

**ANALISIS KONSENTRASI *PARTICULATE MATTER* PADA KAWASAN
MAN 2 KOTA MAKASSAR**

**NIKO SANTO BA'RU
D131201014**



**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**ANALISIS KONSENTRASI *PARTICULATE MATTER* PADA KAWASAN
MAN 2 KOTA MAKASSAR**

NIKO SANTO BA'RU
D131201014

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Teknik Lingkungan

pada

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI
**ANALISIS KONSENTRASI *PARTICULATE MATTER* PADA KAWASAN
MAN 2 KOTA MAKASSAR**

NIKO SANTO BA'RU
D131201014

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada 22 Oktober 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:

Pembimbing tugas akhir,



Ir. Zarah Arwieny Hanami, S.T., M.T.
NIP. 199710272024062002

Mengetahui:

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr.Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., AER.
NIP. 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul “**Analisis Konsentrasi *Particulate Matter* pada Kawasan MAN 2 Kota Makassar**” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Ir. Zarah Arwieny Hanami, S.T., M.T.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 22 Oktober 2024



Niko Santo Ba'ru
NIM D131201014

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yesus Kristus atas kasih karunia, berkat, dan penyertaan-Nya yang telah memberikan kekuatan, kesehatan, dan kebijaksanaan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul "Analisis Konsentrasi *Particulate Matter* pada Kawasan MAN 2 Kota Makassar".

Penelitian dapat terlaksana dan rampung dalam bentuk tugas akhir ini atas bimbingan, masukan dan dukungan dari Ibu Ir. Zarah Arwieny Hanami, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak/Ibu dosen serta karyawan dan staf Departemen Teknik Lingkungan yang telah memberikan banyak pengetahuan kepada penulis selama masa studi.

Kepada teman-teman Lingkungan 2020 dan ENTITAS 2021, penulis mengucapkan rasa terima kasih yang mendalam atas segala pengalaman, kebersamaan, serta dukungan yang telah diberikan selama masa perkuliahan. Setiap momen berharga yang dilalui bersama menjadi bagian yang tak terlupakan dalam perjalanan akademik penulis. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian tugas akhir ini, meskipun tidak dapat disebutkan satu per satu, bantuan kalian sangat berarti bagi kelancaran penelitian ini.

Tugas akhir ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, Ibu Martina Barrang Pabendon dan Bapak Yulius Sattu, yang selalu memberikan cinta, doa, dukungan, dan motivasi yang tiada henti. Penulis sangat berterima kasih atas segala pengorbanan, kasih sayang, dan dorongan yang diberikan hingga penulis bisa mencapai tahap ini. Dan juga, saudara-saudara tercinta (Nela, Nia, Nartika, Nova dan Nelson) yang selalu memberikan semangat, dukungan, serta keceriaan yang tak ternilai. Kehadirannya menjadi penyemangat di setiap langkah yang penulis ambil dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis,
Niko Santo Ba'ru

ABSTRAK

NIKO SANTO BA'RU. **Analisis Konsentrasi *Particulate Matter* pada Kawasan MAN 2 Kota Makassar** (dibimbing oleh Zarah Arwieny Hanami).

Latar Belakang. Salah satu sumber yang berkontribusi besar terhadap kualitas udara perkotaan adalah lalu lintas. Lokasi sekolah yang berdekatan dengan lalu lintas akan mengakibatkan para siswa lebih beresiko terpapar partikulat dengan konsentrasi tinggi. Sekolah MAN 2 Kota Makassar merupakan pusat pendidikan yang berlokasi di daerah perkotaan dan berdekatan dengan jalan utama. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi *particulate matter* (PM) dan menganalisis hubungan antara parameter lalu lintas serta faktor meteorologi terhadap konsentrasi PM. **Metode.** Penelitian ini menggunakan metode sampling udara pada empat titik pada kawasan sekolah menggunakan alat *Ambient Nano Sampler* (ANS) selama 8 jam pada 2 hari kerja dan hari libur. Data yang diperoleh dianalisis. **Hasil.** Dari hasil analisis konsentrasi PM di kawasan MAN 2 Kota Makassar, untuk konsentrasi PM >10 μm berkisar antara 42,80 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 197,28 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM 2,5 - 10 μm antara 48,15 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 134,13 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM 1 - 2,5 μm berkisar 36,88 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 118,83 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM 0,5 - 1 μm berada pada rentang 31,62 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 96,45 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, dan PM <0,5 μm berkisar antara 16,10 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 197,41 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Untuk TSP, konsentrasi berada dalam rentang 283,02 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 555,55 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM₁₀ berkisar antara 177,52 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 321,89 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, dan PM_{2,5} antara 111,24 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ hingga 244,64 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. **Kesimpulan.** Tingkat konsentrasi *particulate matter* pada kawasan MAN 2 Kota Makassar berada jauh dari baku mutu yang ditetapkan di Indonesia. Hasil uji statistik menunjukkan volume dan kecepatan kendaraan berkorelasi signifikan dengan konsentrasi PM di lokasi jalan utama.

Kata Kunci: *Particulate Matter*, *Ambient Nano Sampler*, MAN 2 Kota Makassar

ABSTRACT

NIKO SANTO BA'RU. **Analysis of Particulate Matter in the Area of MAN 2 Kota Makassar** (Supervised Zarah Arwieny Hanami).

Background. One of the major contributors to urban air quality is traffic. Schools located near traffic are at higher risk of exposing students to high concentrations of particulate matter. MAN 2 Kota Makassar is a school situated in an urban area near a main road. **Aim.** This study aims to analyze particulate matter (PM) concentrations and examine the relationship between traffic parameters and meteorological factors on PM concentrations. **Method.** The study used air sampling at four points within the school area using an Ambient Nano Sampler (ANS) for 8 hours on 2 weekdays and a weekend. The collected data were analyzed. **Results.** The analysis of PM concentrations in the MAN 2 Kota Makassar area showed PM $>10\ \mu\text{m}$ ranged from $42.80\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $197.28\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM 2.5 - $10\ \mu\text{m}$ ranged from $48.15\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $134.13\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM 1 - $2.5\ \mu\text{m}$ ranged from $36.88\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $118.83\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM 0.5 - $1\ \mu\text{m}$ ranged from $31.62\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $96.45\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, and PM $<0.5\ \mu\text{m}$ ranged from $16.10\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $197.41\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. For TSP, concentrations ranged from $283.02\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $555.55\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, PM₁₀ ranged from $177.52\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $321.89\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, and PM_{2.5} ranged from $111.24\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ to $244.64\ \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. **Conclusion.** The particulate matter concentration levels in the MAN 2 Kota Makassar area are far from the quality standards set in Indonesia. The results of statistical tests show that the volume and speed of vehicles are significantly correlated with PM concentrations at main road locations.

Keywords: Particulate Matter, Ambient Nano Sampler, MAN 2 Kota Makassar

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Teori	4
BAB II METODE PENELITIAN	18
2.1 Kerangka Penelitian	18
2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	19
2.3 Alat dan Bahan Penelitian	21
2.4 Metode Pengumpulan Data	23
2.5 Analisis Data Konsentrasi <i>Particulate matter</i>	30
2.6 Uji Statistika	32
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN	36
3.1 Konsentrasi <i>Particulate matter</i> (PM)	36
3.2 Perbandingan konsentrasi PM Dengan Baku Mutu	44
3.3 Volume Lalu Lintas	46
3.4 Kecepatan Kendaraan	50
3.5 Data Meteorologi	55
3.6 Analisis Statistik	57
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	66
5.1 Kesimpulan	66
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	70
Lampiran 1. Dokumentasi Kegiatan	71
Lampiran 2. Olah data Excel	73
Lampiran 3 Uji Statistik SPSS	79

DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
1. Baku mutu pencemaran udara.....	10
2. Spesifikasi tahapan Alat <i>Ambient Nano Sampler</i>	13
3. Parameter Normalitas Data	15
4. Kekuatan hubungan korelasi	17
5. Perbandingan konsentrasi partikulat dengan baku mutu.....	45
6. Rekapitulasi data meteorologi.....	56
7. Uji Normalitas data pada masing-masing titik pengukuran.....	57
8. Rekapitulasi Perbandingan konsentrasi PM pada hari kerja dan hari libur.	58
9. Rekapitulasi uji beda PM antar titik pengukuran.....	61
10. Rekapitulasi perbandingan volume kendaraan pada hari kerja dan hari libur..	62
11. Hubungan volume dan kecepatan kendaraan dengan konsentrasi partikulat..	64

DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
1. Ilustrasi Ukuran Particulate matter	8
2. Alat <i>Ambient Nano Sampler</i>	13
3. Peta Lokasi Penelitian	20
4. Sketsa lokasi MAN 2 Kota Makassar	20
5. Alat dan bahan penelitian	21
6. Software pendukung penelitian	22
7. Sketsa lokasi alat penelitian PM di ruas jalan sekolah	23
8. Sketsa lokasi alat penelitian PM di lapangan sekolah	24
9. Sketsa lokasi alat penelitian dalam ruang kelas	24
10. Diagram Alir Penimbangan Kertas Saring	26
11. Diagram Alir Pengambilan Data <i>Particulate matter</i> (PM)	28
12. Diagram Penimbangan Berat Sampel <i>Particulate matter</i> (PM)	29
13. Diagram Alir Analisa Data Konsentrasi <i>Particulate matter</i>	31
14. <i>Flowchart</i> Uji Normalitas	32
15. <i>Flowchart</i> Uji T berpasangan (<i>Paired t-test</i>)	33
16. <i>Flowchart</i> Uji T tidak berpasangan (<i>Independent t-test</i>)	34
17. <i>Flowchart</i> uji regresi berganda	35
18. Grafik konsentrasi PM berdasarkan ukuran di Jl. A.P Pettarani	36
19. Grafik konsentrasi partikulat berdasarkan jenis	37
20. Grafik konsentrasi PM berdasarkan ukuran di Jl. Sultan Alauddin	38
21. Grafik konsentrasi partikulat berdasarkan jenis	38
22. Grafik konsentrasi PM berdasarkan ukuran	39
23. Grafik konsentrasi partikulat berdasarkan jenis	40
24. Grafik konsentrasi PM berdasarkan ukuran	41
25. Grafik konsentrasi partikulat berdasarkan jenis	41
26. Grafik Rekapitulasi konsentrasi PM berdasarkan ukuran	42
27. Grafik Rekapitulasi konsentrasi partikulat berdasarkan jenis	44
28. Grafik volume kendaraan di Jl. A.P Pettarani	46
29. Grafik volume kendaraan di Jl. Sultan Alauddin	47
30. Grafik volume kendaraan di Jl. A.P Pettarani dan Jl. Sultan Alauddin (Pengukuran PM di Lapangan sekolah)	48
31. Grafik volume kendaraan di Jl. A.P Pettarani dan Jl. Sultan Alauddin (Pengukuran PM di ruang kelas)	49
32. Grafik rekapitulasi volume kendaraan	50
33. Grafik kecepatan kendaraan di Jl. A.P Pettarani	51
34. Grafik volume kendaraan di Jl. Sultan Alauddin	52
35. Grafik volume kendaraan di Jl. A.P Pettarani dan Jl. Sultan Alauddin (Pengukuran PM di Lapangan sekolah)	53
36. Grafik kecepatan kendaraan di Jl. A.P Pettarani dan Jl. Sultan Alauddin (Pengukuran PM di Lapangan sekolah)	54
37. Grafik rekapitulasi kecepatan kendaraan	55

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor urut	Halaman
1. Dokumentasi Kegiatan	71
2. Olah data Excel.....	73
3. Uji Statistik SPSS.....	79

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
n	Jumlah populasi
Y'	Nilai estimate variable terikat
a	Titik potong garis regresi pada sumbu y
b	Gradien garis regresi
X	Nilai variable bebas
R	Nilai koefisien korelasi
R ²	Nilai koefisien determinasi
PM	Particulate Matter
ANS	Ambient Nano Sampler
QFF	Quartz Fiber Filter

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas udara sangat penting bagi kesehatan manusia dan menjadi perhatian utama dalam jangka panjang, terutama di daerah perkotaan karena berdampak langsung pada kesehatan masyarakat dan kenyamanan kota (Pratiwi et al., 2020). Tantangan terhadap kualitas udara semakin kompleks di negara-negara berkembang, terutama di daerah perkotaan dengan tingkat urbanisasi yang tinggi dan peningkatan aktivitas industri serta kepadatan lalu lintas, dimana pencemaran udara menjadi masalah umum yang sering terjadi. Kondisi ini tidak hanya mempengaruhi kualitas lingkungan, tetapi juga berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat secara keseluruhan (Kusmiyati et al., 2022).

Pencemar udara pada umumnya masuk kedalam tubuh melalui saluran pernapasan, yang kemudian berdampak pada paru-paru dan kemudian menyebar ke organ lainnya. Telah terbukti bahwa sejumlah penyakit erat berkaitan dengan paparan udara yang tercemar (Kusmiyati et al., 2022). Menurut World Health Organization (WHO), polusi udara menyebabkan sekitar 7 juta kematian setiap tahunnya dan juga berkontribusi pada sejumlah masalah kesehatan seperti penyakit pernapasan, kanker dan penyakit kardiovaskular (Wiranata et al., 2023).

Particulate matter (PM) merupakan salah satu jenis dari beberapa polutan yang dapat memberikan dampak signifikan pada manusia dan juga lingkungan. (Febri Juita Anggraini et al., 2023). Menurut U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *particulate matter* atau *particle pollution* merupakan sebuah campuran kompleks yang memiliki dimensi yang sangat kecil, terdiri dari partikel-partikel kecil atau tetesan cairan. Beberapa partikel tersebut seperti debu, kotoran, jelaga, atau asap, memiliki dimensi yang cukup besar dan gelap sehingga dapat dengan mudah terlihat dengan mata telanjang. Sementara itu, terdapat pula partikel yang memiliki dimensi yang sangat kecil, sehingga hanya dapat terdeteksi melalui penggunaan mikroskop elektron. Secara umum, PM dapat dibedakan berdasarkan ukurannya yakni partikel kasar (PM_{10}), partikel halus ($PM_{2.5}$), dan *ultrafine* ($PM_{0.1}$) (Sousa et al., 2024).

Partikel polutan udara memiliki dampak kesehatan yang berbeda-beda tergantung pada ukurannya. PM_{10} (diameter $\leq 10 \mu m$) dapat menyebabkan masalah pernapasan dan kardiovaskular karena kemampuannya mengendap di saluran napas. $PM_{2.5}$ ($\leq 2.5 \mu m$) lebih berbahaya karena dapat menembus jaringan tubuh, termasuk paru-paru dan aliran darah, meningkatkan risiko penyakit jantung dan gangguan paru-paru kronis. Sementara itu, *ultrafine* PM atau $PM_{0.1}$ ($\leq 0.1 \mu m$) memiliki potensi bahaya terbesar karena dapat menembus lebih dalam ke sistem tubuh, bahkan hingga ke otak, dan telah dikaitkan dengan peningkatan risiko penyakit *neurodegeneratif* seperti ALS melalui mekanisme stres pada retikulum endoplasma dan gangguan homeostasis kalsium di neuro (Sapienza et al., 2024).

Selain ukuran tersebut, terdapat juga klasifikasi PM yang lebih rinci berdasarkan rentang ukuran tertentu yakni partikulat berukuran $>10 \mu\text{m}$, $2,5 - 10 \mu\text{m}$, $1 - 2,5 \mu\text{m}$, $0,5 - 1 \mu\text{m}$, $0,1 - 0,5 \mu\text{m}$ hingga partikulat yang lebih kecil dari $0,1 \mu\text{m}$. Klasifikasi tersebut digunakan menggambarkan secara rinci tentang karakteristik dan distribusi partikulat (Furuuchi et al., 2010; Hata et al., 2013; Putri et al., 2023).

Berdasarkan sumbernya, PM juga dapat dibagi menjadi PM luar ruangan dan PM dalam ruangan. Sumber luar ruangan terutama berasal dari emisi lalu lintas, debu konstruksi, emisi debu, pembakaran biomassa dan emisi industri. Di dalam ruangan, sumber PM mencakup pembakaran bahan bakar, rokok dan nanopartikel rekayasa (ENPs). Penting untuk dicatat bahwa pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna, terutama pembakaran minyak tanah atau bahan bakar padat dapat mengeluarkan sejumlah besar gas berbahaya dan polutan partikulat kecil dengan konsentrasi tinggi (Zhang et al., 2024).

Selain itu, PM terutama yang berasal dari luar ruangan dapat menembus ke dalam ruangan dan meningkatkan risiko kesehatan bagi penghuninya (Jumadil, 2023). Sekolah-sekolah yang berdekatan dengan jalan raya menjadi rentan terhadap paparan PM karena aktivitas lalu lintas yang intens dan siswa memiliki waktu paparan yang lebih lama karena siswa biasanya menghabiskan sebagian besar harinya di sekolah (Febri Juita Anggraini et al., 2023).

Dalam penelitian Kim et al. (2024), disebutkan bahwa perubahan konsentrasi PM bergantung pada aktivitas siswa dalam ruangan, hal ini terjadi karena tidak adanya sumber partikulat di ruangan sekolah seperti proses pembakaran, memasak, atau pengasapan alat pemanas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi PM meningkat secara signifikan selama waktu istirahat dan makan siang dengan kecenderungan penurunan selama jam pelajaran. Penelitian ini menegaskan bahwa kualitas udara dalam ruangan sangat dipengaruhi oleh aktivitas siswa, terutama karena adanya hamburan debu yang kembali ke ruangan akibat aktivitas mereka. Selain itu, Tingkat PM di ruangan yang menggunakan AC umumnya lebih rendah dibandingkan dengan yang menggunakan ventilasi alami. Hasil penelitian juga menegaskan bahwa semakin tinggi jumlah lalu lintas di sekitar sekolah, semakin tinggi pula konsentrasi PM di luar ruangan, yang kemudian mempengaruhi konsentrasi PM di dalam ruangan sekolah.

Akibat dari paparan PM dapat sangat merugikan bagi kesehatan, terutama bagi kelompok rentan seperti siswa, guru dan staf di sekolah yang terpapar PM secara berulang (Hamid & Hussain, 2021).

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu dilakukan penelitian di kawasan sekolah MAN 2 Kota Makassar yakni pada indoor dan outdoor sekolah untuk mengetahui konsentrasi PM yang ada. Dengan demikian, data yang diperoleh dapat menjadi dasar bagi upaya mitigasi pencemaran udara di lingkungan sekolah.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana tingkat konsentrasi PM >10 μm , PM 2,5 - 10 μm , PM 1 - 2,5 μm , PM 0,5 - 1 μm , PM < 0,5 μm , TSP, PM₁₀ dan PM_{2,5} di kawasan MAN 2 Kota Makassar.
2. Bagaimana hubungan antara parameter lalu lintas (volume dan kecepatan kendaraan) terhadap konsentrasi *Particulate Matter* (PM) pada kawasan MAN 2 Kota Makassar

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut.

1. Menganalisis tingkat konsentrasi PM >10 μm , PM 2,5 - 10 μm , PM 1 - 2,5 μm , PM 0,5 - 1 μm , PM < 0,5 μm , TSP, PM₁₀ dan PM_{2,5} di kawasan MAN 2 Kota Makassar.
2. Menganalisis hubungan antara parameter lalu lintas (volume dan kecepatan kendaraan) terhadap konsentrasi *Particulate Matter* (PM) pada kawasan MAN 2 Kota Makassar.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sebagai syarat dalam menyelesaikan studi di perguruan tinggi khususnya Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan mendapat gelar S.T (Sarjana teknik).
2. Sebagai referensi bacaan untuk menambah ilmu pengetahuan bagi generasi-generasi selanjutnya yang berada di Departemen Teknik Lingkungan.
3. Sebagai informasi kepada pemerintah dan masyarakat tentang tingkat pencemaran udara khususnya untuk parameter *particulate matter* (PM >10 μm , PM 2,5 - 10 μm , PM 1 - 2,5 μm , PM 0,5 - 1 μm) yang ada di sekolah.

1.5 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup penelitian ini sebagai berikut.

1. Data yang diambil adalah polutan *Particulate Matter* (PM >10 μm , PM 2,5 - 10 μm , PM 1 - 2,5 μm , PM 0,5 - 1 μm , PM < 0,5 μm), data volume dan kecepatan kendaraan serta data meteorologi.
2. Penelitian berlokasi di sekolah MAN 2 Kota Makassar dengan 4 titik pengambilan data yakni dalam kelas, lapangan sekolah, pada jalan A.P. Pettarani dan jalan Sultan Alauddin
3. Penelitian ini dilakukan pada 2 hari kerja dan 1 hari libur untuk tiap titik pengukuran.
4. Pengambilan sampel *particulate matter* dilakukan selama 8 jam dari jam 8.00 – 16.00 WITA.

1.6 Teori

1.6.1 Udara

Menurut PP Nomor 22 Tahun 2021, Udara bebas yang ditemukan di permukaan bumi pada lapisan troposfir di wilayah yurisdiksi Republik Indonesia disebut udara ambien. Udara ini memiliki pengaruh signifikan terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup, dan elemen lingkungan hidup lainnya.

Dengan kontribusinya untuk memberikan kehidupan di bumi, udara adalah zat yang paling penting setelah air. Selain menyediakan oksigen, udara juga berperan sebagai medium untuk mentransmisikan suara, mendinginkan objek-objek yang panas, dan bahkan dapat menyebar penyakit kepada manusia, tumbuhan, serta hewan. Udara biasa memiliki komposisi sebesar 78,1% nitrogen, 20,93% oksigen, dan 0,03% karbon dioksida. Selain itu, udara juga mengandung berbagai gas lain seperti argon, neon, kripton, xenon, helium, serta partikel seperti uap air, debu, bakteri, spora dan sisa-sisa tumbuhan (Chandra, 2007 dalam Aryanta & Maharani, 2023).

Udara dianggap bersih jika proporsinya tetap stabil, tetapi jika ada perubahan signifikan pada proporsinya, maka udara dianggap tercemar. Perubahan tersebut biasanya disebabkan oleh adanya zat pencemar yang dilepaskan ke udara. Sumber zat pencemar ini dapat berasal dari kegiatan alam, seperti letusan gunung, pembusukan bahan organik, atau debu yang terbawa oleh angin dan juga dapat berasal dari aktivitas manusia, seperti emisi dari cerobong asap industri dan gas buang kendaraan bermesin (Fandani et al., 2019).

1.6.2 Pencemaran Udara

Polusi atau pencemar udara adalah masuknya komponen-komponen lain ke dalam udara, baik melalui aktivitas manusia secara langsung atau tidak langsung maupun sebagai hasil dari proses alam. Hal ini mengakibatkan penurunan kualitas udara hingga tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak sesuai untuk fungsi yang ditujukan. Setiap zat yang tidak merupakan bagian dari komposisi udara normal disebut sebagai polutan, yang dapat memiliki dampak negatif pada Kesehatan (Chandra, 2007 dalam Aryanta & Maharani, 2023).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah RI Nomor 41 tahun 1999, Pencemaran Udara merujuk pada proses di mana zat, energi, atau unsur lain masuk atau dimasukkan ke udara ambien oleh aktivitas manusia. Hal ini mengakibatkan penurunan kualitas udara ambien hingga suatu titik di mana udara tersebut tidak dapat lagi memenuhi perannya yang semestinya.

Polusi udara merupakan sebuah masalah lingkungan yang berdampak besar pada kesehatan manusia, terutama pada anak-anak dan orang lanjut usia dan telah menjadi perhatian utama. Setiap tahun, lebih dari sembilan juta jiwa kematian terjadi karena masalah kualitas udara. Hampir separuh dari kematian tersebut

disebabkan oleh efek kronis atau akut dari paparan bahan partikulat dengan diameter 2.5 μm atau kurang, yang dikenal sebagai $\text{PM}_{2.5}$ (Sobrinho et al., 2024).

1.6.3 Sumber Pencemaran Udara

Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah, sumber pencemar udara adalah setiap usaha dan/atau kegiatan yang mengeluarkan bahan pencemar ke udara yang menyebabkan udara tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya.

Pencemar udara secara umum dibagi menjadi dua kategori: pencemar primer dan pencemar sekunder. Pencemar primer adalah substansi yang langsung dihasilkan dari sumber pencemaran udara. Contoh dari pencemar primer adalah karbon monoksida, yang merupakan hasil dari proses pembakaran. Sementara itu, pencemar sekunder adalah substansi yang terbentuk dari reaksi antara pencemar-pencemar primer di atmosfer. Pembentukan ozon dalam *smog* fotokimia adalah contoh dari pencemaran udara sekunder (Arwini, 2019).

Sumber pencemaran udara dari aktivitas manusia dapat dibedakan menjadi empat kelompok (Arwini, 2019):

1. Sumber bergerak: Sumber yang tidak tetap pada satu tempat, seperti kendaraan bermotor.
2. Sumber bergerak spesifik: Sumber yang tidak tetap pada satu tempat, seperti kereta api, pesawat terbang, kapal laut, dan kendaraan berat lainnya.
3. Sumber tidak bergerak: Sumber emisi yang tetap pada satu tempat, seperti pabrik.
4. Sumber tidak bergerak spesifik: Sumber emisi yang tetap pada satu tempat, seperti pembakaran hutan dan pembakaran sampah.

1.6.4 Dispersi Polutan

Dispersi adalah proses di mana polutan secara kontinu menyebar dari sumbernya, seperti cerobong dan dihembuskan oleh angin yang stabil di atmosfer terbuka. Ketika polutan ini bergerak, polutan tersebut akan turun dan terus mengikuti arah angin rata-rata menjauhi sumbernya. Salah satu hal yang penting dalam bagaimana polutan menyebar adalah difusi. Difusi terjadi ketika polutan dengan konsentrasi tinggi di satu tempat bergerak ke tempat lain yang konsentrasinya lebih rendah (Abidin & Hasibuan, 2019).

Faktor meteorologi memegang peran sentral dalam proses dinamika polutan di atmosfer. Parameter-parameter meteorologi, seperti suhu, kecepatan dan arah angin, stabilitas atmosfer, dan tinggi pencampuran yang senantiasa berfluktuasi, menjadi faktor yang sangat signifikan dalam distribusi polutan (Pratama & Sofyan, 2020). Kecepatan angin dan stabilitas atmosfer dikenal sebagai faktor meteorologi utama yang memengaruhi penyebaran polutan di atmosfer. Selain itu, parameter meteorologi lainnya seperti suhu, kelembaban relatif, dan faktor lainnya juga

memiliki peran yang signifikan dalam menentukan koefisien dispersi partikel, yang pada gilirannya memengaruhi distribusi polutan dalam jangka waktu yang lebih Panjang (Ganguly et al., 2019)

Temperatur. Temperatur mengindikasikan tingkat panas atau dinginnya suatu benda. Panas merupakan energi termal yang mengalir dari satu benda ke benda lainnya karena adanya perbedaan temperatur. Prinsipnya, kalor selalu mengalir dari benda dengan suhu yang lebih tinggi ke benda dengan suhu yang lebih rendah. Namun, ini tidak selalu berarti dari benda yang memiliki energi panas lebih banyak ke benda yang memiliki energi panas lebih sedikit (Kolibu & Suoth, 2019). Temperatur udara dapat mempengaruhi pembentukan polutan udara dan reaksi kimia di atmosfer. Sebuah penelitian menunjukkan adanya korelasi positif antara temperatur dan konsentrasi polutan udara (Serlina, 2020).

Namun, pada penelitian yang dilakukan oleh Sukmawati & Warisaura (2023) terkait pengukuran *particulate matter* ditemukan bahwa penurunan suhu udara mengurangi dispersi partikel sehingga meningkatkan konsentrasi PM di udara pada daerah tersebut. Pada kondisi suhu yang lebih rendah, partikel-partikel cenderung tetap berada di dekat permukaan tanah karena udara dingin yang terjebak dan tidak dapat keluar dari daerah tersebut, sehingga meningkatkan konsentrasi PM.

Kelembaban udara. Kelembaban udara adalah ukuran dari jumlah uap air yang terkandung di udara. Ini mencerminkan seberapa banyak air dalam bentuk uap yang ada di udara. Konsentrasi uap air dalam udara hangat biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan udara yang dingin. Seiring dengan bertambahnya jumlah uap air di udara, kelembaban udara akan meningkat. Ketika udara sudah tidak dapat menampung lebih banyak uap air, disebut sebagai udara jenuh. Tingkat kelembaban udara yang tinggi dapat meningkatkan risiko terkena flu dan infeksi pernapasan (Utama et al., 2019).

Kelembaban udara relatif atau *relative humidity* (RH) adalah salah satu parameter dalam fisika atmosfer yang menunjukkan hubungan antara tekanan udara aktual dan tekanan udara jenuh, serta mencerminkan jumlah uap air di suatu lokasi. Tingkat kelembaban relatif ini sangat terkait dengan temperatur udara serta variasi musiman yang terjadi. Selama musim kemarau, kelembaban relatif cenderung rendah sedangkan pada musim hujan, kelembaban relatif kembali meningkat. Selain suhu udara, kelembaban relatif juga menjadi salah satu faktor iklim yang berpengaruh terhadap distribusi polutan di atmosfer. Saat kelembaban relatif rendah maka konsentrasi polutan cenderung meningkat karena rendahnya tekanan atmosfer menghambat dispersi polutan di udara. Akibatnya, tingkat polusi udara di suatu lokasi tetap tinggi pada kondisi kelembaban relatif yang rendah. Ini menunjukkan bahwa kelembaban relatif memainkan peran penting dalam menentukan kualitas udara di suatu daerah (Tama et al., 2023).

Kecepatan Angin. Secara prinsip, semakin tinggi kecepatan angin, konsentrasi pencemar udara cenderung lebih rendah karena angin membawa pencemar tersebut menjauhi lokasi pengukuran. Sebaliknya, jika kecepatan angin rendah, hasil pengukuran bisa menunjukkan konsentrasi pencemar yang lebih tinggi,

karena angin tidak membawa pencemar tersebut menjauh dari lokasi pengukuran (Ibrahim et al., 2022).

Meskipun demikian, faktor seperti jarak relatif terhadap sumber pencemar, arah angin yang dominan, serta karakteristik topografi dan struktur permukaan lokal juga dapat mempengaruhi pola distribusi PM yang terukur secara signifikan. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Sukmawati & Warisaura (2023), dimana kecepatan angin tertinggi antara 1,3 hingga 3,2 m/s dengan nilai konsentrasi PM tertinggi yakni sebesar 273,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Analisis menggunakan SPSS 23 menunjukkan koefisien korelasi sebesar 1,000**, yang menandakan hubungan yang sangat kuat dan positif antara kecepatan angin dan konsentrasi PM. Hasil ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, semakin tinggi pula konsentrasi PM di udara. Hal ini diperkuat dengan signifikansi statistik dari korelasi yang tinggi (Sig.(2-tailed) 0.00), menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel tersebut sangat signifikan secara statistik, dengan nilai signifikansi kurang dari 0,05.

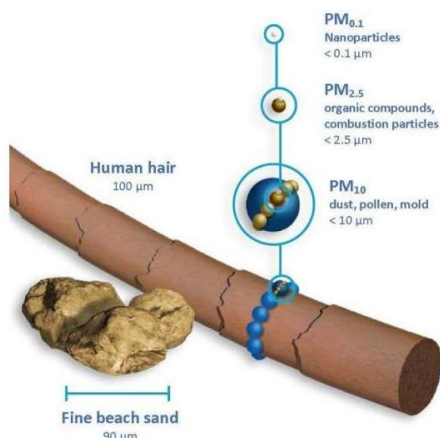
Tekanan udara. Tekanan udara pada permukaan adalah gaya yang dihasilkan oleh kolom udara di atasnya. Tekanan yang dirasakan sebanding dengan massa udara di atas permukaan bumi, hingga ke lapisan terluar atmosfer. Data tekanan digunakan untuk mengevaluasi kepadatan udara di suatu lokasi. Tekanan udara adalah salah satu parameter meteorologi kunci yang dapat diukur menggunakan *Automatic Weather System (AWOS)* (Khaery et al., 2020).

Tekanan udara merupakan faktor penting dalam pemahaman tentang sebaran emisi udara dari berbagai sumber di lingkungan. Perubahan dalam tekanan udara bisa berdampak signifikan terhadap dispersi emisi udara ((Tama et al., 2023).

1.6.5 Particulate matter

Menurut *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)* (2023), *particulate matter* atau *particle pollution* merupakan sebuah campuran kompleks yang memiliki dimensi sangat kecil yang terdiri dari partikel-partikel kecil atau tetesan cairan. Beberapa partikel tersebut seperti debu, kotoran, jelaga, atau asap memiliki dimensi yang cukup besar dan gelap sehingga dapat dengan mudah terlihat dengan mata telanjang. Sementara itu, terdapat pula partikel yang memiliki dimensi yang sangat kecil, sehingga hanya dapat terdeteksi melalui penggunaan mikroskop elektron.

Particulate matter (PM) merupakan salah satu jenis dari beberapa polutan yang dapat memberikan dampak signifikan pada manusia dan juga lingkungan. (Febri Juita Anggraini et al., 2023).



Gambar 1. Ilustrasi Ukuran Particulate matter

Ultrafine Particle. *Ultrafine Particle* adalah Partikulat matter dengan diameter kurang dari 0,1 mikrometer. Ini merupakan jenis partikel yang sangat halus dan biasanya berasal dari sumber pembakaran seperti kendaraan bermotor (Sousa et al., 2024).

Paparan *partikel ultrafine*, terutama PM_{0.1}, didominasi oleh lingkungan dalam ruangan. Sumber utama PM_{0.1} adalah pembakaran, terutama dari kendaraan bermotor dan industri. Aerosol dalam ruangan adalah kombinasi dari aerosol dari luar ruangan dan partikel yang timbul dari aktivitas manusia di dalamnya. Partikel ini muncul secara tidak teratur dan memiliki tingkat variasi yang tinggi, sehingga memerlukan pemantauan yang berkelanjutan. Distribusi dan konsentrasi partikel di dalam ruangan dipengaruhi oleh sistem ventilasi bangunan dan tingkat aktivitas manusia di dalamnya (Marval & Tronville, 2022).

Setelah masuk ke dalam sistem pernapasan, *ultrafine partice* (UFP) memiliki kemampuan untuk berpindah ke organ-organ vital seperti jantung, hati, dan otak dalam waktu yang sangat singkat, bahkan hanya dalam beberapa menit setelah terhirup. Di sisi lain, partikel yang lebih besar cenderung tertahan di dalam jaringan paru-paru dan memiliki kemungkinan kecil untuk mencapai aliran darah. UFP juga dapat mencapai otak dengan cara langsung melalui bulbus olfaktorius, suatu bagian dari hidung yang langsung terhubung dengan otak. Temuan lain yang signifikan menunjukkan adanya korelasi antara paparan fraksi ultrafine dan kerusakan permanen pada DNA karena stres oksidatif sistemik (Schwarz et al., 2023).

PM₁. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa PM₁ (partikel submikronik dengan diameter $\leq 1 \mu\text{m}$) berkontribusi sebanyak 77-86% dari konsentrasi PM_{2.5}. Telah disebutkan bahwa ukuran PM memiliki korelasi negatif dengan tingkat toksisitasnya di paru-paru, yang mengimplikasikan bahwa PM₁ memberikan dampak yang lebih merugikan dibandingkan dengan PM_{2.5}. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa menghirup PM dapat menyebabkan peradangan dan stres oksidatif. Partikel kecil, terutama PM₁ dapat lebih mudah masuk dan mengendap di saluran pernapasan yang lebih dalam. Setelah diinternalisasi oleh sel epitelial pernapasan, PM₁ dapat

memicu stres oksidatif dan respons inflamasi yang lebih dalam di saluran pernapasan. Penelitian yang ada menunjukkan bahwa respons pro-inflamasi memainkan peran penting dalam efek PM_{10} terhadap fungsi paru-paru (Hu et al., 2021).

$PM_{2.5}$. *Partikulat matter* (PM) adalah sebutan untuk partikel debu yang terapung di udara dalam waktu yang lama atau yang bisa ditemukan di atmosfer, termasuk debu, kotoran, jelaga, dan asap. Di antara jenis PM tersebut, ada yang disebut sebagai *Particulate matter 2,5* ($PM_{2.5}$), yang merupakan partikel debu dengan diameter kurang dari 2,5 μm . $PM_{2.5}$ ini sering kali berasal dari sumber-sumber antropogenik, seperti kendaraan bermotor, pembakaran biomassa, dan pembakaran bahan bakar. Pembakaran biomassa dapat menghasilkan asap yang mengandung partikel debu, termasuk $PM_{2.5}$. Paparan terhadap asap dari pembakaran biomassa dapat menjadi faktor risiko bagi kesehatan, termasuk berkontribusi pada masalah Kesehatan (Ridayanti, 2022).

$PM_{2.5}$ adalah campuran kompleks yang terdiri dari beberapa komponen, termasuk sulfat, nitrat, *organic compounds*, *ammonium compounds*, *metal*, *acidic material* dan bahan kontaminan lainnya. Komponen-komponen ini diyakini memiliki potensi untuk memberikan dampak negatif pada kesehatan manusia (As'ari, 2022).

Hasil penelitian Ridayanti (2022) mengungkap adanya hubungan yang signifikan antara gangguan fungsi pernafasan dan konsentrasi *particulate matter* ($PM_{2.5}$) di berbagai lokasi seperti pada industri semen, pasar tetap dan komunitas sekitar industri semen. Selain itu, konsentrasi $PM_{2.5}$ yang terdeteksi di lokasi pembakaran batu bata juga melampaui standar kualitas udara yang telah ditetapkan.

$PM_{2.5}$ telah terbukti memiliki dampak yang signifikan pada saluran pernapasan, khususnya dalam menimbulkan gejala batuk. Selain itu, partikel ini juga dapat menyebabkan gangguan dalam fungsi paru-paru, termasuk gangguan ventilasi yang mengakibatkan penurunan kemampuan paru-paru untuk berkembang dan obstruksi saluran udara yang melambatkan aliran udara karena peningkatan lendir paru-paru. Berbagai bahan yang terkandung dalam $PM_{2.5}$ dapat memicu berbagai gangguan pada saluran pernapasan, seperti infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), kanker paru-paru, masalah kardiovaskular, kematian dini, dan penyakit paru-paru obstruktif kronis. $PM_{2.5}$ dapat menembus ke dalam sistem pertahanan saluran pernapasan melalui berbagai mekanisme fisik seperti sedimentasi, imaksi, difusi, intersepsi dan presipitasi (As'ari, 2022).

PM_{10} . PM_{10} adalah istilah yang merujuk kepada debu partikulat dengan diameter 10 μm yang dikumpulkan dengan efisiensi pengambilan sampel sebesar 50%. Partikulat ini termasuk dalam kategori polutan karena kemampuannya untuk masuk lebih dalam ke dalam saluran pernapasan manusia. Fraksi utama dari partikel dengan ukuran ini banyak berasal dari kegiatan industri. Sumber kontaminan debu partikulat dari luar ruangan umumnya berasal dari emisi gas buang kendaraan bermotor. Partikel-partikel tersebut biasanya memiliki ukuran antara 0,01 hingga 5 mikron. Partikel dengan ukuran lebih dari 50 mikron akan terdeposit di permukaan

jalanan. Selain sumber-sumber eksternal tersebut, faktor-faktor internal dalam ruangan juga dapat memengaruhi konsentrasi debu partikulat. Contohnya, aktivitas seperti proses memasak juga dapat menjadi kontributor dalam pembentukan debu partikulat di lingkungan dalam ruangan (As'ari, 2022).

Paparan PM₁₀ telah lama menjadi fokus pembahasan dalam berbagai literatur. Dampaknya diketahui dapat menyebabkan penyakit kardiovaskular, penyakit pernapasan, asma, cacat lahir, masalah kesehatan serebrovaskular, pemanasan global, peningkatan rawat inap, ketidakhadiran di sekolah, serta peningkatan mortalitas dan morbiditas. Selain itu, PM₁₀ juga memiliki potensi karsinogenik (Tella et al., 2021).

1.6.6 Baku Mutu

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 mengenai Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Baku Mutu Udara Ambien adalah nilai yang menetapkan batasan keberadaan pencemar udara dalam udara sekitar.

Tabel 1. Baku mutu pencemaran udara

No.	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sistem Pengukuran
1	Sulfur Dioksida (SO ₂)	1 jam	150	aktif kontinu
		24 jam	75	aktif manual
		1 tahun	45	aktif kontinu
2	Karbon Monoksida (CO)	1 jam	10000	aktif kontinu
		8 jam	4000	aktif kontinu
3	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	1 jam	200	aktif kontinu
				aktif manual
		24 jam	65	aktif kontinu
		1 tahun	50	aktif kontinu
4	Oksidan fotokimia (O _x) sebagai Ozon (O ₃)	1 jam	150	aktif kontinu
		8 jam	100	aktif kontinu [#]
		1 tahun	35	aktif kontinu
5	Hidrokarbon Non Metana NMHC	3 jam	160	aktif kontinu [#] #
6	Partikulat debu < 100 μm (TSP)	24 jam	230	aktif manual
	Partikulat debu < 10 μm (PM ₁₀)	24 jam	75	aktif kontinu
		1 tahun	40	aktif manual aktif kontinu

No.	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sistem Pengukuran
	Partikulat debu < 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$)	24 jam	55	aktif kontinu
		1 tahun	15	aktif kontinu
7	Timbal (Pb)	24 jam	2	aktif manual

Sumber: Lampiran VII Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021

Keterangan:

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: Konsentrasi dalam mikrogram per meter kubik, pada kondisi atmosfer normal, yaitu tekanan (P) 1 atm dan temperatur (T) 25°C

: Konsentrasi yang dilaporkan untuk waktu pengukuran selama 1 (satu) jam adalah konsentrasi hasil pengukuran yang dilakukan setiap 30 (tiga puluh) menit (dalam 1 jam dilakukan 2 kali pengukuran) dan dilakukan pukul di antara 11:00 - 14:00 waktu setempat.

: Konsentrasi yang dilaporkan untuk waktu pengukuran selama 8 jam adalah konsentrasi dari waktu pengukuran yang dilakukan di antara pukul 06:00 - 18:00 waktu setempat.

: Konsentrasi yang dilaporkan untuk waktu pengukuran selama 3 (tiga) jam adalah konsentrasi dari waktu pengukuran yang dilakukan di antara pukul 06:00 - 10:00 waktu setempat

1.6.7 Emisi Kendaraan Bermotor

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019, Emisi merujuk kepada zat, energi, dan/atau komponen lain yang dihasilkan oleh suatu aktivitas dan kemudian masuk ke udara ambien, baik yang memiliki potensi sebagai pencemar maupun tidak.

Pencegahan dan penanggulangan dampak lingkungan akibat masalah transportasi diatur dalam Pasal 29 Ayat (1) Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009. Pasal ini menegaskan pentingnya mengurangi pencemaran lingkungan dalam setiap kegiatan terkait lalu lintas dan angkutan jalan. Pencegahan dan penanggulangan pencemaran lingkungan harus dilakukan untuk memastikan bahwa standar mutu lingkungan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Sesuai dengan ketentuan tersebut, Pasal 5 Ayat 2 menjelaskan bahwa kendaraan bermotor yang beroperasi di daerah tertentu wajib menjalani uji emisi gas buang secara berkala. Ini bertujuan untuk memastikan bahwa kendaraan bermotor mematuhi standar emisi yang telah ditetapkan oleh peraturan perundang-undangan.

1.6.8 Klasifikasi Kendaraan

Klasifikasi kendaraan menurut Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan, kendaraan dapat dibagi menjadi dua jenis utama yakni kendaraan bermotor dan kendaraan tidak bermotor. Kendaraan bermotor

mencakup semua jenis kendaraan yang menggunakan mesin sebagai sumber tenaga, kecuali kendaraan yang berjalan di atas rel. Sementara itu, kendaraan tidak bermotor meliputi kendaraan yang digerakkan oleh tenaga manusia dan/atau hewan. Di dalam kategori kendaraan yang beroperasi di jalan raya, terdapat beberapa kelompok kendaraan yang berbeda yaitu antara lain:

1. Kendaraan Berat (*Heavy Vehicle*)

Kendaraan berat adalah kendaraan bermotor yang memiliki lebih empat roda seperti bus, truk dengan 2 as, truk dengan 3 as dan truk kombinasi.

2. Kendaraan Ringan (*Light Vehicle*)

Kendaraan ringan adalah kendaraan bermotor yang memiliki dua atau empat roda dengan jarak roda antara 2,0 hingga 3,0 meter. Jenis kendaraan ringan mencakup mobil penumpang, *microbus*, pick up dan truk kecil.

3. Sepeda Motor (*Motorcycle*)

Sepeda motor adalah kendaraan bermotor yang memiliki 2 atau 3 roda, termasuk sepeda motor dan kendaraan roda tiga.

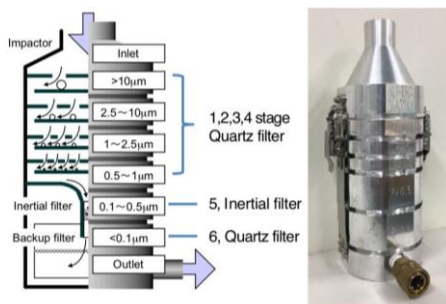
4. Kendaraan Tak Bermotor (*Unmotorized Vehicle*)

Kendaraan tak bermotor adalah kendaraan yang roda-roda nya digerakkan oleh tenaga manusia atau hewan. Jenis kendaraan tak bermotor mencakup sepeda, becak, kereta kuda, dan kereta dorong.

1.6.9 Alat Ambient Nano Sampler

Alat Ambient Nano Sampler (ANS) adalah alat yang digunakan untuk mengumpulkan sampel partikulat hingga berukuran nano dari udara ambien. ANS merupakan alat buatan Kanazawa University yang digunakan dalam penelitian dan pengukuran konsentrasi partikulat di atmosfer. ANS bekerja dengan mengumpulkan partikulat yang terangkut oleh udara, yang kemudian disimpan dalam filter untuk analisis laboratorium. ANS terdiri dari empat tahap penangkap partikel dengan ukuran yang berbeda (PM > 10 μm , PM 2.5 – 10 μm , PM 1.0 – 2.5 μm , PM 0.5 – 1.0 μm) dan juga dilengkapi dengan filter inersia untuk partikel yang sangat kecil (PM 0.1 – 0.5 μm) serta filter cadangan untuk ukuran PM yang kurang dari 0.1 μm . Alat ini digunakan untuk mengambil sampel udara. Untuk mengumpulkan sampel partikel, digunakan *Quartz filters* (QFF) dengan diameter 55 mm dan tahap filter inersial dengan nosel kartrid berdiameter 5,25 mm yang terbuat dari serat baja tahan karat (*fiber* diameter, $df = 9.8 \mu\text{m}$) (Handika et al., 2023).

Selama proses pengambilan sampel, semua filter yang digunakan dilindungi dengan aluminium foil dan disimpan dalam kantong plastik untuk mencegah adanya kontaminasi. Sebelum ditimbang, filter dipanaskan selama satu jam pada suhu 350°C untuk menghilangkan kontaminasi. Konsentrasi PM yang diukur menggunakan ANS dapat digunakan untuk memperkirakan konsentrasi di lokasi reseptor tertentu dan membandingkan dengan baku mutu yang berlaku. Alat ini berguna untuk mengetahui kualitas udara ambien dan mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas udara ((Handika et al., 2023).



Gambar 2. Alat *Ambient Nano Sampler*

Sampel diambil menggunakan impaktor beberapa tahap untuk PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 , dan $PM_{0.5}$, serta filter inersial dengan ukuran cutoff aerodinamis dp_{50} sekitar 65 nm. Alat ini dirancang untuk bekerja pada laju aliran 40 L/menit, yang memungkinkan pengambilan sampel partikel nano dengan cepat. Laju aliran pada alat ini, lebih dari besar dua kali lipat dibandingkan sampler komersial *low-volume samplers* (16,7 L/menit) tetapi lebih kecil daripada *high volume air samplers* (500–1000 L/menit). Keunggulan dari alat Nanosampler ini adalah laju aliran sampel dapat disesuaikan dengan kebutuhan di lapangan. Spesifikasi setiap tahap impaktor terdapat pada Tabel 2 berikut (Furuuchi et al., 2010).

Tabel 2. Spesifikasi tahapan Alat *Ambient Nano Sampler*

Jenis	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1	$PM_{0.5}$
Diameter nosel (mm)	7.2	1.8	0.8	0.4
Panjang nosel (mm)	7.5	3	2	2
Jarak nosel-ke-pelat (mm)	7.5	4.5	2	2
Jumlah nosel di setiap tahap (-)	6	25	50	100
Diameter pelat impaksi (mm)	60	60	60	60
Kecepatan aliran udara melalui nosel (m/s)	2.73	10.8	26.5	53.1
dp_{50} (μm) - Dirancang	10	2.5	1	0.5
dp_{50} (μm) - Diukur	9.7	2.71	1.08	0.46
Kesalahan (%)	-3	8	8	-8

Sumber: Furuuchi et al., 2010

Diameter filter yang digunakan sebesar 55 mm untuk semua tahap. Seperti pengambil sampel lainnya, berbagai jenis filter seperti *glass fiber filter*, *quartz fiber filters* dan *teflon filters* dapat digunakan tergantung pada tujuan pengukuran. Alat ini bekerja dengan prinsip impaksi, di mana partikel dengan ukuran yang berbeda dipisahkan saat udara yang mengandung partikel melewati serangkaian pelat atau nosel dengan ukuran lubang yang semakin kecil pada setiap tahap (stage) (Furuuchi et al., 2010).

1.6.10 Persamaan Perhitungan Konsentrasi PM

Sampel udara yang diperoleh ditimbang menggunakan neraca analitik, lalu dilakukan perhitungan untuk menentukan masing-masing konsentrasi PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ dan PM_{0.5}. Sebelum menghitung konsentrasi TSP di udara ambien, maka dilakukan terlebih dahulu perhitungan koreksi laju alir pada kondisi standar dengan rumus sebagai berikut (SNI 19-7119.3-2005):

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

Dimana,

Q_s = laju alir volume dikoreksi pada kondisi standar (m³ /menit)

Q_o = laju alir volume uji (m³ /menit)

T_s = temperatur standar (288 K)

T_o = temperatur absolut (273 + t ukur) dimana Q_o °C ditentukan

P_s = tekanan barometrik standar, 101.3 kPa (760 mmHg)

P_o = tekanan barometrik dimana Q_o ditentukan

Setelah menyesuaikan laju alir ke kondisi standar, langkah selanjutnya adalah menghitung volume udara yang diambil menggunakan rumus berikut ini:

$$V = \frac{Q_{s1} + Q_{s2}}{2} \times T \quad (2)$$

Dimana,

V = volume udara yang diambil (m³)

Q_{s1} = laju alir awal terkoreksi pada pengukuran pertama (m³ /menit)

Q_{s2} = laju alir akhir terkoreksi pada pengukuran kedua (m³ /menit)

T = durasi pengambilan contoh uji (menit)

Untuk mengetahui masing-masing konsentrasi konsentrasi TSP, PM₁₀, PM_{2.5} dan PM₁. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut (Febri Juita Anggraini et al., 2023):

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

Dimana,

C = konsentrasi massa partikel (µg/Nm³)

W₁ = berat filter awal (g)

W₂ = berat filter akhir (g)

V = volume contoh udara (m³)

10⁶ = konversi g ke µg

Ketika melakukan pengukuran lapangan, seringkali waktu pengambilan data tidak selaras dengan waktu yang ditentukan dalam standar kualitas (baku mutu). Untuk mengatasi hal ini, dapat dilakukan estimasi waktu pengukuran lapangan agar sesuai dengan standar kualitas menggunakan rumus Canter pada persamaan berikut:

$$C2 = C1 \left(\frac{t1}{t2} \right)^{0,185} \quad (4)$$

Dimana,

- C1 = konsentrasi sesaat ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)
 C2 = konsentrasi standar ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)
 t1 = waktu pemaparan sesaat (menit)
 t2 = waktu pemaparan standar (menit)

1.6.11 Uji Normalitas Data

Ajija (2011) menyatakan bahwa uji normalitas diperlukan ketika jumlah observasi kurang dari 30. Uji ini digunakan untuk mengetahui apakah error term mengikuti distribusi normal. Namun, jika jumlah observasi lebih dari 30, uji normalitas tidak diperlukan karena distribusi sampling dari error term dianggap telah mendekati normal. Data yang berdistribusi normal merupakan prasyarat penting dalam melakukan inferensi statistik. Uji normalitas diperlukan untuk menentukan jenis statistik yang sesuai dengan data yang akan dianalisis. Penggunaan statistik parametrik disarankan untuk data yang berasal dari populasi normal, sementara statistik nonparametrik lebih tepat digunakan untuk data yang tidak memenuhi syarat distribusi normal. Uji normalitas juga krusial terutama dalam penelitian yang menggunakan rata-rata sebagai parameter keberhasilan. Pada penelitian kuantitatif atau eksperimental, asumsi data normal dibutuhkan karena sifat parameter rata-rata yang tidak tangguh (tidak *robust*). Berbagai metode seperti Anderson Darling, Kolmogorov-Smirnov, Chi-Square, Lilliefors, Shapiro-Wilk, Cramer Von Mises, QQ-Plot, dan PP-Plot dapat digunakan untuk melakukan uji normalitas. Uji Kolmogorov-Smirnov khususnya dalam mengidentifikasi kesesuaian distribusi data dengan kurva teoritis, di mana deviasi maksimum (D) dari distribusi kumulatif empiris terhadap distribusi kumulatif teoritisnya menentukan keberhasilan normalitas data observasi (Nasrum, 2018).

Tabel 3. Parameter Normalitas Data

Parameter	Kriteria Normal
Koefisien varians = (Standar deviasi/ Mean) x 100%	< 30 %
Rasio Skewness = Skewness/ Standar error of skewness	-2 s/d 2
Rasio Kurtosis = Kurtosis/ Standar error of kurtosis	-2 s/d 2
Histogram **	Simetris, tidak miring ke kiri atau ke kanan, tidak terlalu tinggi atau terlalu rendah
Box Plot **	Simetris, median tepat di tengah, tidak ada outlier (o) atau nilai ekstrim (tanda *)
Normal Q-Q Plots **	Data menyebar sekitar garis

Parameter	Kriteria Normal
Detrendend Q-Q Plots **	Data menyebar sekitar garis pada nilai 0
Kolmogorov –Smirnov Shapiro-Wilk	P > 0,05

Sumber: Modul pengolahan dan analisis data menggunakan SPSS, 2021

Hasil uji normalitas dapat dinilai baik secara deskriptif maupun analitik. Pada tabel di atas, penilaian deskriptif ditandai dengan warna hitam sedangkan penilaian analitik ditandai dengan warna biru. Tanda ** menunjukkan bahwa dalam menginterpretasikan histogram atau plot, beberapa pengamat mungkin memiliki pandangan yang berbeda sehingga kesimpulannya bisa bervariasi. Untuk mencapai kesepakatan, metode yang akan digunakan untuk menilai hasil uji normalitas adalah metode analitik, dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Penilaian analitik (uji *Kolmogorov-Smirnov* maupun *Shapiro-Wilk*) lebih sensitif dibandingkan dengan penilaian deskriptif (menghitung koefisien variasi, rasio skewness, rasio kurtosis).
2. Penilaian analitik lebih objektif dibandingkan dengan penilaian deskriptif (metode histogram dan plot).

1.6.12 Uji Korelasi

Sudjana (2005) menjelaskan bahwa analisis korelasi berganda berguna untuk menilai seberapa kuat hubungan antara variabel X (data meteorologi) dan variabel Y (konsentrasi partikulat). Korelasi yang digunakan dalam analisis ini adalah korelasi ganda, yang dapat dihitung menggunakan rumus:

$$R^2 = \frac{JK(reg)}{\Sigma Y^2} \quad (5)$$

Dimana,

R² = koefisien korelasi ganda

JK (reg) = Jumlah kuadrat regresi dalam bentuk deviasi

ΣY^2 = Jumlah kuadrat total korelasi dalam bentuk deviasi

t² = waktu pemaparan standar (menit)

Dari nilai koefisien korelasi (R) yang diperoleh, dapat diinterpretasikan sebagai berikut:

1. Jika nilai R = 1, ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif sempurna antara variabel X dan Y.
2. Jika nilai R = -1, ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan negatif sempurna antara variabel X dan Y.
3. Jika nilai R = 0, ini menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan antara variabel X dan Y.

4. Jika nilai R berada di antara -1 dan 1, maka tanda negatif (-) menunjukkan adanya korelasi negatif atau tidak langsung, sedangkan tanda positif (+) menunjukkan adanya korelasi positif atau langsung.

Interpretasi tentang kekuatan hubungan korelasi dapat merujuk pada pendapat yang diungkapkan oleh Tjasyono (2004) dalam Jesiani (2019) sebagai berikut:

Tabel 4. Kekuatan hubungan korelasi

Nilai r	Interpretasi
1	Sempurna
0,75 - 0,99	Sangat kuat
0,50 – 0,75	Kuat
0,25 – 0,50	Cukup
0 – 0,25	Sangat lemah
0	Tidak ada

Sumber: Tjasyono (2004) dalam Jesiani (2019)

1.6.13 Software SPSS

SPSS yang dipublikasikan oleh SPSS Inc., adalah program komputer yang digunakan untuk analisis statistik. SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences* atau Paket Statistik untuk Ilmu Sosial) pertama kali dirilis pada tahun 1968 dan diciptakan oleh Norman Nie, seorang lulusan Fakultas Ilmu Politik dari Stanford University. Saat ini, Norman Nie menjadi Profesor Peneliti Fakultas Ilmu Politik di Stanford dan Profesor Emeritus Ilmu Politik di University of Chicago. Awalnya, SPSS hanya digunakan untuk ilmu sosial, tetapi seiring perkembangan waktu, penggunaannya meluas ke berbagai disiplin ilmu, sehingga akronimnya berubah menjadi "*Statistical Product and Service Solution*" (Lestari, 2021).

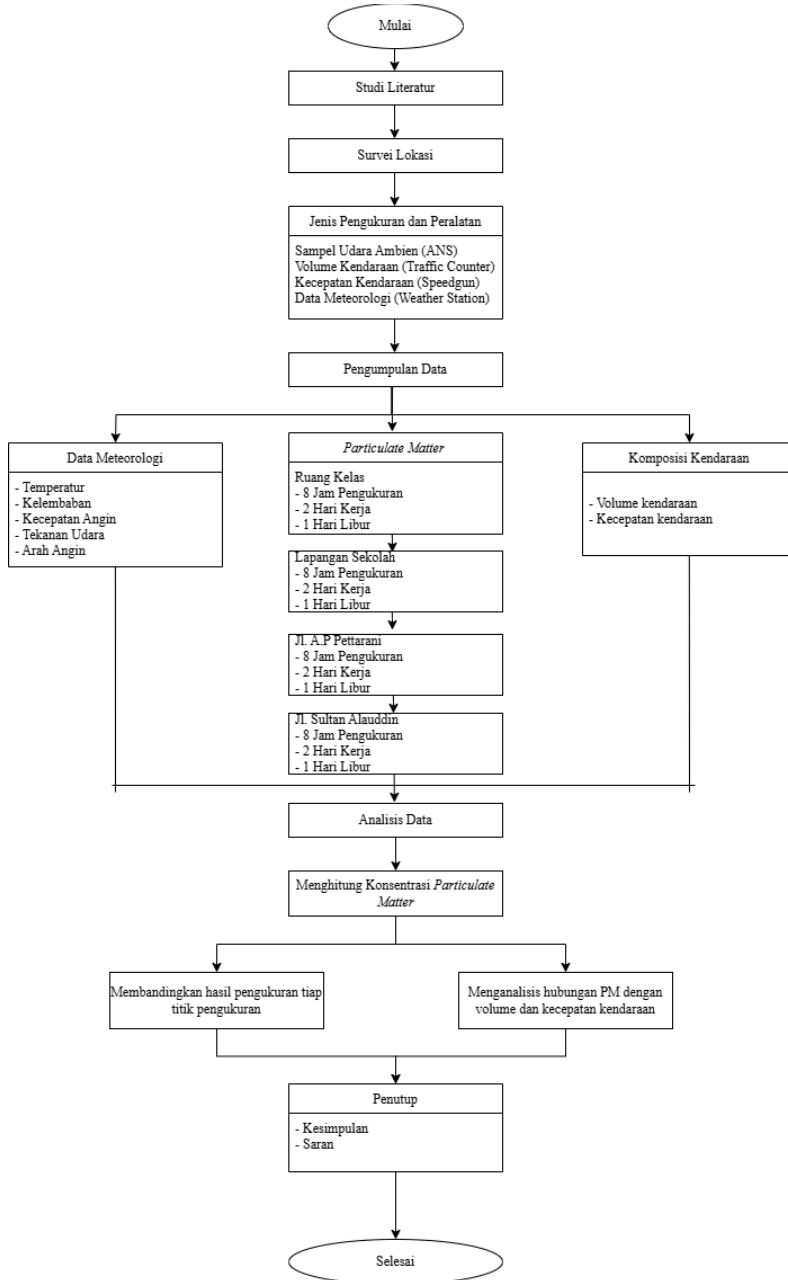
Adapun keunggulan SPSS meliputi (Lestari, 2021):

1. Antarmuka menu dan kotak dialog yang *user-friendly*, memudahkan pengguna dalam perekaman data (*data entry*).
2. Menyediakan berbagai perintah dan sub-perintah analisis serta menampilkan hasilnya.
3. Kemampuan yang andal dalam menampilkan grafik atau plot hasil analisis.
4. Kemudahan dalam melakukan penyuntingan data jika diperlukan.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian analisis konsentrasi *particulate metter* adalah sebagai berikut:



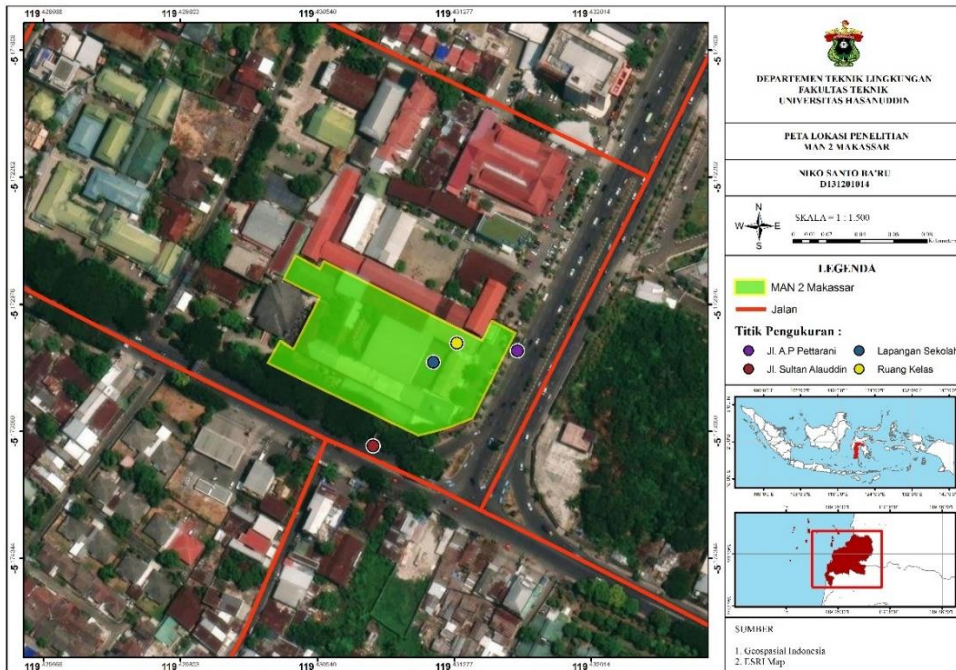
2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Sebelum melakukan pengambilan data penelitian, langkah pertama yang diperlukan adalah melakukan survei pendahuluan. Survei ini bertujuan untuk memperkirakan beberapa hal yang akan memengaruhi proses pengambilan sampel dan pelaksanaan penelitian. Beberapa faktor yang dievaluasi dalam survei pendahuluan termasuk lokasi penelitian yang dipilih untuk keperluan penelitian, ketepatan metode yang akan digunakan dalam pengumpulan data serta perkiraan biaya dan waktu yang diperlukan untuk melaksanakan penelitian. Survei pendahuluan pada penelitian ini dilakukan mulai dari tanggal 3 Mei 2024 hingga 16 Juli 2024.

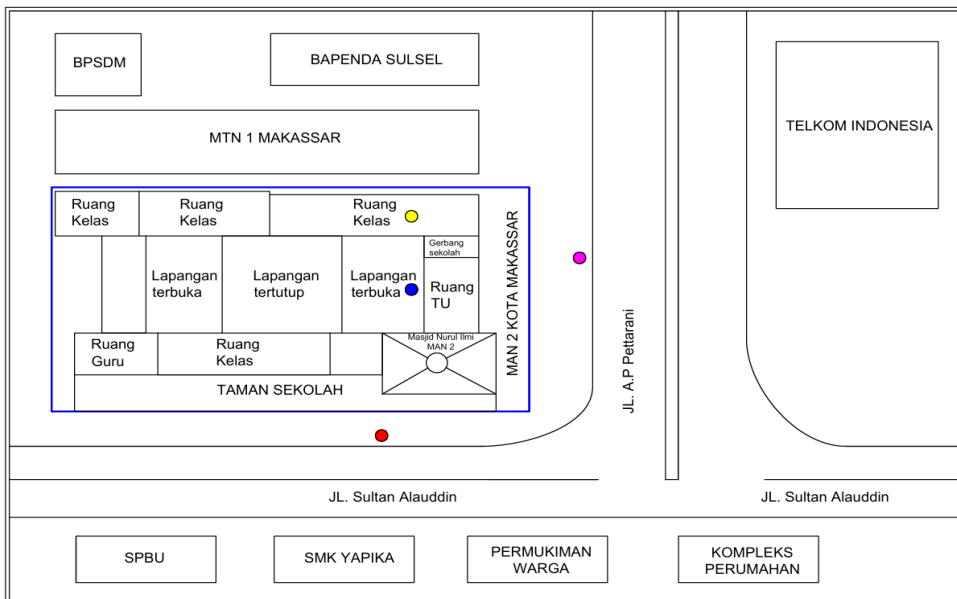
Penelitian ini dilaksanakan di sekolah MAN 2 Kota Makassar dengan pertimbangan lokasi yang strategis. Pemilihan MAN 2 Kota Makassar sebagai lokasi penelitian didasarkan pada keberadaannya di area yang memiliki tingkat pencemaran yang signifikan, terutama terkait dengan jalan-jalan utama yang menjadi sumber utama pencemar udara. Secara khusus, lokasi penelitian berada diantara Jalan AP. Pettarani dengan tipe jalan 8/2 D yang merupakan jalan arteri utama, serta Jalan Sultan Alauddin dengan Tipe Jalan 4/2 D.

Titik pengambilan sampel dilakukan pada empat titik, titik pertama dengan koordinat $5^{\circ}10'23.80970''\text{S}$ dan $119^{\circ}25'53.82000''\text{E}$ terletak di Jl. A.P Pettarani depan sekolah. titik kedua $5^{\circ}10'25.16350''\text{S}$ dan $119^{\circ}25'50.51710''\text{E}$ terletak di Jl. Sultan Alauddin samping sekolah. titik ketiga dengan koordinat $5^{\circ}10'23.88300''\text{S}$ $119^{\circ}25'52.10180''\text{E}$ terletak di lapangan sekolah. titik keempat dengan koordinat $5^{\circ}10'23.75880''\text{S}$ dan $119^{\circ}25'52.31900''\text{E}$ terletak ruang kelas. Pendekatan ini memungkinkan untuk dilakukan analisis secara komprehensif terhadap dampak polusi udara khususnya parameter *particulate matter* terhadap lingkungan belajar di MAN 2 Kota Makassar baik di dalam ruangan maupun area terbuka yang terpapar langsung dengan emisi kendaraan.

Titik pengambilan sampel penelitian di kawasan MAN 2 Kota Makassar sebagai berikut:



Gambar 3. Peta Lokasi Penelitian
Adapun detail sketsa lokasi penelitian sebagai berikut:



Gambar 4. Sketsa lokasi MAN 2 Kota Makassar

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa lokasi MAN 2 Kota Makassar tepat berada diantara persimpangan jalan A.P. Pettarani dengan tipe jalan 8/2 D yang merupakan jalan arteri utama, serta jalan Sultan Alauddin dengan tipe jalan 4/2 D. Pengambilan sampel dilakukan pada hari kerja dan satu hari libur. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai variasi konsentrasi PM pada hari-hari dengan aktivitas normal dan hari-hari dengan aktivitas yang lebih rendah, sehingga analisis dapat mencakup perbandingan antara kondisi hari kerja dan hari libur. Rencana awal pengambilan data dilakukan pada 3 hari kerja dan 1 hari libur sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Handika et al. (2023) di sekolah yang juga menggunakan alat *Ambien Nano Sampler* (ANS). Namun, karena keterbatasan alat maka penelitian dilakukan pada 2 hari kerja dan 1 hari libur dengan total 12 hari pengukuran untuk semua titik pengukuran . Pengambilan sampel dilakukan selama 8 jam, disesuaikan dengan durasi waktu belajar siswa rata-rata di sekolah. Hal ini bertujuan untuk memastikan data yang diperoleh representatif terhadap kondisi selama jam belajar siswa, sehingga hasil penelitian dapat memberikan gambaran yang akurat mengenai paparan PM yang dialami siswa selama kegiatan belajar-mengajar.

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 5. Alat dan bahan penelitian

Keterangan:

1. *Ambient Nano Sampler*, berfungsi untuk mengukur *particulate Matter*, yang dapat mengukur partikel kasar hingga partikel *ultrafine*.
2. *Speed Gun*, berfungsi untuk mengukur kecepatan kendaraan.
3. *Handphone*, berfungsi untuk menghitung volume kendaraan dengan aplikasi *traffic counter*.
4. *Stopwatch*, berfungsi untuk mengukur waktu pengukuran.
5. *Walking Distance Meter*, berfungsi untuk mengukur lebar jalan dan lebar lajur.
6. Tripot, berfungsi sebagai alat penyangga dudukan alat.
7. Timbangan Analitik, berfungsi sebagai alat pengukur berat kertas filter
8. *Weather Station*, berfungsi untuk mengukur tekanan udara, suhu, kelembaban, arah angin, dan curah hujan.
9. Kabel Rol, sebagai sumber aliran listrik yang akan digunakan.
10. Cawan Petri, berfungsi sebagai wadah kertas filter untuk menghindari kontaminan saat pengukuran berat filter.
11. Pinset, berfungsi untuk membantu dalam memindahkan kertas filter .
12. Aluminium foil, berfungsi untuk menutupi dan melindungi kertas filter dari kontaminan lain
13. *Aquades*, berfungsi sebagai cairan pembersih cawan petri.
14. *Ethanol*, berfungsi untuk mensterilkan alat-alat yang digunakan.
15. *Quartz filter pore size 0.3 mikron*, berfungsi untuk menangkap partikel debu yang terbawa oleh udara yang dihisap oleh alat sampling.
16. Sarung tangan plastik, berfungsi mencegah kontaminasi secara langsung terhadap alat dan bahan penelitian
17. Tisu *kime wipe*, berfungsi membersihkan alat penelitian

Adapun Software yang mendukung dalam proses penelitian ini yaitu antara lain:



Gambar 6. Software pendukung penelitian

Keterangan:

1. Microsoft Excel yaitu *software* yang digunakan dalam proses pengolahan data.
2. Arcgis yaitu *software* yang digunakan dalam pemetaan titik lokasi penelitian.
3. IBM SPSS yaitu *software* yang digunakan dalam melakukan analisis statistik data penelitian.

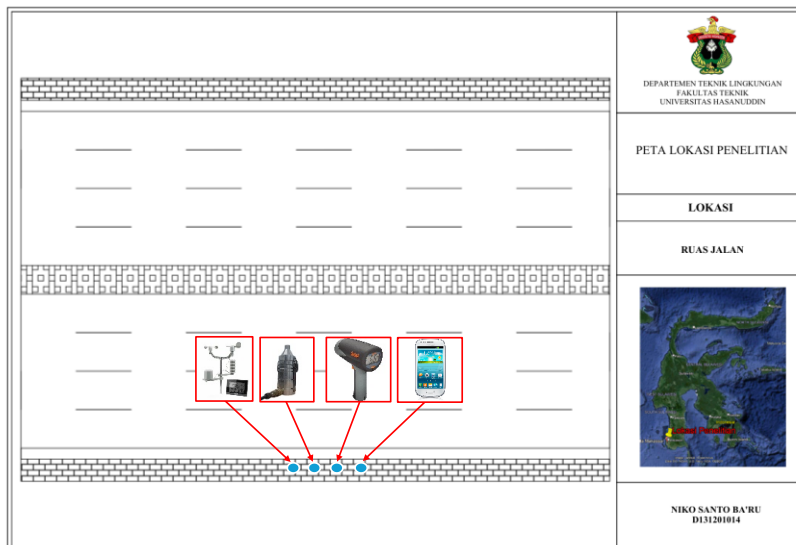
4. AutoCad yaitu *software* yang digunakan dalam menggambar sketsa lokasi penelitian.

2.4 Metode Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui dua metode, yakni secara langsung dan tidak langsung. Data yang diperoleh secara langsung disebut data primer, sedangkan yang diperoleh secara tidak langsung disebut data sekunder.

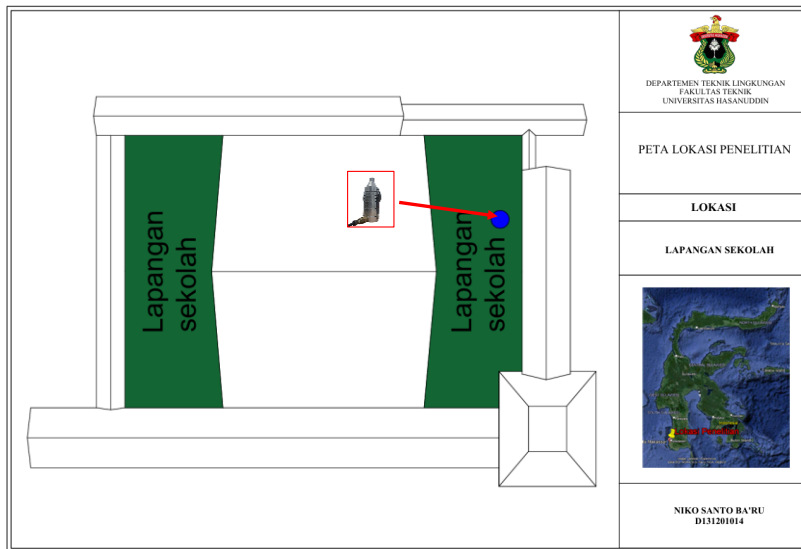
2.4.1 Data Primer

Pengumpulan data primer terdiri dari data tingkat PM, data volume kendaraan, data kecepatan kendaraan dan data meteorologi. Adapun secara visual gambaran pengambilan data di ruas jalan dapat dilihat pada gambar 12



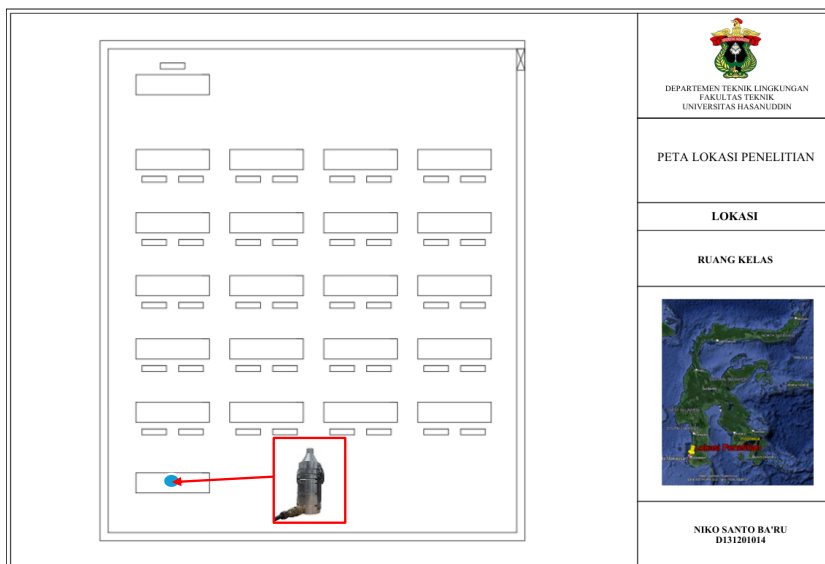
Gambar 7. Sketsa lokasi alat penelitian PM di ruas jalan sekolah

Pada pengukuran di lapangan sekolah, data primer diperoleh melalui pengambilan sampel PM di lapangan sekolah menggunakan Alat *Ambient Nano Sampler* (ANS). Pengukuran ini dilakukan secara simultan dengan pencatatan jumlah dan kecepatan kendaraan di jalan raya. Visualisasi pengukuran di lapangan sekolah disajikan pada gambar 13.



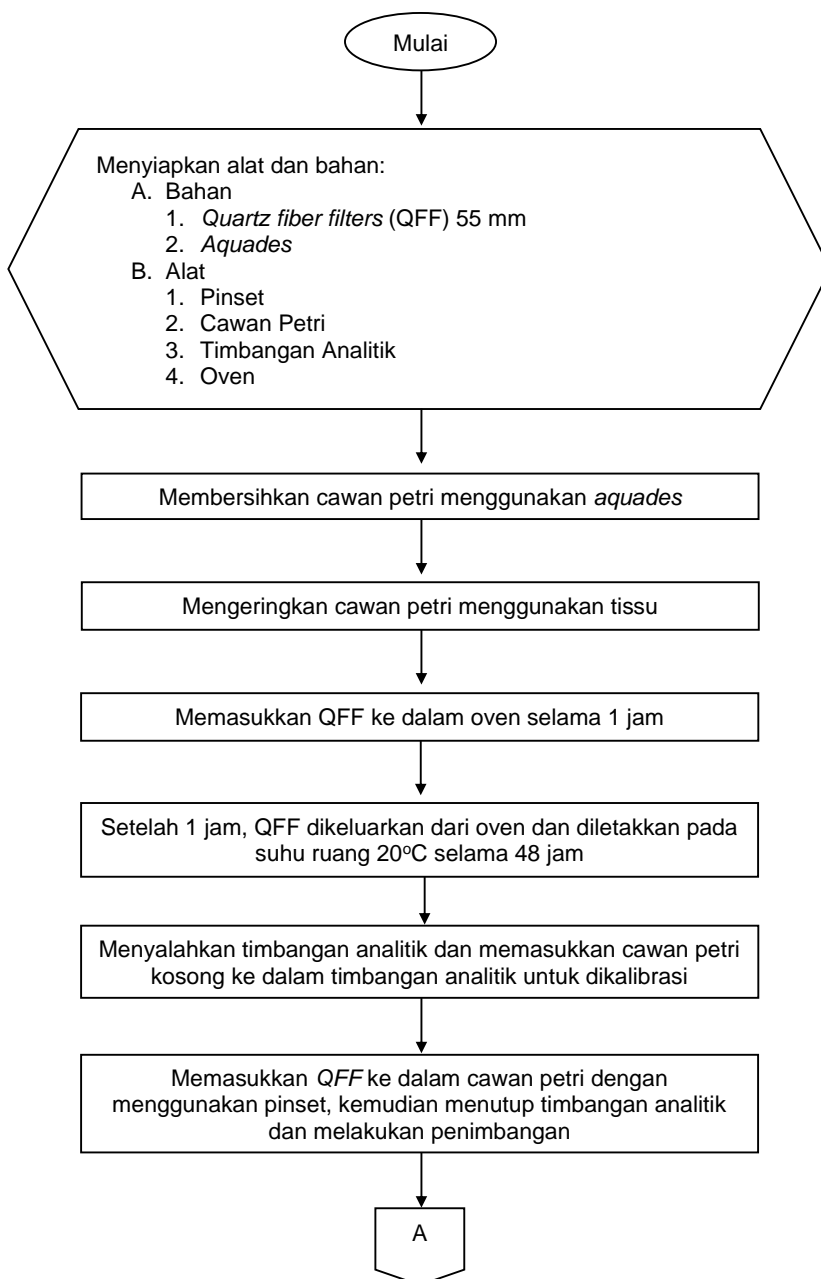
Gambar 8. Sketsa lokasi alat penelitian PM di lapangan sekolah

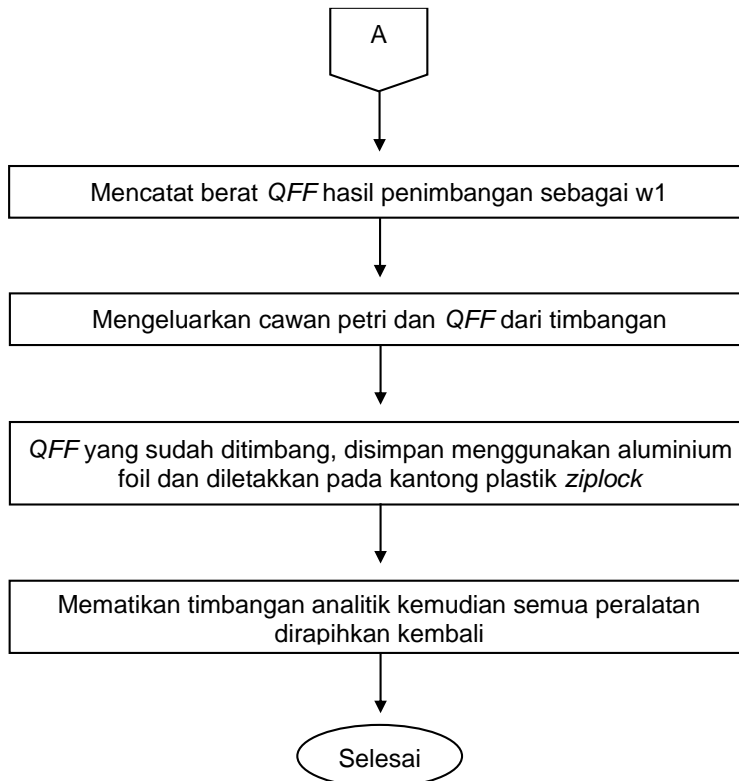
Seperti halnya pada pengukuran di lapangan sekolah, pada ruang kelas data primer diperoleh melalui pengambilan sampel PM di ruang kelas menggunakan Alat *Ambient Nano Sampler* (ANS). Pengukuran ini dilakukan secara simultan dengan pencatatan jumlah dan kecepatan kendaraan di jalan raya. Visualisasi pengukuran di ruang kelas disajikan pada gambar 14.



Gambar 9. Sketsa lokasi alat penelitian dalam ruang kelas

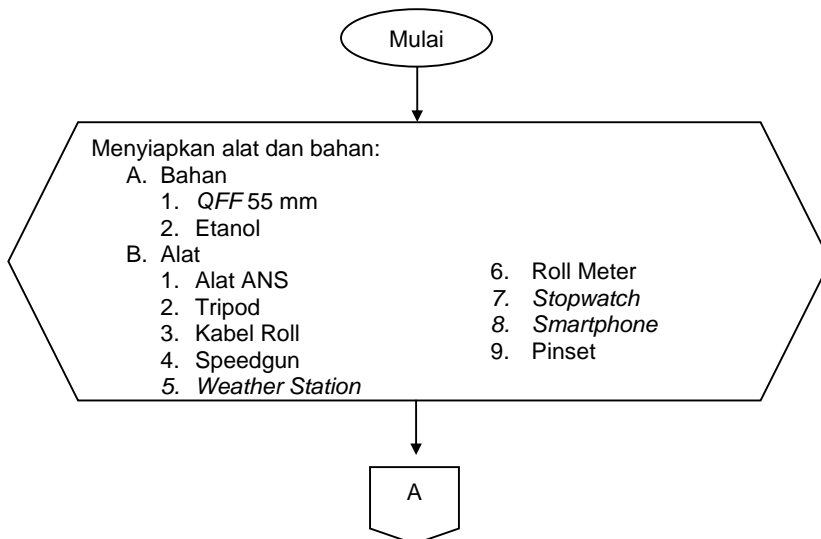
Adapun bagan alir proses pengambilan data tiap variabel sebagai berikut.
a. Penimbangan Kertas Saring

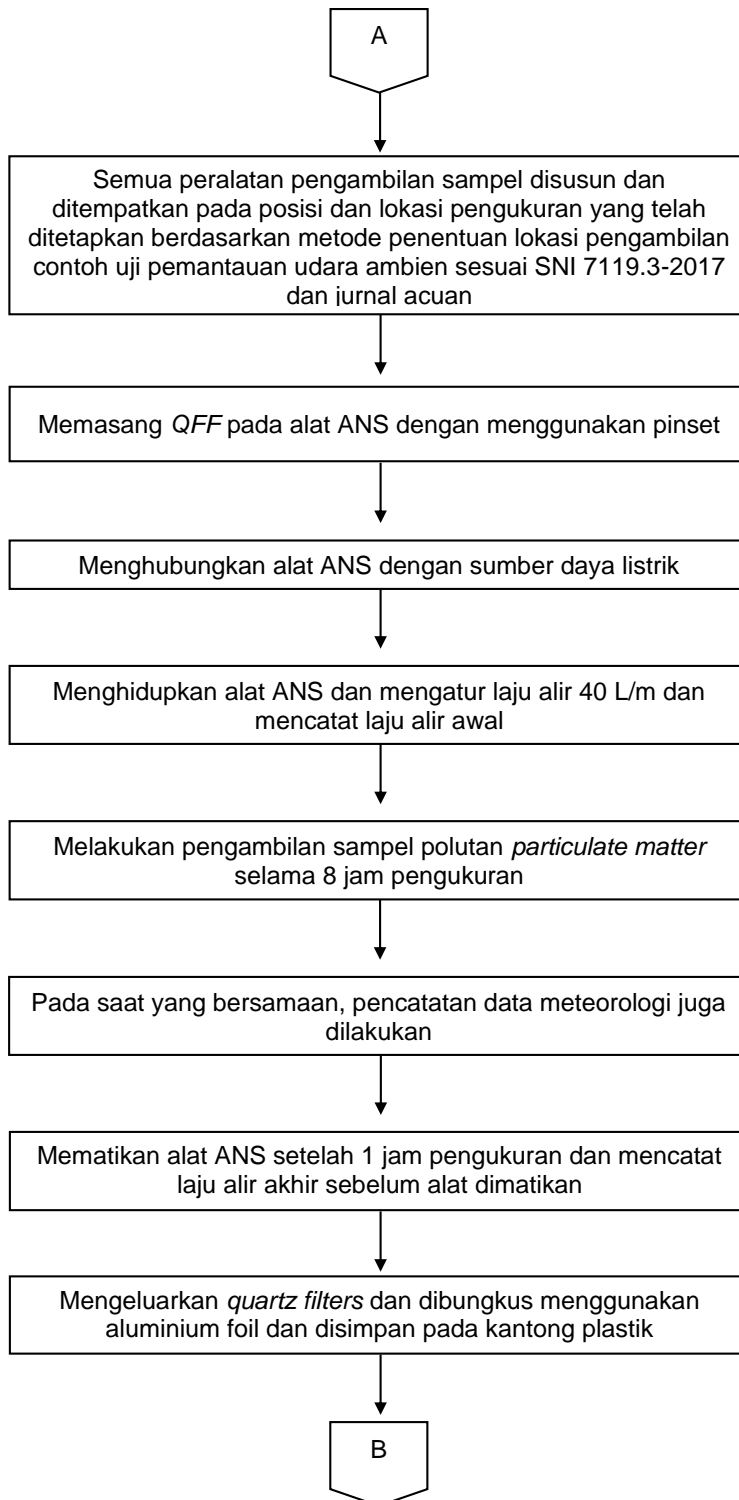


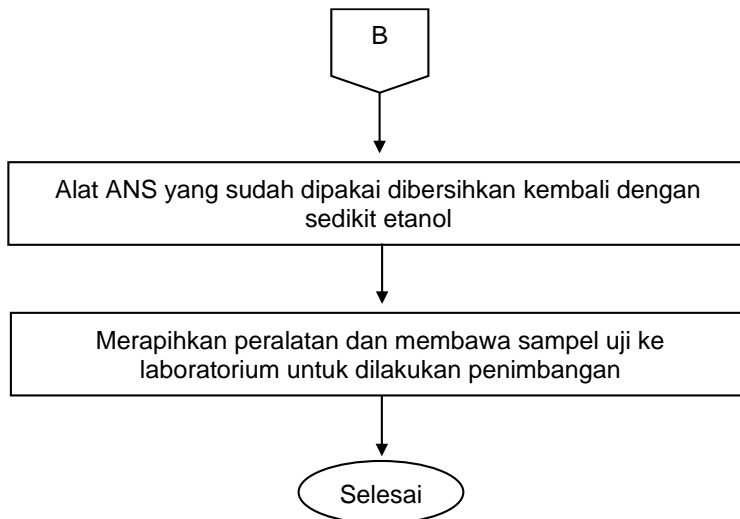


Gambar 10. Diagram Alir Penimbangan Kertas Saring

b. Pengambilan data *Particulate matter* (PM)

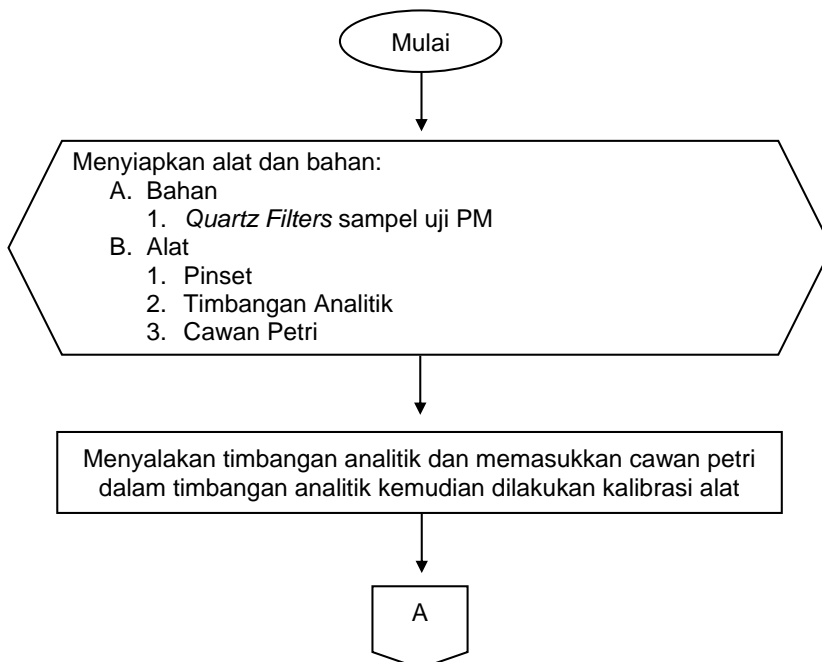


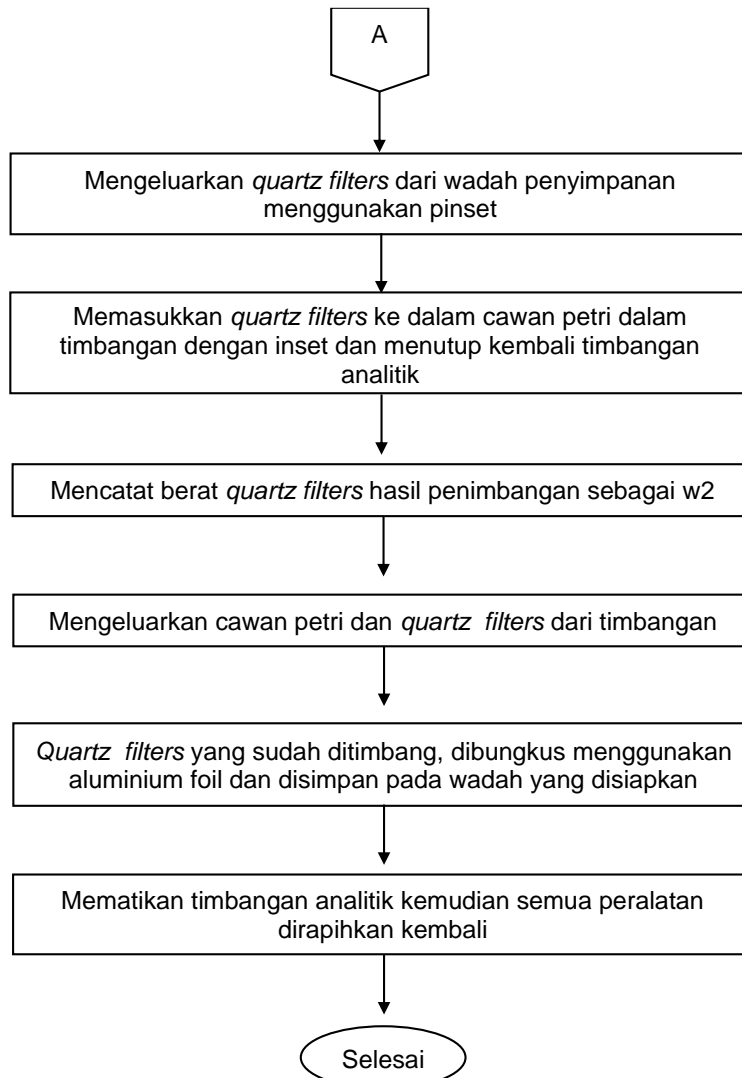




Gambar 11. Diagram Alir Pengambilan Data *Particulate matter* (PM)

c. Penimbangan berat sampel *Particulate matter* (PM)





Gambar 12. Diagram Penimbangan Berat Sampel *Particulate matter* (PM)

Pengukuran tingkat konsentrasi *particulate matter* dilakukan dengan alat *ambient nano sampler* (ANS) dengan media filter berupa *Quartz fiber filter* (QFF) diameter 55 mm sebagai media pengumpulan sampel *particulate matter*. Langkah awal yang dilakukan pada pengukuran ini dimulai dengan menyiapkan semua alat dan bahan. Selanjutnya, QFF dimasukkan ke oven selama 1 jam. Setelah 1 jam, QFF dikeluarkan dan diletakkan pada ruang dengan suhu 20°C selama 48 jam untuk menstabilkan beratnya. Langkah selanjutnya adalah melakukan penimbangan berat awal QSS dengan timbangan analitik, dimana QFF ditimbang satu per satu. Setelah melakukan penimbangan awal, QSS disimpan menggunakan aluminium foil dan diletakkan pada wadah kantong plastik *zip-lock* yang sesuai. Semua peralatan yang akan dipakai ditempatkan pada lokasi

pengukuran, kemudian QSS dipasang pada alat ANS. Alat ANS yang telah terhubung ke pompa dan sumber listrik dinyalakan dan mengatur laju alir 40 L/m. Pengukuran dilakukan selama 8 jam sesuai dengan durasi kegiatan pembelajaran di sekolah. Pengukuran dilakukan dengan memperhatikan penurunan tekanan saluran pada sambungan ANS. Setelah pengukuran selesai, catat laju aliran akhir kemudian matikan alat. QSS harus dilipat menjadi setengah lingkaran dan dibungkus aluminium foil yang bersih kemudian menyimpan pada kantong plastik *zip-lock* yang sudah disiapkan. Alat ANS yang sudah dibongkar kemudian dibersihkan dengan sedikit etanol dengan kain *kimwipe* dan dirapihkan kembali. Sampel udara yang sudah didapatkan kemudian diletakkan pada ruang dengan suhu 20°C selama 48 jam untuk menstabilkan beratnya. QFF kemudian dibawa ke laboratorium untuk ditimbang kembali dengan menggunakan timbangan analitik. Setelah selesai filter ini disimpan di *freezer* jika akan dilakukan analisis lebih mendalam.

2.4.2 Data Sekunder

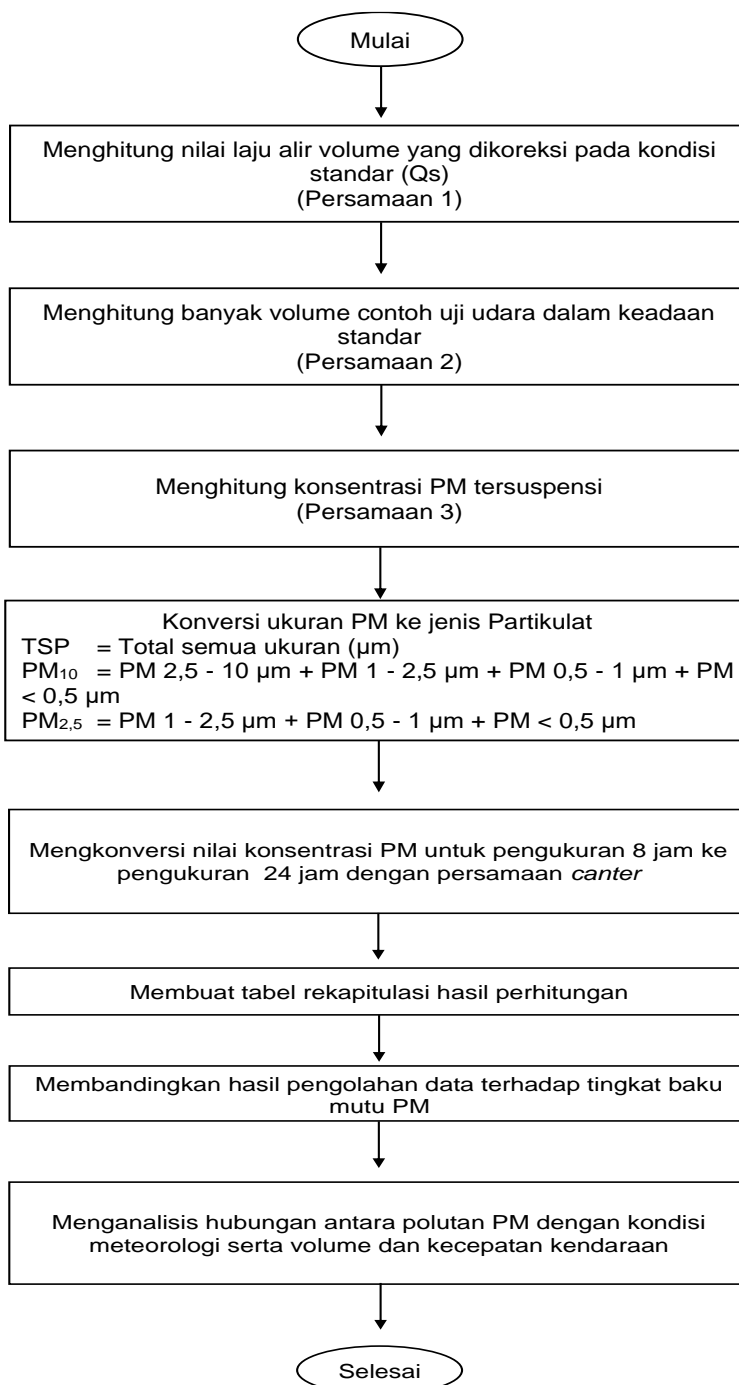
Data sekunder merupakan informasi tambahan yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan data dalam pengukuran. Dalam penelitian ini, data sekunder meliputi peta lokasi titik penelitian, serta referensi dari jurnal dan buku.

2.5 Analisis Data Konsentrasi *Particulate matter*

Prinsip pengambilan sampel udara partikulat menggunakan alat ANS yaitu alat mengumpulkan partikulat oleh udara melalui sistem vacuum menggunakan pompa udara. Pada sistem ini, partikel dipisahkan melalui beberapa tahap, di mana setiap tahap dirancang untuk menangkap fraksi partikel dengan ukuran tertentu yakni untuk $PM > 10 \mu m$, $PM 2.5 - 10 \mu m$, $PM 1.0 - 2.5 \mu m$, $PM 0.5 - 1.0 \mu m$ yang melewati pelat serta dilengkapi kertas filter serta filter cadangan untuk ukuran PM yang kurang dari $0.5 \mu m$. Impactor berjenjang memisahkan partikel berdasarkan ukuran aerodinamik melalui penyaringan bertahap. Data konsentrasi partikel yang diperoleh kemudian dianalisis untuk memetakan distribusi ukuran. Pengelompokan PM (*particulate matter*) dibagi menjadi TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$, di mana setiap kategori mengacu pada ukuran partikel yang diatur dalam baku mutu PP 22 Tahun 2021.

Namun, meskipun sistem ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi, terdapat beberapa error dalam pengukuran. Berdasarkan hasil pengujian, error yang terjadi dalam ukuran cutoff adalah -3% untuk PM_{10} , 8% untuk $PM_{2.5}$. Error ini disebabkan oleh variasi dalam desain alat, kecepatan filtrasi. Meskipun demikian, error ini masih dalam batas yang dapat diterima dan tidak secara signifikan mengurangi validitas analisis konsentrasi partikel.

Setelah mendapatkan data primer dan sekunder, maka langkah selanjutnya adalah menganalisis data tersebut. Data dianalisis sesuai dengan persamaan 1 hingga persamaan 4 mengenai perhitungan konsentrasi *particulate matter*. Adapun teknik analisis yang digunakan adalah sebagai berikut.



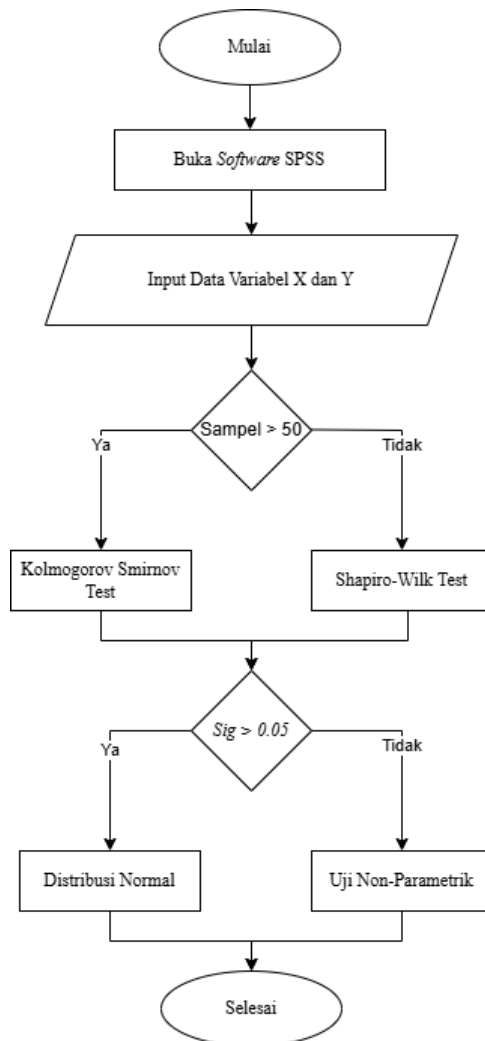
Gambar 13. Diagram Alir Analisa Data Konsentrasi *Particulate matter*

2.6 Uji Statistika

Uji statistika digunakan dalam analisis data untuk menentukan apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara kelompok data atau hubungan antara variabel. Salah satu software yang sering digunakan dalam uji statistik adalah SPSS.

2.6.1 Uji Normalitas

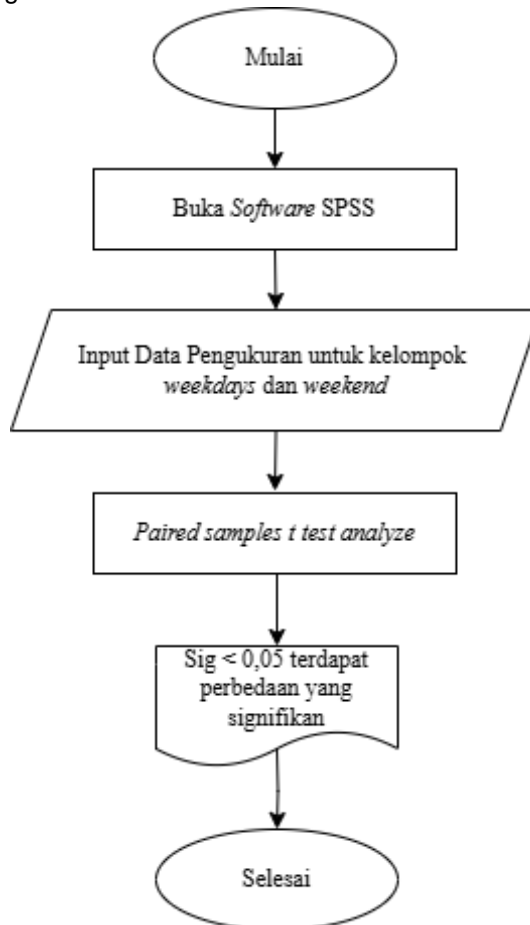
Uji normalitas digunakan untuk menentukan apakah data sampel berasal dari distribusi normal atau tidak. Uji normalitas perlu dilakukan untuk menentukan jenis uji statistik yang akan dilakukan selanjutnya. *Flowchart* uji normalitas dapat dilihat pada gambar 19 berikut.



Gambar 14. *Flowchart* Uji Normalitas

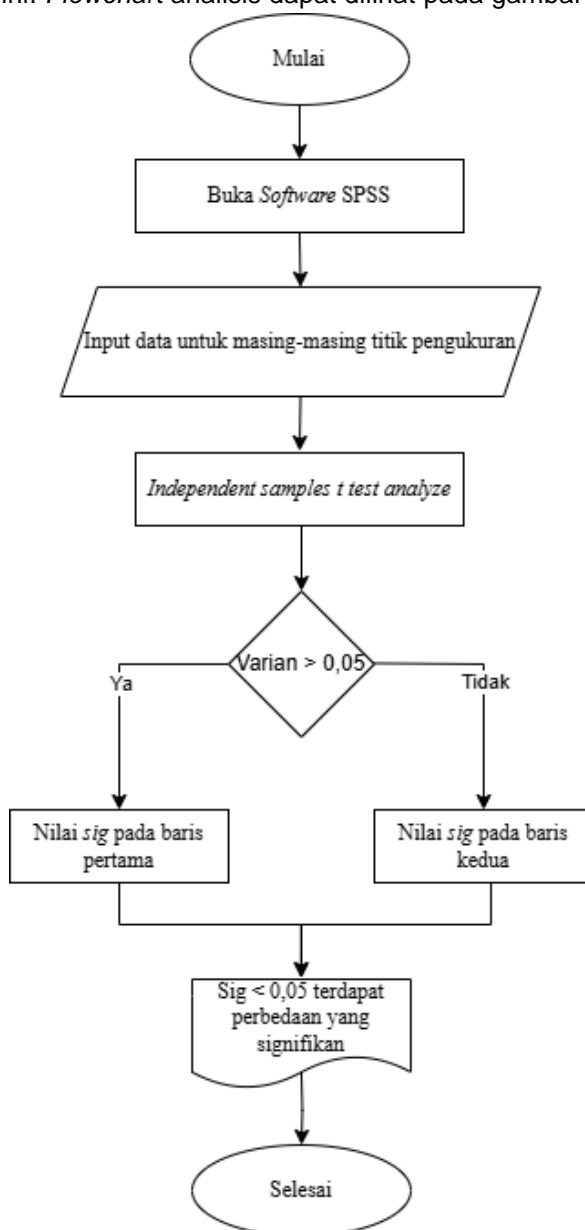
3.6.2 Uji t-test

Uji T berpasangan (*Paired t-test*). Uji t berpasangan digunakan untuk membandingkan rata-rata dari dua kelompok data yang berpasangan. Data berpasangan berarti bahwa setiap pengamatan dalam satu kelompok data berhubungan secara langsung dengan pengamatan dalam kelompok data lainnya. Ini biasanya digunakan ketika data dikumpulkan dari subjek yang sama pada dua waktu yang berbeda seperti pada hari kerja dan hari libur. *Flowchart* analisis uji t dapat dilihat pada gambar 20 berikut.



Gambar 15. *Flowchart* Uji T berpasangan (*Paired t-test*)

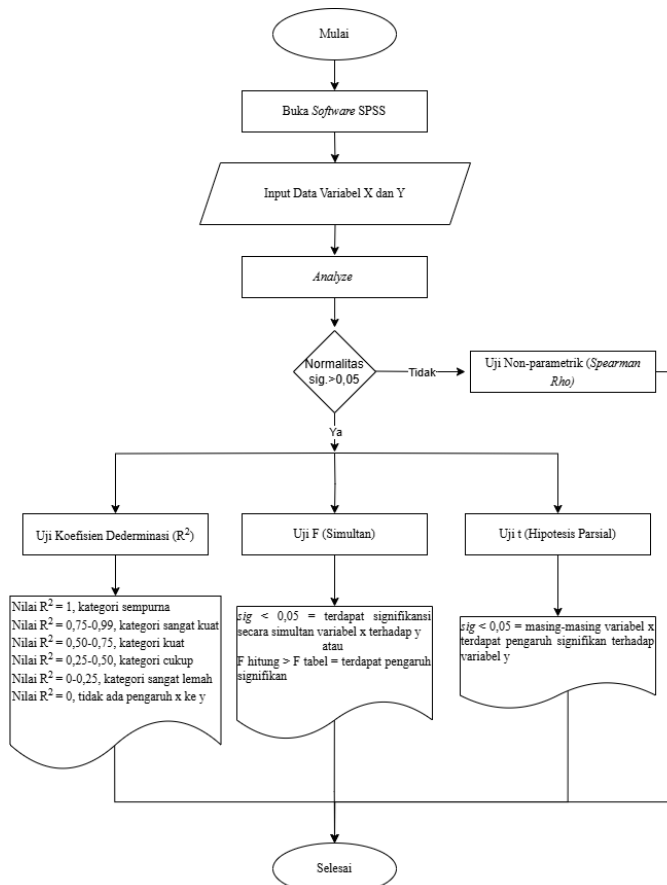
Uji T tidak berpasangan (*Independent t-test*). Uji t tidak berpasangan digunakan untuk membandingkan rata-rata dari dua kelompok data yang tidak berhubungan. Kelompok-kelompok ini independen satu sama lain, yang berarti tidak ada hubungan antara pengamatan dalam satu kelompok dengan pengamatan dalam kelompok lain. Dalam hal ini, uji perbandingan antar titik pengukuran dapat menggunakan uji ini. *Flowchart* analisis dapat dilihat pada gambar 21 berikut.



Gambar 16. *Flowchart* Uji T tidak berpasangan (*Independent t-test*)

2.6.3 Uji Regresi Berganda

Uji regresi berganda dilakukan menggunakan SPSS untuk menganalisis hubungan antara variabel independen dan dependen dalam penelitian. Hasil yang diperoleh mencakup uji koefisien determinasi, uji F (simultan), dan uji t (hipotesis parsial). Variabel independen (X) yang diuji meliputi data kendaraan dan meteorologi, sementara variabel dependen (Y) adalah konsentrasi *particulate matter* (PM). Uji koefisien determinasi digunakan untuk mengetahui seberapa besar variabel independen mampu menjelaskan variabilitas variabel dependen. Uji F dilakukan untuk mengetahui apakah variabel independen secara bersama-sama berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen. Sedangkan uji t digunakan untuk menguji pengaruh masing-masing variabel independen secara parsial terhadap variabel dependen. Adapun langkah-langkah analisis dapat dilihat pada gambar 22.



Gambar 17. Flowchart uji regresi berganda