BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Udara

A.1 Pengertian Udara

Udara termasuk komponen lingkungan hidup yang sangat penting, baik bagi benda mati maupun makhluk hidup, sehingga keberadaannya perlu dijaga agar tetap bersih dan terhindar dari pencemaran yang dapat merugikan manusia maupun organisme lain agar kondisinya tetap sehat dan lestari, tidak tergolong tercemar. Masuknya benda asing ke dalam udara dapat menimbulkan dampak buruk terhadap organisme yang sebelumnya hidup normal dalam ekosistem tersebut (Umah & Gusmira, 2024). Udara dikatakan tidak seimbang atau berpotensi mengganggu kesehatan apabila terjadi ketidaksesuaian antara kebutuhan makhluk hidup dan kondisi lingkungan, atau munculnya oksida dari unsur yang tidak diinginkan di dalamnya.

Secara komposisi, udara merupakan campuran berbagai jenis gas yang proporsinya tidak tetap, bergantung pada suhu, tekanan udara, serta kondisi lingkungan sekitar. Di dalamnya terkandung oksigen yang dibutuhkan untuk pernapasan, karbon dioksida yang berperan dalam fotosintesis tumbuhan, serta ozon yang berfungsi menahan radiasi ultraviolet. Selain itu, terdapat pula gas mulia, nitrogen, hidrogen, metana, belerang dioksida, dan amonia (Dan & Malang, n.d.).

A.2 Pencemaran Udara

Pencemaran udara terjadi ketika zat, energi, atau komponen lain masuk ke udara ambien akibat aktivitas manusia sehingga menurunkan mutu udara di bawah standar yang seharusnya, yang pada akhirnya mengganggu fungsi udara ambien itu sendiri. Kondisi ini menggambarkan keadaan atmosfer bumi yang mengandung zat fisik, biologi, atau kimiawi yang membahayakan kesehatan manusia maupun makhluk hidup lainnya. Berdasarkan sumbernya, polutan dibedakan menjadi dua jenis: polutan primer, yaitu polutan yang langsung dilepaskan dari sumber pencemarnya (contohnya karbon dioksida hasil pembakaran), dan polutan sekunder, yang terbentuk dari reaksi kimia polutan primer di atmosfer, seperti pembentukan ozon dalam kabut fotokimia (Dyana et al., 2025).

Berdasarkan cara masuknya ke atmosfer, pencemaran udara terbagi menjadi pencemaran primer (polutan yang langsung dilepaskan dari sumbernya) dan pencemaran sekunder (polutan hasil reaksi kimiawi di atmosfer). Sumber pencemaran udara secara umum dibedakan menjadi sumber alami (natural source), seperti letusan gunung berapi, dan sumber antropogenik (anthropogenic sources), seperti lalu lintas dan emisi pabrik. Sumber antropogenik sendiri terbagi menjadi sumber tidak bergerak (misalnya pembangkit listrik berbahan bakar fosil, pabrik, dan rumah tangga) serta sumber bergerak (seperti truk, bus, pesawat, dan kereta api) (Salsabila, 2023).

Menurut PP No. 22 Tahun 2021, sumber pencemaran udara adalah setiap kegiatan manusia yang melepaskan zat pencemar ke udara ambien, yang secara garis besar terbagi menjadi sumber alami dan sumber yang berasal dari aktivitas manusia (Hidup, 2021). Lebih rinci lagi, PP No. 22 Tahun 2021 mengelompokkan sumber pencemaran udara menjadi lima kategori, yaitu:

(1) Sumber Bergerak : emisi dari sumber yang tidak menetap, seperti kendaraan bermotor.
(2) Sumber Bergerak Spesifik : emisi dari sumber bergerak khusus seperti pesawat, kapal laut, dan kereta api.
(3) Sumber Tidak Bergerak : emisi dari lokasi tetap seperti bengkel atau pabrik
(4) Sumber Tidak Bergerak Spesifik : emisi dari sumber tidak terduga seperti pembakaran sampah dan kebakaran hutan.
(5) Sumber Gangguan : pencemaran yang disebarkan lewat media udara atau benda padat, seperti kebisingan dan kebakaran.

Emisi merupakan salah satu sumber utama pencemaran udara, yaitu zat pencemar yang dihasilkan dari aktivitas manusia yang masuk ke udara, baik yang berpotensi mencemari maupun tidak (PP No. 22, 2021). Emisi mengacu pada pelepasan zat atau partikel ke atmosfer dari berbagai sumber, baik alami maupun antropogenik. Emisi gas buang kendaraan misalnya, merupakan sisa hasil pembakaran bahan bakar di dalam mesin yang dikeluarkan melalui sistem

pembuangan, di mana proses pembakarannya melibatkan reaksi kimia antara oksigen di udara dengan senyawa hidrokarbon dalam bahan bakar.

A.3 Persyaratan Udara Permenkes Nomor 2 Tahun 2023

Persyaratan kesehatan media udara ambien yang bersentuhan langsung dengan manusia mensyaratkan bahwa kualitas udara ambien tidak boleh melampaui batas toleransi tubuh manusia. Batas toleransi ini merujuk pada kemampuan fisik manusia dalam menyerap zat pencemar baik fisik, kimia, maupun biologi yang berpotensi menimbulkan risiko kesehatan. Faktor yang memengaruhi batas toleransi ini antara lain durasi paparan, jenis aktivitas selama terpapar, serta besarnya dosis paparan. Persyaratan kesehatan ini juga mencakup ketentuan agar suhu udara tidak melampaui batas toleransi, serta bebas dari bau yang berasal dari H_2S, amonia, atau parameter lain hasil pembusukan limbah. Paparan asap atau debu tidak boleh sampai mengganggu pernapasan, menimbulkan iritasi mata, atau mengurangi jarak pandang normal.

Tabel 2.1 berikut menyajikan sebagian parameter kimia udara ambien menurut SBMKL (Permenkes RI No. 2 Tahun 2023):

Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu
Suhu	-	20 - 30 °C
Kelembapan	-	40 - 70 %
Debu Partikulat (PM10)	24 jam	75 µg/m³
Debu Partikulat (PM2,5)	Tahunan	40 µg/m³
Kebisingan Perumahan/Permukiman	-	55 dB(A)
Kebisingan Industri	-	70 dB(A)

A.4 Indeks Kualitas Udara (Air Quality Index)

Air Quality Index (AQI) merupakan sistem yang digunakan untuk menggambarkan tingkat kebersihan atau pencemaran udara pada suatu wilayah dalam kurun waktu tertentu, dan berfungsi sebagai indikator penilaian kualitas udara harian berdasarkan konsentrasi polutan utama seperti partikulat halus ($PM_{2,5}$ dan PM_{10}), ozon, karbon monoksida, nitrogen dioksida, dan sulfur dioksida (EPA, 2020). Berdasarkan PP Nomor 22 Tahun 2021, zat pencemar udara ambien yang telah ditetapkan kadarnya meliputi SO_2, CO, NO_2, O_3, NMHC, partikulat debu

(PM_{10} dan $PM_{2,5}$), serta timbal (Pb), di mana polutan partikulat menjadi salah satu yang paling membahayakan kesehatan manusia secara langsung.

Setiap negara memiliki standar pengukuran pencemaran udaranya sendiri: Indonesia menggunakan ISPU, Beijing menggunakan AQI, Singapura menggunakan PSI, Korea Selatan menggunakan CSI, Inggris menggunakan APB, dan Eropa menggunakan CAQI. Di Indonesia, ISPU diatur berdasarkan Keputusan Bapedal Nomor KEP-107/Kabapedal/11/1997, dan setiap negara memiliki lembaga tersendiri yang mengelola pemantauan pencemaran lingkungan.



Gambar 2. 1 Indeks Kualitas Udara (Air Quality Index)

Sumber (Color, n.d.)

B. Partikulat Udara

Partikulat merupakan salah satu polutan udara dengan ukuran diameter berkisar 0,1–100 µm. Penyebarannya dapat terjadi secara alami (letusan gunung berapi, debu terbawa angin) maupun akibat aktivitas manusia (debu dan asbes dari material bangunan, fly ash dari peleburan baja, asap hasil pembakaran tidak sempurna terutama batu bara). Sumber utama partikulat berasal dari pembakaran bahan bakar dan proses industri. Partikulat dikenal sebagai pencemar paling berbahaya bagi kesehatan, khususnya di negara berkembang yang mengalami urbanisasi cepat, dengan sekitar 28% kasus penyakit dan kematian di negara berkembang disebabkan oleh materi partikulat dari polusi udara. Paparan jangka pendek terhadap partikel ($PM_{2,5}$ dan PM_{10}) dapat meningkatkan risiko kematian

akibat penyakit pernapasan dan kardiovaskular, sementara efek non-akutnya dapat memperparah gejala asma dan menurunkan produktivitas (Salsabila, 2023).

B.1 Partikulat Meter (PM)

Partikulat Meter (PM) adalah partikel debu yang tersuspensi di udara dalam jangka waktu tertentu, mencakup debu, kotoran, jelaga, dan asap (Ridayanti et al., 2022), dengan komposisi utama berupa sulfat, nitrat, amonia, natrium klorida, karbon, debu mineral, dan air (Amelia et al., 2022). Secara umum, partikel udara dikategorikan menjadi partikel halus (fine particle, <2,5 µm) dan partikel kasar (coarse particle, >2,5 µm). PM dapat berbentuk cair maupun padat, dengan komposisi ion organik, unsur karbon, senyawa organik, logam berat, dan senyawa lain. Partikel primer dilepaskan langsung dari sumbernya, sedangkan partikel sekunder terbentuk melalui reaksi kimia di atmosfer. Berdasarkan ukurannya, *Particulate Matter t*erbagi menjadi PM1, $PM_{2,5}$, dan PM_{10} (Salsabila, 2023).

B.2 $PM_{2,5}$

$PM_{2,5}$ adalah partikel udara dengan ukuran diameter ≤2,5 µm yang paparannya dapat merusak fungsi paru-paru serta memperburuk asma, bronkitis, dan kanker paru-paru. Sumbernya antara lain hasil pembakaran BBM dari kendaraan bermotor dan kebakaran hutan (Ruchjana et al., 2021). $PM_{2,5}$ diperkirakan menyebabkan sekitar 3 juta kematian di dunia pada 2017, dan WHO memperkirakan 92% populasi dunia tinggal di wilayah dengan rata-rata $PM_{2,5}$ tahunan melebihi 10 µg/m³. Knalpot kendaraan diesel dikenal menghasilkan partikel nano dalam jumlah besar dengan luas permukaan reaktif yang besar (Salsabila, 2023).

B.3 Dampak $PM_{2,5}$ terhadap Kesehatan Manusia

Akumulasi $PM_{2,5}$ di saluran pernapasan dapat menyumbat alveolus, merusak sel, dan menurunkan kapasitas paru (Azizah, 2020). Paparan jangka pendek memicu gejala seperti batuk, bersin, sesak napas, pusing, dan nyeri dada (AH, 2021), sementara paparan jangka panjang meningkatkan risiko gangguan kardiovaskular dan penurunan fungsi paru, terutama pada penderita asma (Pui et al., 2022). Paparan berkepanjangan juga dikaitkan dengan ISPA, kanker paru, penyakit kardiovaskular, kematian dini, dan PPOK (WHO, 2023).

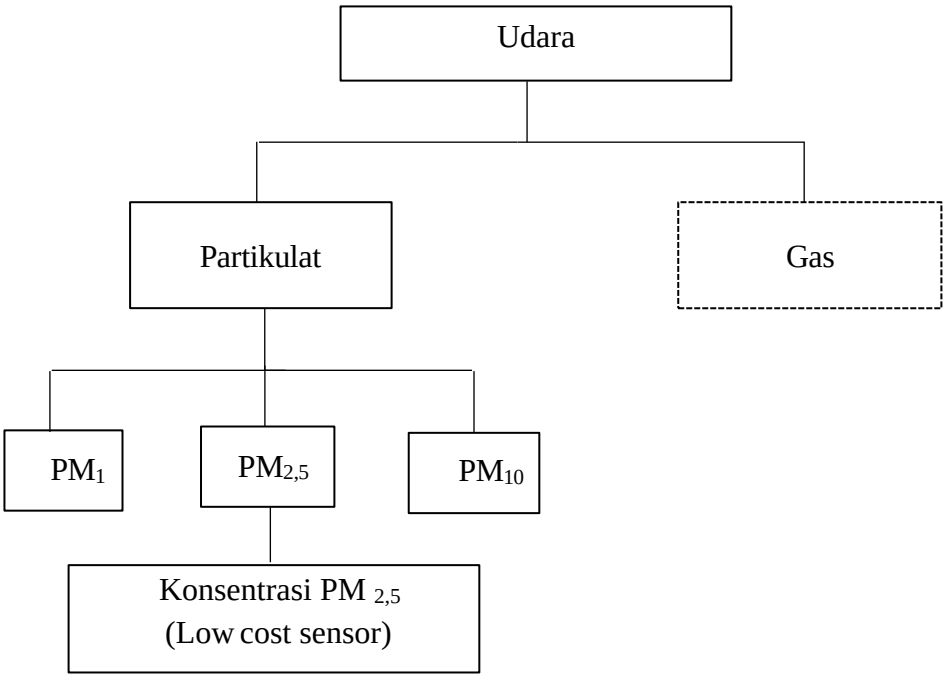
C. Alat Low-Cost Sensor

Low-Cost Sensor (LCS) merupakan teknologi relatif baru untuk mengukur polutan udara tertentu umumnya partikel, terkadang gas dengan harga jauh lebih terjangkau dibanding alat konvensional. Istilah "*Low-Cost*" merujuk pada perbandingan harga *LCS* dengan biaya instrumen analisis referensi yang jauh lebih mahal (Karagulian et al., 2019). Penelitian ini menggunakan Purple Air PA-II-SD, sensor partikulat (PM_1, $PM_{2,5}$, PM_{10}) berbiaya rendah yang telah banyak diadopsi peneliti di berbagai negara (Karaoghlanian et al., 2022).



Gambar 2. 2 ***Low Cost Sensor Purple Air***

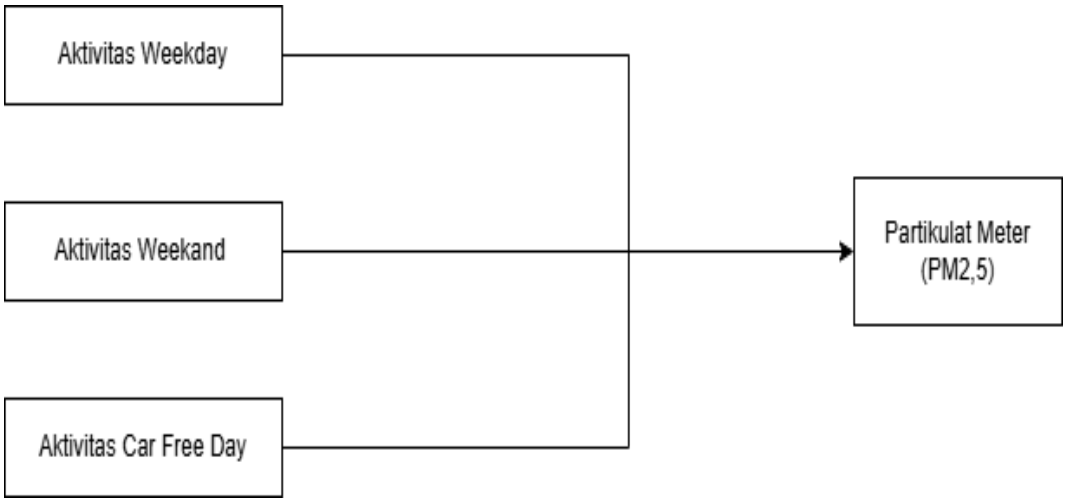
D. Kerangka Teori



Sumber : (Andriani, 2021)

Gambar 2. 3 Kerangka Teori

E. Kerangka Konsep



Gambar 2.4 Kerangka Konsep

F. Definisi Operasional

Tabel 2. 2

Definisi Operasional

Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Hasil Ukur	Skala
Low-Cost Sensor	Alat pengambil sampel $PM_{2,5}$	PurpleAir	µg/m³	Ratio
$PM_{2,5}$	Konsentrasi partikulat berdiameter <2,5 µm	PurpleAir	Konsentrasi massa	Ratio
Weekday	Sampel diambil pada hari kerja (Senin-Jumat)	Kalender/timestamp	Hari	Nominal
Weekend	Sampel diambil pada hari akhir pekan (Sabtu)	Kalender/timestamp	Hari	Nominal
Car-free day	Hari tanpa kendaraan bermotor di Medan, biasanya Minggu pukul 6-10	Kalender/timestamp	Hari	Nominal
Waktu Pengukuran	Durasi pengambilan sampel pukul 06-10 & 13-17	Stopwatch	Jam	Ratio

G. Hipotesis

H_{o1} : Tidak terdapat perbedaan rata-rata konsentrasi $PM_{2,5}$ antara *Weekday, Weekend, dan Car Free Day* di Dalam Lapangan Merdeka.

H_{o2} : Tidak terdapat perbedaan rata-rata konsentrasi $PM_{2,5}$ antara *Weekday, Weekend, dan Car Free Day* di Luar Lapangan Merdeka.

H_{a1} : Terdapat perbedaan rata-rata konsentrasi $PM_{2,5}$ antara *Weekday, Weekend, dan Car Free Day* di dalam Lapangan Merdeka.

H_{a2} : Terdapat perbedaan rata-rata konsentrasi $PM_{2,5}$ antara *Weekday, Weekend, dan Car Free Day* di luar Lapangan Merdeka.