

SKRIPSI

**ANALISIS TINGKAT PM₁, PM_{2.5}, DAN PM₁₀ PADA HALTE
BUS DI UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA**

Disusun dan diajukan oleh:

**PUTRI HUMAIRA SALSABILA
D131 19 1064**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS TINGKAT PM₁, PM_{2.5}, DAN PM₁₀ PADA HALTE BUS DI UNIVERSITAS KEBANGSAAN MALAYSIA

Disusun dan diajukan oleh


Putri Humaira Salsabila
D131191064

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 8 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


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


Zarah Arwienny Hanami, S.T., M.T.
NIP 199710272022044001

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Putri Humaira Salsabila
NIM : D131191064
Program Studi : Teknik Lingkungan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Tingkat PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_{10} pada Halte Bus di Universitas Kebangsaan Malaysia}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Putri Humaira Salsabila

ABSTRAK

PUTRI HUMAIRA SALSABILA. *Analisis Tingkat PM₁, PM_{2.5}, Dan PM₁₀ Pada Halte Bus Di Universiti Kebangsaan Malaysia* (dibimbing oleh Muralia Hustim dan Zarah Arwieny Hanami)

Pencemaran udara merupakan masalah global yang dihadapi sebagian besar negara di dunia. Di antaranya adalah Malaysia. Dewasa ini, penduduk kota besar memilih untuk berkendara dengan kendaraan pribadi meskipun sudah banyak transportasi umum yang layak. Hal ini berdampak pada peningkatan pencemar di udara akibat banyaknya kendaraan bermotor. Salah satunya di Universiti Kebangsaan Malaysia yang ramai oleh kendaraan pribadi serta *shuttle bus* yang berkeliling di dalam area kampus.

Tujuan dari penelitian ini yaitu menganalisis tingkat konsentrasi *Particulate Matter* (PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀) pada halte bus di UKM, menganalisis hubungan tingkat konsentrasi PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ dengan volume kendaraan, menganalisis hubungan tingkat konsentrasi PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ dengan temperatur dan kelembapan udara.

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif. Adapun parameter yang diamati yaitu konsentrasi *Particulate Matter* (PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀), volume kendaraan, temperatur, dan kelembapan udara menggunakan sensor *portable AS-LUNG*. Analisis data dilakukan dengan menggunakan SPSS 22 untuk mengetahui hubungan antar parameter.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat konsentrasi PM₁ berkisar dari $7.40 \pm 0.95 \mu\text{g m}^{-3}$ hingga $22.13 \pm 4.47 \mu\text{g m}^{-3}$, tingkat konsentrasi PM_{2.5} dari $10.30 \pm 1.09 \mu\text{g m}^{-3}$ hingga $31.83 \pm 5.92 \mu\text{g m}^{-3}$ (Baik hingga Sedang), dan tingkat konsentrasi PM₁₀ dari $12.02 \pm 1.25 \mu\text{g m}^{-3}$ hingga $36.48 \pm 8.31 \mu\text{g m}^{-3}$ (Baik) (BMKG, 2023), volume kendaraan ringan, kendaraan berat, dan sepeda motor berpengaruh terhadap tingkat konsentrasi PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ yang ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi (R) berkisar dari 0.861 hingga 0.886 (sangat kuat) untuk kendaraan ringan, sedangkan untuk kendaraan berat nilai R dari 0.694 hingga 0.749 (kuat), serta untuk sepeda motor nilai R dari 0.619 hingga 0.698 (kuat), adapun temperatur dan kelembapan udara berpengaruh terhadap tingkat konsentrasi PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ yang ditunjukkan oleh nilai R dari 0.360 hingga 0.385 (rendah) untuk temperatur, sedangkan untuk kelembapan udara nilai R dari 0.514 hingga 0.547 (sedang).

Kata Kunci: Konsentrasi PM, Volume Kendaraan, Temperatur dan Kelembapan Udara

ABSTRACT

PUTRI HUMAIRA SALSABILA. *Analysis of PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ Levels at Bus Stops in Universiti Kebangsaan Malaysia* (supervised by Muralia Hustim and Zarah Arwieny Hanami)

Air pollution is a global problem faced by most countries in the world. Among them is Malaysia. Today, prominent city residents prefer to drive by a private vehicle even though there is plenty of decent public transportation. This impacts increasing air pollution due to the large number of motorized vehicles. One is at Universiti Kebangsaan Malaysia, which is busy with private vehicles and shuttle buses around the campus area.

The purpose of this study was to analyze the Particulate Matter (PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀) concentration at bus stops in UKM, to analyze the relationship between the PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ concentration with vehicle volume, to analyze the relationship between the PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ concentration with temperature and humidity.

This research is quantitative descriptive. The parameters observed were the Particulate Matter (PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀) concentration, vehicle volume, temperature, and humidity using the AS-LUNG portable sensor. Data analysis was performed using SPSS 22 to determine the relationship between parameters.

The results showed that PM₁ concentration ranged from $7.40 \pm 0.95 \mu\text{g m}^{-3}$ to $22.13 \pm 4.47 \mu\text{g m}^{-3}$, PM_{2.5} concentration from $10.30 \pm 1.09 \mu\text{g m}^{-3}$ to $31.83 \pm 5.92 \mu\text{g m}^{-3}$ (Good to Moderate), and PM₁₀ concentration from $12.02 \pm 1.25 \mu\text{g m}^{-3}$ to $36.48 \pm 8.31 \mu\text{g m}^{-3}$ (Good), light vehicles, heavy vehicles, and motorcycles volume effects PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ concentration as indicated by correlation coefficient (R) values from 0.861 to 0.886 (very strong) for light vehicles, while for heavy vehicles the R values from 0.694 to 0.749 (strong), and for motorcycles the R values from 0.619 to 0.698 (strong), and temperature and humidity affects the PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ concentration as indicated by the R values from 0.360 to 0.385 (low) for temperature, while for relative humidity the R values from 0.514 to 0.547 (moderate).

Keywords: PM Concentration, Vehicle Volume, Temperature and Humidity

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Udara.....	6
2.2 Pencemaran Udara	6
2.3 Partikulat di Udara	8
2.4 <i>Particulate Matter</i> (PM)	9
2.5 Dispersi Polutan	15
2.6 Faktor-faktor Meteorologi yang Mempengaruhi Dispersi Polutan.....	15
2.7 Emisi Kendaraan Bermotor.....	19
2.8 Klasifikasi Kendaraan	21
2.9 Baku Mutu Udara di Malaysia	21
2.10Klasifikasi Nilai PM.....	22
2.11Alat <i>Low-Cost Sensor</i>	24
2.12Perhitungan	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	29
3.2 Bagan Alir Penelitian	33
3.3 Alat yang Digunakan	35
3.4 Metode Pengambilan Data.....	36
3.5 Analisis Data	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Tingkat Konsentrasi <i>Particulate Matter</i> (PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀)	40
4.2 Volume Kendaraan	45
4.3 Temperatur dan Kelembapan Udara	48
4.4 Rekapitulasi Volume Kendaraan, Temperatur, dan Kelembapan Udara	51
4.5 Hubungan Tingkat Konsentrasi <i>Particulate Matter</i> (PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀) dengan Volume Kendaraan	52
4.6 Hubungan Tingkat Konsentrasi <i>Particulate Matter</i> (PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀) dengan Temperatur.....	64

4.7 Hubungan Tingkat Konsentrasi <i>Particulate Matter</i> (PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀) dengan Kelembapan Udara	67
4.8 Rekapitulasi Hasil Analisis Hubungan Tingkat Konsentrasi PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀ dengan Volume Kendaraan, Temperatur, dan Kelembapan Udara	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	74
5.1 Kesimpulan	74
5.2 Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Contoh pengaplikasian klasifikasi nilai $PM_{2.5}$	23
Gambar 2	Contoh pengaplikasian klasifikasi nilai PM_{10}	23
Gambar 3	Sensor <i>portable</i> AS-LUNG.....	24
Gambar 4	Bagian-bagian sensor <i>portable</i> AS-LUNG	24
Gambar 5	Layar display sensor <i>portable</i> AS-LUNG.....	25
Gambar 6	Lokasi penelitian	29
Gambar 7	Halte bus Fakultas Sains Sosial dan Kemanusiaan (Titik 1).....	30
Gambar 8	Halte bus Fakultas Sains dan Teknologi (Titik 2).....	30
Gambar 9	Halte bus Kolej Rahim Kajai (Titik 3).....	31
Gambar 10	Halte bus Kolej Ungku Omar (Titik 4)	31
Gambar 11	Sketsa Pengukuran (Tampak Atas)	32
Gambar 12	Sketsa Pengukuran (Tampak Depan)	32
Gambar 13	Rute <i>shuttle bus</i>	33
Gambar 14	Alat yang digunakan.....	35
Gambar 15	Tingkat konsentrasi PM_1	40
Gambar 16	Tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$	41
Gambar 17	Tingkat konsentrasi PM_{10}	43
Gambar 18	Volume kendaraan pada hari kerja.....	46
Gambar 19	Volume kendaraan pada hari libur	47
Gambar 20	Rata-rata temperatur pada hari kerja	48
Gambar 21	Rata-rata temperatur pada hari libur.....	49
Gambar 22	Rata-rata kelembapan udara pada hari kerja	50
Gambar 23	Rata-rata kelembapan udara pada hari libur.....	51
Gambar 24	Hubungan tingkat konsentrasi PM_1 dengan volume kendaraan total.....	53
Gambar 25	Hubungan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan volume kendaraan total.....	54
Gambar 26	Hubungan tingkat konsentrasi PM_{10} dengan volume kendaraan total.....	54
Gambar 27	Hubungan tingkat konsentrasi PM_1 dengan volume kendaraan ringan.....	56
Gambar 28	Hubungan tingkat konsentrasi PM_1 dengan volume kendaraan berat.....	57
Gambar 29	Hubungan tingkat konsentrasi PM_1 dengan volume sepeda motor....	57
Gambar 30	Hubungan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan volume kendaraan ringan.....	58
Gambar 31	Hubungan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan volume kendaraan berat.....	59
Gambar 32	Hubungan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan volume sepeda motor..	60
Gambar 33	Hubungan tingkat konsentrasi PM_{10} dengan volume kendaraan ringan.....	60
Gambar 34	Hubungan tingkat konsentrasi PM_{10} dengan volume kendaraan berat.....	61
Gambar 35	Hubungan tingkat konsentrasi PM_{10} dengan volume sepeda motor ..	62
Gambar 36	Hubungan tingkat konsentrasi PM_1 dengan temperatur	64

Gambar 37 Hubungan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan temperatur	65
Gambar 38 Hubungan tingkat konsentrasi PM_{10} dengan temperatur.....	66
Gambar 39 Hubungan tingkat konsentrasi PM_1 dengan kelembapan udara	68
Gambar 40 Hubungan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan kelembapan udara	69
Gambar 41 Hubungan tingkat konsentrasi PM_{10} dengan kelembapan udara.....	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Standard Baru Kualiti Udara Ambien Malaysia	22
Tabel 2	Klasifikasi Nilai PM.....	22
Tabel 3	Pedoman interpretasi koefisien korelasi.....	27
Tabel 4	Rekapitulasi tingkat konsentrasi PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀	44
Tabel 5	Rekapitulasi volume kendaraan, temperatur, dan kelembapan udara.....	52
Tabel 6	Rekapitulasi nilai koefisien korelasi, determinasi, dan signifikansi hubungan tingkat konsentrasi PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀ dengan volume kendaraan	62
Tabel 7	Rekapitulasi nilai koefisien korelasi, determinasi, dan signifikansi hubungan tingkat konsentrasi PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀ dengan temperatur.....	66
Tabel 8	Rekapitulasi nilai koefisien korelasi, determinasi, dan signifikansi hubungan tingkat konsentrasi PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀ dengan temperatur.....	70
Tabel 9	Rekapitulasi hasil analisis hubungan tingkat konsentrasi PM ₁ , PM _{2.5} , dan PM ₁₀ dengan volume kendaraan, temperatur, dan kelembapan udara.....	72

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
\bar{x}	Nilai rata-rata
$\sum x$	Jumlah seluruh data pada populasi
n	Jumlah populasi
Y'	Nilai <i>estimate</i> variabel terikat
a	Titik potong garis regresi pada sumbu y
b	Gradien garis regresi
X	Nilai variabel bebas
R	Nilai koefisien korelasi
R^2	Nilai koefisien determinasi
PM	<i>Particulate Matter</i>
UKM	Universiti Kebangsaan Malaysia

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Tingkat konsentrasi PM ₁ , PM _{2.5} , & PM ₁₀	83
Lampiran 2	Volume kendaraan	84
Lampiran 3	Rata-rata temperatur dan kelembapan udara	85
Lampiran 4	Hasil analisis hubungan konsentrasi PM dengan volume kendaraan total.....	86
Lampiran 5	Hasil uji homogenitas SPSS	88
Lampiran 6	Hasil analisis hubungan konsentrasi PM dengan volume kendaraan (berdasarkan jenis kendaraan).....	89
Lampiran 7	Hasil analisis hubungan konsentrasi PM dengan temperatur	93
Lampiran 8	Hasil analisis hubungan konsentrasi PM dengan kelembapan udara.....	95
Lampiran 9	Dokumentasi	97

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kehadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* atas berkat, rahmat, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Analisis Tingkat PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀ pada Halte Bus di Universiti Kebangsaan Malaysia**” ini.

Pencapaian ini tidak terlepas dari bantuan, jasa-jasa, serta dukungan banyak pihak. Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mengalami hambatan, namun berkat bantuan, bimbingan, nasehat, dan doa dari berbagai pihak yang membuat penulis semangat dan mampu dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya.

Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat, penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga tercinta, Papa Ir. Sukma Jaya, Ummi Nur Anny Suryaningsih Taufieq, S.P., M.Si., Ph.D., dan adik tersayang, Aisyah Aulia Savitri yang telah mencurahkan segala cinta, perhatian, dan kasih sayang, tak henti memberi dukungan, bantuan, serta doa yang tiada henti sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Ibu Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan Dosen Pembimbing I atas segala ilmu yang bermanfaat, waktu yang telah diluangkan ditengah kesibukan, serta arahan dan bimbingan selama proses penyusunan tugas akhir.
5. Ibu Zarah Arwieny Hanami, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II atas segala ilmu yang telah diajarkan, waktu yang telah diluangkan ditengah kesibukan, kesabaran untuk membimbing penulis, semangat serta motivasi yang tiada henti diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Prof. Dr. Mohd. Talib Latif dari Universiti Kebangsaan Malaysia selaku pembimbing Kerja Praktik yang telah membantu penulis dalam proses pengambilan data.

7. Bapak/Ibu Dosen Departemen Teknik Lingkungan atas didikan, ilmu yang bermanfaat dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan selama kurang lebih empat tahun.
8. Seluruh staf dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuannya selama penulis menempuh perkuliahan terkhusus kepada Ibu Sumiati, Kak Olan, dan Kak Tami sebagai staf S1 Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin.
9. Nurhaedah Azzahra, sebagai rekan penelitian dan rekan KP yang telah membantu penulis dalam proses pengambilan data di bawah terik matahari Universiti Kebangsaan Malaysia, hingga berjalan kaki dari satu titik pengukuran ke titik lainnya jika *shuttle bus* kampus tidak lewat-lewat juga, serta membantu dan menyemangati dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
10. Teman-teman seperjuangan sedari maba, Fitri Wulandari, Mustabsirah Sabiq, Nila Fitra Andini, Muhammad Firmansyah, Muhammad Rifqi Syech Putra, dan Buya Ibnu Fulqan, yang telah memberikan semangat, membantu, menemani, dan tidak henti-hentinya memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
11. Sektor Pallangga, Nurul Azrina, Muhammad Farhan, dan Muhammad Faiz Mubarak Nurjaya, yang selalu ada kapanpun penulis memerlukan bantuan dan dukungan.
12. Teman-teman Teknik Lingkungan 2019, yang telah menemani, membantu, dan mewarnai masa-masa perkuliahan.
13. Teman-teman Portland 2020, atas segala bantuan, cerita, dan kenangan selama perkuliahan.
14. Seluruh keluarga, teman, dan berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, penulis mengucapkan terima kasih atas setiap bantuan dan doa yang diberikan.

Gowa, 26 Juni 2023

Putri Humaira Salsabila

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Udara merupakan salah satu faktor paling penting dalam kehidupan manusia sehingga menjaga kualitas udara sangat penting untuk dilakukan. Hal tersebut merupakan latar belakang adanya standar baku mutu yang diterapkan suatu negara terhadap kualitas udara. Adanya faktor-faktor pencemar menjadi penyebab timbulnya pencemaran udara yang dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, tidak hanya bagi manusia, namun juga bagi makhluk hidup lainnya.

Pencemaran udara merupakan masalah global yang dihadapi oleh sebagian besar kota di dunia. Pencemaran udara didefinisikan sebagai penurunan kualitas udara sehingga kualitas udara memburuk, yang pada akhirnya tidak dapat digunakan sebagaimana peruntukannya. Pencemaran udara selalu mengacu pada sumber penyebab pencemaran udara, yaitu sumber bergerak (biasanya kendaraan bermotor) dan sumber tidak bergerak (biasanya kegiatan industri), sedangkan pengendaliannya selalu dikaitkan dengan seperangkat tindakan pengendalian yang berasal dari standar baku mutu (Simarmata et al., 2022).

Salah satu negara yang menghadapi isu pencemaran udara yaitu Malaysia. Malaysia merupakan salah satu negara yang terletak di Asia Tenggara. Letak geografis Malaysia terdiri dari dua bagian besar wilayah daratan yaitu Malaysia Barat yang disebut Semenanjung (Peninsula) Malaysia dan Malaysia Timur yang meliputi Sabah dan Sarawak. Pada 2019, Malaysia yang berpenduduk 32,7 juta jiwa terdiri dari 69,3% etnis Melayu, 22,8% etnis Tionghoa, 6,9% etnis India, dan 1,0% etnis lain (Malaysia, 2019).

Di Malaysia, polusi udara telah menjadi masalah besar yang menjadi perhatian publik. Malaysia menduduki peringkat ketiga negara tertinggi untuk emisi polutan di Asia Tenggara setelah Indonesia dan Thailand. Polusi udara terus-menerus menjadi berita utama di sebagian besar surat kabar dan kemudian meningkatkan kecemasan warga (Kamaruzzaman et al., 2017). Sumber utama polusi udara di Malaysia adalah sumber bergerak, industri, dan pembakaran terbuka, dengan sumber bergerak menjadi kontributor utama. Sumber polusi

bergerak meliputi emisi dari sektor transportasi, yang bertanggung jawab atas 68,5% total emisi di Malaysia (Bazrbachi et al., 2017).

Dewasa ini, penduduk kota-kota besar memilih untuk berkendara dengan kendaraan pribadi meskipun sudah banyak transportasi umum yang layak. Hal ini tentu saja berdampak pada peningkatan pencemar di udara akibat banyaknya kendaraan bermotor. Pada tahun 1998, terdapat 7,7 juta kendaraan bermotor yang terdaftar di Jabatan Pengangkutan Jalan Malaysia (Departemen Transportasi Jalan Malaysia). Jumlahnya terus meningkat dari tahun ke tahun dan terdapat 10,6 juta kendaraan bermotor yang terdaftar pada tahun 2001 (Halim et al., 2018). Pada tahun 2019, jumlah kendaraan bermotor yang terdaftar yaitu 30,501,890 dan meningkat menjadi 31,641,647 pada tahun 2020 (Department of Environment, 2020a).

Masalah polusi lalu lintas yang terjadi tentu saja disebabkan oleh kombinasi faktor manusia dan lingkungan. Faktor manusia meliputi pengaruh dan keterlibatan penduduk dan komunitas lokal dalam menciptakan masalah polusi lalu lintas yang serius sehingga berdampak negatif pada kesehatan individu. Faktor lingkungan meliputi beberapa aspek penting seperti kendaraan bermotor, pengaruh urbanisasi, dan penggunaan lahan. Oleh karena itu, pencemaran lalu lintas perkotaan di Malaysia diidentifikasi sebagai masalah lingkungan serius yang perlu mendapat perhatian dan fokus utama dari berbagai pihak. Hal ini dikarenakan dampak yang ditimbulkan mengakibatkan gangguan dan penurunan kualitas udara lingkungan yang menyebabkan terjadinya perubahan iklim dalam skala global disamping adanya berbagai penyakit berbahaya bagi penduduk setempat (Shafie & Mahmud, 2020).

Di Bangi, Selangor, Malaysia, terdapat berbagai fasilitas yang digunakan oleh masyarakat setempat, seperti fasilitas pendidikan, fasilitas kesehatan, fasilitas sosial, dan masih banyak lagi. Kota ini juga dilengkapi dengan pusat perbelanjaan, deretan tempat makan, pusat olahraga, bioskop, arena bowling, dan sistem transportasi umum yang baik. Salah satu fasilitas pendidikan yang terdapat di Kota Bangi yaitu Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM). Kampus ini terletak 45 menit dari bandara internasional KLIA (Kuala Lumpur International Airport) dan dapat diakses dengan transportasi darat dan kereta api.

Universiti Kebangsaan Malaysia terdiri dari 13 fakultas, 10 asrama mahasiswa (kolej kediaman), dan beberapa institut penelitian. Kampus ini juga memiliki aula utama, masjid, pusat-pusat olahraga, perpustakaan, dan beberapa fasilitas pendukung lainnya. Kampus ini memiliki 22.605 mahasiswa yang terdiri dari 17.500 mahasiswa Strata 1 (S1) dan 5.105 mahasiswa pascasarjana dimana 1.368 mahasiswa merupakan mahasiswa asing yang berasal dari 35 negara. Kampus ini berukuran 1.096 hektar dan dapat diakses salah satunya dengan Rapid KL (sistem transportasi bus), namun kampus juga memiliki *shuttle bus* gratis yang terbagi menjadi 3 rute (zon), yaitu UKM Zone 2, UKM Zone 3, dan UKM Zone 6.

Adanya *shuttle bus* ini sangat memudahkan mahasiswa dalam mengakses berbagai tempat di dalam kawasan kampus. Terlebih lagi karena frekuensi *shuttle bus* ini yang juga banyak dan berjarak paling lama 30 menit dengan bus berikutnya untuk rute yang sama. Karena luasnya kampus dan beragamnya fakultas, asrama, dan institut, maka jumlah halte bus di kampus dapat dikategorikan banyak. Selain *shuttle bus*, mahasiswa juga mengendarai kendaraan pribadi dalam kawasan kampus. Hal ini tentu saja meningkatkan jumlah kendaraan bermotor yang terdapat di dalam kampus. Menurut (Nurhalifa et al., 2022), konsumsi bahan bakar kendaraan bermotor yang semakin meningkat dapat mengakibatkan meningkatnya pencemaran udara akibat pembakaran mesin kendaraan, terutama pembakaran tidak sempurna akibat terabaikannya perawatan mesin kendaraan. Salah satu polutan yang dilepaskan langsung ke udara dari kendaraan bermotor yaitu *Particulate Matter* (PM).

Particulate Matter (PM) adalah klasifikasi fisik umum partikel udara seperti debu, kotoran, jelaga dan asap. PM tidak merujuk pada entitas kimia tertentu tetapi merupakan campuran partikel dari berbagai sumber dengan ukuran, komposisi, dan sifat yang berbeda (Sibarani et al., 2021).

Partikulat dianggap sebagai salah satu pencemar paling utama yang berdampak bagi kesehatan. Efek akut paparan jangka pendek partikulat (PM_{2.5} dan PM₁₀) meningkatkan jumlah kematian akibat penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Adapun efek non-akut dari paparan jangka pendek partikulat yaitu dapat memperburuk gejala asma dan menyebabkan penurunan produktivitas akibat badan terasa tidak nyaman (Ihsan et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan

adanya penelitian ini untuk mengetahui tingkat *Particulate Matter* (PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10}) akibat kendaraan bermotor di beberapa halte bus yang terdapat di Universiti Kebangsaan Malaysia.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana tingkat konsentrasi *Particulate Matter* (PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10}) pada halte bus di Universiti Kebangsaan Malaysia?
2. Bagaimana hubungan tingkat konsentrasi *Particulate Matter* (PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10}) dengan volume kendaraan?
3. Bagaimana hubungan tingkat konsentrasi *Particulate Matter* (PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10}) dengan temperatur dan kelembapan udara?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis tingkat konsentrasi *Particulate Matter* (PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10}) pada halte bus di Universiti Kebangsaan Malaysia.
2. Menganalisis hubungan tingkat konsentrasi *Particulate Matter* (PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10}) dengan volume kendaraan.
3. Menganalisis hubungan tingkat konsentrasi *Particulate Matter* (PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10}) dengan temperatur dan kelembapan udara.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu:

1. Sebagai pemenuhan syarat untuk menyelesaikan studi Strata 1 (S1) dan mendapatkan gelar Sarjana Teknik (ST) di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
2. Sebagai bahan arsip penelitian dan referensi tambahan bagi para peneliti selanjutnya, khususnya terkait tingkat *Particulate Matter* (PM).

3. Sebagai bahan masukan kepada pemerintah dan masyarakat dalam melakukan bentuk pengendalian yang dapat dilakukan untuk mengurangi tingkat *Particulate Matter* (PM) tersebut.

1.5 Ruang Lingkup

Berdasarkan identifikasi masalah di atas, permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini perlu dibatasi. Tujuan dari pembatasan masalah ini adalah untuk menarik perhatian penelitian dengan kesimpulan yang tepat dan menyeluruh tentang aspek yang diteliti. Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Tingkat *Particulate Matter* (PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀) yang akan dianalisis berasal dari lalu lintas yang terdapat di depan beberapa halte bus di Universiti Kebangsaan Malaysia.
2. Pengambilan data tingkat *Particulate Matter* (PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀) pada halte bus di Universiti Kebangsaan Malaysia dilakukan selama hari kerja dan hari libur dengan waktu pengukuran di lapangan selama 1 jam per periode pengukuran (1 jam di pagi hari (08.00-11.30), 1 jam di siang hari (12.30-15.00), dan 1 jam di sore hari (15.30-18.30)).
3. Pengambilan data tingkat *Particulate Matter* (PM₁, PM_{2.5}, dan PM₁₀) pada halte bus di Universiti Kebangsaan Malaysia dilakukan bersamaan dengan pengambilan data volume kendaraan, temperatur, dan kelembapan udara.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Udara

Menurut (Nabillah & Nugraha, 2017), udara adalah campuran gas yang ada pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas yang terdapat pada lapisan tersebut tidak selalu konstan. Komponen yang paling bervariasi konsentrasinya adalah air berupa uap H₂O dan karbon dioksida (CO₂). Jumlah uap air di udara bervariasi tergantung pada cuaca dan temperatur.

Sedangkan menurut (Pratomo, 2019), udara adalah campuran mekanis dari berbagai gas dan bukan senyawa kimia. Udara adalah komponen atmosfer terestrial yang membentuk zona kehidupan di permukaan bumi. Udara terdiri dari berbagai gas dengan konsentrasi tetap di permukaan bumi, kecuali metana, amonia, hidrogen sulfida, karbon monoksida, dan nitro-oksida, yang konsentrasinya bervariasi berdasarkan wilayah/lokasi. Secara umum, konsentrasi metana, amonia, hidrogen sulfida, karbon monoksida, dan nitro-oksida sangat tinggi di daerah rawa atau industri kimia.

Menurut (Indonesia, 1999), udara ambien adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfir yang berada di dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya. Jika perubahan komposisi udara alami melebihi konsentrasi tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya, maka dikatakan udara tersebut telah tercemar.

2.2 Pencemaran Udara

Menurut (Indonesia, 1999), pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak memenuhi fungsinya.

Pencemaran udara adalah suatu keadaan dimana atmosfer bumi mengandung zat-zat fisik, biologi atau kimiawi yang berbahaya bagi kesehatan tubuh manusia dan makhluk hidup lainnya. Pencemaran udara terbagi menjadi

pencemaran primer dan pencemaran sekunder. Polutan primer adalah polutan yang timbul langsung dari sumber pencemaran udara. Karbon dioksida (CO₂) adalah contoh polutan primer yang dihasilkan oleh pembakaran. Polutan sekunder adalah polutan yang dihasilkan dari reaksi polutan primer di atmosfer. Pembentukan ozon dalam kabut fotokimia adalah contoh polusi udara sekunder (Siburian, 2020).

Pencemaran udara didefinisikan sebagai adanya zat asing di udara atau zat yang menyebabkan perubahan susunan (komposisi) udara dari keadaan normalnya. Adanya zat asing di udara dalam jumlah tertentu dan dalam waktu yang lama di udara dapat mengganggu kehidupan manusia, hewan, dan makhluk hidup lainnya. Apabila situasi seperti itu terjadi, maka udara dapat dinyatakan telah tercemar (Dewi & Andarini, 2020).

Pencemaran udara dibagi menjadi dua kategori berdasarkan cara polutan masuk atau dimasukkan ke atmosfer, yaitu pencemaran primer (pencemar yang dilepaskan langsung dari sumber pencemar) dan pencemaran sekunder (pencemaran yang dihasilkan oleh proses kimiawi di atmosfer). Secara umum, sumber pencemaran udara ada dua, yaitu sumber alami (*natural source*) seperti letusan gunung berapi dan antropogenik (*anthropogenic sources*) seperti lalu lintas, emisi pabrik, dan sumber pencemar lainnya. Sumber pencemaran antropogenik adalah kegiatan manusia yang melepaskan polutan primer ke atmosfer. Ada dua kategori antropogenik, yaitu sumber tidak bergerak seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil, pabrik, rumah tangga, jasa dan lain-lain, dan sumber bergerak seperti truk, bus, pesawat dan kereta api (Hartarani et al., 2019).

Adapun klasifikasi sumber pencemar udara berdasarkan letaknya adalah sebagai berikut (Karunia, 2019):

1. Sumber pencemar udara dalam ruangan adalah aktivitas dalam ruangan yang menghasilkan polutan udara yang dapat mempengaruhi kualitas udara dalam ruangan, misalnya kegiatan sehari-hari seperti memasak, menyalin, melukis, bahan pembersih, radiasi *microwave*, dan sebagainya.
2. Sumber pencemar udara luar ruangan adalah kegiatan di luar ruangan yang dapat menimbulkan pencemaran udara yang dapat mempengaruhi kualitas

udara, seperti kegiatan transportasi, pembakaran sampah, cerobong asap industri, dan sebagainya.

Menurut (Hamanaka & Mutlu, 2018), polusi udara adalah campuran kompleks komponen gas dan partikulat, yang masing-masing memiliki efek merugikan bagi kesehatan manusia. Sementara komposisi polusi udara sangat bervariasi tergantung pada sumbernya, penelitian dari seluruh dunia secara konsisten menunjukkan bahwa polusi udara merupakan faktor risiko penting yang dapat dimodifikasi untuk meningkatkan morbiditas dan mortalitas secara signifikan.

Pencemaran udara mempengaruhi kehidupan masyarakat, bahkan membahayakan kelangsungan hidup umat manusia. Selama Revolusi Industri, terjadi peningkatan dramatis dalam penggunaan batu bara oleh pabrik dan rumah tangga, dan kabut asap menyebabkan morbiditas dan mortalitas yang signifikan, terutama bila digabungkan dengan kondisi atmosfer yang stagnan. Selama *Great London Smog* pada tahun 1952, polusi berat selama 5 hari menyebabkan sedikitnya 4000 kematian. Hal ini menyoroti hubungan antara polusi udara dan kesehatan manusia, namun polusi udara terus menjadi masalah yang berkembang di seluruh dunia. Polusi udara sendiri terdiri dari campuran gas dan partikel dalam jumlah berbahaya yang dilepaskan ke atmosfer karena aktivitas alam atau manusia. Secara umum, polusi udara tidak hanya merusak lingkungan lokal atau regional. Namun juga dapat menyebabkan kerusakan pada skala global. Bahan kimia buatan manusia tertentu telah merusak lapisan ozon pelindung bumi sehingga memungkinkan radiasi matahari yang lebih berbahaya merusak permukaan bumi (Bai et al., 2018).

2.3 Partikulat di Udara

Menurut (Arismaya & Hergiana, n.d.), partikulat merupakan salah satu sumber pencemar udara dengan diameter 0,1–100 μm . Berbagai proses alami menyebabkan penyebaran partikel ke atmosfer, seperti letusan gunung berapi dan debu, serta tanah yang tertiuip angin. Aktivitas manusia juga mempengaruhi penyebaran partikulat, misalnya melalui penyebaran partikel debu dan asbes dari bahan bangunan, *fly ash* dari peleburan baja, dan asap dari proses pembakaran

yang tidak sempurna terutama batu bara. Sumber utama partikel adalah pembakaran bahan bakar di sumbernya, diikuti oleh proses industri.

Menurut (Ihsan et al., 2021), partikulat dikenal sebagai pencemar utama yang berbahaya terhadap kesehatan. Hal ini mendapat banyak perhatian, terutama di negara-negara berkembang yang sedang mengalami proses urbanisasi akibat peningkatan industri dan transportasi. Partikulat yang terhirup manusia terkait erat dengan morbiditas (kesehatan dan penyakit) dan mortalitas (kematian), dengan sekitar 28% penyakit dan kematian disebabkan oleh materi partikulat dari polusi udara di negara berkembang.

Efek akut paparan jangka pendek terhadap partikel ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}) meningkatkan kematian akibat penyakit pernapasan dan kardiovaskular di rumah sakit. Pada saat yang sama, efek non-akut dari paparan jangka pendek terhadap partikel memperparah gejala asma dan penyakit fisik, yang mengakibatkan penurunan produktivitas (Ihsan et al., 2021).

Toksisitas partikel halus yang dihasilkan dari berbagai sumber pembakaran (mesin diesel, mesin bensin, pembakaran biomassa (pembakaran jerami padi dan batang pinus), dan pembakaran batu bara) dan sumber non-pembakaran (debu jalan termasuk aerosol semprotan laut, amonium sulfat, amonium nitrat, dan aerosol organik sekunder (SOA)), yang dikenal sebagai sumber utama $PM_{2.5}$, telah ditentukan. Skor toksisitas tertinggi diperoleh oleh partikel knalpot mesin diesel, diikuti oleh partikel knalpot mesin bensin, partikel pembakaran biomassa, partikel pembakaran batu bara, dan debu jalan, menunjukkan bahwa lalu lintas memainkan peran paling penting dalam meningkatkan efek toksik dari partikel halus (Park et al., 2018).

2.4 *Particulate Matter (PM)*

Particulate Matter (PM) adalah partikel debu tersuspensi di udara untuk waktu yang lama atau partikel debu yang ditemukan di udara, termasuk debu, kotoran, jelaga, dan asap (Ridayanti et al., 2022). *Particulate Matter* merupakan sumber emisi terbesar dan di udara ambient. Komponen-komponen terbesar PM terdiri dari sulfat, nitrat, ammonia, sodium klorida, karbon, debu mineral dan air (Amelia et al., 2018).

Menurut (Maziya, 2020), partikel udara secara umum dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

1. Partikel halus (*fine particle*) adalah partikel yang lebih kecil dari 2,5 μm .
2. Partikel kasar (*coarse particle*) adalah partikel yang berukuran lebih besar dari 2,5 μm .

Selanjutnya, berikut merupakan beberapa istilah yang dapat menggambarkan partikel berdasarkan pembentukan dan ukurannya (Maziya, 2020):

1. Debu (*dust*), yaitu aerosol padat yang dihasilkan oleh penghancuran material besar secara mekanis seperti penghancuran dan pendaratan. Ukuran partikel berkisar dari submikron hingga terlihat. Partikel kasar berukuran $> 2,5 \mu\text{m}$, sedangkan partikel halus berukuran $< 2,5 \mu\text{m}$.
2. *Fume* yaitu aerosol padat yang dibentuk oleh kondensasi uap atau gas pembakaran. Ukuran partikelnya kurang dari 1 μm . Definisi ini berbeda dari definisi yang diterima secara umum berdasarkan pada keberadaan polutan berbahaya.
3. Asap (*smoke*) yaitu aerosol yang terlihat dari pembakaran tidak sempurna. Ukuran partikelnya (padat atau cair) kurang dari 1 μm .
4. Kabut (*mist*) yaitu aerosol cair yang dihasilkan dari proses kondensasi atau atomisasi. Ukuran partikel berkisar dari submikron hingga 20 μm .

Particulate Matter memiliki bentuk cair dan padat. Ada juga yang memiliki inti padat tetapi dikelilingi cairan. Partikel-partikel ini terdiri dari ion organik, unsur karbon, senyawa organik, logam berat, dan senyawa lainnya. Beberapa partikel bersifat higroskopis dan mengandung partikel yang terikat pada air. Partikel organik kompleks yang mengandung ratusan atau ribuan senyawa organik. Partikel primer dilepaskan langsung dari sumbernya, sedangkan partikel sekunder terbentuk dari gas yang dihasilkan oleh reaksi kimia di atmosfer. Reaksi kimia di atmosfer meliputi oksigen atmosfer (O_2) dan uap air (H_2O), spesies reaktif seperti ozon (O_3), senyawa radikal seperti radikal hidroksi (COH) dan radikal nitrat (CNO_3), dan polutan organik (SO_2 , NO_x , dan gas organik, baik akibat aktivitas alam maupun kegiatan manusia). Ukuran merupakan faktor yang

menentukan sifat partikel. Ukuran biasanya dinyatakan dalam diameter aerodinamis, yang mengacu pada kerapatan unit partikel bola (Maziya, 2020).

Particulate Matter (PM) ditemukan secara alami dalam partikel garam, penguapan air laut, tanah, jamur, virus dan bakteri. Pada saat yang sama, aktivitas manusia menghasilkan partikel PM melalui aktivitas industri, kendaraan bermotor, listrik, dan hasil pembakaran. *Particulate Matter* (PM) muncul langsung dari emisi mesin diesel, pertanian, pengoperasian jalan raya, dan reaksi fotokimia dengan polutan (Maziya, 2020). Secara umum, sumber *Particulate Matter* (PM) terbagi menjadi dua yaitu alami dan antropogenik atau buatan. Sumber alami termasuk gunung berapi, kebakaran, badai pasir, dan aerosol garam laut. Sumber *Particulate Matter* (PM) buatan manusia termasuk pembakaran dalam proses mekanis, proses pembakaran fosil, pembakaran biomassa, emisi industri dan kendaraan (Murniasih et al., 2020). Selain itu, lalu lintas kendaraan bermotor juga dapat meningkatkan kadar partikulat debu yang berasal dari permukaan jalan, komponen ban, dan rem (Gunawan et al., 2018).

Pengaruh permukaan jalan dan berat muatan kendaraan merupakan faktor pendukung terbentuknya PM yang saling berkaitan erat. Dimana besar gesekan antara ban dan jalan merupakan hasil kali dari koefisien kekasaran permukaan jalan dan berat dari kendaraan serta percepatan gravitasi bumi, maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar tingkat kekasaran permukaan dan semakin berat kendaraan akan menghasilkan gesekan yang besar pula. Begitu pula dengan kapasitas mesin, semakin besar kapasitas mesin kendaraan bermotor, maka semakin besar pula kebutuhan bahan bakarnya sehingga PM yang terbentuk akibat pembakaran yang tidak sempurna akan semakin besar juga (Kusuma et al., 2022).

Kecepatan kendaraan juga berpengaruh terhadap tinggi rendahnya konsentrasi PM. Pengaruhnya terhadap gesekan ban dan jalan yaitu semakin tinggi kecepatan kendaraan melaju maka gesekan antara ban dan permukaan jalan juga akan semakin besar, sehingga PM yang terbentuk juga semakin besar. Hal ini disebabkan oleh besar gesekan yang merupakan hasil kali antara berat kendaraan dikalikan dengan kecepatan yang diberikan oleh kendaraan. Selain itu, pengaruhnya terhadap asap knalpot kendaraan adalah semakin lambat kendaraan melaju, maka semakin besar PM yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan asap

knalpot yang dihasilkan akan lebih cepat terakumulasi di sepanjang jalan yang dilewati (Kusuma et al., 2022).

Adapun sumber *Particulate Matter* berdasarkan ukuran diameternya yaitu sebagai berikut:

1. Partikulat yang sangat halus dengan diameter $\leq 0,1 \mu\text{m}$ dihasilkan dari konversi SO_2 dan senyawa organik baik di atmosfer maupun oleh proses kimia pada temperatur tinggi.
2. Partikulat dalam keadaan akumulasi dengan diameter $0,1 \mu\text{m}$ sampai $3 \mu\text{m}$. Partikulat ini dihasilkan oleh pembakaran fosil seperti minyak dan batu bara, pembakaran kayu bakar, konversi sulfur dioksida, NO_x dan senyawa organik, dan operasi temperatur tinggi seperti pabrik baja atau peleburan logam.
3. Partikulat yang kasar berdiameter $> 3 \mu\text{m}$, yang dihasilkan dari pembuangan tanah dari jalan raya, konstruksi, dan pembakaran minyak dan batu bara yang tidak terkendali.

Particulate Matter (PM) di udara, masuk ke dalam tubuh setiap kali manusia bernapas. Di paru-paru, PM memiliki efek fisik langsung dan/atau diserap ke dalam darah. Setiap orang terpapar pada tingkat tertentu, kecuali di lingkungan yang disaring secara khusus. Paparan di daerah perkotaan dan industri memiliki kemungkinan yang lebih besar, tetapi tidak terkecuali di daerah dengan lingkungan yang alami (Maziya, 2020).

Studi klinis umumnya menunjukkan dampak lebih besar polusi udara partikulat (PM) terhadap kesehatan daripada komponen gas. PM memiliki efek merusak yang luas pada kesehatan manusia, terutama pada sistem kardiovaskular. Paparan polusi udara PM akut dan kronis dikaitkan dengan peningkatan risiko kematian akibat penyakit kardiovaskular (Hamanaka & Mutlu, 2018). Penyakit saraf juga telah dilaporkan dapat diakibatkan oleh PM, termasuk hipertensi, aterosklerosis, infark miokard akut, stroke, kehilangan fungsi kognitif, kecemasan, serta penyakit Parkinson dan Alzheimer (Arias-Pérez et al., 2020).

Selain manusia, partikulat di udara dapat melemahkan aktivitas ekosistem karena partikel tersebut lepas ke tanah. Siklus mineral juga menjadi lebih sulit dengan menghilangkan logam berat dari partikulat. Partikulat pada permukaan

material dapat menyebabkan erosi pada material bangunan. Hal ini juga mengganggu estetika bangunan dan struktur tanah. Pada tumbuhan, partikulat pada permukaan daun menutupi stomata sedemikian rupa sehingga menutup saluran gas dan uap air ke dalam struktur daun. Akibatnya, kapasitas fotosintesis daun menurun dan pertumbuhan vegetasi juga melambat (Maziya, 2020).

Adapun Particulate Matter terbagi menjadi beberapa bagian berdasarkan ukurannya, yaitu PM_1 , $PM_{2.5}$, dan PM_{10} .

2.4.1 PM_1

PM_1 adalah komponen utama dari $PM_{2.5}$. Namun, PM_1 mungkin berbeda dari $PM_{2.5}$ dalam hal sifat fisikokimia (misalnya rasio luas permukaan terhadap massa yang lebih tinggi dan komposisi kimia yang lebih beracun). PM_1 dapat memiliki efek kesehatan yang lebih merusak daripada $PM_{2.5}$ (B.-Y. Yang et al., 2019).

Bukti bahkan menunjukkan bahwa PM_1 terdapat lebih dari 80% dibanding $PM_{2.5}$ di Cina. Dibandingkan dengan $PM_{2.5}$, PM_1 memiliki ukuran diameter yang lebih kecil, tetapi memiliki rasio luas permukaan terhadap massa yang lebih tinggi, dan membawa lebih banyak racun dari emisi antropogenik. Dengan demikian, PM_1 dapat menembus lebih dalam ke alveoli paru-paru dan memiliki peluang lebih tinggi untuk mempengaruhi kesehatan manusia (B.-Y. Yang et al., 2019).

Partikel PM_1 memiliki potensi yang lebih besar untuk interaksi biologis yang merusak dengan jaringan pernapasan dan risiko untuk hasil kesehatan yang merugikan. Namun, PM_1 tidak diukur secara rutin karena tidak terdapat pada standar kualitas udara di sebagian besar negara dan data untuk mengkarakterisasi paparan yang tersedia terbatas (M. Yang et al., 2018).

2.4.2 $PM_{2.5}$

Particulate Matter 2.5 yang disingkat $PM_{2.5}$ merupakan partikel udara yang memiliki ukuran $\leq 2.5 \mu\text{m}$. Paparan $PM_{2.5}$ dapat merusak fungsi paru-paru dan memperburuk kondisi kesehatan seperti asma, bronkitis, dan kanker paru-paru. $PM_{2.5}$ berasal dari berbagai sumber seperti hasil pembakaran BBM pada kendaraan bermotor dan kebakaran hutan (Ruchjana et al., 2021). $PM_{2.5}$

merupakan salah satu penyebab masalah kesehatan seperti ISPA pada anak, penyakit obstruksi kronis, asma, dan kanker paru-paru (Ridayanti et al., 2022).

PM_{2.5} terutama berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, termasuk lalu lintas jalan raya, pembangkit listrik, pemanas industri dan perumahan menggunakan minyak, batu bara, atau kayu. Partikel yang terbentuk dengan cara ini umumnya terdiri dari karbon, logam transisi, molekul organik kompleks, sulfat, dan nitrat. Knalpot mesin kendaraan (terutama knalpot diesel) sangat kaya akan partikel nano, yang meskipun hanya menyumbang sebagian kecil dari total massa PM_{2.5}, memiliki luas permukaan reaktif yang lebih besar untuk massa tertentu (Lee et al., 2018).

Paparan partikel halus (PM_{2.5}) adalah faktor risiko lingkungan utama untuk beban penyakit global dengan perkiraan 3 juta kematian yang disebabkan di seluruh dunia pada tahun 2017. Selain itu, World Health Organization (WHO) memperkirakan bahwa 92% dari populasi dunia tinggal di daerah dengan PM_{2.5} rata-rata tahunan lebih besar dari 10 µg/m³, melebihi pedoman kualitas udara mereka untuk paparan PM_{2.5} (Hammer et al., 2020).

2.4.3 PM₁₀

Menurut (Organization, 2013), PM₁₀ adalah partikel yang lebih kecil dari 10 µm. PM₁₀ terdiri dari partikel berukuran sekecil 2.5 µm dan beberapa partikel kasar berukuran mulai dari 2.5 µm hingga 10 µm. Partikel-partikel ini terdiri dari berbagai ukuran, bentuk, dan ratusan bahan kimia yang berbeda. PM₁₀ berasal dari debu jalan, debu konstruksi, material handling, knalpot kendaraan, dan cerobong asap industri, serta dari kegiatan penghancuran dan penggilingan.

PM₁₀ merupakan pencemar udara yang tergolong pencemar primer (*primary pollutant*), yang masuk ke udara secara langsung dari sumber pencemar seperti kendaraan bermotor. Partikel kecil di udara dapat terhirup ke dalam saluran udara dan menyebabkan masalah pernapasan dan kerusakan paru-paru (Gunawan et al., 2018).

PM₁₀ juga menyebabkan berbagai masalah selain yang berkaitan dengan kesehatan manusia, seperti mengurangi jarak pandang di daerah berpenduduk dan merupakan faktor penting bagi perubahan iklim. Karena peristiwa polusi udara

yang serius sering terjadi, peran aktivitas manusia terhadap konsentrasi polutan udara termasuk PM_{10} telah diselidiki di beberapa kota besar di seluruh dunia. Studi-studi ini menunjukkan bahwa pengoperasian mobil adalah sumber utama polutan udara ambien, diikuti oleh pembakaran industri. Juga telah ditunjukkan bahwa faktor lingkungan seperti kecepatan angin kencang, lapisan batas planet, tekanan permukaan laut, divergensi angin, dan curah hujan memberikan pengaruh besar pada konsentrasi PM_{10} (Kim & Kim, 2020).

2.5 Dispersi Polutan

Dispersi adalah salah satu mekanisme yang dapat menyebabkan polutan atau bahan tertentu menyebar. Dispersi atau difusi adalah penyebaran polutan di udara karena adanya perbedaan atau perubahan konsentrasi (Anzira & Ahmad, 2020). Dispersi polutan adalah proses dimana polutan mengalir secara terus menerus terlepas dari sumbernya dan dihembuskan ke atmosfer terbuka oleh angin yang stabil, aliran polutan berputar ke bawah dan terus bergerak sesuai arah rata-rata angin menyebarkan konsentrasi polutan dan membawa polutan jauh dari sumbernya (Abidin & Hasibuan, 2019).

Dispersi polutan dipengaruhi oleh angin (arah dan kecepatan), yang mempengaruhi arah dan tingkat konsentrasi polutan di daerah tersebut. Arah angin menentukan arah area paparan, sedangkan kecepatan angin menentukan seberapa jauh polutan dibawa sepanjang arah angin yang berlaku. Faktor-faktor meteorologi ini saling berhubungan. Temperatur yang tinggi menyebabkan udara mengembang dengan cepat, menyebabkan ketidakstabilan udara (Turyanti, 2011).

2.6 Faktor-faktor Meteorologi yang Mempengaruhi Dispersi Polutan

Kecepatan angin dan stabilitas atmosfer disebut sebagai faktor meteorologi utama yang mempengaruhi penyebaran polutan di atmosfer. Namun, parameter meteorologi lainnya seperti suhu, kelembaban relatif, dan lainnya juga memainkan peran penting dalam menentukan koefisien dispersi partikel yang mempengaruhi pengangkutan dan distribusi jangka panjangnya (Ganguly et al., 2019).

2.6.1 Temperatur

Temperatur adalah besaran yang menyatakan panas atau dinginnya suatu benda. Panas adalah energi panas yang mengalir dari satu benda ke benda lain karena perbedaan temperatur. Kalor selalu mengalir dari benda bertemperatur tinggi ke benda bertemperatur rendah, tetapi tidak harus dari benda berenergi panas banyak ke benda berenergi panas lebih sedikit (Kolibu & Suoth, 2019).

Secara umum temperatur atmosfer menurun dengan bertambahnya ketinggian, yang berarti semakin tinggi suatu tempat, semakin rendah temperaturnya. Hal ini karena panas dari energi matahari diserap oleh permukaan bumi sehingga membuat temperatur permukaan menjadi lebih hangat. Udara hangat kemudian naik ke atmosfer dan menyebar luas, menyebabkan udara menjadi dingin. Namun terkadang temperatur udara juga meningkat dengan bertambahnya ketinggian. Kondisi ini disebut inversi temperatur karena temperatur atmosfer tidak terkonversi dengan baik (Hastutiningrum & Sunarsih, 2018).

2.6.2 Kelembapan Udara

Kelembapan udara adalah parameter yang menunjukkan jumlah uap air di udara. Kelembapan udara merupakan derajat kelembaban di udara, karena air selalu ada dalam bentuk uap air. Konsentrasi uap air di udara hangat lebih tinggi daripada konsentrasi uap air di udara dingin. Semakin banyak uap air di udara, maka kelembapan udara semakin tinggi. Udara yang mengandung uap air sebanyak yang dapat ditampungnya disebut udara jenuh. Kelembapan udara yang tinggi dapat meningkatkan risiko flu dan infeksi pernapasan (Utama et al., 2019).

Macam-macam kelembapan udara yaitu (1) Kelembapan relatif atau nisbi adalah perbandingan jumlah uap air di udara dengan yang terkandung di udara pada temperatur yang sama; (2) Kelembapan absolut atau mutlak adalah banyaknya uap air dalam satuan gram; dan (3) Kelembapan udara yang menggambarkan konsentrasi uap air di udara, yang dapat dinyatakan sebagai kelembapan absolut, kelembapan relatif (nisbi) atau defisit tekanan uap air (Bhaktian et al., 2022).

Adapun besaran yang biasa digunakan untuk menunjukkan kelembapan adalah kelembapan relatif, yang diukur dengan higrometer. Kelembapan relatif bervariasi menurut tempat dan waktu. Kelembapan relatif secara bertahap menurun pada siang hari dan kemudian meningkat pada sore hingga dini hari. Kelembapan relatif membandingkan konsentrasi tekanan uap air sebenarnya dengan keadaan jenuhnya atau kemampuan udara menahan uap air, kemampuan udara menahan uap air (ketika jenuh) bergantung pada temperatur udara (Bhaktian et al., 2022).

2.6.3 Kecepatan Angin

Kecepatan angin adalah jarak yang ditempuh oleh gerakan angin atau udara per satuan waktu dan dinyatakan dalam meter per detik (m/s), kilometer per jam (km/jam) dan mil per jam (mi/jam). Satuan mil (mil laut) per jam disebut juga sebagai knot (kn); $1 \text{ kn} = 1,85 \text{ km/jam} = 1,151 \text{ mi/jam} = 0,514 \text{ m/s}$ atau $1 \text{ m/s} = 2,237 \text{ mi/jam} = 1,944 \text{ kn}$. Kecepatan angin bervariasi dengan ketinggian di atas tanah. Kecepatan angin dapat diukur dengan anemometer (Siregar & Supani, 2018)

Pada dasarnya semakin tinggi kecepatan angin maka semakin rendah konsentrasi pencemar udara, karena angin membawa pencemar tersebut menjauhi lokasi pengukuran. Sebaliknya bila kecepatan angin rendah maka hasil pengukuran yang dapat dikatakan rendah, akan dapat menyebabkan peningkatan pencemar udara di lokasi tersebut (Ibrahim et al., 2022).

2.6.4 Tekanan Udara

Tekanan udara permukaan adalah gaya yang diberikan pada permukaan oleh kolom udara di atas permukaan. Tekanan yang diterapkan sebanding dengan massa vertikal udara di atas permukaan bumi sampai ke tingkat lapisan terluar atmosfer. Data tekanan digunakan untuk menentukan kepadatan udara di suatu lokasi. Tekanan udara adalah salah satu parameter meteorologi yang paling penting yang dapat diukur dengan *Automatic Weather System (AWOS)* (Khaery et al., 2020).

Semakin tinggi suatu tempat maka semakin rendah tekanannya, tinggi suatu tempat berbanding terbalik dengan tekanan udara di daerah tersebut.

Temperatur udara juga berpengaruh kuat pada tekanan udara, karena pada temperatur tinggi, molekul udara mengembang dan volume udara bertambah. Jika volume di atas tempat itu konstan, maka dengan meningkatnya temperatur udara massa udara total berkurang, berat udara berkurang dan dengan itu tekanan udara. Sebaliknya, ketika temperatur rendah, tekanan udara lebih tinggi (Azlin & Musadat, 2018).

2.6.5 Curah Hujan

Curah hujan adalah jumlah air hujan yang terkumpul pada suatu daerah yang dangkal, tidak menguap, tidak meresap, dan tidak mengalir. Curah hujan selalu dinyatakan dalam milimeter atau inci, tetapi di Indonesia satuan curah hujan adalah milimeter (mm). Banyaknya curah hujan dalam 1 (satu) milimeter berarti luasan satu meter persegi di atas permukaan datar yang dapat menyerap air sampai dengan satu milimeter atau satu liter air (Dwirani, 2019). Menurut (Serlina, 2020), Hujan mempengaruhi konsentrasi polutan yang terukur. Curah hujan berkorelasi negatif dengan konsentrasi polutan udara. Karena hujan memiliki efek “*washing*” atau “pencucian” terhadap polutan yang terdapat di udara.

2.6.6 Radiasi Matahari

Radiasi matahari adalah intensitas energi yang terus menerus dipancarkan oleh matahari dan diterima oleh permukaan bumi. Akibat perputaran dan perputaran bumi, intensitas pancaran (radiasi) yang diterima dari setiap titik di permukaan bumi dapat bervariasi. Perputaran dan perputaran bumi ini menyebabkan perubahan jarak sebenarnya matahari dari bumi dan perubahan sudut zenit matahari ke suatu titik di bumi (Syamsudin, 2018).

Radiasi matahari yang mencapai atmosfer dan permukaan bumi merupakan energi utama siklus cuaca, termasuk distribusi polutan di atmosfer. Efek fisik dan dinamis dari radiasi matahari terhadap penyebaran polutan udara berfungsi sebagai sumber energi untuk transportasi massal udara. Hal ini disebabkan adanya perbedaan temperatur antara permukaan bumi dan air yang menimbulkan angin dan turbulensi yang mempengaruhi kestabilan atmosfer dan bercampurnya polutan pada lingkungan (Reskita, 2020).

2.7 Emisi Kendaraan Bermotor

Menurut (Indonesia, 1999), emisi adalah zat, energi dan/atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk dan/atau dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar. Sumber emisi adalah setiap usaha dan/atau kegiatan yang mengeluarkan emisi dari sumber bergerak, sumber bergerak spesifik, sumber tidak bergerak maupun sumber tidak bergerak spesifik.

Emisi gas buang kendaraan adalah sisa hasil pembakaran bahan bakar di dalam mesin kendaraan dan keluar melalui sistem pembuangan mesin, sedangkan proses pembakaran merupakan reaksi kimia antara oksigen di udara dengan senyawa hidrokarbon di dalam bahan bakar untuk menghasilkan reaksi sempurna, sehingga menghasilkan sisa hasil pembakaran berupa gas buang yang mengandung karbondioksida (CO_2), uap air (H_2O), oksigen (O_2) dan nitrogen (N_2) (Syaief et al., 2019). Selain itu, lalu lintas kendaraan bermotor juga dapat meningkatkan kadar partikulat debu yang berasal dari permukaan jalan, komponen ban, dan rem (Gunawan et al., 2018).

Pengaruh permukaan jalan dan berat muatan kendaraan merupakan faktor pendukung terbentuknya PM yang saling berkaitan erat. Dimana besar gesekan antara ban dan jalan merupakan hasil kali dari koefisien kekasaran permukaan jalan dan berat dari kendaraan serta percepatan gravitasi bumi, maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar tingkat kekasaran permukaan dan semakin berat kendaraan akan menghasilkan gesekan yang besar pula. Begitu pula dengan kapasitas mesin, semakin besar kapasitas mesin kendaraan bermotor, maka semakin besar pula kebutuhan bahan bakarnya sehingga PM yang terbentuk akibat pembakaran yang tidak sempurna akan semakin besar juga (Kusuma et al., 2022).

Kecepatan kendaraan juga berpengaruh terhadap tinggi rendahnya konsentrasi PM. Pengaruhnya terhadap gesekan ban dan jalan yaitu semakin tinggi kecepatan kendaraan melaju maka gesekan antara ban dan permukaan jalan juga akan semakin besar, sehingga PM yang terbentuk juga semakin besar. Hal ini disebabkan oleh besar gesekan yang merupakan hasil kali antara berat kendaraan dikalikan dengan kecepatan yang diberikan oleh kendaraan. Selain itu, pengaruhnya terhadap asap knalpot kendaraan adalah semakin lambat kendaraan

melaju, maka semakin besar PM yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan asap knalpot yang dihasilkan akan lebih cepat terakumulasi di sepanjang jalan yang dilewati (Kusuma et al., 2022).

Emisi kendaraan bermotor diyakini menyebabkan dan memiliki kontribusi terhadap masalah kesehatan masyarakat luas. Gangguan yang umum diketahui akibat emisi kendaraan bermotor adalah penyakit pernapasan, sakit kepala, iritasi mata, meningkatkan serangan asma, penyakit jantung dan penurunan kecerdasan pada anak-anak (Wakhid, 2018).

Adapun jenis kendaraan berdasarkan (Nomor, 55 C.E.) adalah sebagai berikut:

1. Kendaraan bermotor adalah setiap kendaraan yang digerakkan oleh peralatan mekanik berupa mesin selain kendaraan yang berjalan di atas rel. Kendaraan bermotor berdasarkan jenis dikelompokkan menjadi:
 - a. Sepeda motor adalah kendaraan bermotor beroda 2 (dua) dengan atau tanpa rumah-rumah dan dengan atau tanpa kereta samping, atau kendaraan bermotor beroda tiga tanpa rumah-rumah.
 - b. Mobil penumpang adalah kendaraan bermotor angkutan orang yang memiliki tempat duduk maksimal 8 (delapan) orang, termasuk untuk pengemudi atau yang beratnya tidak lebih dari 3.500 (tiga ribu lima ratus) kilogram.
 - c. Mobil bus adalah kendaraan bermotor angkutan orang yang memiliki tempat duduk lebih dari 8 (delapan) orang, termasuk untuk pengemudi atau yang beratnya lebih dari 3.500 (tiga ribu lima ratus) kilogram.
 - d. Mobil barang adalah kendaraan bermotor yang dirancang sebagian atau seluruhnya untuk mengangkut barang.
 - e. Kendaraan khusus adalah kendaraan bermotor yang dirancang khusus yang memiliki fungsi dan rancang bangun tertentu.
2. Kendaraan tidak bermotor adalah setiap kendaraan yang digerakkan oleh tenaga manusia dan/atau hewan.

2.8 Klasifikasi Kendaraan

Menurut (Umum, 1997), arus lalu lintas adalah jumlah kendaraan bermotor yang melalui titik tertentu per satuan waktu, dinyatakan dalam kendaraan per jam, arus lalu lintas perkotaan terbagi menjadi empat, yaitu:

2.8.1 Kendaraan Ringan (Light Vehicle) [LV]

Meliputi kendaraan bermotor 2 as beroda empat dengan jarak as 2.0- 3.0 M (termasuk mobil penumpang, mikrobis, pick-up, truk kecil, sesuai sistem klasifikasi Bina Marga).

2.8.2 Kendaraan Berat (Heavy Vehicle) [HV]

Meliputi kendaraan bermotor dengan jarak as lebih dari 3.5 M, biasanya beroda lebih dari empat (termasuk bis, truk dua as, truk tiga as, dan truk kombinasi).

2.8.3 Sepeda Motor (Motor Cycle) [MC]

Meliputi kendaraan bermotor roda dua atau tiga (termasuk sepeda motor dan kendaraan roda tiga, sesuai klasifikasi Bina Marga).

2.8.4 Kendaraan Tidak Bermotor (Un Motorized) [UM]

Meliputi kendaraan beroda yang menggunakan tenaga manusia, hewan, dan lain-lain (termasuk becak, sepeda, kereta kuda, kereta dorong dan lain-lain, sesuai klasifikasi Bina Marga).

2.9 Baku Mutu Udara di Malaysia

Menurut (Department of Environment, 2020b) New Ambient Air Quality Standard (NAAQS) atau Standard Baru Kualiti Udara Ambien ditetapkan untuk menggantikan Malaysian Ambient Air Quality Guideline (Garis Panduan Kualiti Udara Ambien Malaysia) yang telah digunakan sejak tahun 1989. Standard Baru Kualiti Udara Ambien menggunakan 6 kriteria pencemar udara yang meliputi 5 pencemar udara yaitu materi partikulat dengan ukuran kurang dari 10 mikron (PM_{10}), sulfur dioksida (SO_2), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), dan ozon (O_3), serta 1 parameter tambahan yaitu materi partikulat dengan ukuran

kurang dari 2,5 mikron ($PM_{2.5}$). Adapun standar baku mutu udara ambien yang telah ditetapkan berdasarkan NAAQS ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Standard Baru Kualiti Udara Ambien Malaysia

Pencemar	Purata Masa	Standard 2020 ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Zarahhan terampai bersaiz 10 mikrometer atau kurang (PM_{10})	1 Tahun	40
	24 Jam	100
Zarahhan terampai bersaiz 2.5 mikrometer atau kurang ($PM_{2.5}$)	1 Tahun	15
	24 Jam	35
Sulfur Dioksida (SO_2)	1 Jam	250
	24 Jam	80
Nitrogen Dioksida (NO_2)	1 Jam	280
	24 Jam	70
Ozon (O_3)	1 Jam	180
	8 Jam	100
*Karbon Monoksida (CO)	1 Jam	30
	8 Jam	10

* mg m^{-3}

Sumber: (Department of Environment, 2020b)

2.10 Klasifikasi Nilai PM

Menurut Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, konsentrasi $PM_{2.5}$ dan PM_{10} dapat diklasifikasikan menjadi lima kategori. Nilai konsentrasi PM dan kelima kategorinya dapat dilihat pada Tabel 2.

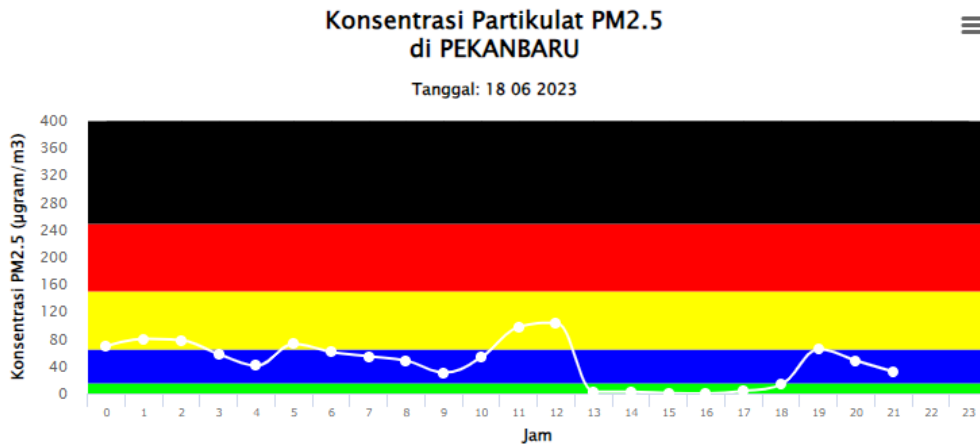
Tabel 2 Klasifikasi Nilai PM

Kategori	Baik	Sedang	Tidak Sehat	Sangat Tidak Sehat	Berbahaya
Konsentrasi $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0 - 15,5	15,6 - 55,4	55,5 - 150,4	150,5 - 250,4	> 250,4
Konsentrasi PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0 - 50	51 - 150	151 - 350	351 - 420	> 420

Sumber: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (2023)

Adapun contoh pengaplikasian kategori ini pada Kota Pekanbaru (untuk $PM_{2.5}$) dan Kota Kototabang (untuk PM_{10}) dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

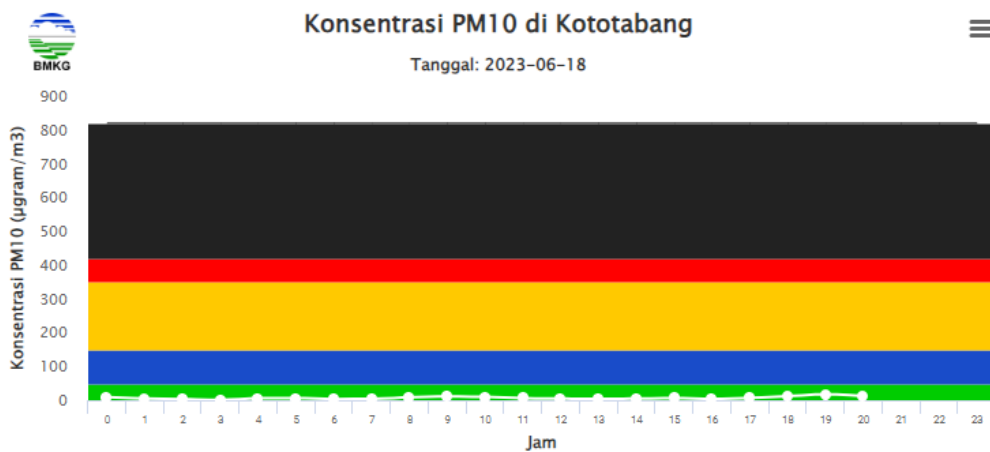
Keterangan:



Sumber: (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2023b)

Gambar 1 Contoh pengaplikasian klasifikasi nilai PM_{2,5}

Keterangan:



Sumber: (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2023a)

Gambar 2 Contoh pengaplikasian klasifikasi nilai PM₁₀

2.11 Alat Low-Cost Sensor

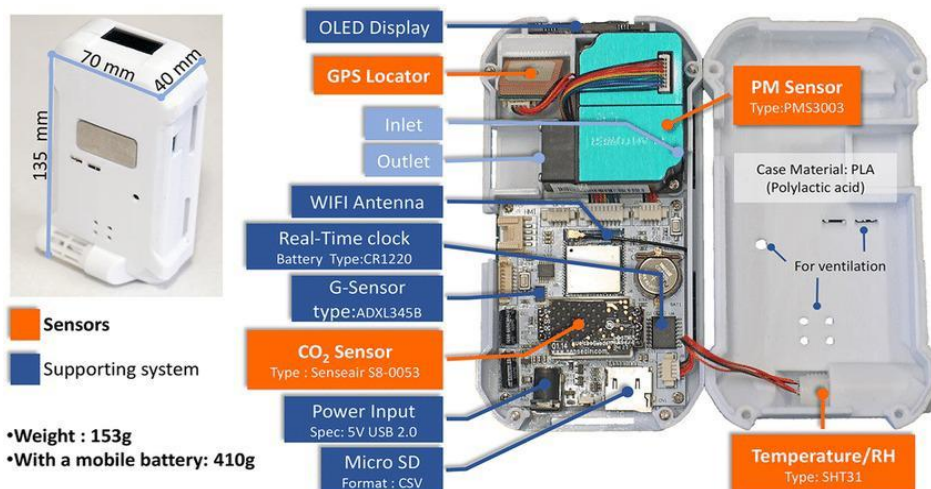
Low-Cost Sensor (LCS) adalah teknologi yang relatif baru yang mengukur polutan udara tertentu, biasanya partikel dan terkadang polutan gas, dan harganya jauh lebih murah daripada pemantau kualitas udara tradisional. Semakin banyak perusahaan yang mulai mengkomersialkan sensor berbiaya rendah atau yang biasa disebut dengan LCS yang dapat memantau polusi udara di udara luar. Saat ini, ada ratusan LCS yang tersedia secara komersial dengan harga mulai dari beberapa ratus hingga beberapa ribu euro. “*Low-Cost*” mengacu pada harga pembelian LCS dibandingkan dengan biaya pembelian dan pengoperasian penganalisa referensi untuk pemantauan polutan anorganik dan PM, yang dapat dikatakan biayanya lebih mahal (Karagulian et al., 2019).

Di Universiti Kebangsaan Malaysia, salah satu LCS yang digunakan yaitu sensor *portable* AS-LUNG. Adapun sensor *portable* AS-LUNG ini dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.



Sumber: Dokumentasi (2023)

Gambar 3 Sensor *portable* AS-LUNG



Sumber: UKM (2023)

Gambar 4 Bagian-bagian sensor *portable* AS-LUNG



Sumber: Dokumentasi (2023)

Gambar 5 Layar display sensor *portable* AS-LUNG

Sensor *portable* AS-LUNG ini dapat mendeteksi tingkat konsentrasi CO₂ dan *Particulate Matter* melalui sensor CO₂ (tipe: Senseair 58-0053) dan sensor PM (tipe: PMS3003) setiap 15 detik dan menyimpan data tersebut dalam SD card yang diinput pada alat ini. Adapun arah pengukuran sensor ini yaitu 180°. Alat ini telah dikalibrasi dengan alat Grimm Spectrometer oleh Professor Shih-Chun Candice Lung dari Academia Sinica Taiwan sebelum diberikan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia. Hal ini penting karena dapat memastikan pembacaan data yang kemudian akan tersimpan mempunyai kadar ketidakpastian yang sangat rendah. Adapun cara mengoperasikan sensor *portable* AS-LUNG yaitu:

- a. Menyambungkan layar display dengan alat serta menyambungkan alat dengan *powerbank* atau sumber listrik lainnya yang tersedia (seperti stop kontak).
- b. Setelah layar display menyala, kemudian menyesuaikan tanggal dan waktu serta mengecek apakah sensor CO₂ dan sensor PM bekerja sebagaimana mestinya.
- c. Apabila sensor-sensor tersebut telah menunjukkan angka konsentrasi pencemar masing-masing, lepaskan kabel yang tersambung dengan *powerbank*, serta lepaskan kabel layar display.
- d. Kemudian sambungkan kembali alat dengan *powerbank*. Alat akan mulai mengukur tingkat konsentrasi CO₂ dan PM.

Sensor *portable* AS-LUNG dipasang pada mini bag dengan tali pada tas sebagai penyangga dengan tinggi $\pm 1,5$ m dan juga dipasang pada tripod pada

lokasi yang tidak memiliki tiang untuk diikatkan pada tas mini penyangga alat. Alat ini dipilih karena merupakan alat ukur yang *portable* dan mudah digunakan, serta mampu untuk mengukur secara akurat PM dan CO₂. Data hasil pengukuran dapat dipindahkan ke perangkat lunak PC (Windows 7, 8, XP) melalui *memory card* yang dipasangkan pada alat sensor *portable* AS-LUNG saat pengukuran kemudian disambungkan pada *memory card reader* agar dapat dipindahkan ke perangkat lunak. Selain itu, temperatur dan kelembapan udara juga dapat diukur menggunakan alat sensor *portable* AS-LUNG ini.

Adapun kelebihan alat sensor *portable* AS-LUNG yaitu:

- a. Mudah digunakan.
- b. Dapat mengukur beberapa parameter.
- c. Harganya lebih terjangkau.

Sedangkan kekurangan alat sensor *portable* AS-LUNG yaitu:

- a. Jumlah alat yang terkalibrasi terbatas.
- b. Waktu pengiriman alat termasuk lama.

2.12 Perhitungan

Adapun perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

2.12.1 Uji Homogenitas

Uji homogenitas digunakan untuk mengetahui apakah beberapa data adalah sama atau tidak. Uji kesamaan dua kelompok data digunakan untuk menguji apakah sebaran data tersebut homogen atau tidak, yaitu dengan membandingkan kedua kelompok data (Usmadi, 2020). Adapun uji homogenitas ini dilakukan dengan menggunakan *software* SPSS 22.

2.12.2 Analisis Regresi Linear

Untuk mengetahui hubungan antara variabel x dan y, dapat digunakan rumus analisis regresi linear sederhana yaitu (Lane et al., 2017):

$$Y' = a + bX \tag{1}$$

Dimana:

Y' = nilai *estimate* variabel terikat

- a = titik potong garis regresi pada sumbu y (nilai *estimate* Y' bila x = 0)
 b = gradien garis regresi (perubahan nilai *estimate* Y' per satuan perubahan nilai x)

X = nilai variabel bebas

Nilai b dapat dihitung dengan (Lane et al., 2017):

$$b = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$

Nilai a dapat dihitung dengan (Lane et al., 2017):

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3)$$

2.12.3 Analisis Koefisien Korelasi dan Koefisien Determinasi

Adapun koefisien korelasi (r) dapat dihitung dengan (Lane et al., 2017):

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{\{n \sum x^2 - (\sum x)^2\}\{n \sum y^2 - (\sum y)^2\}}} \quad (4)$$

Dengan r:

- r = 0; tidak terdapat hubungan linier antara x dan y
 r = 1, terdapat hubungan linier sempurna langsung antara x dan y, yaitu harga x besar berpasangan dengan y besar & x kecil dengan y kecil (perlakuan semakin mendekati garis regresi)
 r = -1, terdapat hubungan linier sempurna tidak langsung antara x dan y, yaitu harga x besar berpasangan dengan y kecil atau sebaliknya

Interpretasi koefisien korelasi untuk menentukan tingkat hubungan antara variabel x dan y dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Pedoman interpretasi koefisien korelasi

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,00 - 0,199	Sangat Rendah
0,20 - 0,399	Rendah
0,40 - 0,599	Sedang
0,60 - 0,799	Kuat
0,80 - 1,000	Sangat Kuat

Sumber: Sugiyono (2017)

Sedangkan koefisien determinasi (R^2) dapat dihitung dengan (Lane et al., 2017):

$$R^2 = (r)^2 \times 100\% \quad (5)$$

Nilai koefisien determinasi menunjukkan banyaknya pengaruh yang diberikan oleh suatu faktor dan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain.