	0,00004	12	Jl Sultan Agung
JL8	431423	9137573	109,52	1,3	0,00002	8	Jl Suryapranoto
JL9	431430	9138861	120,55	1,3	0,00006	7	Jl Dr. Sutomo
JL10	431432	9138865	120,67	1,3	0,00007	9	Jl Dr Wahidin Sudirhusodo
JL11	429960	9137605	110,49	1,3	0,00003	15	Jl Panembahan Senopati

Sumber: KepWalJogja2018

Pemodelan dilakukan dengan pengaturan domain area sebesar 5 km × 5 km, mencakup area yang berpotensi terdampak dari aktivitas transportasi di titik-titik sumber. Adapun hasil visualisasi pemodelan sebaran konsentrasi PM_{2,5} yang diperoleh dari output AERMOD dapat dilihat pada Gambar 4.10.

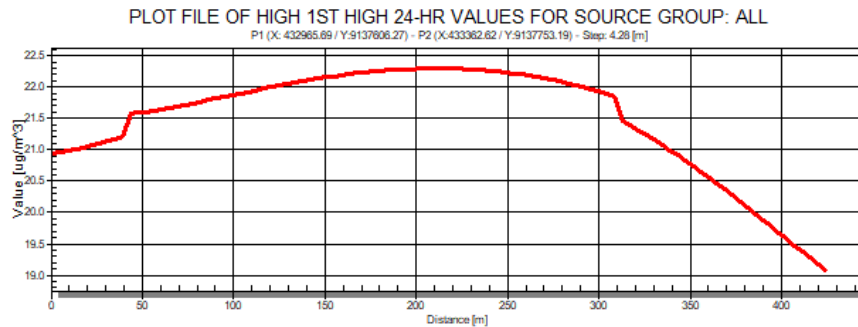


Gambar 4. 10 Peta Sebaran Konsentrasi PM_{2,5} Selama 24 Jam

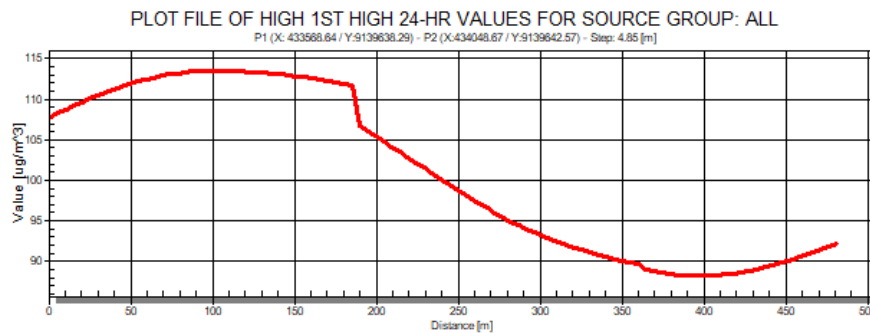
Berdasarkan hasil pemodelan konsentrasi $PM_{2,5}$ menggunakan *software* AERMOD, dapat dilihat pada gambar 4.10 dimana wilayah dengan konsentrasi $PM_{2,5}$ tertinggi teridentifikasi di sekitar Jalan Laksda Adisucipto dan sekitarnya yang ditandai dengan warna merah yang merepresentasikan konsentrasi $PM_{2,5}$ dengan rentang 100-143 $\mu g/Nm^3$ maksimumnya. Selain itu, titik sebaran yang signifikan juga muncul di Jalan Urip Sumoharjo dan Jalan Jendral Sudirman dengan rentang konsentrasi $PM_{2,5}$ sekitar 80-143 $\mu g/Nm^3$. Pola sebaran ini menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan dari arah dan kecepatan angin yang terjadi selama periode pemodelan. Dapat dilihat pada hasil pemodelan, sebaran polutan cenderung meluas ke arah utara.

Berdasarkan data *wind class frequency distribution*, kecepatan angin di lokasi penelitian didominasi oleh rentang 3,60–5,70 m/s, yang mencakup 33,5 % dari total frekuensi angin. Kecepatan angin yang relatif tinggi ini mempercepat proses dispersi, menyebabkan polutan tersebar lebih luas ke area sekitar. Namun demikian, akumulasi konsentrasi polutan tetap terjadi di area yang dekat dengan sumber emisi, terutama di jalur utama lalu lintas yang menjadi titik sumber dominan. Hal ini sejalan dengan prinsip dasar penyebaran polutan di atmosfer, dimana semakin besar kecepatan angin, maka jarak jangkauan penyebaran polutan juga akan semakin jauh. Beberapa ruas jalan lain yang juga termasuk dalam cakupan penelitian, tidak berada dalam zona konsentrasi tinggi yang menandakan bahwa nilai konsentrasi $PM_{2,5}$ di wilayah tersebut masih berada di bawah ambang batas baku mutu udara ambien.

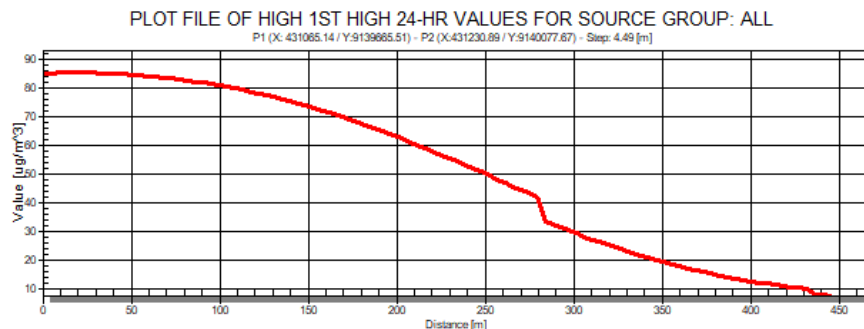
Tingginya konsentrasi $PM_{2,5}$ di titik-titik tertentu disebabkan oleh tingginya aktivitas lalu lintas kendaraan bermotor di kawasan tersebut, terutama kendaraan roda dua dan mobil yang mendominasi jalan-jalan utama kota. Selain faktor emisi kendaraan dan faktor meteorologi, kondisi topografi juga turut mendukung penyebaran polutan secara horizontal. Lokasi penelitian memiliki kontur yang relatif datar dengan ketinggian berkisar antara 100 hingga 120-an meter di atas permukaan laut, sehingga memungkinkan pergerakan udara berlangsung lebih leluasa tanpa hambatan dari bentuk lahan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa arah angin dominan berasal dari barat daya, emisi tinggi dari kendaraan bermotor, serta topografi yang relatif datar menjadi faktor utama yang mempengaruhi pola distribusi konsentrasi $PM_{2,5}$ di kawasan studi.



Gambar 4. 11 Pola Sebaran Polutan PM_{2,5} Menuju SMA 8 Yogyakarta



Gambar 4. 12 Pola Sebaran Polutan PM_{2,5} Menuju Ambarukmo Plaza



Gambar 4. 13 Pola Sebaran Polutan PM_{2,5} Menuju RS Panti Rapih

Berdasarkan Gambar 4.11, sebaran PM_{2,5} menuju SMA 8 Yogyakarta menunjukkan peningkatan konsentrasi pada awal pengukuran. Konsentrasi dimulai dari 21 µg/m³ pada jarak 0 meter dan naik menjadi 21,6 µg/m³ pada jarak 40 meter. Selanjutnya, konsentrasi terus meningkat secara bertahap hingga mencapai 22,3 µg/m³ pada jarak 240 meter. Setelah itu, konsentrasi menurun menjadi 21,8 µg/m³ pada jarak 310 meter, lalu turun secara signifikan hingga 19 µg/m³ pada jarak 425 meter. Perubahan fluktuatif pada grafik di Gambar 4.11 ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti peningkatan jumlah polutan, turbulensi udara di dekat permukaan tanah, serta pengaruh *downwash* dari bangunan sekitar. Pada jarak yang sangat dekat dengan sumber emisi, polutan cenderung tetap berada pada ketinggian

tertentu, sehingga konsentrasi di permukaan tanah relatif rendah. Namun, seiring bertambahnya jarak dari sumber, turbulensi atmosfer dan *wake effect* (bayangan angin) yang dihasilkan oleh bangunan di sekitar jalur angin menyebabkan polutan terdorong turun ke permukaan. Kondisi ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi polutan di permukaan hingga mencapai titik puncak sebelum akhirnya menurun kembali.

Berdasarkan gambar-gambar plot sebaran polutan terhadap reseptor sensitif, Gambar 4.12 memperlihatkan bahwa konsentrasi $PM_{2,5}$ menuju Ambarukmo Plaza mengalami peningkatan dari $108 \mu g/m^3$ menjadi $113 \mu g/m^3$ pada jarak hingga 190 meter. Setelah itu, konsentrasi menurun menjadi $107 \mu g/m^3$ pada jarak yang sama, kemudian terus menurun secara bertahap hingga mencapai $90 \mu g/m^3$ pada jarak 360 meter, dan berlanjut turun menjadi $87 \mu g/m^3$ pada jarak sekitar 420 meter. Namun, pada jarak sekitar 480 meter, konsentrasi kembali meningkat secara perlahan menjadi $93 \mu g/m^3$. Penurunan konsentrasi ini terjadi karena polutan semakin tersebar atau terdispersi ke udara bebas seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi. Saat polutan bergerak menjauh, area pencampuran dengan udara bersih di sekitarnya menjadi lebih luas. Akibatnya, konsentrasi polutan tidak tetap pekat, melainkan terus berkurang karena tercampur dengan udara yang lebih bersih. Kenaikan konsentrasi yang terjadi pada jarak tertentu, seperti pada 80 meter, dapat dijelaskan oleh faktor-faktor lokal seperti perubahan arah angin, turbulensi atmosfer, atau pengaruh bangunan dan medan sekitar yang menyebabkan polutan terkonsentrasi kembali di area tersebut. Fenomena ini menunjukkan bahwa penyebaran polutan di atmosfer tidak selalu linier dan dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan setempat yang kompleks.

Berdasarkan Gambar 4.13, terlihat bahwa konsentrasi $PM_{2,5}$ menuju RS Panti Rapih mengalami penurunan secara perlahan dari $85 \mu g/m^3$ dan terus menurun menjadi $43 \mu g/m^3$ pada jarak 280 meter. Kemudian menurun secara perlahan hingga mencapai $0 \mu g/m^3$ pada jarak 440 m. Pola ini terjadi karena di awal pergerakan, polutan menyebar cepat dan bercampur dengan udara bersih sehingga konsentrasinya menurun signifikan. Namun, setelah mencapai jarak tertentu, penyebarannya mulai meluas ke segala arah (baik horizontal maupun vertikal), membuat konsentrasi di permukaan tidak langsung turun drastis lagi, tapi bertahan

lebih stabil untuk beberapa jarak. Penurunan ini terjadi karena semakin jauh polutan bergerak dari sumber emisi, maka semakin luas penyebarannya di udara. Polutan yang awalnya pekat di dekat sumber lama-lama akan bercampur dengan udara bersih di sekitarnya. Data ini menunjukkan bahwa semakin dekat ke sumber emisi, konsentrasi PM_{2,5} akan semakin tinggi. Sebaliknya, semakin jauh dari sumber emisi, polutan akan menyebar dan bercampur dengan udara bersih, sehingga konsentrasinya perlahan menurun (Eka Suryana, 2022).

4.5 Perbandingan Konsentrasi Hasil Sampling dengan Konsentrasi Hasil *Software* AERMOD

Perbandingan antara konsentrasi PM_{2,5} hasil pemodelan menggunakan *software* AERMOD dengan hasil pengukuran langsung (sampling) di lapangan dilakukan untuk mengetahui sejauh mana akurasi model dalam merepresentasikan kondisi kualitas udara ambien di lokasi penelitian. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan tipe sumber *line area* yang menggambarkan ruas jalan sebagai sumber emisi PM_{2,5}, sementara data sampling diperoleh dari hasil pengukuran langsung di titik-titik tertentu yang mewakili kondisi riil di lapangan. Tujuan utama dari perbandingan ini adalah untuk menilai kemampuan AERMOD dalam memproyeksikan sebaran konsentrasi PM_{2,5} berdasarkan input data meteorologi serta karakteristik sumber emisi yang dimodelkan. Melalui perbandingan ini, dapat diketahui apakah hasil pemodelan mendekati kondisi sebenarnya di lapangan atau terdapat perbedaan yang cukup signifikan. Adapun hasil perbandingan antara konsentrasi PM_{2,5} dari hasil sampling dan hasil pemodelan AERMOD disajikan pada Tabel 4.6 Berikut:

Tabel 4. 6 Perbandingan Konsentrasi PM_{2,5} Hasil Pemodelan dan Hasil Sampling

No	Nama Jalan	Konsentrasi PM _{2,5} Model (µg/Nm ³)	Konsentrasi PM _{2,5} Sampling (µg/Nm ³)	Selisih (µg/Nm ³)	Keterangan Selisih
1.	Jalan Jendral Sudirman	91,761	41,949	50,236	Model>Sampling
2.	Jalan Ipda Tut Harsono	22,305	38,948	16,643	Model<Sampling

No	Nama Jalan	Konsentrasi PM _{2,5} Model (µg/Nm ³)	Konsentrasi PM _{2,5} Sampling (µg/Nm ³)	Selisih (µg/Nm ³)	Keterangan Selisih
3.	Jalan Laksda Adisucipto	113,551	53,365	60,186	Model>Sampling

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Berdasarkan Tabel 4.6, terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara hasil pemodelan dan hasil sampling konsentrasi PM_{2,5} di tiga ruas jalan utama, yaitu Jalan Jenderal Sudirman, Jalan Ipda Tut Harsono, dan Jalan Laksda Adisucipto. Selisih konsentrasi berkisar antara 16,643 µg/Nm³ hingga 60,186 µg/Nm³. Perbedaan dari hasil konsentrasi sampling dengan konsentrasi pemodelan bisa saja terjadi karena beberapa hal, misalnya input data emisi lalu lintas seperti volume kendaraan atau faktor emisi yang mungkin tidak benar-benar mencerminkan kondisi secara keseluruhan atau secara real, sehingga output model jauh lebih besar. Kemudian adanya polutan primer yang tidak hanya menghasilkan PM_{2,5} seperti pembakaran kayu, pembakaran limbah pertanian, kebakaran hutan, proses industri pada saat sampling. Kemudian AERMOD yang tidak sepenuhnya dapat memperhitungkan efek pembentukan partikel sekunder PM_{2,5} yang terbawa dari luar area. Serta faktor meteorologi seperti kecepatan angin, kelembaban, atau stabilitas atmosfer yang sangat menentukan dispersi polutan, sulit tertangkap jika data input tidak cukup detail.

Selain itu, perbedaan hasil konsentrasi dari hasil model dan sampling dapat disebabkan karena adanya polutan PM_{2,5} sekunder yang tidak teranalisis beberapa oleh model dikarenakan pada model tidak hanya mengukur polutan PM_{2,5} tetapi juga mengukur faktor polutan lainnya. Polutan PM_{2,5} sekunder ini tidak langsung dilepaskan dari sumbernya, tetapi terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia antara gas prekursor, misalnya Sulfur dioksida (SO₂) yang teroksidasi menjadi sulfat (SO₄²⁻), NO_x (Nitrogen Oksida: NO, NO₂) yang teroksidasi menjadi nitrat (NO₃⁻). VOCs akan teroksidasi oleh OH menjadi aerosol organik sekunder (SOA). Kesimpulannya, hasil pemodelan konsentrasi PM_{2,5} belum dapat dijadikan acuan tunggal tanpa divalidasi oleh data pengukuran lapangan. Meskipun model memberikan gambaran umum tentang distribusi secara spasial dan temporal polusi

udara, namun model belum sepenuhnya dapat merepresentasikan maupun menggambarkan konsentrasi aktual, terutama di kawasan padat lalu lintas (Iriani dan Pribadi, 2023).

4.6 Uji Hasil Validasi Model

Uji validasi model dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar tingkat ketelitian antara hasil prediksi konsentrasi PM_{2,5} dari model AERMOD dengan data hasil pengukuran langsung di lapangan. Hasil prediksi dari model bisa jadi kurang merepresentasikan keadaan *rill time* maupun hasil sampling di lapangan. Hal ini umum terjadi dalam memodelkan kualitas udara, dimana hasil prediksi model dapat lebih rendah (*underprediction*) maupun lebih tinggi (*overprediction*) dibandingkan dengan hasil sampling langsung. Metode yang digunakan untuk uji validasi adalah *Root Mean Square Percentage Error* (RMSPE). Nilai konsentrasi PM_{2,5} hasil model dan hasil sampling di tiga lokasi pengamatan, yaitu Jalan Jendral Sudirman, Jalan Ipda Tut Harsono, dan Jalan Laksda Adisucipto dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan untuk contoh perhitungan nilai RMSPE dapat dilihat pada Lampiran 3.

Tabel 4. 7 Uji Validitas Model

Nama Jalan	Konsentrasi PM _{2,5}		$\left(\frac{St-At}{At}\right)^2$	RMSPE (%)
	Model (µg/m ³)	Sampling (µg/m ³)		
Jalan Jendral Sudirman	91,761	41,949	1,464	120,978
Jalan Ipda Tut Hasono	22,305	38,948	0,183	42,731
Jalan Laksda Adisucipto	113,551	53,365	1,272	112,782
	$\Sigma \left(\frac{St-At}{At}\right)^2$		0,973	98,626

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Berdasarkan hasil perhitungan RMSPE, didapatkan nilai di Jalan Jendral Sudirman sekitar 120,978%, Jalan Ipda Tut Harsono sekitar 42,731%, dan Jalan Laksda Adisucipto sekitar 112,782%. Sedangkan didapat rata-rata sebesar 98,626%, yang mengindikasikan bahwa terdapat deviasi sebesar 98,626% antara hasil model dengan data aktual di lapangan. Nilai ini termasuk dalam kategori kurang merepresentasikan hasil yang mendekati kondisi aktual, karena idealnya nilai dari RMSPE (*Root Mean Square Percentage Error*) dinyatakan dapat

merepresentasikan hasil secara *real time* apabila memenuhi $<25\%$ yang artinya nilai rata-rata observasi dianggap dapat diterima jika $<25\%$ dan jika berada di bawah 10% dari nilai rata-rata maka termasuk dalam kategori yang baik (Reed dkk., 2015). Dan menurut Moriasi dkk. (2007), nilai RMSPE yang baik yakni berada di bawah 30%.

Selain itu menurut Paramita dkk. (2020), berdasarkan hasil perhitungan RMSPE yang telah dilakukan, terlihat bahwa terdapat variasi nilai error yang cukup signifikan diantara setiap lokasi pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat akurasi model dalam merepresentasikan konsentrasi $PM_{2.5}$ di masing-masing titik belum konsisten. Ketika nilai RMSPE melebihi ambang batas 10%, hal tersebut menandakan bahwa tingkat validitas model terhadap data pengukuran aktual tergolong rendah. Dengan kata lain, model belum mampu secara optimal merepresentasikan kondisi asli di lapangan, sehingga model sebagai alat prediksi masih perlu dievaluasi lebih lanjut.

Nilai RMSPE yang diperoleh sekitar 98,626%, bisa disebabkan karena pemodelan menggunakan AERMOD dalam penelitian kali ini hanya berfokus pada emisi kendaraan bermotor, khususnya untuk parameter $PM_{2.5}$. Sementara itu, hasil pengukuran konsentrasi di lapangan merefleksikan kondisi udara ambien yang lebih kompleks, dimana polutan tidak hanya berasal dari kendaraan bermotor, melainkan juga bisa berasal dari berbagai sumber lain seperti industri, pembakaran domestik, aktivitas konstruksi, serta faktor meteorologi yang berubah-ubah. Perbedaan lingkup antara model yang terbatas pada satu sektor dengan kondisi nyata di lapangan inilah yang dapat berkontribusi terhadap nilai RMSPE yang cukup tinggi. Dengan demikian, tingginya nilai RMSPE lebih menunjukkan keterbatasan model dalam menangkap keseluruhan sumber pencemar udara.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Pemodelan Kualitas Udara Ambien Parameter *Particulate Matter 2,5* ($PM_{2,5}$) Menggunakan *Software* AERMOD di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Beban emisi total yang dihasilkan dari sektor transportasi atau *line area* di Kota Yogyakarta dan sekitarnya, berdasarkan seluruh jalan yang masuk ke dalam ruang lingkup yakni Jalan Ipda Tut Harsono sebesar 1134,91 gr/jam, Jalan Urip Sumoharjo sebesar 1170,91 gr/jam, Jalan Laksda Adisucipto sebesar 7285,15 gr/jam, Jalan Timoho sebesar 1750,19 gr/jam, Jalan Jendral Sudirman sebesar 1507,79 gr/jam, Jalan Kusumanegara sebesar 4215,72 gr/jam, Jalan Sultan Agung sebesar 1856,22 gr/jam, Jalan Suryopranoto sebesar 246,02 gr/jam, Jalan Dr. Sutomo sebesar 1176,92 gr/jam, Jalan Dr. Wahidin Sudirohusodo sebesar 1845,02 gr/jam dan Jalan Panembahan Senopati sebesar 1219,46 gr/jam. Dengan hasil beban emisi tertinggi terdapat di Jalan Laksda Adisucipto sebesar 7285,15 gr/jam sedangkan yang terendah di Jalan Suryopranoto sebesar 246,02 gr/jam. Hasil beban emisi ini berasal dari volume kendaraan, jarak yang dilalui kendaraan serta bahan bakar kendaraan yang melintas pada ruas jalan yang diamati.
2. Konsentrasi $PM_{2,5}$ yang berasal dari aktivitas transportasi diukur secara langsung menggunakan alat *High Volume Air Sampler* (HVAS) di beberapa titik pengambilan sampel. Nilai konsentrasi yang diperoleh mencerminkan kondisi aktual kualitas udara ambien di Kota Yogyakarta dan Sekitarnya. Adapun hasil rerata konsentrasi di masing-masing lokasi sampling yakni Jalan Jendral Sudirman sebesar 41,525 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, Jalan Ipda Tut Harsono sebesar 38,948 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ serta Jalan Laksda Adisucipto sebesar 53,365 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Hasil keseluruhan nilai konsentrasi $PM_{2,5}$ yang diuji secara langsung masih termasuk ke dalam kategori aman dikarenakan tidak melebihi baku mutu yang berlaku yakni sebesar 55 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

3. Pola sebaran konsentrasi $PM_{2,5}$ yang dianalisis melalui pemodelan menggunakan perangkat lunak AERMOD menunjukkan hasil konsentrasi tertinggi $PM_{2,5}$ berada di Laksda Adisucipto yang ditandai dengan warna merah yang merepresentasikan konsentrasi $PM_{2,5}$ tertinggi sebesar $113,551 \mu g/m^3$. Jangkauan penyebaran polutan ini dipengaruhi oleh kondisi meteorologi, terutama arah angin dan kecepatan angin, yang menyebabkan distribusi polutan tersebar dominan yang cenderung meluas utara dengan konsentrasi tertinggi terdistribusi ke area yang lebih jauh dari titik emisi awal.
4. Tingkat akurasi hasil pemodelan dibandingkan dengan data pengukuran menunjukkan adanya perbedaan, diantaranya di Jalan Jendral Sudirman konsentrasi $PM_{2,5}$ model sebesar $91,761 \mu g/m^3$ dan konsentrasi $PM_{2,5}$ sampling sebesar $41,525 \mu g/m^3$ dengan RMSPE yang didapat sebesar 120,978%. Jalan Ipda Tut Harsono konsentrasi $PM_{2,5}$ model sebesar $22,305 \mu g/m^3$ dan konsentrasi $PM_{2,5}$ sampling sebesar $38,948 \mu g/m^3$ dengan RMSPE yang didapat sebesar 42,731%. Jalan Laksda Adisucipto konsentrasi $PM_{2,5}$ model sebesar $113,551 \mu g/m^3$ dan konsentrasi $PM_{2,5}$ sampling sebesar $53,365 \mu g/m^3$ dengan RMSPE yang didapat sebesar 112,782%. Hasil uji validasi menggunakan metode RMSPE rerata yang didapat yakni sebesar 98,626%. Hasil RMSPE ini memiliki nilai error yang cukup signifikan diantara setiap lokasi pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat akurasi model dalam merepresentasikan konsentrasi $PM_{2,5}$ di masing-masing titik belum konsisten. Model belum mampu secara optimal merepresentasikan kondisi asli di lapangan.

5.2 Saran

1. Menggunakan data volume lalu lintas yang lebih mendetail dan terperinci berdasarkan jenis kendaraan di jam-jam tertentu (*rush hour*) misalnya dengan meminta data kepada pihak yang berwenang seperti Dinas Perhubungan, agar beban emisi yang dihitung menjadi lebih akurat dan representatif.
2. Menambahkan jumlah lokasi pengambilan sampling agar hasil yang didapat lebih representatif dan lebih akurat.

3. Melakukan analisis lebih mendalam terhadap elemen-elemen pendukung dalam input pemodelan, seperti jenis penggunaan lahan, keberadaan ruang terbuka hijau, serta kondisi vegetasi di sekitar area studi.
4. Menggunakan *software* model selain AERMOD untuk mengetahui perbandingan hasil model jika menggunakan model yang berbeda.
5. Menyelesaikan perizinan terkait dengan lokasi sampling sebelum melakukan sampling, agar sampling tidak terkendala izin dan dapat dilakukan pada hari yang berturut-turut.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiningrum, A. B., Lestari, P., & Dewi, K. M. (2023). Inventarisasi Emisi CO, NO_x, SO_x, PM₁₀ dan PM_{2,5} untuk Sektor Transportasi, Industri, Pembangkit, Residensial, Agrikultur, dan Limbah Padat di DKI Jakarta. Institut Teknologi Bandung.
- Andrian, B., & Marpaung, V. J. (2019). Studi Perencanaan Kendaraan Listrik E Bsw Yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Inosains*, 14(2), 44-49.
- Anjarsari, I. (2019). Evaluasi Kualitas Udara Karbon Monoksida (CO) Akibat Lalu Lintas Kendaraan Bermotor di Kampus I UIN Sunan Ampel Surabaya. Tugas Akhir, Program Studi Teknik Lingkungan, UIN Sunan Ampel Surabaya.
- Anggraini, F. J., Shalsabila, A., & Rodhiyah, Z. (2023). Sebaran Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, PM_{0,1}) di SMP Negeri 1 Kota Jambi Menggunakan Model CFD (Computational Fluid Dynamics). *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, Vol. 2 No. 4 (Agustus 2023) 690-702 .
- Badan Pusat Statistik Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. (2025). Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta Dalam Angka 2025 [Publikasi tahunan]. Badan Pusat Statistik Provinsi D.I. Yogyakarta.
- Block, M. L., & Calderón-Garcidueñas, L. (2009). Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease. *Trends in Neurosciences*, 32(9), 506–516.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., & Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378.
- Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R.J., Wilson, R.B., Lee, R.F., Peters, W.D. and Brode, R.W. (2004). AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization. *Journal of applied meteorology*, 44(5), pp.682-693.

- Dominici, F., Peng, R. D., Bell, M. L., et al. (2006). Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA*, 295(10), 1127–1134.
- Eka Suryana, I. P. (2022). Analisis Windrose untuk Prediksi Arah & Jangkauan Pencemaran Udara . *Jurnal Sistem Informasi dan Komputer Terapan Indonesia (JSIKTI)*, Vol.4, No.3, March 2022, pp. 132~141 .
- Fauzan, F.D., Rayhan, D.A., Putri, H.M. and Kartiasih, F. (2024). Peramalan Konsentrasi PM_{2.5} Menggunakan Model ARCH/GARCH dan Long Short-Term Memory (Studi Kasus: Kota Jakarta Pusat). *Infomatek*, 26(1), pp.27-44.
- Goletic, S., & N, I. (2013). Modeling The Dispersion of SO₂ in Zenica Valley. *Annals Of Faculty Engineering Hunedoara*, 47-52.
- Gusnita, D. and Cholianawati, N. (2019). Pola konsentrasi dan trayektori polutan PM_{2.5} serta faktor meteo di kota Jakarta. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 4(3), pp.152-163.
- Hallquist, M., Wenger, J., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., . . . Wildt, J. (2009). The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. 155–5236.
- Hasbiah, A., Rahman, B., & Cahyani, D. (2016). Udara bersih dan kualitas hidup: Kajian pencemaran polutan udara di perkotaan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 12(2), 45–53.
- He, R., Han, T., Bachman, D., Carluccio, D. J., Jaeger, R., Zhang, J., Thirumurugesan, S., Andrews, C., dan Mainelis, G. (2020). Evaluation of two low-cost PM monitors under different laboratory and indoor conditions. *Aerosol science and technology*, 55(3), 316- 331.
- Huang, R.-J., Zhang, Y., Bozzetti, C., Ho, K.-F., Cao, J.-J., Han, Y., . . . H. Prévôt, A. (2014). High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature* 514, 218–222 .
- IAEA. (1992). Sampling and Analytical Methodologies for Instrumental Neutron Activation Analysis of Airborne Particulate Matter. Training Course Series Vienna: International Atomic Energy Agency.

- Iriani, L., & Pribadi, A. (2023). Analisis Sebaran Konsentrasi PM_{2,5} Menggunakan Model AERMOD di Jalur Protokol Kota Bogor. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan* EISSN:2549-1407, Vol. 08 No. 03.
- IQAir. (2024). Air quality in Indonesia – 2023 average, country ranking. IQAir.com.
- Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality, 43(1), 51-63.
- Janssen, N. A. H., Hoek, G., Simic-Lawson, M., Fischer, P., van Bree, L., ten Brink, H., ... & Brunekreef, B. (2011). Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM₁₀ and PM_{2.5}. *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1691–1699.
- Kheirbek, I., Haney, J., Douglas, S., Ito, K., & Matte, T. (2016). The contribution of motor vehicle emissions to ambient fine particulate matter public health impacts in New York City: a health burden assessment. *Environmental Health*, 15(1), 89.
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136–143.
- Kopplitz, S. N., Mickley, L. J., Marlier, M. E., Buonocore, J. J., Kim, P. S., Liu, T., Sulprizio, M. P., DeFries, R. S., Jacob, D. J., Schwartz, Js. (2016). Public health impacts of the severe haze in Equatorial Asia in September–October 2015: demonstration of a new framework for informing fire management strategies to reduce downwind smoke exposure, 11(9), 094023.
- Korhonen, H., Carslaw, K. S., Spracklen, D. V., Mann, G. W., Woodhouse. (2008). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D9).
- Larson, T., Gould, T., Riley, E.A., Austin, E., Fintzi, J., Sheppard, L., Yost, M. and Simpson, C. (2017). Ambient air quality measurements from a continuously moving mobile platform: Estimation of area-wide, fuel-based, mobile source emission factors using absolute principal component scores. *Atmospheric Environment*, 152, pp.201-211..
- Liu, Q., Guo, C., Wang, J., Jing, L., Ma, R., Gai, L., Cao, L., Duan, J., Zhou, X., Li, Y., Sun, Z. (2018). *Environmental Pollution*, 233, 705-715.

- Long, C. M., Nascarella, M. A., & Valberg, P. A. (2016). Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions. *Environmental Pollution*, 181, 271–286.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, Vol. 50(3): 885–900 .
- Natsir, T. A., Pambarep, Y. W., Susetyaningsih, R., Setyanto, K., & Triastianti, R. D. (2017). Penggunaan Aermod Untuk Kajian Simulasi Dampak Pencemaran Karbon Monoksida di Kota Yogyakarta Akibat Emisi Kendaraan Bermotor . *Jurnal Manusia & Lingkungan*, 24(1):11-16.
- Mulyani, T., & Ainingsih, S. N. (2024). Analisa Pemantauan Kualitas Udara Ambien (PM_{2,5}, PM₁₀ dan TSP) di PT Sucofindo Kota Bandung. *Jurnal Lingkungan dan Sumberdaya Alam (JURNALIS)*, Volume 7 Nomor 2, Oktober 2024: 100-108.
- Oberdörster, G., et al. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823–839.
- Paramita, A., Nugroho, B., & Sari, D. (2020). Analisis akurasi model dispersi dengan pendekatan RMSPE pada konsentrasi PM_{2,5}. *Jurnal Kualitas Udara dan Lingkungan*, 12(3), 145–156.
- Pemerintah Kota Yogyakarta. (2018). Keputusan Walikota Yogyakarta Nomor 71 Tahun 2018 tentang Penetapan Ruas-Ruas Jalan Kota Yogyakarta. Yogyakarta: Pemerintah Kota Yogyakarta.
- Perdana, A. R., Pangastuti, A. I., & Haryanto, Y. D. (2023). Analisis Konsentrasi PM₁₀ dan PM_{2,5} Pada Titik Pemantauan Bundaran Hi Jakarta Pusat Periode Data Februari-Oktober 2021 . *Jurnal Kajian Ilmu dan Pendidikan Geografi* , Vol.06 No.1.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Lampiran VII.
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742.
- Qonita, I. R., Santikayasa, I. P., & Turyanti, A. (2025). Analisis Pengaruh Faktor Meteorologi terhadap Fluktuasi Konsentrasi PM_{2,5} di Kota Pontianak. *POSITRON*, Vol. 15, No. 1 (2025), Hal. 24 - 33.
- Rahman, Abdur. (2007). Bahan Ajar Pelatihan Analisis Risiko Kesehatan (Program Intensif Tingkat Dasar). Depok: FK UI.
- Rood, A. S. (2014). Performance Evaluation of AERMOD, CALPUFF, and Legacy Air Dispersion Models Using the Winter Validation Tracer Study Dataset. *Atmos. Environ.*, 89:707-720
- Sayad, T., Moursy, F. I., M. El-Tantawi, A., Saad, M., & Morsy, M. (2022). Assessment the impact of different fuels used in cement industry on pollutant emissions and ambient air quality: a case study in Egypt. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 4.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Serlina, Y., Bachtiar, V. S., & Putra, I. (2023). Analisis Konsentrasi Particulate Matter 2,5 di Udara Ambien dan Rekomendasi Tanaman Pereduksi PM_{2,5} di Perumahan Unand Blok B, Ulu Gadut, Kota Padang. *Jurnal Serambi Engineering*, Volume VIII, No.4, Oktober 2023 Hal 7516 - 7524.
- Srivastava, D., Faber, P., & Robinson, A. L. (2022). Sources of organic aerosol in the atmosphere: Evidence for secondary formation and implications for air quality and climate. *Nature Communications*, 13, 1345.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2005). No.19-7119.6-2005. Bagian 6 Penentuan Lokasi pengambilan contoh uji pemantauan kualitas udara ambien

- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2016). No.7119.14-2016. Bagian 14 Cara uji partikel ukuran $\leq 2,5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) menggunakan peralatan High Volume Air Sampler (HVAS) dengan metode gravimetri
- Stockie, J. M. (2011). The mathematics of atmospheric dispersion modeling. *SIAM Review*, 53(2), 349–372.
- Tarigan, H., Dharma, S., Hasan, W. (2014). Analisis Kadar Nitrogen Dioksida Dan Particulate Matter 10 (PM_{10}) Udara Ambien Dan Keluhan Kesehatan Pada Pedagang Kaki Lima Di Sepanjang Jalan Raya Kelurahan Lalang Kecamatan Medan Sunggal Tahun 2014. Universitas Sumatra Utara, Medan.
- Thé, J., & Hilverda, M. (2003). Provision Of Services To Develop Guidance For Air Dispersion Modelling. United States: Ontario Ministry of the Environment.
- Turner, D. B. (1994). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling* (2nd ed.). CRC Press.
- U.S. EPA. (2009). Health and Environmental Effect of Particulate Matter. Diakses dari: <https://www.epa.gov/> [pada 29 Januari 2025]
- U.S. EPA. (2018). User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD). U.S. Environmental Protection Agency, RTP, NC EPA-454/B-18-001.
- Vallero, D. A. (2014). Fundamentals of air pollution. Edisi ke 4. Academic press: London.
- Wedding, J.B., McFarland, A.R. and Cermak, J.E. (1977). Large particle collection characteristics of ambient aerosol samplers. *Environmental Science & Technology*, 11(4), pp.387-390.
- World Health Organization (WHO). (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: WHO.
- Zhang, J., Su, Y., Chen, C., Guo, W., Tan, Q., Feng, M., . . . Wang, G. (2024). Chemical composition, sources and formation mechanism of urban $\text{PM}_{2.5}$ in Southwest China: a case study at the beginning of 2023. *Athmospheric Chemistry and Physics*, 24, 2803–2820.

- Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M.L., Ying, Q., Lin, Y., Wang, W., Hu, M. and Wang, Y. (2015). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical reviews*, 115(10), pp.3803-3855.
- Zhao, Y., Nguyen, N. T., Presto, A. A., Hennigan, C. J., May, A. A., & Robinson, A. L. (2017). Intermediate-volatility organic compounds from gasoline vehicles: Chemical characterization and estimation of secondary organic aerosol production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(27), 7449–7454.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Contoh Perhitungan Inventarisasi Emisi

A. Jumlah Kendaraan

Contoh Perhitungan Kendaraan Jalan Jendral Sudirman

$$\text{-Motor} = \frac{(3127+2528+3826)}{3} = 3160$$

$$\text{-Mobil bensin} = 220$$

$$\text{-Mobil solar} = 125$$

$$\text{-Bis} = 10$$

$$\text{-Truk} = 3$$

Total Kendaraan di Jalan Jendral Sudirman

$$= 3160+220+125+10+3$$

$$= 3518 \text{ Unit}$$

B. Inventarisasi Emisi Kendaraan

Contoh Perhitungan Inventarisasi Emisi Jalan Jendral Sudirman

$$\text{- Panjang Jalan} = 1342,3 \text{ m}$$

$$\text{- Lebar jalan} = 22,5 \text{ m}$$

$$\text{- Luas Jalan} = 1,342 \text{ km}$$

$$\text{- Volume Kendaraan Motor} = 3160 \text{ unit}$$

$$\text{- VKT}_{\text{jline}} = \text{Volume Kendaraan Motor} \times \text{Luas Jalan}$$

$$= 3160 \text{ unit} \times 1,342 \text{ km}$$

$$= 4242,12 \text{ km/jam}$$

$$\text{- EF PM}_{2,5} \text{ motor} = 0,35 \text{ gr/km}$$

$$E_{\text{cji}} = \text{VKT}_{\text{jline}} \times \text{EF}_{\text{cj}}$$

$$= 4242,12 \text{ km/jam} \times 0,35 \text{ gr/km}$$

$$= 1484,74 \text{ gr/jam}$$

Lampiran 2 Contoh Perhitungan Konsentrasi Sampling PM_{2,5}

Contoh perhitungan Jalan Jendral Sudirman

$$\text{- Koreksi Laju Alir Jam 08.00}$$

Diketahui:

$$Q_0 = 1,2 \text{ m}^3/\text{menit}$$

$$T_s = 298 \text{ K}$$

$$P_0 = 746,7 \text{ mmHg}$$

$$T_0 = (273+31,3)$$

$$P_s = 760 \text{ mmHg}$$

$$Q_s = Q_0 \times \left[\frac{T_s \times P_0}{T_0 \times P_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1,2 \times \left[\frac{298 \times 746,7}{(273+31,3) \times 760} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1,17 \text{ Nm}^3/\text{menit}$$

- Volume Udara yang diambil Jam 08.00

$$V_{\text{std}} = \text{Koreksi Laju alir} \times t$$

$$= 1,17 \text{ Nm}^3/\text{menit} \times 1440 \text{ menit}$$

$$= 1694,99 \text{ Nm}^3$$

- Konsentrasi PM_{2,5} di jam 08.00

Kertas Saring

$$W_1 = 3,52048 \text{ gr}$$

$$W_2 = 5,5915 \text{ gr}$$

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

$$C = \frac{(5,5915 - 3,52048) \times 10^6}{1694,99}$$

$$C = 41,899 \text{ } \mu\text{g}/\text{Nm}^3$$

- Konsentrasi Rerata di Jalan Jendral Sudirman = 41,525 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

Lampiran 3 Contoh Perhitungan RMSPE

Contoh perhitungan Jalan Jendral Sudirman

- Konsentrasi hasil model (St) = 91,761 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

- Konsentrasi hasil sampling (At) = 41,525 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \left(\frac{St - At}{At} \right)^2} \times 100\%$$

$$\text{RMSPE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \sum_{n=1}^n \left(\frac{91,761 - 41,525}{41,525} \right)^2}}{\sqrt{3}} \times 100\%$$

$$\text{RMSPE} = 69,847\%$$

- Rerata RMSPE 3 lokasi = 98,626%

Lampiran 4 Data Inventarisasi Emisi

No	Jalan	panjang	lebar	A (luas jalan)	L	Q					VKTgaris (km/jam)				
		(m)	(m)	(m ²)	(km)	motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk	motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk
				(A = p x l)	L=A/1000)	kendaraan/jam					jumlah kendaraan*L				
1	Jl Ipda Tut H.	1052,2	7,4	7786,28	1,0522	3027	645	57	8	7	3185,01	679,02	59,62	8,42	7,01
2	Jl Urip Sumoharjo	940,2	11,5	10812,3	0,9402	3466	968	135	16	7	3258,42	909,80	127,24	14,73	6,27
3	Jl Laksda Adisucipto	2500	15	37500	2,5	8178	1489	229	21	15	20444,17	3721,67	573,33	52,50	36,67
4	Jl Timoho	802,1	7,4	5935,54	0,8021	6105	1108	143	30	17	4897,09	888,46	114,97	23,80	13,64
5	Jl Jendral Sudirman	1342,3	22,5	30201,75	1,3423	3160	220	125	10	3	4242,12	294,86	168,23	12,98	4,03
6	Jl Kusumanegara	2413,3	10,2	24615,66	2,4133	4851	1091	132	35	23	11707,72	2633,71	319,36	85,27	54,70
7	Jl Sultan Agung	1033,8	12	12405,6	1,0338	4993	950	148	31	26	5162,11	982,45	152,66	32,39	27,22
8	Jl Suryapranoto	513	8	4104	0,513	1293	187	113	22	17	663,31	95,76	57,80	11,29	8,89
9	Jl Dr. Sutomo	801,3	7	5609,1	0,8013	4084	1241	170	17	7	3272,78	994,68	136,49	13,36	5,61
10	Jl Dr Wahidin S.	794,1	9	7146,9	0,7941	6470	1166	293	30	22	5138,09	925,92	232,41	24,09	17,47
11	Jl Panembahan S	700,9	15	10513,5	0,7009	4841	947	133	40	15	3393,29	663,52	93,22	27,80	10,28

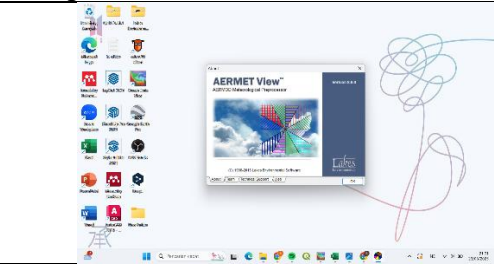
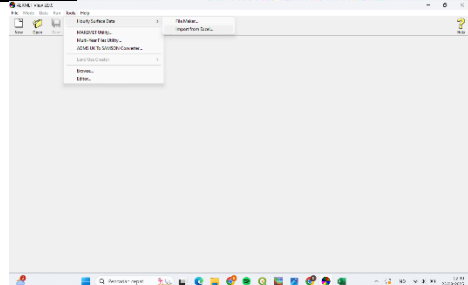
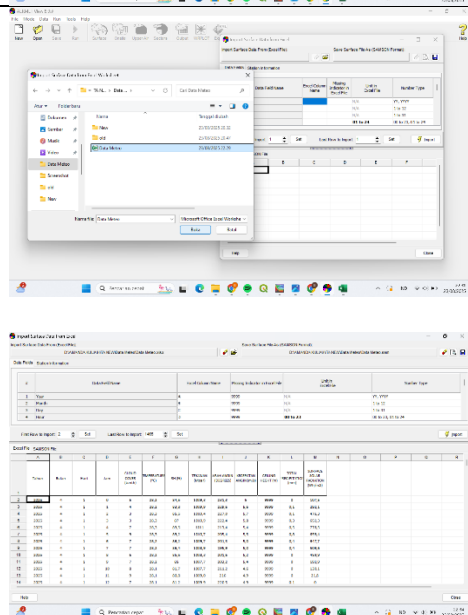
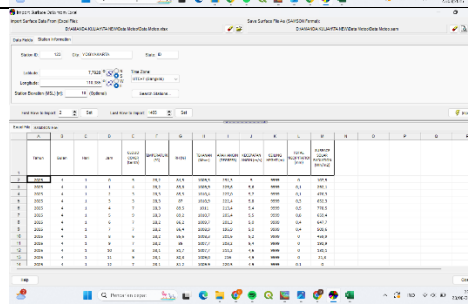
No	Nama Jalan	EF PM2,5					Beban Emisi Garis					Emisi Garis Total	Emisi Garis Total	Emisi Garis Total
		motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk	motor	mobil bensin	mobil solar	bis	truk	gr/jam	gr/s	gr/s/m2
		g/km					gr/jam							
1.	Jl. Ipda Tut Harsono	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1114,75	9,51	4,17	3,54	2,95	1134,91	0,315	0,00004
2.	Jl. Urip Sumoharjo	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1140,45	12,74	8,91	6,19	2,63	1170,91	0,325	0,00003
3.	Jl. Laksda Adisucipto	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	7155,46	52,10	40,13	22,05	15,40	7285,15	2,024	0,00005
4.	Jl. Timoho	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1713,98	12,44	8,05	9,99	5,73	1750,19	0,486	0,00008
5.	Jl Jendral Sudirman	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1484,74	4,13	11,78	5,45	1,69	1507,79	0,419	0,00001
6.	Jl.Kusumanegara	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	4097,70	36,87	22,36	35,81	22,97	4215,72	1,171	0,00005
7.	Jl. Sultan Agung	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1806,74	13,75	10,69	13,60	11,43	1856,22	0,516	0,00004
8.	Jl. Suryopranoto	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	232,16	1,34	4,05	4,74	3,73	246,02	0,068	0,00002
9.	Jl. Dr. Sutomo	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1145,47	13,93	9,55	5,61	2,36	1176,92	0,327	0,00006
10.	Jl. Dr. Wahidin Sudirohusodo	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1798,33	12,96	16,27	10,12	7,34	1845,02	0,513	0,00007
11.	Jl. Panembahan Senapati	0,35	0,014	0,07	0,42	0,42	1187,65	9,29	6,53	11,68	4,32	1219,46	0,339	0,00003

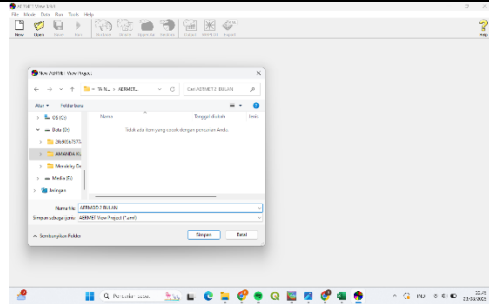
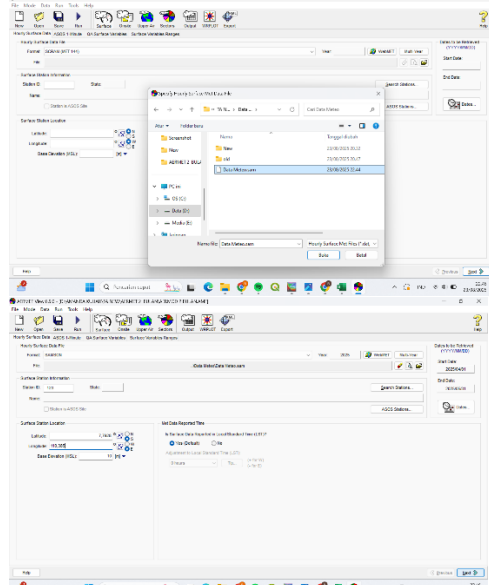
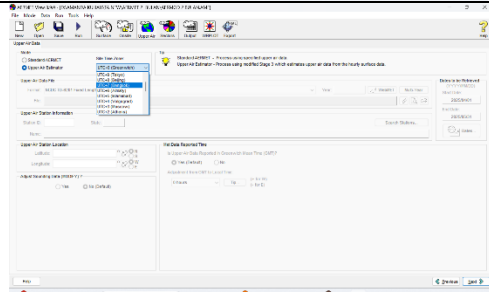
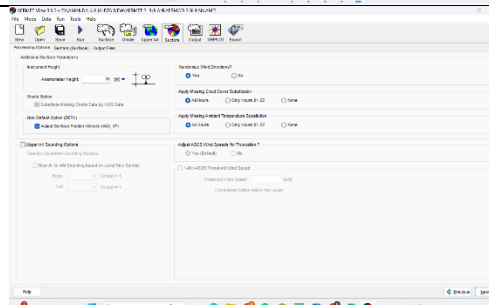
Lampiran 5 Data Meteorologi Saat Sampling

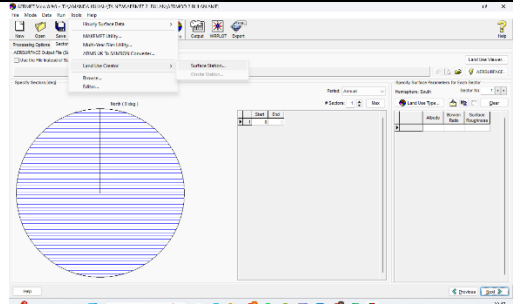
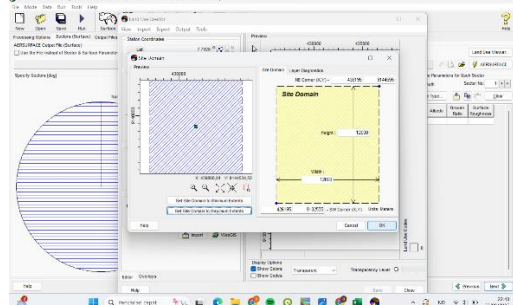
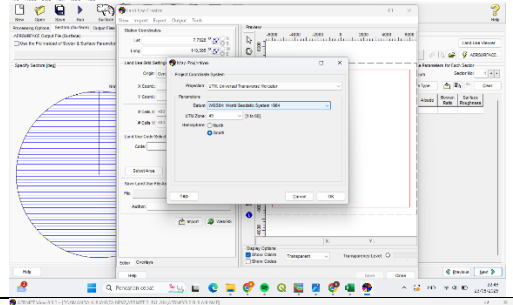
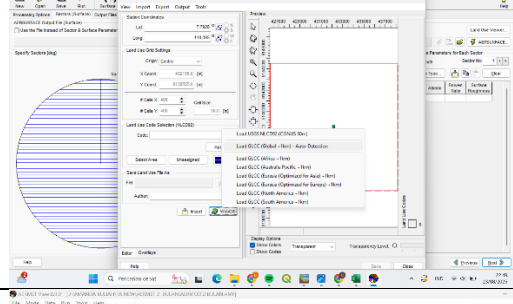
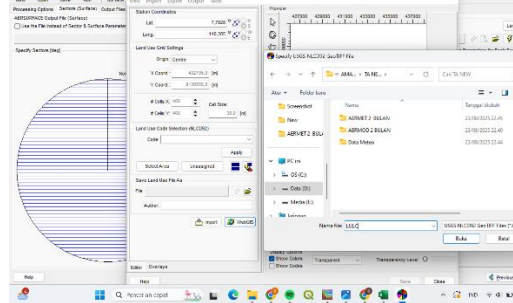
No	Jam	Jalan Jendral Sudirman				Jalan Ipda Tut Harsono				Jalan Laksda Adisucipto			
		Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)
1	08.00	31,3	1,2	64,8	746,7	28,9	1,2	72,5	747,6	29,7	1,1	73,5	746
2	09.00	31,1	2,2	62,3	746,7	29,2	2	71,5	747,5	30,7	1,3	73,9	745,9
3	10.00	32,1	1,8	60,7	755,311	31,2	1,2	67,1	747,5	34	1,1	63,4	745,7
4	11.00	33,5	1,8	58,8	746,7	30	1,9	67,2	746,8	34	2,1	62,5	745
5	12.00	32	2,7	55	758,29	31	2,8	65,7	746	34	2,2	59	743
6	13.00	32,9	1,2	51	756,812	30	1,5	66,2	745,7	33,3	1,6	67	743,3
7	14.00	32,6	1,8	57	756,062	31	2,2	66,4	745,4	29	1,5	80	743
8	15.00	32,7	1,7	60,1	756,062	31,3	1,3	65,4	745,1	29,7	1	72	743,5
9	16.00	32,1	1,9	56,9	755,311	30,3	1,5	68,5	745,5	29,8	1,8	75,9	743,8
10	17.00	31	0,9	58,1	756,812	30,1	1,1	70,2	746	29	1,3	71	744
11	18.00	29	1,7	56,9	756,812	29,5	1,5	71,7	746,1	28,6	2,8	73,3	744,6
12	19.00	29	0,7	63,4	756,062	29,5	0	73,2	746,8	28,4	0,7	74,1	743,2
13	20.00	29,8	0,7	64,8	756,812	28,5	0	80,1	747	28,3	0,9	73,4	743,6
14	21.00	28	1,3	71,1	757,562	28,8	0	77,5	747,2	28,2	1,4	77,7	745,5
15	22.00	28,8	0	73,2	757,562	28,9	0	76,1	747,1	27,6	1,7	81,5	745,3
16	23.00	28,9	0	65,7	757,562	28,3	0	77,3	747	28	1,3	80,8	745,1
17	00.00	28,9	0	67,9	758,29	28	0	76,2	746	28,2	1,4	81,7	744,5
18	01.00	28,3	0	67,5	757,562	28,2	0	77,1	746,2	27,8	0	83,6	744,1
19	02.00	27,9	0	70,9	758,29	28,5	0	76,3	747	27	1,1	87,6	743,5
20	03.00	24	0	73,5	756,812	27	0	74,3	745	27	1,2	87	743,5

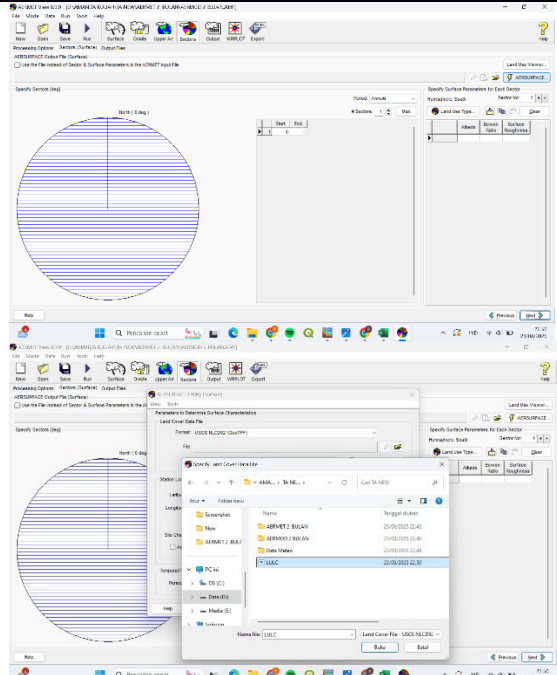
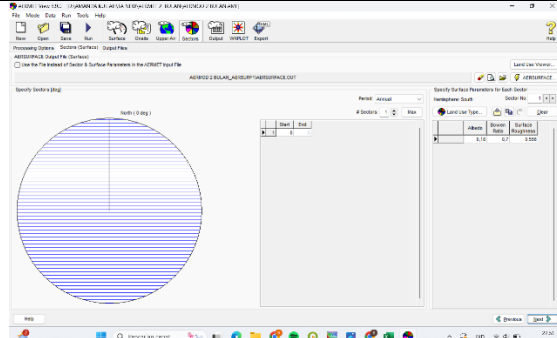
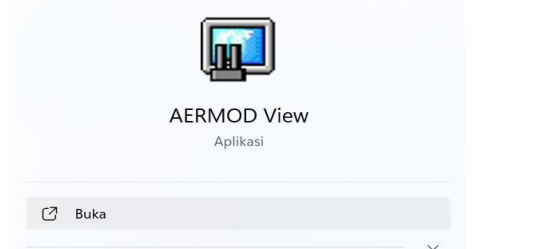
No	Jam	Jalan Jendral Sudirman				Jalan Ipda Tut Harsono				Jalan Laksda Adisucipto			
		Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)	Suhu (°C)	Kecepatan Angin (m/s)	Kelembaban (%RH)	Tekanan Udara (mmHg)
21	04.00	24	0	74,1	758,29	27	0	74,5	745,3	27,6	1,4	84,1	743,3
22	05.00	25,2	0	74,6	756,812	26,9	0	74,9	747,7	27,2	0	85	743,4
23	06.00	26	0	76,3	757,562	26,7	0	76,4	746	27,7	1,7	82,1	743,5
24	07.00	28,2	1,3	75,6	755,311	28,3	1,7	74,8	746,5	28,7	1,7	77,8	744,4
Rerata		29,5	1,0	65,0	755,7	29,0	0,8	72,5	746,4	29,3	1,3	76,2	744,2

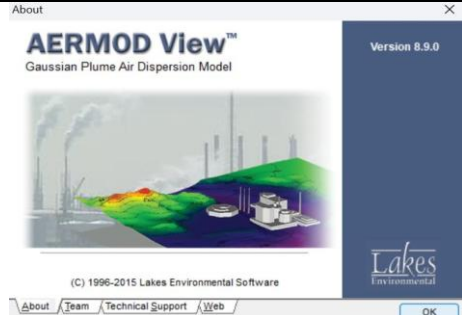
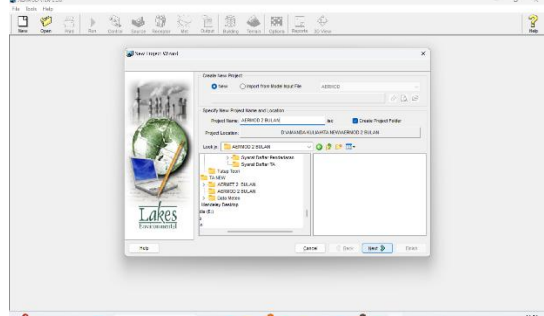
Lampiran 6 Tahapan Detail Pemodelan AERMOD

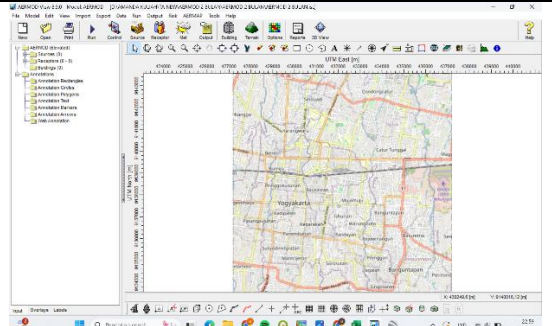
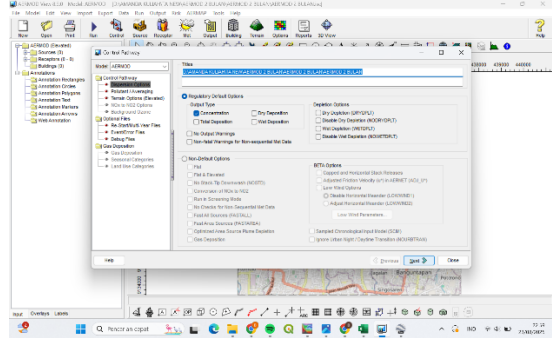
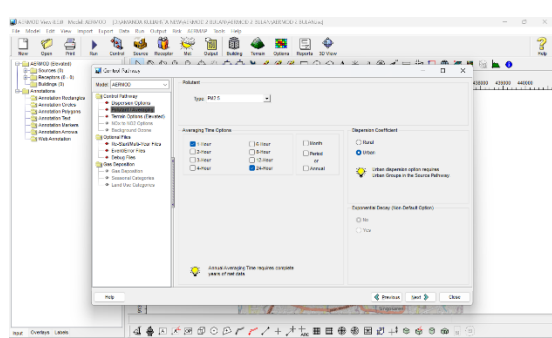
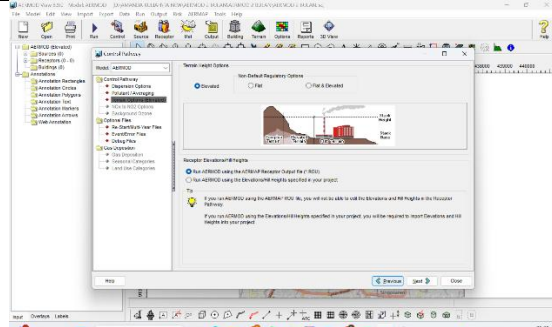
No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
1.	Siapkan data meteorologi, kemudian Buka apk AERMET	AERMET	
2.	Klik tools, pilih hourly surface data, lalu import excel.	AERMET	
3.	Kemudian pilih specify file untuk memasukkan file data meteorologi dari excel yang sudah disiapkan. Lalu isi excel column name sesuai dengan excel file.	AERMET	
4.	Klik station information, kemudian isi stadion ID, city, state, latitude longitude, time zone, serta station elevation (MSL). Kemudian import hingga ada file Samson format.	AERMET	

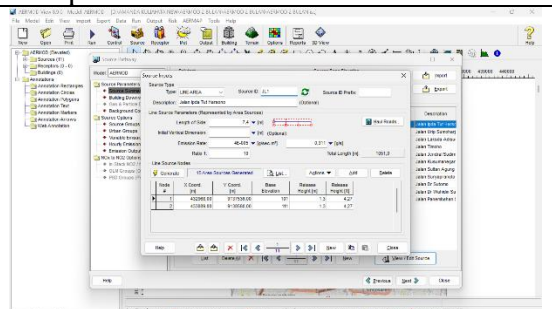
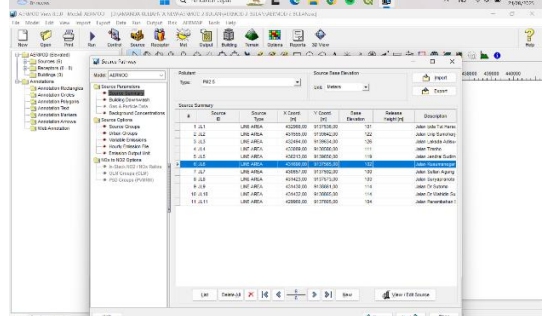
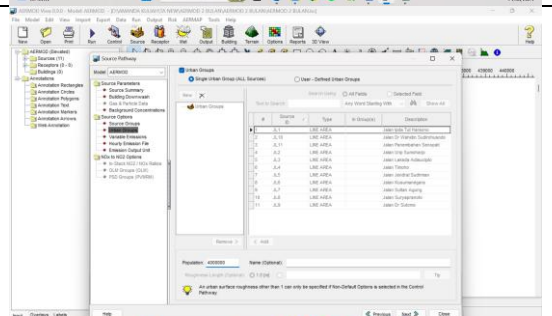
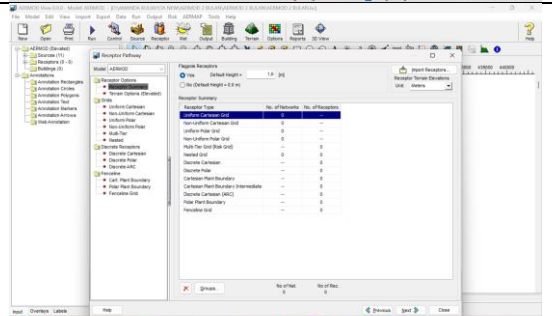
No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
5.	Klik new, pilih lokasi untuk menyimpan semua data AERMET	AERMET	
6.	Buka file .sam yang telah dibuat dan make sure semua data sudah terbaca	AERMET	
7.	Next, hingga upper air data. Pilih mode upper air estimator lalu ganti site time zone menjadi UTC+7(Bangkok).	AERMET	
8.	Next untuk processing option, untuk anemometer height ganti menggunakan 10 m(umum digunakan). Lalu untuk low wind option, diceklist adjust surface friction velocity	AERMET	

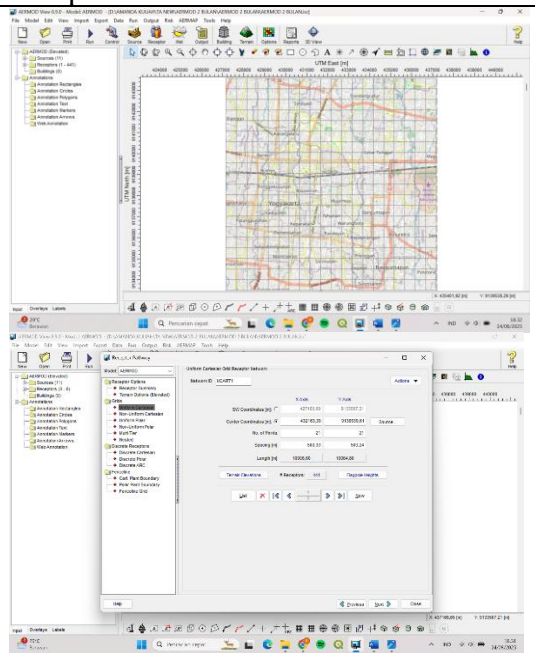
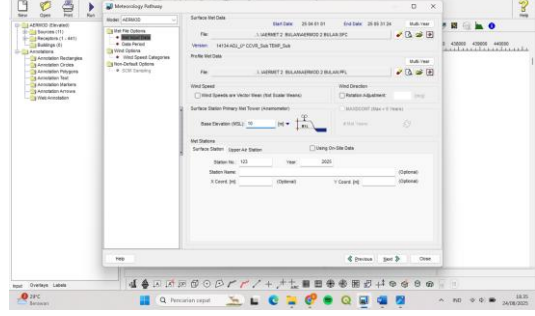
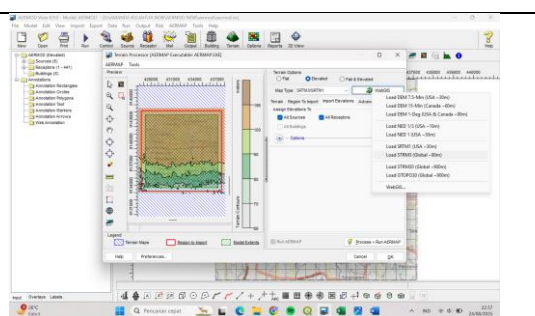
No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
9.	Next, balik lagi ke tools, klik land use creator, surface station.	AERMET	
10.	Kemudian klik view, site domain, set site domain to max, ok	AERMET	
11.	Kemudian klik view, map projection, ganti projection menggunakan UTM, dan sesuaikan UTM zone untuk wilayah Yogyakarta	AERMET	
12.	Kemudian pilih webgis, pilih GLCC(Global~1km) auto-detection	AERMET	
13.	Klik specify file untuk menyimpan data tutupan lahan, kasi nama LULC. Kemudian open. Lalu save. Close	AERMET	

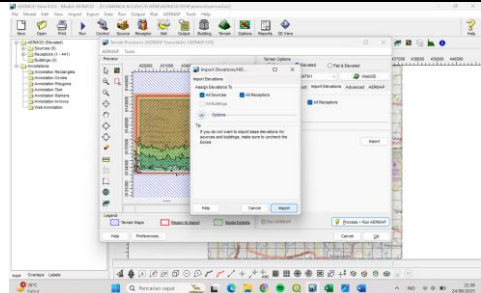
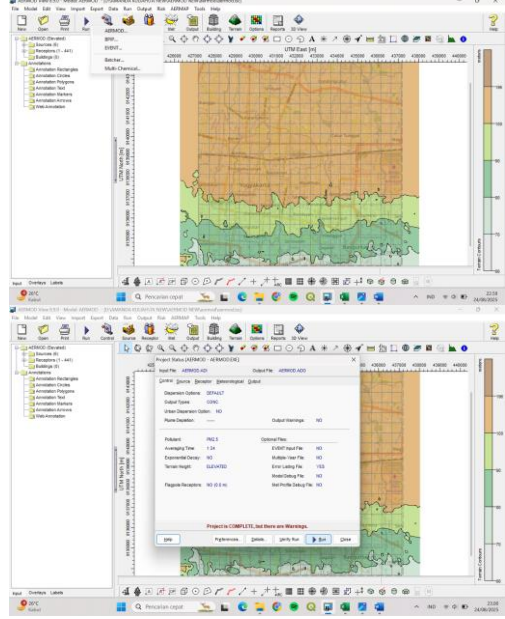
No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
14.	Kemudian klik AERSURFACE, lalu masukkan file LULC yang sudah dibuat, klik process, lalu klik OK. Dan muncul nilai albedo, bowen ratio, dan surface roughness.	AERMET	
15.	Next terus, kemudian run dan data AERMET dapat digunakan	AERMET	
16.	Buka apk AERMOD, kemudial klik OK.	AERMOD	

No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
			
17.	Klik new, dan simpan di satu tempat yang sama dengan file AERMET	AERMOD	
18.	Next, klik projection, ganti projection menggunakan UTM, dan sesuaikan UTM zone untuk wilayah Yogyakarta	AERMOD	
19.	Next, klik lat/long untuk reference point dan isi sesuai dengan lat/long yang digunakan. Untuk modeling area dimension gunakan 5km×5km. Kemudian klik check dan lihat kawasan yang masuk ke dalam 5km×5km. Lalu klik finish	AERMOD	

No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
			
20.	Kemudian klik control, ubah type sesuai dengan parameter yg diuji. Untuk averaging time option pilih 1 jam dan 24 jam, kemudian untuk dispersion coefficient urban	AERMOD	 
21.	Next, terrain height pilih elevated	AERMOD	

No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
22.	Next terus hingga source summary. Kemudian klik new, masukan source input, sesuai dengan data yang telah didapat.	AERMOD	 
23.	Next hingga urban groups, pilih single urban group (all sources). Kemudian masukkan population kota Yogyakarta sesuai dengan BPS	AERMOD	
24.	Next terus hingga receptor options, kemudian untuk flagpole receptor klik yes dan masukkan tinggi rerata manusia di Indonesia	AERMOD	

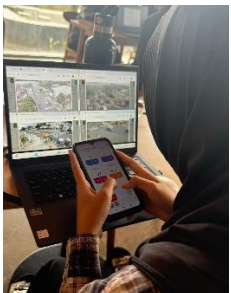
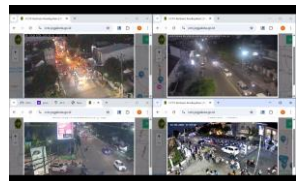
No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
25.	Kemudian pilih Uniform Cartesian Grid (logo kotak banyak) lalu grid, dan ubah ke center coordinates	AERMAP	
26	Kemudian setelah control, source dan receptor sudah diisi. Maka selanjutnya klik Met, masukan data meteo yang sudah didapat di AERMET dengan format file .SFC. Kemudian isi base elevation menjadi 10 m.	AERMAP	
27.	Setelah itu klik terrain, klik webgis dan pilih SRTM3 (Global~90m), klik process+run AERMAP, kemudian klik import	AERMAP	

No.	Tahapan	Bagian	Tampilan
			
28.	Kemudian klik Run dan pilih AERMOD, kemudian pilih Run. Setelah di running, maka peta sebaran konsentrasi PM _{2.5} menggunakan model AERMOD akan terlihat.	AERMOD	

Lampiran 7 Dokumentasi Sampling

No	Lokasi	Dokumentasi		Keterangan
1.	Jalan Jendral Sudirman			Sampling PM _{2.5} di lapangan, 27 April 2025
				
				

No	Lokasi	Dokumentasi		Keterangan
2.	Jalan Ipda Tut Harsono			Sampling PM _{2,5} di lapangan, 01 Mei 2025
				
3.	Jalan Laksda Adisucipto			Sampling PM _{2,5} di lapangan, 06 Mei 2025
				

No	Lokasi	Dokumentasi		Keterangan
4.	Laboratorium			Penimbangan Kertas Saring sebelum sampling dan setelah sampling
5.	Aplikasi counter dan website CCTV Jogja			Proses perhitungan volume kendaraan melalui pantauan CCTV

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Baiq Amanda Msustika Utari atau sering dipanggil Manda. Penulis lahir di Lombok Timur pada tanggal 24 Februari 2003. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak H. Lalu Mukhtar dan Ibu Nurmayati. Penulis mulai menempuh pendidikan taman kanak-kanak di TK Dharma Wanita, Lendang Nangka. Kemudian melanjutkan sekolah dasar di SDN 04 Lendang Nangka. Dilanjut pendidikan menengah pertama di SMPN 02 Masbagik. Serta penulis melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Selong pada tahun 2018 hingga tahun 2021. Kemudian tahun 2021 penulis diterima di prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, jenjang studi Strata Satu (S1).

Selama masa perkuliahan, penulis juga aktif mengikuti kegiatan di kampus. Penulis bergabung menjadi bagian dari organizing commuttee acara “Lintas Lingkungan 2022” sebagai staf Divisi Dekorasi dan Dokumentasi. Selain itu penulis juga ikut serta dalam kegiatan volunteer yang diselenggarakan oleh himpunan mahasiswa Teknik Lingkungan, UII. Selain itu, penulis juga penulis juga melaksanakan kerja praktik sebagai syarat dari akademik, di Rumah Sakit Umum Provinsi Nusa Tenggara Barat yang membahas terkait dengan pengelolaan limbah B3 padat yang ada di RSUP tersebut. Keterlibatan penulis dalam kegiatan selama masa studi telah memberikan penulis kesempatan untuk belajar dan mengembangkan kemampuan, khususnya dalam hal komunikasi, kolaborasi tim, serta kepedulian sosial. Hal ini memberikan kontribusi positif terhadap perjalanan akademik dan pertumbuhan pribadi penulis di lingkungan perguruan tinggi .