

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Udara

A.1. Pengertian Udara

Udara adalah campuran berbagai gas yang menyelimuti planet Bumi dan terikat oleh gravitasi Bumi. Udara terdiri dari berbagai macam gas dengan komposisi tertentu, di mana komponen terbesar adalah nitrogen (78,084% volume), oksigen (20,946% volume) dan gas lain seperti neon, karbon dioksida, helium dan argon. Komposisi ini memungkinkan terjadinya kehidupan dan berbagai proses alam di Bumi. Selain itu, udara tidak hanya mendukung kehidupan secara biologis, tetapi juga berperan dalam proses fisika dan kimia lainnya, seperti penyebaran gelombang suara, pembentukan ozon di lapisan stratosfer, dan perlindungan dari radiasi matahari. Dengan segala fungsinya, udara menjadi sumber daya alam yang tak tergantikan bagi keberlangsungan kehidupan di planet Bumi (Raimunah et al., 2018).

Zat pencemar udara adalah senyawa atau partikel yang hadir di atmosfer yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan. Menurut laporan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), hampir seluruh populasi di dunia (99%) masih terpapar udara yang mengandung zat berbahaya dengan konsentrasi melebihi ambang batas aman yang dapat ditoleransi. Lima jenis pencemar udara utama yang berpengaruh terhadap kesehatan manusia meliputi partikel partikulat (PM), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃), karbon monoksida (CO) dan nitrogen dioksida (NO₂). Jika terpapar oleh pencemar udara tersebut dapat menimbulkan berbagai permasalahan kesehatan, khususnya penyakit pada sistem pernapasan dan kardiovaskular.

A.2. Polusi Udara

Polusi udara merupakan hasil dari limbah yang dihasilkan oleh berbagai aktivitas manusia untuk memenuhi kebutuhan hidup, baik dalam sektor industri maupun transportasi. Seiring dengan peningkatan jumlah populasi,

jumlah limbah yang mencemari udara pun turut meningkat, sehingga kadar polutan di atmosfer semakin tinggi. Hal ini berhubungan langsung dengan meningkatnya jumlah individu yang mengalami gangguan kesehatan atau penyakit akibat paparan polusi udara. Paparan polutan udara utama terjadi melalui inhalasi atau pernapasan, sedangkan penyerapan melalui kulit merupakan jalur paparan yang lebih sedikit. Polusi udara juga berkontribusi terhadap kontaminasi makanan dan air, yang dalam beberapa kasus menjadi jalur utama masuknya polutan ke dalam tubuh manusia. Melalui saluran pernapasan, polutan dapat diserap ke dalam tubuh, dan beberapa zat berbahaya bisa ditemukan dalam sirkulasi darah serta terakumulasi di berbagai jaringan tubuh manusia. Salah satu dampak kesehatan yang sering terjadi adalah Penyakit Paru Obstruktif Kronik (PPOK) (Rosyidah, 2016)

Polusi udara dapat dikategorikan berdasarkan jenis polutannya (A`yun & Umaroh, 2022) , seperti:

- a. Partikulat ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}): Partikel halus yang dapat terhirup dan menembus saluran pernapasan, berpotensi menyebabkan masalah kesehatan serius.
- b. Gas Berbahaya: Termasuk dan karbon dioksida (CO_2), nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), ozon (O_3), dan sulfur dioksida (SO_2) yang dapat merusak kesehatan manusia dan lingkungan

A.3. Udara Dalam Ruangan

Kualitas udara yang ada di ruangan menjadi faktor krusial yang mempengaruhi kesehatan dan kesejahteraan manusia, mengingat sebagian besar waktu kita dihabiskan di dalam bangunan, baik di rumah, kantor, sekolah, atau tempat lainnya (Bardi *et al.*, 2021) (Laila, 2023).

Berbagai kajian ilmiah mengungkapkan bahwa kondisi lingkungan udara dalam ruangan dapat berdampak signifikan terhadap produktivitas dan kinerja akademik. Pemerintah Indonesia telah mengatur standar kualitas

udara dalam ruang melalui Permenkes No 48 Tahun 2016 tentang Standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja Perkantoran dan Permenaker No. 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja.

A.4. Dispersi Polutan

Dispersi merupakan salah satu mekanisme utama yang berperan dalam penyebaran polutan atau zat tertentu di lingkungan. Proses ini, yang juga dikenal sebagai difusi, terjadi akibat perbedaan atau perubahan konsentrasi suatu zat di udara. Dispersi polutan mengacu pada pergerakan polutan yang terus-menerus menjauhi sumber emisinya. Dalam proses ini, polutan yang dilepaskan ke atmosfer akan terbawa oleh angin yang stabil, sehingga aliran polutan mengalami perputaran. Mekanisme ini menyebabkan penyebaran konsentrasi polutan di udara, yang pada akhirnya membawa polutan semakin jauh dari sumber asalnya (Anzira & Ahmad, 2020).

Penelitian yang dilakukan oleh Abidin dan Hasibuan (2019) membahas penyebaran konsentrasi polutan di udara dengan menggunakan pemodelan dispersi Gauss yang diproses melalui bahasa pemrograman MATLAB. Studi ini bertujuan untuk menggambarkan proses penyebaran polutan yang berasal dari asap cerobong pabrik. Hasil pemodelan diharapkan dapat menunjukkan jarak area dengan konsentrasi polutan tertinggi serta cakupan penyebarannya. Variasi ketinggian efektif emisi cerobong (H) juga dianalisis untuk mendapatkan hasil yang berbeda sesuai dengan ketinggian cerobong. Penelitian ini memberikan wawasan mengenai bagaimana polutan menyebar di udara dan pentingnya mempertimbangkan faktor ketinggian cerobong dalam mengendalikan penyebaran polutan. Selain itu, penelitian ini juga menyoroti peran kondisi meteorologi, seperti kecepatan dan arah angin, dalam menentukan pola pergerakan polutan di atmosfer. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin tinggi cerobong emisi, semakin luas cakupan penyebaran polutan, namun dengan konsentrasi yang lebih rendah di permukaan tanah. Oleh karena itu, pemodelan dispersi ini dapat digunakan sebagai referensi dalam

merancang sistem pengelolaan emisi industri untuk meminimalkan dampak pencemaran udara terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

A.5. Indeks Air Quality atau *Air Quality Index (AQI)*

Indeks Kualitas Udara (Air Quality Index/AQI) merupakan standar yang bisa digunakan untuk mengukur tingkat pencemaran udara. Setiap negara memiliki standar tersendiri dalam penentuan indeks kualitas udara. Indonesia dikenal dengan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU), di Beijing digunakan Air Quality Index (AQI), di Singapura Pollutant Standards Index (PSI), di Korea Selatan Comprehensive Air Quality Index (CAI), di Inggris Air Pollutant Banding (APB), sedangkan di Eropa digunakan Common Air Quality Index (CAQI), dan lain sebagainya. Di Indonesia, penerapan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) diatur melalui Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (BAPEDAL) Nomor KEP-107/Kabapedal/11/1997. Setiap negara pada umumnya memiliki lembaga atau instansi resmi yang bertanggung jawab dalam pengelolaan kualitas udara dan pengendalian pencemaran lingkungan.

US AQI Level		PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Health Recommendation (for 24 hour exposure)
WHO PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Recommended Guidelines as of 2024: 0-5.0			
 Good	0-50	0-9.0	Air quality is satisfactory and poses little or no risk.
 Moderate	51-100	9.1-35.4	Sensitive individuals should avoid outdoor activity as they may experience respiratory symptoms.
 Unhealthy for Sensitive Groups	101-150	35.5-55.4	General public and sensitive individuals in particular are at risk to experience irritation and respiratory problems.
 Unhealthy	151-200	55.5-125.4	Increased likelihood of adverse effects and aggravation to the heart and lungs among general public.
 Very Unhealthy	201-300	125.5-225.4	General public will be noticeably affected. Sensitive groups should restrict outdoor activities.
 Hazardous	301+	225.5+	General public at high risk of experiencing strong irritations and adverse health effects. Should avoid outdoor activities.

Gambar 2. 1 Air Quality Indeks (AQI)

B. Partikulat PM_{2,5}

PM_{2,5} merupakan partikel halus yang berdiameter 2,5 mikrometer (μm) yang dapat terhirup dengan mudah oleh manusia. Partikel ini termasuk dalam kategori polutan udara yang paling berbahaya bagi kesehatan, karena ukurannya yang sangat kecil memungkinkan partikel tersebut untuk masuk ke dalam saluran pernapasan dan bahkan mencapai bagian dalam paru-paru. Ketika terhirup, PM_{2,5} dapat menyebabkan gangguan serius pada sistem pernapasan, meningkatkan risiko penyakit pernapasan kronis. Selain itu, paparan jangka panjang terhadap polutan ini dapat mengurangi kualitas hidup dan memperpendek usia harapan hidup seseorang (Septian dan Sylva, 2022).

PM_{2,5} (partikulat) merupakan partikel halus di udara dengan ukuran kurang dari 2,5 mikron (mikrometer) dan memiliki Nilai Ambang Batas (NAB) sebesar $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Jika terpapar PM_{2,5} dalam konsentrasi yang tinggi dapat berbahaya karena mampu menembus hingga ke bagian terdalam paru-paru serta sistem kardiovaskular, sehingga berpotensi menimbulkan kanker paru-paru, penyakit kardiovaskular, infeksi saluran pernapasan akut bahkan kematian (Serlina *et al*, 2023).

B.1. Dampak Partikulat PM_{2,5}

Ukurannya yang sangat kecil, PM_{2,5} sangat mudah masuk ke dalam saluran pernapasan karena terhirup oleh manusia, bahkan mencapai bagian terdalam paru-paru sehingga memiliki dampak jika terpapar dalam waktu jangka panjang yaitu dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan serius, seperti penyakit pernapasan kronis (asma, bronkitis), penyakit jantung, dan bahkan meningkatkan risiko stroke. Selain itu, PM_{2,5} juga dapat memperburuk kondisi kesehatan pada individu yang sudah memiliki masalah pernapasan atau kardiovaskular. Dampak buruk dari polusi ini tidak hanya dirasakan oleh individu yang terpapar langsung, tetapi juga oleh masyarakat secara keseluruhan, karena meningkatkan angka kejadian penyakit yang berhubungan dengan pernapasan dan kardiovaskular (Yuwanda *et al*, 2024).

Studi epidemiologi dan penelitian eksperimental mengungkapkan bahwa partikel halus (PM_{2.5}) mampu mencapai bagian terdalam dari paru-paru bahkan dapat masuk ke aliran darah, sehingga dapat memicu stres oksidatif dan peradangan sistemik. Ozon troposfer yang terbentuk akibat reaksi kimia antara sinar matahari dan polutan seperti nitrogen dioksida (NO₂) dan senyawa organik yang mudah menguap (VOC), berisiko menyebabkan iritasi pada saluran pernapasan dan memperburuk asma. Nitrogen dioksida (NO₂) yang umumnya berasal dari emisi kendaraan bermotor atau pembakaran bahan bakar fosil diketahui dapat menyebabkan peradangan pada saluran pernapasan dan menurunkan kapasitas fungsi paru-paru. Sedangkan sulfur dioksida (SO₂) yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil atau aktivitas gunung berapi berpotensi menyebabkan berbagai iritasi seperti, iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan, serta memperburuk gangguan pernafasan (Rosatul & Eva, 2024).

Paparan PM_{2.5} di lingkungan kerja perkantoran dapat berdampak signifikan terhadap kesehatan pekerja. Paparan jangka panjang terhadap PM_{2.5} dapat menyebabkan gangguan fungsi paru-paru pada pekerja, terutama mereka yang bekerja di lingkungan dengan ventilasi yang kurang memadai. Penelitian ini menekankan pentingnya pemantauan kualitas udara dalam ruangan dan penerapan langkah-langkah mitigasi untuk mengurangi risiko kesehatan akibat paparan PM_{2.5} (Maksum & Tarigan, 2022).

B.2. Metodologi Pengukuran

a. Gravimetri

Metode pengukuran gravimetri adalah teknik analisis kuantitatif yang didasarkan pada penimbangan massa zat yang dianalisis setelah melalui proses isolasi dan pemurnian. Dalam metode ini, zat yang akan diukur diubah menjadi bentuk senyawa yang stabil dan dapat ditimbang, sehingga memungkinkan penentuan kadar komponen tertentu dalam sampel dengan akurasi

tinggi. Sebagai contoh, penelitian oleh Widjanarko dan Megawati (2015) membandingkan metode kolorimetri dan gravimetri untuk mengukur kadar glukomanan pada konjak (*Amorphophallus konjac*). Dalam penelitian tersebut menunjukkan hasil bahwa metode gravimetri dapat digunakan untuk menentukan kadar glukomanan dengan presisi yang memadai (Widjanarko & Megawati 2015).

b. Sensor Optik

Sensor-sensor optik, seperti sensor optocoupler dan sensor cahaya, telah menjadi metode pengukuran yang populer untuk pemantauan kualitas udara menggunakan sensor-sensor low-cost. Sensor-sensor optik ini dapat mengukur parameter-parameter seperti konsentrasi partikulat dan gas dengan menggunakan prinsip-prinsip pengukuran seperti hamburan cahaya dan penyerapan cahaya. Penggunaan sensor-sensor optik ini dinilai lebih ekonomis dibandingkan dengan sensor-sensor tradisional yang lebih mahal, sehingga dapat menjadi solusi yang menjanjikan untuk pemantauan kualitas udara dalam skala yang lebih luas (Feinberg *et al.*, 2018).

Namun, sensor-sensor optik ini juga menghadapi tantangan-tantangan seperti sensitivitas silang terhadap berbagai polutan, pengaruh faktor-faktor eksternal, dan penurunan akurasi seiring waktu penggunaan (Concas *et al.*, 2021).

c. Data Real-Time

Data real time adalah pengambilan data secara terus-menerus dalam waktu sesaat dengan tujuan untuk memperoleh informasi terkini. Kemajuan teknologi komunikasi digital seperti GPRS telah memfasilitasi pengukuran data secara online dan terhubung dengan jaringan internet, memungkinkan pemantauan kondisi terkini secara real-time. (Fatoni, 2019) . Data real time adalah pengambilan data secara terus-menerus dalam waktu sesaat dengan tujuan untuk memperoleh informasi terkini. Kemajuan teknologi komunikasi digital seperti GPRS telah memfasilitasi pengukuran data secara online dan

terhubung dengan jaringan internet, memungkinkan pemantauan kondisi terkini secara real-time (Teknologi Pengukuran Online Pasang Surut Dengan Sensor Ultrasonik Dan Berbasis *Realtime Web*, n.d.). Teknologi sensor ultrasonik dapat diintegrasikan dengan sistem pengukuran online untuk menghasilkan data pasang surut yang dapat dimonitor dari mana saja melalui aplikasi daring (Pardede & H, 2010).

C. Pengendalian dan Manajemen Kualitas Udara

C.1. Peningkatan Ventilasi

Peningkatan ventilasi adalah proses meningkatkan laju pertukaran udara dalam suatu ruangan atau bangunan untuk memastikan pasokan udara segar yang memadai dan pembuangan udara yang terkontaminasi. Tujuan utamanya adalah menjaga kualitas udara dalam ruangan, mengurangi konsentrasi polutan, dan mengendalikan faktor-faktor seperti suhu, kelembapan, serta bau yang tidak diinginkan. Metode peningkatan ventilasi dapat dilakukan secara alami, dengan memanfaatkan aliran udara melalui jendela atau ventilasi, atau secara mekanis, menggunakan sistem *HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)* yang dirancang untuk meningkatkan laju ventilasi sesuai kebutuhan. Organisasi Kesehatan Dunia (*WHO*) merekomendasikan peningkatan laju ventilasi melalui cara alami atau mekanis untuk memastikan udara bersih dan segar di tempat kerja, sekolah, dan akomodasi lainnya (*WHO*, 2020).

C.2. Pembersih udara

Pembersih udara merupakan suatu perangkat yang telah dirancang untuk menghilangkan atau mengurangi partikel-partikel di udara, seperti debu, asap, dan polutan lainnya, termasuk $PM_{2.5}$ (Prayoga, 2020). Alat ini bekerja dengan cara menarik udara melalui sistem filtrasi yang dapat menyaring partikel-partikel kecil hingga mikro-mikro, menjadikannya efektif dalam memperbaiki kualitas udara dalam ruangan. Beberapa pembersih udara juga dilengkapi dengan teknologi tambahan seperti filter karbon aktif untuk menyerap gas berbahaya dan bau tak sedap, serta lampu UV-C untuk

membunuh mikroorganisme seperti bakteri dan virus. Dengan demikian, pembersih udara dapat menciptakan lingkungan yang lebih sehat dan nyaman, terutama bagi mereka yang memiliki masalah pernapasan atau alergi.

D. Regulasi Standar Kualitas Udara

Regulasi standar kualitas udara merupakan serangkaian kebijakan dan peraturan yang ditetapkan oleh pemerintah atau badan yang berwenang untuk mengatur dan memantau kualitas udara di suatu wilayah. Hal ini penting untuk menjamin kesehatan dan keselamatan masyarakat dari dampak buruk pencemaran udara. Standar ini menetapkan batas maksimum konsentrasi berbagai polutan, seperti partikel tersuspensi (PM_{10} dan $PM_{2,5}$), sulfur dioksida (SO_2), nitrogen dioksida (NO_2), ozon (O_3), dan karbon monoksida (CO), yang diperbolehkan di udara ambien. Tujuan utama dari regulasi ini adalah untuk memastikan bahwa kualitas udara tetap berada pada tingkat yang aman bagi kesehatan masyarakat dan ekosistem (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020).

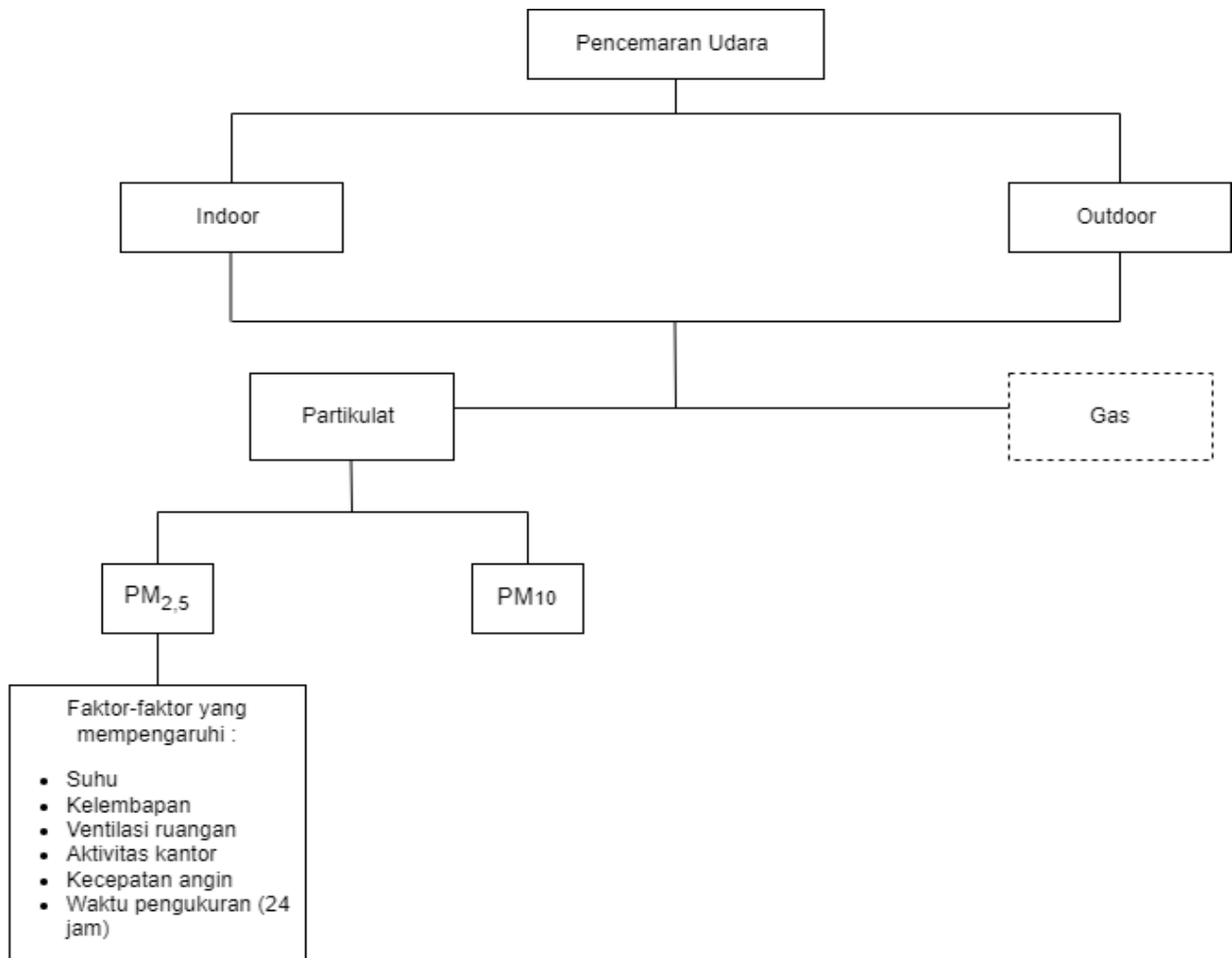
Menurut pedoman terbaru yang dirilis pada tahun 2021, WHO merekomendasikan bahwa rata-rata tahunan $PM_{2,5}$ tidak melebihi 5 mikrogram per meter kubik, dan rata-rata 24 jam tidak melebihi 15 mikrogram per meter kubik (*World Health Organization*, 2021).

E. Alat Low-Cost Sensor

Alat sensor low cost adalah perangkat elektronik yang dirancang untuk mengukur dan mengumpulkan data dari lingkungan sekitar dengan biaya yang lebih terjangkau dibandingkan dengan sensor konvensional. Alat ini dirancang dengan konsep "*open source*," sehingga desain dan implementasinya dapat diakses secara terbuka dan mengikuti lisensi GNU. Selain itu, sensor ini sering kali memanfaatkan *teknologi* yang hemat energi dan berbasis mikroprosesor sederhana, sehingga dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pemantauan kualitas udara, kelembapan, suhu, dan parameter lingkungan lainnya (Adinandra *et al.*, 2018).

Sensor low cost ini dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan akan resolusi spasial yang lebih tinggi dengan biaya relatif rendah sebagai alternatif solusi selain sensor mahal. Namun, penggunaan sensor low cost ini harus didukung dengan pemahaman yang tepat mengenai karakteristik sensornya, terutama ketika digunakan di lingkungan perkotaan yang kompleks. Meskipun sensor low cost memiliki banyak keunggulan, seperti biaya yang lebih terjangkau dan kemudahan akses, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Untuk menghasilkan data yang akurat dan handal, penggunaan sensor low cost memerlukan kalibrasi dan validasi yang tepat sesuai dengan konteks lingkungan penggunaannya (Mao *et al*, 2019).

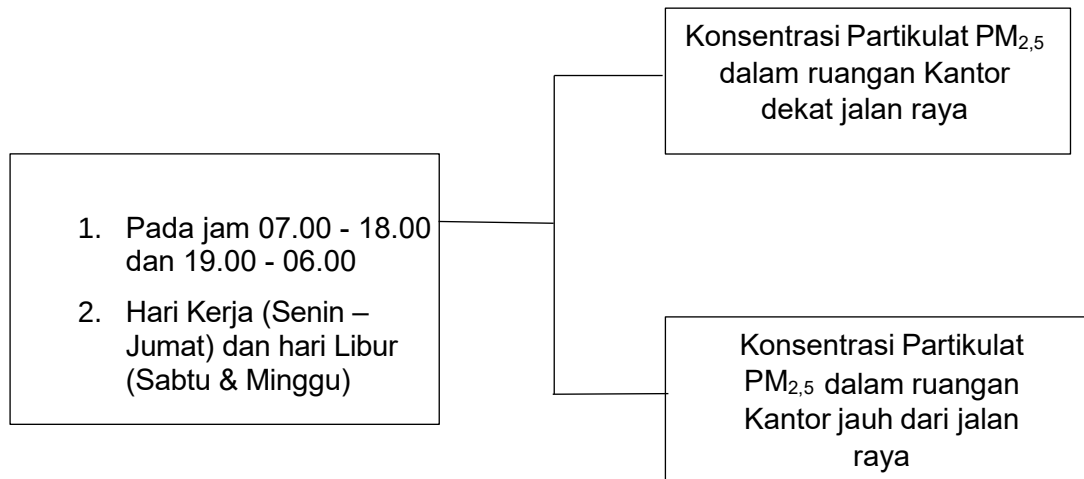
F. Kerangka Teori



Sumber: S. C lee (2017) dan Sischa Andriani Alimin (2021)

Gambar 2.2 Kerangka Teori

G. Kerangka Konsep



Gambar 2.3 Kerangka Konsep

H. Defenisi Operasional

Tabel 2.1 Defenisi Operasioal

No	Variabel	Defenisi Oparasional	Alat Ukur	Hasil Ukur	Skala Ukur
1.	PM _{2,5}	Partikel halus yang ada di udara yang berdiameter kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer	Low-Cost Sensor (PurpleAir)	Konsentrasi masa 5 µg/m ³ (WHO, 2021)	Ratio
2.	Low-Cost Sensor	Alat pengukuran PM _{2,5}	Kantor	µg/m ³	Ratio
3.	Ruang Kantor	Ruangan tertutup yang digunakan untuk kegiatan administrasi atau pekerjaan perkantoran	Low-Cost Sensor (PurpleAir)	µg/m ³	Ratio
4.	Kantor dekat jalan raya	Kantor yang berlokasi dekat dengan jalan raya	Low-Cost Sensor (PurpleAir)	µg/m ³	Ratio
5.	Kantor jauh dari jalan raya	Kantor yang berlokasi jauh dari jalan raya	Low-Cost Sensor (PurpleAir)	µg/m ³	Ratio
6.	Waktu Pengukuran	Lamanya waktu yang diperlukan untuk pengukuran	Low-Cost Sensor (PurpleAir)	Jam/menit	Ratio
7.	Aktivitas di Ruang Kantor	Aktivitas perkantoran yang dilakukan pegawai dalam ruang kantor	Observasi	Ada aktivitas, tidak ada aktifitas	Nominal
8.	Ventilasi Ruangan	Proses pertukaran udara yang dilakukan untuk menjaga kualitas udara di dalam ruangan	Meteran	M ²	Ratio