BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

A. Penyehatan Udara

1. Pengertian Udara

Udara atmosfer adalah campuran gas utama seperti nitrogen (N_2) sekitar 78%, oksigen (O_2) 21%, dan argon (Ar) 0,9% (Rachman, 2021). Gas minor meliputi karbon dioksida (CO_2), neon, helium, hidrogen, dan ozon, masing-masing kurang dari 1%. Variasi kandungan gas di atmosfer dipengaruhi aktivitas lokal, misalnya CO_2 meningkat di area industri dan padat penduduk (WMO, 2024). Di samping gas-gas tersebut, udara mengandung uap air yang fluktuatif mengikuti musim dan lokasi geografis (Irma et al., 2024). Polutan tambahan seperti SO_2, NO_x, $PM_{2.5}$, dan VOCs berasal dari pembakaran` fosil, pemrosesan industri, dan proses pelapukan alami. 10 tahun terakhir (2015–2024) menunjukkan kenaikan konsentrasi CO_2 dan metana secara global walaupun ada regulasi mitigasi (IPCC, 2021). Peningkatan polutan ini juga menyebabkan perubahan suhu udara dan gangguan sistem iklim dunia (Herlina et al., 2017). Penelitian Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika mencatat bahwa laju peningkatan CO_2 rata-rata mencapai 2–3 ppm per tahun sejak 2015. Komposisi udara yang berubah memperkuat risiko kesehatan, khususnya penyakit terkait kualitas udara. Sebagai contoh, kenaikan CO_2 dan $PM_{2.5}$ pada tahun-tahun pandemi menghasilkan lonjakan kasus ISPA di perkotaan (Irma et al., 2024).

Sumber gas rumah kaca utama saat ini adalah CO_2 dari industri, CH_4 dari pertanian, dan N_2O dari penggunaan pupuk nitrogen (BMKG, 2024*)*. Data bukti atmosfer global Kototabang (Sumatera Barat) menjadi refleksi umum pola atmosfer Indonesia dan pengaruhnya terhadap lingkungan regional. Variasi musiman dan pola atmosfer lokal sangat mempengaruhi distribusi dan penimbunan polutan contoh peningkatan CO_2 di musim kemarau akibat pembakaran biomassa (BMKG, 2024). Disisi lain, penurunan O_2 dan peningkatan CO_2 dan SO_2 di kota industri menyebabkan penurunan kualitas hidup, pencemaran air dan tanah serta penurunan hasil pertanian di sekitar zona polusi (Rachman, 2021). Menurut Peraturan Menteri Kesehatan Republik

Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Udara Ambien adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfir yang berada di dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan berpengaruh terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya. Udara merupakan hal yang sangat dibutuhkan bagi kelangsungan hidup makhluk hidup. Tanpa adanya udara, makhluk hidup tidak akan bisa bertahan hidup lama, bahkan hanya beberapa menit saja. Hal ini karena udara yang ada di bumi ini mengandung banyak gas-gas yang dibutuhkan, terutama untuk kepentingan bernafas, yakni gas oksigen. Oleh karena oksigen ini sangat dibutuhkan untuk bernafas, maka dari itulah udara ini dianggap sebagai komponen yang sangat dibutuhkan di setiap saat. Tidak sembarang udara bisa dikonsumsi oleh makhluk hidup.

2. Pencemaran Udara

Pencemaran udara adalah kondisi ketika udara mengandung zat, energi, atau komponen lain dalam jumlah yang dapat membahayakan kesehatan, kehidupan makhluk hidup, serta mengganggu kenyamanan dan keseimbangan lingkungan. Menurut *World Health Organization (2021)*, pencemaran udara merupakan kontaminasi udara luar maupun dalam ruangan oleh agen kimia, fisik, atau biologis yang mengubah sifat alami atmosfer.WHO juga menekankan bahwa polusi udara merupakan risiko lingkungan terbesar terhadap kesehatan manusia.Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Pasal 1 angka 49 mendefinisikan Pencemaran udara adalah sebagai masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam Udara Ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui Baku Mutu Udara Ambien yang telah di tetapkan.

3. Sumber Pencemaran Udara

a. Emisi

Emisi udara adalah pelepasan gas, aerosol, partikel padat dan cair ke atmosfer, bersumber dari aktivitas manusia atau alam, yang berpotensi menjadi polutan dan berbahaya bagi kesehatan (BIPK UMA, 2024). Emisi terjadi ketika bahan bakar fosil dibakar untuk energi, industri, maupun

transportasi (BMKG, 2024). Emisi gas rumah kaca misal CO_2, CH_4, N_2O menjadi isu utama karena berdampak langsung pada pemanasan global dan perubahan iklim (IPCC, 2021). Sektor pertanian, limbah, dan aktivitas domestik juga menyumbang emisi hidrogen sulfida, senyawa organik volatil (VOCs), NOx, SO_2, dan partikulat (Irma et al., 2024).

Polusi udara adalah akumulasi gas-gas berbahaya, partikulat, atau senyawa kimia di atmosfer dalam konsentrasi yang dapat mengganggu kesehatan manusia, tumbuhan, hewan, serta menyebabkan degradasi ekosistem (BMKG,2024). Studi selama satu dekade terakhir menyoroti perubahan komposisi emisi di kawasan Asia akibat transisi energi dan peningkatan transportasi (BIPK UMA,2024). Pengelolaan emisi udara dilakukan dengan menetapkan ambang batas dan baku mutu polutan, serta mengaplikasikan teknologi ramah lingkungan, filter emisi, dan regulasi ketat di sektor transportasi dan energi (BMKG, 2024). Penelitian mutakhir memaparkan tren peningkatan konsentrasi NO_2 dan SO_2 pada kota-kota berkembang, serta lonjakan PM2,5 pada musim kemarau, menjadi penyebab lonjakan kasus ISPA dan penyakit paru kronis (Irma et al., 2024).

1) Klasifikasi Emisi Udara

Emisi primer adalah polutan yang dilepaskan langsung dari sumber seperti CO, SO_2, NOx, PM, dan VOCs (BMKG, 2024). Emisi sekunder terbentuk di atmosfer melalui proses fotokimia atau reaksi kimia antara polutan primer dan komponen alami seperti ozon, asam nitrat, dan partikel organik sekunder (BIPK UMA, 2024). Sumber emisi diklasifikasikan ke dalam dua antropogenik dan alami. Antropogenik mencakup kendaraan, industri, pembakaran biomassa, limbah, pertanian, dan rumah tangga (BMKG, 2024).

Alami berasal dari letusan gunung berapi, kebakaran hutan, emisi rawa atau lahan basah, serta gejala meteorit atmosfer (Irma et al., 2024). Emisi juga diklasifikasikan berdasarkan bentuknya gas (CO, NO_2, O_3), cair (aerosol/kimia cair), dan padat (PM10, $PM_{2,5}$, debu mineral) (BMKG, 2024). Dalam 10 tahun terakhir, polutan primer dari transportasi menjadi target strategi pengurangan di kota-kota besar

Indonesia (BIPK UMA, 2024). Pola waktu emisi juga dipelajari untuk memahami dispersi polutan harian, musiman, hingga tahunan, sangat membantu dalam penentuan strategi mitigasi dan teknologi pengendali emisi sektor energi dan industri (Irma et al., 2024). Implementasi inventarisasi dan sistem monitoring digital 5 tahun terakhir memudahkan pelacakan emisi serta memfasilitasi model prediksi dampak lingkungan dan kesehatan masyarakat (BMKG, 2024).

2) Sumber Emisi Udara

Sumber emisi antropogenik mendominasi lingkungan urban transportasi menghasilkan CO, NOx, $PM_{2.5}$, SO_2 dan VOCs (BMKG, 2024); (Irma et al., 2024). Industri dan pembangkit listrik melepaskan CO_2, SO_2, NOx, serta logam berat. Pertanian dan pembakaran lahan menyumbang CH_4, N_2O dan ammonia. Peningkatan teknologi transportasi dan urbanisasi selama 5–10 tahun terakhir memicu lonjakan emisi, khususnya di Jakarta, Surabaya, Medan, dan kota besar lainnya (BMKG, 2024). Data inventarisasi emisi KLHK menunjukkan sektor transportasi sebagai kontributor utama (>40%) polusi udara kota (KLHK, 2022).

Sumber alami, misal letusan vulkanik, menyumbang polutan seperti SO_2, abu mineral, HCl, dan gas-gas beracun yang efeknya periodik namun dominan pada krisis atmosfer singkat (Irma et al., 2024). Kebakaran hutan tropis menghasilkan CO, CO_2, NOx, PM, dan VOCs, serta memperburuk polusi lintas batas nasional. Dipedesaan dan wilayah pertanian, emisi NOx, N_2O, dan CH_4 berasal dari penggunaan pupuk, pengelolaan limbah ternak serta pembakaran jerami (BMKG, 2024). Peran sektor domestik dalam emisi $PM_{2,5}$ dan VOCs meningkat berkat perubahan gaya hidup/penggunaan produk rumah tangga, sedangkan pertumbuhan industri makanan dan tekstil menambah sumber emisi baru pada dekade terakhir (BMKG, 2024).

b. Udara Ambien

Udara ambien didefinisikan sebagai udara luar ruangan yang menjadi medium utama pergerakan dan akumulasi polutan dari berbagai sumber

antropogenik maupun alami (BMKG, 2024). Baku mutu dan pengawasan udara ambien menjadi parameter utama dalam kebijakan lingkungan serta keperluan surveilans epidemiologi penyakit pernapasan (Menlhk, 2022). Pengukuran udara ambien menggunakan instrumen monitor gas ($CO/NOx/SO_2/O_3$), partikulat (PM10/ $PM_{2.5}$), serta metode pasif aktif sampling (Irma et al., 2024).

Udara ambien sangat dipengaruhi aktivitas lokal dan kondisi meteorologi misal angin, hujan, serta fenomena inversi (BMKG, 2024). Sebagian besar penelitian kualitas udara akan merujuk pada status udara ambien yang menggambarkan paparan harian masyarakat (Wulandari & Suryati, 2023). Studi kualitas udara ambien di kota Jakarta dan Surabaya selama periode 2018–2023 menunjukkan pola fluktuatif konsentrasi PM dan SO_2 yang berbanding lurus dengan intensitas kendaraan dan aktivitas industri (Menlhk, 2022). Perubahan udara ambien berkontribusi meningkatnya keluhan ISPA, asma, dan alergi pada komunitas urban, terutama pada musim kering dan saat terjadi polusi regional (Irma et al., 2024). Implementasi kebijakan monitoring udara ambien dengan sensor dan aplikasi digital telah membantu deteksi dini polusi, peringatan kesehatan dan pengambilan keputusan tata ruang/transportasi oleh pemerintah daerah (BMKG, 2024).

1) Karakteristik Udara Ambien.

Karakteristik utama udara ambien adalah komposisi kimia (CO, SO_2, NO_2, O_3), kandungan partikulat (PM_{10}/ $PM_{2.5}$), suhu, kelembaban, kecepatan angin, tekanan udara serta kandungan bioaerosol dan senyawa organik volatil (BMKG, 2024). Parameter udara ambien diukur menggunakan standar baku mutu Permen LH dan hasil pengujian laboratorium terakreditasi (Menlhk, 2022). Di zona industrial dan urban Indonesia, udara ambien seringkali menunjukkan konsentrasi CO, NO2, dan PM2,5 di atas ambang batas nasional (BIPK UMA, 2024). Penelitian di Medan dan Surabaya mencatat variasi musiman sangat signifikan, misal PM2,5 cenderung naik saat musim kemarau karena efek angkutan debu dan pembakaran sampah (Wulandari & Suryati, 2023).

Karakter fisik udara ambien juga menentukan pola dispersi polutan ke area perumahan dan fasilitas publik serta perubahan pola penyakit akibat polusi yang berbeda setiap zona kota (Irma et al., 2024). Studi epidemiologi Jakarta, Bandung, Semarang 2017–2022 menunjukkan paparan polusi udara ambien memiliki efek akut pada insiden ISPA, terutama balita dan lansia (Menlhk, 2022). Kondisi angin, kelembaban dan suhu lingkungan juga dapat mempercepat atau memperlambat peluruhan polutan di udara ambien serta menentukan pola migrasi polutan dari sumber ke wilayah terdampak (BMKG, 2024). Setiap karakteristik polutan di udara ambien telah dikorelasikan dengan tren penyakit pernapasan, penurunan kualitas hidup, masalah visual/transportasi, dan potensi gangguan iklim mikro kota (BIPK UMA, 2024)

4. Klasifikasi Udara

Klasifikasi udara berdasarkan lokasi meliputi udara ambien (*outdoor*), udara dalam ruangan (*indoor* air), udara lokal, regional, dan global (Menlhk, 2022). Berdasarkan tingkat polusi serta baku mutu, udara dikelompokkan menjadi udara bersih (clean air), udara tercemar ringan, sedang, dan berat (*BMKG, 2024*); (*Wulandari & Suryati, 2023*). Polusi Udara Dalam Ruangan (*Indoor* Air Pollution) secara tradisional didefinisikan sebagai kontaminasi udara di dalam bangunan oleh polutan kimia (misal, VOCs, Formaldehida) dan partikulat ($PM_{2.5}$) yang berdampak pada kesehatan kronis dan kenyamanan (USEPA, 2020). Polusi udara dalam ruangan (*Indoor* Air Pollution/IAP) semakin menjadi perhatian di Indonesia karena efeknya yang signifikan terhadap kesehatan masyarakat. Sebagian besar masyarakat menghabiskan lebih dari 80% waktunya di dalam ruangan, sehingga paparan polutan seperti $PM_{2.5}$, karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), sulfur dioksida (SO_2), dan senyawa organik volatil (VOC) dapat memengaruhi kualitas hidup secara serius.

System ventilasi buruk, maka akan menghasilkan akumulasi polutan yang ada dalam ruangan. Polutan tersebut bisa berasal dari berbagai sumber, bisa dari udara luar ataupun dari peralatan dan aktivitas yang terdapat dalam ruangan itu sendiri. Sumber polutan dalam ruangan di antaranya bisa karena asap rokok, komponen yang ada dalam bangunan serta furniture dan emisi dari

gas buang peralatan kantor. Kualitas udara di dalam ruangan dapat dipengaruhi oleh polutan yang berasal dari berbagai sumber. Yang paling umum polutan tersebut bersumber dari 3 hal, yaitu sumber polutan dari luar yang masuk ke dalam ruangan, pembakaaran atau sumber memasak dari dalam ruangan dan sumber kimiawi. Pertama, ada dua sumber pencemar utama yang berasal dari luar ruangan yang dapat masuk ke dalam ruangan, yaitu ozon (O) dan material partikulat (PM). Polutan Ozon adalah bentuk fotokimia yang berasal dari sinar matahari dan nitrogen oksida (NOX3) dan juga senyawa organik yang mudah menguap (VOC). Yang dimaksud dengan polutan udara menurut adalah karbon monoksida, radon, asbes, formaldehid, hidrokarbon, dan beberapa bahan kimia organik lainnya, ozon, asap tembakau, beberapa mikroorganisme, fiberglass, ammonia dan pestisida. Ada beberapa sumber potensial yang menyebabkan polusi pada udara ruangan. Sumber-sumber tersebut adalah Udara dari Luar ruangan.

Kontaminasi udara bisa berasal dari luar ruangan baik secara sengaja atau tidak sengaja. Udara tersebut masuk melalui ventilasi atau AC. Udara yang masuk dapat berupa tanah, emisi, gas dan kelembapan. Sistem HVAC (*Heating, ventilation or Air Conditioning*). System HVAC ini dianggap sebagai agen penyebab pada *Sick building syndrome*. Karena sifatnya berada di lingkungan yang hangat dan lembab, maka mikroba seperti jamur dan bakteri dapat tumbuh dan berkembang. Mikroorganisme ini terbawa oleh debu dan kotoran dari system ventilasi dan dapat menyebarkan organik yang dapat menguap (VOC) seperti heksana, metil chlonaik, benzene dan aseton. Kontruksi bangunan atau renovasi. Konstruksi bangunan interio seperti perabotan yang baru, karpet, dinding atau renovasi di beberapa tempat dapat dapat menimbulkan masalah udara akibat debu dan serat yang berkontribusi terhadap kontaminasi udara dalam ruangan.

Komponen bangunan seperti papan, kayu lapis, bahan insulasi, ubin langit-langit, karpet, kain, gorden atau perabotan baru diketahui dapat memancarkan formaldehida ke lingkungan dalam ruangan air dari luar. Kerusakan interior udara dikarenakan adanya air yang tergenang di atas gedung atau sekitarnya juga dapat mempengaruhi kualitas udara dalam ruangan, di mana idesangat

ideal untuk tumbuhnya mikroba. Sumber pemanas. Seperti kompor gas, kompor kayu, perapian, tungku dan pemanas ruangan berkontribusi terhadap pelepasan produk pembakaran seperti karbon monoksida, nitrogen oksida, dan lain-lain. Asap tembakau di dalam ruangan akan melepaskan ammonia, karbon dioksida dan formaldehid. Mesin fotokopi dan mesin listrik yang lain akan memancarkan ozon. Klasifikasi lain ialah berdasarkan fungsi/komponen: udara alami (alam, daerah konservasi), udara buatan (ruang industri, rumah tangga), dan udara rekayasa (teknologi filtrasi, ventilasi mekanik) (Rachman, 2021). Sesuai standar WHO dan EPA, udara diklasifikasikan menurut konsentrasi parameter polutan utama seperti CO, SO2, NO_2, O_3, serta PM_{10} / $PM_{2,5}$; polutan sekunder (ozon, asam nitrat), dan kandungan organik volatil (VOC/AOC) (IPCC, 2021).

Di kota besar, pemantauan dan pelaporan kualitas udara dilakukan menggunakan jaringan stasiun pengawasan guna klasifikasi status harian, mingguan, serta penilaian risiko untuk kesehatan masyarakat (Menlhk, 2022). Implementasi rating "Air Quality Index/Indeks Standar Pencemar Udara" (*ISPU/AQI*) selama 10 tahun terakhir membantu masyarakat dan stakeholder dalam memahami klasifikasi udara dan mengambil keputusan kesehatan seperti aktivitas luar ruang (*BMKG, 2024*).

5. **Jenis-Jenis dan Karakteristik Gas Pencemar**

Gas pencemar udara utama seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx yang terdiri dari NO dan NO_2), sulfur dioksida (SO_2), dan ozon (O_3) memiliki sifat fisik dan toksikologis yang berbeda-beda. Karbon monoksida adalah gas tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa yang terbentuk dari pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna.

6. **Definisi Partikulat Udara**

Partikulat udara (atau *particulate matter*. PM adalah campuran partikel padat dan/atau cair yang terdapat di atmosfer dan memiliki berbagai ukuran, bentuk, serta komposisi kimiawi (BMKG, 2024). Partikulat dapat berasal baik dari sumber alami maupun hasil aktivitas manusia, dan tetap tersuspensi dalam waktu tertentu sebelum mengalami pengendapan atau hilang karena presipitasi, difusi, dan proses kimia-fisika lainnya (Seinfeld & Pandis, 2016).

Dalam konteks polusi udara, istilah PM secara khusus digunakan untuk mengelompokkan partikel berdasarkan diameter aerodinamisnya, yang paling sering adalah PM10 (≤10 mikrometer) dan $PM_{2,5}$ (≤2,5 mikrometer). Partikel dengan ukuran lebih kecil disebut *ultrafine particles* (≤0,1 mikrometer) (World Health Organization, 2016). Ukuran ini sangat menentukan perilaku partikulat di atmosfer, jarak sebar, serta potensi penetrasinya ke dalam sistem pernapasan manusia (BMKG, 2024). Secara fisik, partikulat terdiri dari campuran debris organik dan anorganik seperti debu tanah, pasir, logam berat, sulfur, nitrat, karbon elementer, serta sisa pembakaran bahan bakar/makanan (Ghorani, B., et al. 2022).

Partikulat juga dapat membawa senyawa kimia toksik, mikroorganisme (bakteri, jamur), bahkan virus, sehingga memperparah dampak kesehatan masyarakat (Shin et al., 2023). Komposisi kimia partikulat sangat bergantung pada sumber, musim, lokasi geografis, serta interaksi antar polutan di udara (Wulandari & Suryati, 2023).Paparan jangka panjang terhadap PM, khususnya $PM_{2,5}$, dihubungkan dengan meningkatnya risiko infeksi saluran napas, penyakit kardiovaskular, asma, kanker paru, hingga kematian dini (Shin et al., 2023). Oleh karena itu, PM menjadi salah satu parameter utama dalam pengukuran dan pemantauan kualitas udara ambien secara nasional dan internasional (BMKG, 2024).Standar baku mutu kualitas udara untuk $PM_{2,5}$ dan PM_{10} telah diadopsi di banyak negara, termasuk Indonesia, karena partikel-partikel ini dapat bertahan lama di atmosfer, mengalami transportasi lintas batas, dan menimbulkan efek kesehatan maupun lingkungan secara luas (BMKG, 2024). Karena asal, ukuran, dan komposisinya sangat beragam, studi mengenai partikulat udara selalu menyesuaikan dengan kondisi geografis dan karakteristik lokal suatu wilayah (Wulandari & Suryati, 2023).

7. **Jenis-Jenis Partikulat Udara**

a. PM_1 (*Particulate Matter* ≤1 Mikrometer)

PM_1 adalah partikulat udara ultra-halus dengan diameter ≤1 mikrometer (atau 1/70 ketebalan rambut manusia), dan pada umumnya terbentuk dalam proses pembakaran bersuhu sangat tinggi (Combustion), seperti pada knalpot mobil, pesawat terbang, serta industri logam atau pabrik pembangkit listrik

(Maulydia 2021). PM_1 bersifat sangat sulit difilter oleh sistem pernapasan manusia maupun filter udara biasa, sehingga cenderung menembus hingga ke alveoli paru-palung terdalam, lalu berpotensi masuk ke sirkulasi darah dan mencapai organ-organ vital termasuk otak (Shin et al., 2023). Sebaran PM_1 biasanya mengikuti tren $PM_{2,5}$ namun konsentrasinya lebih rendah; namun, efek kesehatan jangka panjang PM_1 diduga lebih berbahaya daripada $PM_{2,5}$ dan PM_{10} karena sifat kimia lebih reaktif serta mudah membawa senyawa racun dan logam berat (BMKG, 2024).

Sampai saat ini, regulasi PM_1 belum seketat $PM_{2,5}$ atau PM_{10} di mayoritas negara, namun penelitian mutakhir mulai memfokuskan pengukuran dan kesadaran pada PM_1, terutama di perkotaan dan kawasan industri padat (Maulydia (2021)). PM_1 menunjukkan kontribusi signifikan pada efek kesehatan neurologis, inflamasi sistemik, serta efek epigenetik pada populasi anak-anak perkotaan (Shin et al., 2023).Peningkatan PM_1 pada udara ambien dikaitkan dengan peningkatan risiko asma, penurunan kapasitas paru jangka panjang, peningkatan stres oksidatif dan inflamasi kronis, serta efek neurotoksik akibat penetrasi partikel ke sawar darah otak (Shin et al., 2023).

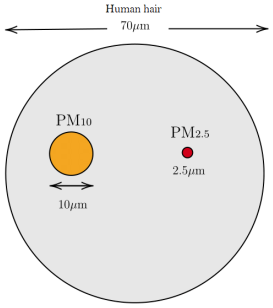
b. PM_{10} (*Particulate Matter* ≤10 Mikrometer)

PM_{10} adalah partikel udara yang berdiameter kurang dari atau sama dengan 10 mikrometer, atau sekitar 1/5 ketebalan rambut manusia (Greenlab, 2024). Partikulat ini biasa disebut juga sebagai “partikulat kasar” (coarse particles). Sumber utama PM_{10} adalah debu dari jalan raya, proses konstruksi, aktivitas pertanian, pembakaran sampah terbuka, kebakaran hutan, dan material alami seperti serbuk sari tumbuhan serta spora jamur (Katadata, 2021). PM_{10} umumnya berasal dari proses mekanik dan sumber alami yang menyebabkan pelepasan debu ke udara, seperti angin kencang di daerah kering atau aktivitas tambang (Climate4Life, 2023).

Di wilayah urban, PM_{10} biasanya meningkat saat musim kemarau karena pergerakan kendaraan, pengerukan tanah, dan rendahnya kelembapan udara yang memudahkan debu beterbangan (BMKG, 2024). PM_{10} biasanya tidak dapat menembus jauh ke dalam sistem pernapasan, sebagian besar tertahan di hidung atau saluran pernapasan bagian atas (Katadata, 2021).Namun, inhalasi

jangka panjang PM_{10} tetap dapat memicu iritasi saluran napas, memperparah asma, penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), serta menimbulkan masalah pernapasan dan kesehatan jantung khususnya pada anak-anak dan orang tua (Greenlab, 2024).

c. *PARTIKULAT MATTER* (PM2,5)



Gambar 1 PM $_{2,5}$

Sumber :(Pedraza et al., 2020)

$PM_{2,5}$ merupakan debu partikulat yang memiliki diameter aerodinamik 2.5μm yang dikumpulkan dengan 50% efisiensi oleh pengumpulan sampling $PM_{2,5}$. Secara internasional, *Particulate Matter* 2.5 ($PM_{2,5}$) didefinisikan secara konsisten oleh badan-badan kesehatan dan lingkungan terkemuka. U.S. Environmental Protection Agency (EPA) mendefinisikan $PM_{2,5}$ sebagai "*fine inhalable particles*" (partikel halus yang dapat terhirup), yaitu campuran partikel padat dan tetesan cairan di udara dengan diameter umumnya 2.5 mikrometer (μm) dan lebih kecil. Senada dengan itu, *World Health Organization* (WHO) mendefinisikan $PM_{2,5}$ sebagai konsentrasi massa dari partikel halus tersuspensi dengan diameter 2.5 μm atau lebih kecil. Kedua organisasi ini sepakat bahwa $PM_{2,5}$ menimbulkan risiko kesehatan terbesar karena ukurannya yang sangat kecil memungkinkannya menembus jauh ke dalam paru-paru (mencapai alveoli) dan bahkan berpotensi masuk ke dalam aliran darah.

***8.* Filtrasi Partikulat**

Definisi dan Signifikansi Filtrasi partikulat merupakan sebuah unit operasi fundamental dalam rekayasa lingkungan yang dirancang untuk memisahkan dan menahan kontaminan padat atau cair (aerosol) dari suatu aliran fluida,

dalam konteks ini adalah udara. Kontaminan tersebut, yang secara kolektif dikenal sebagai Materi Partikulat (*Particulate Matter* atau PM), merepresentasikan salah satu polutan udara urban yang paling berbahaya bagi kesehatan manusia. Di Indonesia, materi partikulat, khususnya $PM_{2,5}$ (partikel dengan diameter aerodinamis ≤ 2,5 mikrometer), telah menjadi isu kesehatan lingkungan yang kronis, terutama di kawasan metropolitan (Pramudita & Wijaya, 2021). Fungsi primer dari filter partikulat adalah sebagai barier fisik, yang secara signifikan mereduksi paparan individu terhadap polutan tersebut serta melindungi peralatan sensitif dari kerusakan akibat deposisi debu.

Ruang Lingkup dan Batasan Sebuah distingsi fundamental harus ditarik antara filtrasi partikulat dan adsorpsi gas. Filtrasi partikulat adalah sebuah proses yang murni bersifat fisik dan mekanis. Tujuannya adalah menangkap partikel yang tersuspensi di udara, mencakup debu, serbuk sari, spora jamur, bulu hewan, jelaga, bahkan bakteri atau virus yang beraglomerasi dengan partikel yang lebih besar (Nugroho, 2020). Proses ini tidak efektif untuk mengeliminasi polutan dalam fasa gas, seperti senyawa organik volatil (VOCs), odor (bau), atau gas toksik (misalnya, formaldehida atau ozon.

Mekanisme Penangkapan Partikel Efisiensi suatu filter partikulat tidak berasal dari satu mekanisme tunggal, melainkan merupakan hasil sinergi yang kompleks dari empat mekanisme fisika utama. Pemahaman mendalam mengenai mekanisme ini krusial karena efektivitasnya bervariasi, bergantung pada ukuran partikel dan kecepatan aliran udara. Keempat mekanisme tersebut adalah penyaringan mekanis (*straining*), tumbukan inersia (*inertial impaction*), intersepsi *(interception*), dan difusi (*diffusion*) (Nugroho, 2020). Dalam sebuah media filter, keempat mekanisme ini beroperasi secara simultan untuk menangkap spektrum ukuran partikel yang luas.

1) Penyaringan (*Straining*) Ini merupakan mekanisme yang paling intuitif, yang sering disalahpahami sebagai satu-satunya modus operandi filter. Penyaringan terjadi ketika sebuah partikel secara fisik memiliki dimensi yang lebih besar daripada celah atau pori di antara serat-serat media filter. Partikel tersebut secara harfiah "tersaring" atau terjebak di antara dua serat atau lebih (Nugroho, 2020). Mekanisme ini hanya

efektif untuk partikel yang sangat besar, seperti debu kasar atau rambut, yang ukurannya jauh melampaui rata-rata celah media filter.

2) Tumbukan Inersia (*Inertial Impaction*) Mekanisme ini dominan untuk partikel yang relatif besar dan berat (umumnya > 1 μm) yang bergerak dengan kecepatan tinggi. Ketika aliran udara (yang membawa partikel) mendekati serat filter, aliran udara akan membelok tajam untuk mengitari serat tersebut. Akan tetapi, partikel yang memiliki inersia (kelembaman) yang cukup besar akan gagal mengikuti alur aliran udara yang berbelok. Sebaliknya, partikel tersebut akan terus bergerak lurus sesuai Hukum Newton Pertama dan menabrak (impact) serat filter, kemudian menempel akibat gaya adhesi (Nugroho, 2020). Efisiensi mekanisme ini meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan aliran dan peningkatan massa (ukuran) partikel.
3) Intersepsi (*Interception*) Intersepsi adalah mekanisme utama untuk partikel berukuran sedang (sekitar 0.2 hingga 1.0 μm). Partikel-partikel ini memiliki inersia yang tidak cukup besar untuk menabrak serat, sehingga mereka cenderung mengikuti aliran udara mengitari serat. Namun, jika partikel tersebut mengikuti garis aliran (streamline) yang melintas sangat dekat dengan serat dalam jarak yang lebih kecil dari radius partikel itu sendiri maka partikel tersebut akan "menyentuh" atau terintersep oleh permukaan serat dan melekat (Pramudita & Wijaya, 2021). Berbeda dengan inersia, efisiensi intersepsi relatif tidak terlalu terpengaruh oleh kecepatan aliran.
4) Difusi (*Diffusion*) / Gerak Brown Mekanisme ini bersifat krusial dan dominan untuk partikel yang sangat kecil (umumnya < 0.1 μm). Partikel-partikel super-halus ini memiliki massa yang sangat rendah sehingga mereka tidak bergerak lurus mengikuti aliran udara. Sebaliknya, mereka terus-menerus mengalami tumbukan dengan molekul-molekul udara (seperti nitrogen dan oksigen) yang bergerak secara acak. Tumbukan konstan ini menyebabkan partikel bergerak dalam lintasan zig-zag dan tidak teratur, sebuah fenomena yang dikenal sebagai Gerak Brown. Gerakan stokastik ini secara drastis

meningkatkan probabilitas partikel untuk menyimpang dari jalurnya dan menumbuk serat filter (Nugroho, 2020). Menariknya, efisiensi difusi meningkat ketika kecepatan aliran udara menurun, karena partikel memiliki "waktu tinggal" (*residence time*) yang lebih lama di dalam filter untuk bergerak acak dan menumbuk serat.

Ukuran Partikel Paling Menembus *Most Penetrating Particle Size* (MPPS) Pemahaman gabungan dari mekanisme-mekanisme di atas melahirkan satu konsep paling penting dalam ilmu filtrasi. *Most Penetrating Particle Size* (MPPS) terdapat sebuah "titik lemah" dalam kurva efisiensi filter. Partikel besar (> 1 μm) mudah ditangkap oleh inersia dan intersepsi. Partikel sangat kecil (< 0.1 μm) mudah ditangkap oleh difusi. Akan tetapi, partikel dalam rentang ukuran "intermediet" (sekitar 0.3 μm, atau 0.1-0.4 μm) adalah yang paling sulit ditangkap; mereka terlalu kecil untuk memiliki inersia yang signifikan, namun terlalu besar untuk mengalami difusi yang kuat (Pramudita & Wijaya, 2021). Oleh karena itu, ukuran partikel inilah (MPPS) yang digunakan sebagai standar pengujian untuk filter berkinerja tinggi.

Elektret / Elektrostatis Selain filter mekanis murni, terdapat pula filter elektrostatis, yang juga dikenal sebagai media elektret. Media filter ini (biasanya terbuat dari polimer sintetik) diberi muatan listrik statis permanen selama proses manufaktur. Muatan ini bertindak sebagai dipol, secara aktif menarik dan menangkap partikel (bahkan yang sangat kecil) dari aliran udara (Nugroho, 2020). Ini adalah mekanisme augmentasi yang meningkatkan efisiensi penangkapan partikel tanpa meningkatkan hambatan aliran udara (penurunan tekanan) secara signifikan. Banyak respirator N95 memanfaatkan teknologi media elektret ini.

Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*) Karakteristik kinerja yang paling penting selain efisiensi adalah penurunan tekanan (*pressure drop*). Ini adalah ukuran kuantitatif seberapa besar filter menghambat aliran udara. Semakin efisien dan rapat sebuah filter (seperti HEPA), semakin tinggi penurunan tekanannya (Pramudita & Wijaya, 2021). Ini adalah pertukaran (trade-off) yang fundamental: filter yang lebih baik membutuhkan kipas (blower) yang

lebih kuat untuk mendorong volume udara yang sama, yang pada gilirannya mengonsumsi lebih banyak energi.

Kapasitas Tampung Debu (DHC) *Dust Holding Capacity* (DHC) merujuk pada jumlah massa partikulat yang dapat ditampung oleh filter sebelum mencapai akhir masa pakainya. Seiring filter menangkap partikel, celah-celahnya mulai tersumbat. Pada awalnya, fenomena ini dapat meningkatkan efisiensi filter (karena partikel yang tertangkap membantu menangkap partikel lain), tetapi secara bersamaan, penurunan tekanan akan meningkat secara eksponensial (Nugroho, 2020). Filter mencapai akhir masa pakainya ketika penurunan tekanan menjadi terlalu tinggi sehingga aliran udara tereduksi secara signifikan, atau ketika terjadi re-entrainment partikel. Aplikasi dalam Kesehatan Lingkungan Aplikasi filter partikulat sangat esensial. Di fasilitas kesehatan, filter HEPA sangat penting untuk menciptakan ruang isolasi bertekanan negatif (untuk pasien penyakit menular via udara) dan ruang operasi steril bertekanan positif (Pramudita & Wijaya, 2021). Dalam konteks residensial dan komersial, mereka adalah lini pertahanan utama terhadap infiltrasi polusi udara eksternal ($PM_{2.5}$) dan alergen internal (debu, serbuk sari). Dalam industri, mereka digunakan dalam unit baghouse untuk mengendalikan emisi cerobong asap dan di *cleanroom* untuk melindungi proses manufaktur sensitif.

9. **Persyaratan Udara Permenkes Nomor 2 Tahun 2023**

Sektor kesehatan memiliki peranan sentral dalam upaya pencegahan dan pengendalian pencemaran udara. Tidak hanya berfokus pada pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), sektor ini juga bertanggung jawab untuk meningkatkan kualitas udara demi penyehatan masyarakat secara menyeluruh. Penanganan ini dilakukan melalui mitigasi risiko penyakit yang bersumber dari kualitas udara yang buruk, sehingga diharapkan angka kejadian penyakit berbasis pencemaran udara dapat ditekan secara signifikan (Tri Cahyono *et al*., 2023). Upaya yang dilakukan mencakup pemantauan kualitas udara, pengembangan kebijakan kesehatan lingkungan, hingga edukasi kepada masyarakat untuk mengubah perilaku yang berisiko terhadap polusi udara.

Pengelolaan pencemaran udara tidak dapat dilakukan secara tunggal oleh sektor kesehatan saja. Oleh karena itu, koordinasi lintas sektor menjadi aspek krusial dalam mitigasi sumber pencemaran udara, baik di dalam ruang (*indoor*) maupun luar ruang (ambien). Koordinasi ini melibatkan sektor lingkungan hidup, perumahan, transportasi, dan pemerintahan daerah untuk memastikan pengendalian pencemaran berjalan efektif dan berkesinambungan, terutama di wilayah permukiman dan tempat fasilitas umum (TFUI). Pendekatan lintas sektor tersebut diharapkan mampu mendorong peningkatan derajat kesehatan masyarakat secara umum serta menjaga kualitas lingkungan hidup yang sehat (Kementerian Kesehatan RI, 2023). Pencemaran udara dalam ruang dan luar ruang memiliki hubungan timbal balik yang sangat erat, terutama di Indonesia yang sebagian besar rumah tinggal menerapkan ventilasi alami sebagai sistem sirkulasi udara.

Sumber pencemaran udara dari lingkungan luar seperti asap kendaraan bermotor dan aktivitas pembakaran sampah di pemukiman dapat dengan mudah masuk ke dalam ruangan. Di sisi lain, sumber pencemaran dari dalam rumah seperti asap rokok, penggunaan bahan bakar fosil, dan bahan berbahaya beracun (B3) juga memperburuk kualitas udara dalam ruang. Kondisi ini mempengaruhi kesehatan pernapasan dan kenyamanan penghuni serta meningkatkan risiko penyakit pernapasan kronis (Seviana *et al*., 2023).Berikut rincian parameter fisik dan ambang batas kualitas udara menurut Permenkes Nomor 2 Tahun 2023

Tabel 1 Parameter fisik Udara

No	Parameter Fisik	Satuan	Ambang Batas / Persyaratan
1	Suhu	°C	18–30 dalam ruang
2	Kelembaban	% RH	40–60 dalam ruang
3	Laju ventilasi udara	m/dtk	0,15–0,25 dalam ruang
4	Debu (PM2,5)	µg/m³	≤ 35 (24 jam/ambien)
5	Debu (PM10)	µg/m³	≤ 70 (24 jam/ambien)
6	Kualitas udara umum	—	Bebas asap, bebas bau menyengat, bebas debu terlihat, tidak menyebabkan gangguan pernapasan/iritasi mata

B. Adsorben

Adsorpsi merupakan sebuah proses perpindahan massa di mana molekul atau atom dari *fasa fluida* (gas atau cairan), yang disebut adsorbat, melekat dan terakumulasi pada permukaan material padat, yang disebut adsorben (Sutrisno, 2019). Sangat penting untuk membedakan adsorpsi (fenomena permukaan, molekul melekat di permukaan) dari absorpsi (fenomena curah/bulk, molekul meresap ke dalam volume material, analog dengan spons menyerap air). Dalam purifikasi udara, fenomena yang relevan hampir secara eksklusif adalah adsorpsi. Energi Permukaan Proses adsorpsi terjadi secara spontan karena adanya ketidakseimbangan energi pada antarmuka permukaan adsorben. Atom-atom di dalam (bulk) material padat sepenuhnya dikelilingi dan terikat oleh atom-atom lain, sehingga resultan gayanya seimbang. Sebaliknya, atom-atom di permukaan tidak memiliki "tetangga" di satu sisi, sehingga mereka memiliki gaya sisa atau

energi permukaan bebas *(free surface energy*) yang tidak terpuaskan (Sutrisno, 2019). Untuk mencapai kondisi energi yang lebih rendah dan lebih stabil, permukaan ini akan menarik dan menahan molekul-molekul dari lingkungan sekitarnya (adsorbat).Luas Permukaan Spesifik Oleh karena adsorpsi adalah fenomena permukaan, karakteristik tunggal yang paling penting dari sebuah adsorben adalah luas permukaan spesifik (*specific surface area*)-nya. Ini adalah total luas permukaan yang dapat diakses untuk adsorpsi per unit massa material, biasanya dinyatakan dalam satuan meter persegi per gram (m^2/g) (Santosa, 2018). Adsorben yang baik, seperti karbon aktif, bukanlah padatan monolitik mereka adalah material yang sangat berpori, memiliki jaringan internal pori-pori yang sangat ekstensif. Satu gram karbon aktif dapat memiliki luas permukaan internal yang setara dengan satu lapangan sepak bola (500–2500 m^2/g).

Klasifikasi Pori (IUPAC) Struktur pori internal ini sangat krusial dan diklasifikasikan oleh IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) berdasarkan diameternya. Mikropori (< 2 nm) adalah pori-pori terkecil dan merupakan situs primer untuk adsorpsi gas, karena di dalam pori sempit ini, medan gaya dari dinding yang berlawanan tumpang tindih, menciptakan potensi adsorpsi yang sangat kuat. Mesopori (2–50 nm) berfungsi sebagai "jalan raya" atau saluran transportasi untuk memungkinkan molekul adsorbat berdifusi lebih cepat menuju mikropori. Makropori (> 50 nm) bertindak sebagai "pintu masuk" utama ke dalam partikel adsorben (Sutrisno, 2019). Jenis Adsorpsi sebagai berikut :

1) Adsorpsi Fisik (*Physisorption*) Terdapat dua mekanisme fundamental adsorpsi. Yang pertama adalah adsorpsi fisik (*physisorption*). Proses ini didasarkan pada gaya antar molekul yang relatif lemah, yang dikenal sebagai gaya *Van der Waals* (Sutrisno, 2019). Gaya ini analog dengan gaya yang menyebabkan gas mengembun menjadi cairan. *Physisorption* bersifat non-spesifik (dapat terjadi pada permukaan apa pun jika kondisi termodinamika memungkinkan), reversibel (mudah dibalikkan dengan pemanasan atau penurunan tekanan), dan dapat membentuk beberapa lapisan molekul (multilayer) di permukaan. Mayoritas filter udara yang menggunakan karbon aktif untuk menghilangkan bau dan VOCs beroperasi berdasarkan prinsip ini.

2) Adsorpsi Kimia (*Chemisorption*) Mekanisme kedua adalah adsorpsi kimia (*chemisorption*). Proses ini melibatkan pembentukan ikatan kimia (kovalen atau ionik) yang aktual antara molekul adsorbat dan situs aktif di permukaan adsorben (Sutrisno, 2019). Berbeda dengan *physisorption, chemisorption* bersifat sangat spesifik (memerlukan kompatibilitas kimia), seringkali tidak reversibel (*irreversible*) atau membutuhkan energi aktivasi yang tinggi, serta secara ketat terbatas pada pembentukan satu lapisan molekul (monolayer). Entalpi (panas) yang dilepaskan selama *chemisorption* jauh lebih tinggi daripada *physisorption*.

Isoterm Adsorpsi Untuk mengkarakterisasi dan membandingkan kapasitas adsorben, ilmuwan menggunakan model matematika yang disebut isoterm adsorpsi. Isoterm adalah grafik atau persamaan yang merepresentasikan hubungan keseimbangan antara jumlah adsorbat yang terjerat pada adsorben (q_e) dan konsentrasi adsorbat yang tersisa dalam fasa gas (C_e) pada temperatur yang konstan (Sutrisno, 2019). Model yang paling umum adalah *Isoterm Langmuir* (yang mengasumsikan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen) dan Isoterm Freundlich (model empiris yang dapat mendeskripsikan adsorpsi multilayer pada permukaan heterogen).

1) Karbon Aktif (*Activated Carbon*) Ini adalah adsorben yang paling umum, serbaguna, dan paling banyak digunakan (Santosa, 2018). Karbon aktif adalah material karbon amorf yang telah melalui proses aktivasi untuk menjadi sangat berpori. Bahan bakunya bisa batubara, kayu, atau biomassa. Karbon aktif sangat efektif untuk menjerap senyawa organik non-polar berberat molekul sedang hingga tinggi, seperti benzene, toluene, xylene (BTEX), dan senyawa penyebab odor. Namun, ia memiliki afinitas yang rendah terhadap senyawa polar atau berberat molekul rendah, seperti formaldehida, amonia, atau hidrogen sulfida.
2) Zeolit Zeolit adalah material aluminosilikat kristalin yang memiliki struktur kerangka tiga dimensi yang sangat teratur dan berpori. Karena struktur kristal ini, zeolit memiliki pori-pori dengan ukuran yang sangat spesifik dan seragam, menjadikannya dikenal sebagai "saringan molekuler" (molecular sieves) (Handayani & Santoso, 2022). Berbeda dengan karbon aktif yang hidrofobik

(menolak air), kerangka aluminosilikat zeolit bersifat hidrofilik (menarik air) dan polar. Hal ini membuatnya sangat efektif dalam menjerap molekul polar seperti amonia, H_2S, dan uap air, tetapi kurang efektif untuk VOCs non-polar jika dibandingkan dengan karbon aktif.

3) Silika Gel Silika gel adalah bentuk amorf dari silikon dioksida (SiO_2) dengan struktur berpori. Seperti zeolit, ia sangat hidrofilik dan memiliki afinitas yang sangat tinggi terhadap uap air. Fungsi utamanya dalam teknologi udara adalah sebagai desiccant (pengering) untuk mengontrol kelembaban (Santosa, 2018). Meskipun dapat mengadsorpsi beberapa hidrokarbon polar, aplikasi utamanya tetap sebagai agen dehidrasi.
4) Alumina Aktif Alumina aktif (Aluminium Oksida, Al_2O_3) adalah material berpori yang juga bersifat polar dan hidrofilik. Selain digunakan sebagai desiccant, ia sering digunakan sebagai substrat atau pembawa (carrier) untuk material lain, seperti yang akan dibahas di bawah ini (Santosa, 2018).

impregnasi adalah proses pencampuran atau perendaman suatu bahan (biasanya bahan kimia atau larutan) ke dalam material lain, seperti karbon aktif atau filter. *Chemisorption* adalah proses adsorpsi di mana molekul zat yang diserap membentuk ikatan kimia kuat dengan permukaan material adsorben, yang berbeda dari adsorpsi fisik (*fisisorpsi*).Keduanya untuk mengubah sifat permukaan material tersebut agar dapat meningkatkan kemampuannya dalam menyerap atau mengikat zat tertentu. Untuk mengatasi defisiensi karbon aktif standar (yang memiliki kinerja buruk dalam menangani gas polar/reaktif), dikembangkanlah adsorben terimpregnasi. Ini adalah adsorben (seperti karbon aktif atau alumina) yang telah dijenuhkan atau diresapi dengan reagen kimia spesifik untuk mempromosikan *chemisorption* (Santosa, 2018). Sebagai contoh, untuk mengeliminasi gas asam seperti H_2S atau SO_2, karbon dapat diimpregnasi dengan basa kuat seperti KOH atau NaOH. Untuk mengeliminasi formaldehida atau etilen, alumina dapat diimpregnasi dengan kalium permanganat ($KMnO_4$). Dalam kasus ini, karbon/alumina bertindak sebagai matriks berpori untuk menahan reagen, dan reagen tersebutlah yang secara kimia mengoksidasi atau mengikat polutan.

Dinamika Adsorpsi Kurva Terobosan (*Breakthrough*) Dalam aplikasi filter di dunia nyata, udara mengalir secara kontinu melalui "hamparan" (*bed*) adsorben.

Adsorpsi tidak terjadi secara instan di seluruh hamparan. Fenomena ini terjadi di zona terbatas yang disebut zona transfer massa (*Mass Transfer Zone atau MTZ*). Zona ini bergerak melalui hamparan secara progresif. Terobosan (Breakthrough) terjadi ketika zona ini mencapai ujung keluaran hamparan. Pada titik ini, adsorben telah jenuh, dan polutan mulai "tembus" atau lolos dari filter (Sutrisno, 2019). Waktu yang diperlukan untuk mencapai terobosan (waktu terobosan) menentukan masa pakai (service life) filter adsorben. Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Kinerja adsorpsi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional. Temperatur yang lebih rendah umumnya meningkatkan *physisorption* (karena molekul gas memiliki energi kinetik lebih rendah dan lebih mudah ditangkap). Kelembaban yang tinggi (Kelembaban Relatif/RH > 50-60%) dapat secara drastis menurunkan kinerja karbon aktif untuk VOCs, karena molekul air yang polar akan berkompetisi dengan molekul VOCs untuk menempati situs adsorpsi di permukaan (Santosa, 2018). Konsentrasi polutan yang lebih tinggi akan menjenuhkan adsorben dengan laju yang lebih cepat.Karakterisasi Adsorben Untuk mempelajari adsorben baru, serangkaian teknik karakterisasi digunakan. Analisis BET (dinamai dari Brunauer, Emmett, dan Teller) digunakan untuk mengukur secara akurat luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori. SEM (*Scanning Electron Microscopy*) digunakan untuk mengobservasi secara visual morfologi permukaan dan struktur pori. FTIR (*Fourier-Transform Infrared Spectroscopy*) digunakan untuk mengidentifikasi gugus-gugus fungsi kimia (seperti -OH, -COOH) di permukaan adsorben, yang sangat penting untuk memahami mekanisme chemisorption (Handayani & Santoso, 2022).

1. Bio-Adsorben

Definisi dan Konteks Bio-adsorben, atau bio-penjerap, bukanlah kategori material yang baru secara fungsional, melainkan sebuah klasifikasi berdasarkan sumber daya dan motivasi. Bio-adsorben didefinisikan sebagai material adsorben yang difabrikasi dari prekursor (bahan baku) biologis atau biomassa yang terbarukan (Pratama, 2022). Pengembangan bio-adsorben didorong oleh dua pilar utama keberlanjutan (menggantikan material berbasis fosil seperti batubara). Filtrasi alami menggunakan media bio, misalnya tanaman aromatik (kemangi, lidah mertua), serat alami atau bahan fitokimia seperti tanin. *Biofilter*

menurunkan konsentrasi $PM_{2.5}$ melalui mekanisme absorpsi fisik dan adsorpsi kimiawi. Efektivitas biofiltrasi juga didukung oleh kemampuan tanaman menyerap CO_2, VOC, dan menambah kelembapan udara yang baik untuk sistem pernapasan manusia (Tika et al., 2021).

Aplikasi Biosorpsi untuk Udara (Terbatas) Aplikasi biosorpsi untuk purifikasi udara jauh lebih terbatas. Biomassa mentah umumnya tidak memiliki luas permukaan atau porositas yang cukup untuk menjerap VOCs non-polar secara efektif. Namun, penelitian sedang berkembang dalam modifikasi kimia biomassa ini untuk menargetkan gas polar. Misalnya, meng-grafting gugus amina ke permukaan selulosa (dari kapas) telah terbukti meningkatkan kapasitas adsorpsi untuk CO_2 atau formaldehida (Handayani & Santoso, 2022). Pembedaan dari Bio-filter Penting untuk membedakan bio-adsorpsi (proses fisikokimia pasif) dari bio-filtrasi. Bio-filter adalah sebuah sistem biologis aktif. Ini melibatkan penumbuhan biofilm (lapisan mikroorganisme hidup seperti bakteri dan jamur) pada media pendukung (seperti kompos atau potongan plastik). Udara yang terkontaminasi (misalnya, mengandung H_2S dari IPAL) dilewatkan melalui media ini. Polutan diabsorpsi ke dalam biofilm dan kemudian dimetabolisme (dikonsumsi) oleh mikroorganisme sebagai sumber makanan atau energi (Nugroho, 2020). Exhaust Fan/Ventilasi Mekanis Komponen ini berfungsi mengeluarkan udara yang telah disaring agar tidak terjadi penumpukan partikel dalam ruangan dan menjaga sirkulasi udara tetap optimal. Ventilasi mekanis maupun alami harus didesain agar mendukung filtrasi dan mencegah resirkulasi polutan (BMKG, 2024).

C. Stroberi Hutan (*Fragaria Vesca*)



Gambar 2 *Fragaria Vesca*
Sumber : (Royal Botanic Gardens, 2020)

Vesca tergolong dalam divisi Magnoliophyta, kelas Magnoliopsida, ordo Rosales, famili Rosaceae, dan genus Fragaria. Karakteristik genetiknya adalah diploid (2n=14 kromosom), yang membedakannya secara fundamental dari stroberi komersial yang bersifat alopoliploid (Giampieri et al., 2012). Perbedaan genetik ini berkorelasi langsung dengan jalur biosintesis yang menghasilkan konsentrasi senyawa bioaktif tertentu yang lebih tinggi. *F. vesca* dikenal dengan morfologi buahnya yang kecil, intensitas rasa yang kuat, dan ketahanan ekologis yang tinggi. Pertumbuhannya di alam liar (hutan) seringkali memicu mekanisme pertahanan diri tanaman yang kompleks, yang termanifestasi dalam akumulasi senyawa pelindung (antioksidan) yang lebih besar (Dindo *et al*., 2020).

1. Komponen Kimia Stroberi

Kapasitas adsorpsi limbah stroberi hutan (menjadikannya kunci keberhasilan dalam sistem filtrasi yang dirancang. Salah satu kontributor utama terhadap kemampuan adsorpsi ini adalah pektin, komponen yang melimpah pada sisa buah dan kulit stroberi. Pektin, yang tersusun dari unit Asam Galakturonat, merupakan agen adsorpsi paling penting di antara biomassa buah-buahan karena mengandung Gugus Karboksil (COOH) yang sangat reaktif (Dahri et al., 2021). Oleh karena itu, pektin sering menjadi fokus utama dalam proses modifikasi biomassa untuk meningkatkan efisiensi penyerapan ion. Potensi pektin dalam adsorpsi dapat dijelaskan melalui mekanisme ionisasinya. Gugus -COOH memiliki pKa yang memungkinkan deprotonasi mudah menjadi ion Karboksilat (-COO-) pada pH netral atau sedikit basa, suatu kondisi umum dalam air limbah. Muatan negatif yang dihasilkan ini menciptakan situs kuat untuk dua mekanisme utama pertama, Pertukaran Ion, di mana kation logam berat (Mn+) ditarik kuat dan menggantikan ion H+ dan kedua, Kompleksasi, di mana ion logam membentuk ikatan koordinasi dengan atom Oksigen dalam gugus karboksilat (Yuniarti et al., 2022). Sementara pektin menyediakan kekuatan ionik, kerangka struktural dasar stroberi yang terdiri dari Selulosa dan Hemiselulosa memberikan kontribusi tambahan. *Fragaria vesca*) berasal dari kekayaan makromolekul organik yang menyediakan gugus fungsional aktif di permukaannya. Pemahaman mendalam terhadap struktur kimia ini menjadi landasan ilmiah untuk membenarkan penggunaan biomassa stroberi sebagai

bioadsorben yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah (Omo-Okoro et al., 2023). Gugus fungsional tersebut bertindak sebagai situs aktif utama yang memungkinkan penjeratan polutan melalui interaksi elektrostatik dan kimia, menjadikannya kunci keberhasilan dalam sistem filtrasi yang dirancang. Salah satu kontributor utama terhadap kemampuan adsorpsi ini adalah pektin, komponen yang melimpah pada sisa buah dan kulit stroberi. Pektin, yang tersusun dari unit Asam Galakturonat, merupakan agen adsorpsi paling penting di antara biomassa buah-buahan karena mengandung Gugus Karboksil (COOH) yang sangat reaktif (Dahri et al., 2021). Oleh karena itu, pektin sering menjadi fokus utama dalam proses modifikasi biomassa untuk meningkatkan efisiensi penyerapan ion. Potensi pektin dalam adsorpsi dapat dijelaskan melalui mekanisme ionisasinya. Gugus -COOH memiliki pKa yang memungkinkan deprotonasi mudah menjadi ion Karboksilat (-COO-) pada pH netral atau sedikit basa, suatu kondisi umum dalam air limbah. Muatan negatif yang dihasilkan ini menciptakan situs kuat untuk dua mekanisme utama pertama, Pertukaran Ion, di mana kation logam berat (Mn+) ditarik kuat dan menggantikan ion H+ dan kedua, Kompleksasi, di mana ion logam membentuk ikatan koordinasi dengan atom Oksigen dalam gugus karboksilat (Yuniarti et al., 2022). Sementara pektin menyediakan kekuatan ionik, kerangka struktural dasar stroberi yang terdiri dari Selulosa dan Hemiselulosa memberikan kontribusi tambahan.

Kedua polisakarida ini kaya akan Gugus Hidroksil (-OH). Meskipun memiliki afinitas pengikatan yang lebih lemah daripada -COOH, gugus -OH sangat diperlukan. Gugus ini berperan penting dalam memfasilitasi Ikatan Hidrogen dengan polutan polar dan berkontribusi pada muatan permukaan total, terutama pada pH yang lebih tinggi (Budi et al., 2023). Selain struktur polisakarida, komponen seperti Lignin dan Senyawa Fenolik juga melengkapi spektrum adsorpsi. Meskipun kandungan lignin pada buah cenderung lebih rendah daripada kayu, fraksi ini tetap relevan karena mengandung gugus Fenolik (-OH) dan struktur Cincin Aromatik (Gao et al., 2020). Gugus fenolik dapat berpartisipasi dalam kompleksasi ion. Lebih jauh lagi, struktur cincin aromatik yang ada pada lignin memungkinkan terjadinya Interaksi π- π Stacking. Interaksi ini sangat efektif dalam menjerat polutan organik dan zat warna yang

juga memiliki cincin aromatik, melengkapi kemampuan pektin yang cenderung berfokus pada polutan anorganik (Gao et al., 2020). Oleh karena itu, spektrum adsorpsi limbah stroberi bersifat komprehensif. Dalam konteks penelitian ini, tujuan pengolahan limbah stroberi melalui maserasi secara teoritis adalah meningkatkan aksesibilitas gugus fungsional yang telah di identifikasi.

Maserasi, sebagai teknik dingin, menjaga integritas gugus -COOH pektin yang sensitif, sambil melunakkan matriks biomassa atau mengekstrak senyawa aktif yang kemudian digunakan untuk melapisi media carrier (Yuniarti et al., 2022). Dengan demikian, efisiensi kontak antara polutan dan situs aktif dapat dimaksimalkan dalam sistem filtrasi. Secara keseluruhan, kontribusi kimia stroberi bersifat sinergis, menyediakan berbagai situs aktif yang menjanjikan efisiensi tinggi dan stabilitas dalam aplikasi filtrasi lingkungan. Kandungan fitokimia dalam buah *F. vesca* sangat dipengaruhi oleh tingkat kematangan, kondisi pertumbuhan, dan faktor iklim mikro (Reis *et al*., 2018).

Bagian yang paling banyak digunakan sebagai agen fungsional adalah buah (receptacle). Meskipun daun dan akar *F. vesca* juga mengandung senyawa fenolik, buah memiliki konsentrasi Antosianin dan Asam Ellagic tertinggi, menjadikannya bagian yang paling efisien untuk ekstraksi berskala besar (Giampieri *et al*., 2012). Proses ekstraksi bertujuan untuk memisahkan metabolit sekunder dari matriks seluler buah. Pemilihan pelarut (misalnya, metanol, etanol, air) merupakan tahap kritis. Pelarut berpolaritas sedang, seperti metanol atau campuran etanol-air, seringkali dipilih karena efektivitasnya dalam melarutkan senyawa fenolik dan flavonoid yang bersifat semi-polar (Mazza & Miniati, 2019). Ekstrak yang dihasilkan dari *F. vesca* berfungsi sebagai prekursor fungsional. Artinya, ekstrak tersebut tidak hanya menjadi aditif, tetapi juga agen yang memberikan properti baru (misalnya, antimikroba) atau meningkatkan properti yang sudah ada (misalnya, stabilitas material) pada produk akhir (filter).

2. Pemanfaatan Stroberi

Menggunakan limbah buah stroberi dalam teknologi penyaringan air adalah cara yang pintar dan ramah lingkungan untuk menciptakan solusi berkelanjutan. Berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa sisa buah stroberi seperti kulit

dan ampas sangat baik dijadikan bahan penyerap alami (Ali et al., 2021). Keunggulan utama limbah ini terletak pada kandungan tinggi pektin di dalam buah. Oleh karena itu, fokus utama penelitian limbah stroberi adalah kemampuannya membersihkan air dari ion logam berat. Daya serap yang tinggi ini berasal dari banyaknya Gugus Karboksil (-COOH) pada pektin. Gugus ini bertindak seperti "magnet" penarik ion. Secara rinci, cara kerjanya adalah melalui pertukaran ion. Berbagai studi membuktikan bahwa limbah buah stroberi efektif menyerap logam beracun seperti Timbal Pb2+) dan Kadmium (Cd2+) (Weng et al., 2020). Penyerapan terjadi karena ion logam ditarik ke dan diikat oleh ion karboksilat (-COO-) yang memiliki muatan negatif di permukaan sisa buah (Yuniarti et al., 2022). Untuk meningkatkan daya serap, para peneliti biasanya memproses limbah buah. Teknik yang umum adalah membuat bio-arang atau karbon aktif dari stroberi melalui pemanasan. Tujuannya adalah memperluas luas permukaan material, sehingga lebih banyak "tempat duduk" pektin yang tersedia. Peningkatan ini membuat daya serap stroberi bersaing dengan bahan penyerap yang dijual di pasaran (Dahri et al., 2021). Selain logam, limbah buah stroberi juga terbukti mampu menghilangkan polutan organik, khususnya zat warna yang bermuatan positif (kationik).

Kemampuan ini muncul karena adanya daya tarik listrik (elektrostatik) yang kuat antara permukaan limbah buah yang bermuatan negatif (-COO-) dengan molekul zat warna yang bermuatan positif (Ali et al., 2021). Lebih lanjut, beberapa penelitian terbaru telah mencoba membuat adsorben lebih spesifik dengan mengubah pektin secara kimia. Tujuannya adalah agar adsorben mampu menyerap polutan yang sulit, seperti polutan yang bermuatan negatif (anionik), dengan menambahkan gugus fungsi yang tepat di permukaan material. Terkait metode penelitian Anda, studi terdahulu sangat mendukung penggunaan metode bersuhu rendah seperti maserasi. Karena pektin mudah rusak oleh panas, maserasi secara teori lebih baik. Penelitian menunjukkan bahwa pengolahan tanpa panas berlebihan membantu menjaga kualitas gugus -COOH pada pektin (Budi et al., 2023), yang merupakan kunci efisiensi penyaringan. Sebagai kesimpulan, penelitian dalam lima tahun terakhir menunjukkan bahwa limbah

buah stroberi adalah bahan penyerap serbaguna dan ampuh. Kekuatannya terletak pada pektin untuk pertukaran ion logam.

3. Ekstraksi Tanin melalui Metode Maserasi

Tanin adalah kelompok senyawa polifenol yang sangat aktif dan penting, terutama melimpah pada sisa buah stroberi hutan (*Fragaria vesca*), seperti kulit dan ampas. Senyawa ini merupakan target utama ekstraksi karena menawarkan sifat fungsional ganda kemampuan mengikat ion logam berat dan berfungsi sebagai agen antimikroba (Ali et al., 2021). Sifat ini menjadikan tanin sebagai bahan ideal untuk lapisan bioaktif filter. Kekuatan fungsional tanin berasal dari banyaknya Gugus Hidroksil Fenolik (-OH) pada strukturnya. Gugus ini bertanggung jawab atas kemampuan tanin membentuk kompleksasi dengan ion logam dan berinteraksi dengan membran sel bakteri. Namun, gugus fenolik ini juga membuat tanin secara inheren termolabil (sensitif terhadap panas). Kerentanan ini adalah tantangan utama dalam setiap tahap pengolahan awal limbah stroberi. Metode Ekstraksi mampu memisahkan senyawa tersebut dari matriks buah tanpa merusak integritas kimianya. Metode ekstraksi yang melibatkan suhu tinggi, seperti Soxhlet, secara umum harus dihindari karena panas dapat menyebabkan degradasi dan oksidasi tanin. Maserasi adalah teknik yang diterapkan untuk mengambil tanin dari limbah stroberi.

Berdasarkan alasan perlindungan kimia, maserasi adalah teknik ekstraksi dingin yang melibatkan perendaman bahan stroberi dalam pelarut pada suhu ruangan atau suhu rendah (Yuniarti et al., 2022). Ini adalah metode sederhana yang meminimalkan input energi termal. Penggunaan maserasi sangatlah penting karena ia secara efektif menghindari degradasi termal dan oksidasi yang merusak gugus -OH aktif (Budi et al., 2023). Jika gugus -OH rusak, kualitas tanin sebagai pengikat logam akan berkurang drastis. Dengan menjaga suhu tetap rendah, maserasi memastikan kualitas fungsional tanin tetap optimal saat digunakan untuk melapisi media filter. Suhu 60℃ sebagai suhu terbaik tanin, sebagai kelompok polifenol, tanin adalah senyawa yang secara alami sensitif terhadap panas (termolabil). Kerusakan (degradasi termal dan oksidasi) pasti terjadi pada tingkat tertentu saat pemanasan. Namun, pengeringan di atas 70℃ atau 80℃ menyebabkan degradasi tanin yang sangat cepat (Gao et al., 2020).

Pengeringan pada suhu yang terlalu rendah memerlukan waktu yang sangat lama. Waktu pengeringan yang sangat panjang ini justru meningkatkan risiko degradasi oksidatif (kerusakan akibat paparan oksigen dalam jangka waktu lama) dan potensi pertumbuhan mikroba (Weng et al., 2020). Oleh karena itu, suhu 60℃ dianggap sebagai kompromi yang sangat baik karena mempercepat pengeringan (mengurangi risiko oksidasi jangka panjang) sementara meminimalkan degradasi termal langsung. Penghalusan (*Grinding*) penghalusan (blender atau grinder) tidak merusak struktur kimia tanin secara langsung. Tantangan utamanya adalah panas gesekan yang dihasilkan selama proses. Untuk melindungi tanin, penghalusan harus dilakukan dalam waktu singkat (intermiten) untuk mencegah kenaikan suhu permukaan.

D.Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA)

1. Definisi ISPA

Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) adalah penyakit infeksi yang menyerang salah satu bagian atau lebih dari saluran pernapasan, mulai dari hidung hingga alveoli, termasuk jaringan adneksanya seperti sinus, rongga telinga tengah, dan pleura (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). Istilah "akut" pada ISPA merujuk pada masa inkubasi dan perjalanan penyakit yang berlangsung hingga maksimal 14 hari, sehingga membedakannya dari infeksi saluran pernapasan kronik yang berlangsung lebih lama dan biasanya bersifat progresif.

Secara anatomis, saluran pernapasan terbagi menjadi dua bagian, yaitu saluran pernapasan atas yang meliputi hidung, faring, dan laring, serta saluran pernapasan bawah yang meliputi trakea, bronkus, bronkiolus, dan alveoli. ISPA dapat menyerang salah satu maupun kedua bagian tersebut secara bersamaan, dengan tingkat keparahan yang bervariasi tergantung pada lokasi infeksi, agen penyebab, dan kondisi imunitas penderita.

ISPA merupakan salah satu masalah kesehatan masyarakat yang signifikan secara global maupun nasional. Menurut World Health Organization (WHO, 2017), ISPA menjadi salah satu penyebab utama kesakitan dan kematian pada anak balita di negara berkembang, khususnya akibat pneumonia sebagai bentuk ISPA bawah yang paling berat. Di Indonesia, ISPA secara konsisten menempati posisi sepuluh

besar penyakit dengan jumlah kunjungan tertinggi di fasilitas pelayanan kesehatan dasar, baik di Puskesmas maupun rumah sakit.

Selain aspek klinis, ISPA juga dapat ditinjau dari perspektif kesehatan lingkungan, mengingat penyakit ini tidak hanya disebabkan oleh agen infeksius biologis, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kualitas udara yang dihirup sehari-hari (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). Paparan terhadap polutan udara, baik yang berasal dari sumber luar ruangan (kendaraan bermotor, industri, kebakaran lahan) maupun dalam ruangan (asap rokok, bahan bakar biomassa), dapat menjadi faktor pencetus maupun memperberat perjalanan penyakit ISPA.

Kelompok yang paling rentan mengalami ISPA adalah balita, lansia, ibu hamil, serta individu dengan riwayat penyakit pernapasan kronik seperti asma dan Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK). Kerentanan ini disebabkan oleh belum matangnya sistem imun pada balita, penurunan fungsi organ dan imunitas pada lansia, serta kondisi fisiologis khusus yang meningkatkan kebutuhan oksigen pada ibu hamil.

Dampak ISPA tidak hanya terbatas pada gangguan kesehatan fisik semata, tetapi juga berimplikasi pada aspek sosial dan ekonomi, seperti peningkatan angka absensi sekolah dan kerja, peningkatan beban biaya kesehatan rumah tangga, serta penurunan produktivitas masyarakat secara umum. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai definisi, etiologi, dan faktor risiko ISPA menjadi penting sebagai dasar dalam upaya pencegahan dan pengendalian penyakit ini di tingkat individu maupun populasi. Dalam konteks penelitian ini, pemahaman terhadap ISPA menjadi relevan mengingat salah satu faktor lingkungan yang diduga berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kejadian ISPA adalah paparan partikulat halus PM2,5, yang akan dibahas lebih lanjut pada sub bab selanjutnya.

2. Etiologi ISPA

Etiologi ISPA secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua kategori besar, yaitu faktor infeksius yang berasal dari agen biologis seperti virus dan bakteri, serta faktor non-infeksius yang bersumber dari kondisi lingkungan fisik dan kimia di sekitar penderita. Kedua kelompok faktor ini seringkali bekerja secara sinergis dalam meningkatkan risiko maupun memperberat derajat keparahan penyakit.

Faktor Infeksius. Sebagian besar kasus ISPA, terutama pada ISPA atas, disebabkan oleh infeksi virus. Beberapa jenis virus yang paling sering ditemukan sebagai agen penyebab antara lain *Rhinovirus*, *Respiratory Syncytial Virus* (RSV), *Adenovirus*, virus *Parainfluenza*, serta virus *influenza* tipe A dan B. Virus-virus tersebut umumnya menyerang mukosa saluran napas atas dan menimbulkan gejala ringan hingga sedang seperti pilek, batuk, dan nyeri tenggorokan. Selain virus, infeksi bakteri juga berperan penting, khususnya pada kasus ISPA bawah yang lebih berat seperti pneumonia. Bakteri yang paling umum ditemukan adalah *Streptococcus pneumoniae, Haemophilus influenzae* tipe B, dan *Staphylococcus aureus*. Infeksi bakteri seringkali terjadi sebagai infeksi sekunder yang menyertai atau mengikuti infeksi virus sebelumnya, terutama pada individu dengan daya tahan tubuh yang lemah. Penularan agen infeksius ini umumnya terjadi melalui tiga jalur utama, yaitu droplet saat batuk atau bersin, kontak langsung dengan sekret pernapasan penderita, serta melalui udara (airborne) pada ruangan tertutup dengan ventilasi buruk (Ardian S. Leky et al., 2022).

Faktor Non-Infeksius/Lingkungan. Di luar agen biologis, paparan terhadap bahan pencemar udara memiliki peran yang tidak kalah penting dalam patogenesis ISPA. Polutan seperti particulate matter ($PM_{2,5}$ dan PM_{10}), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO_2), nitrogen dioksida (NO_2), serta asap rokok dapat bertindak sebagai predisposing factor yang meningkatkan kerentanan saluran napas terhadap infeksi, maupun sebagai precipitating factor yang secara langsung memicu timbulnya gejala ISPA.

Partikel halus seperti $PM_{2,5}$, karena ukurannya yang sangat kecil (kurang dari 2,5 mikrometer), mampu menembus hingga ke saluran napas bagian bawah bahkan mencapai *alveoli*. Paparan partikel ini menyebabkan iritasi mekanis pada mukosa saluran napas, kerusakan sel epitel bersilia yang berfungsi sebagai mekanisme pertahanan alami saluran napas, serta memicu respons inflamasi sistemik dan lokal. Kondisi inflamasi ini pada akhirnya mempermudah kolonisasi patogen dan memperberat gejala infeksi yang sudah ada sebelumnya.

Interaksi antara faktor infeksius dan non-infeksius inilah yang menjelaskan mengapa daerah dengan tingkat pencemaran udara tinggi cenderung memiliki

insidensi ISPA yang lebih tinggi pula, meskipun agen infeksius penyebab dasarnya (virus dan bakteri) relatif sama dengan daerah dengan kualitas udara yang lebih baik.

3. Klasifikasi ISPA

Klasifikasi ISPA diperlukan untuk memudahkan penegakan diagnosis, penentuan tatalaksana, serta prediksi prognosis penyakit. Secara umum, klasifikasi ISPA dapat ditinjau dari dua sudut pandang utama, yaitu berdasarkan lokasi anatomis yang terkena infeksi dan berdasarkan tingkat keparahan klinis yang ditimbulkan (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). Berdasarkan Lokasi Anatomis. ISPA dibagi menjadi ISPA atas (*upper respiratory tract infection*) dan ISPA bawah (*lower respiratory tract infection*).

ISPA atas mencakup infeksi pada hidung, sinus paranasal, faring, dan laring, dengan contoh klinis seperti *common cold* (rinitis), faringitis, tonsilitis, dan laringitis. ISPA atas umumnya bersifat self-limiting dan sembuh dalam beberapa hari tanpa komplikasi berarti pada individu dengan imunitas baik. Sebaliknya, ISPA bawah mencakup infeksi pada *trakea, bronkus, bronkiolus*, hingga parenkim paru, dengan contoh klinis seperti *bronkitis akut, bronkiolitis,* dan *pneumonia*. ISPA bawah umumnya memiliki derajat keparahan yang lebih tinggi dibandingkan ISPA atas, karena melibatkan struktur saluran napas yang lebih vital dalam proses pertukaran gas, sehingga berisiko menimbulkan komplikasi seperti gagal napas apabila tidak ditangani dengan tepat. Berdasarkan Tingkat Keparahan. Mengacu pada pedoman Manajemen Terpadu Balita Sakit (MTBS) yang dikeluarkan oleh Kementerian Kesehatan RI, ISPA pada balita diklasifikasikan menjadi tiga tingkat keparahan (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). Pertama, ISPA ringan (bukan pneumonia), ditandai dengan gejala batuk dan/atau pilek tanpa disertai napas cepat maupun tarikan dinding dada ke dalam. Kedua, ISPA sedang atau pneumonia, ditandai dengan adanya napas cepat (takipnea) sesuai ambang batas usia, namun tanpa tarikan dinding dada.

ISPA berat atau pneumonia berat, ditandai dengan adanya tarikan dinding dada bagian bawah ke dalam (*chest indrawing*), stridor pada saat anak tenang atau tidak menangis, serta dapat disertai tanda bahaya umum seperti tidak dapat minum atau menyusu, kejang, kesadaran menurun, atau muntah terus-menerus. Klasifikasi

tingkat keparahan ini menjadi dasar penting dalam menentukan tempat dan jenis tatalaksana yang diperlukan, apakah cukup rawat jalan di fasilitas kesehatan primer atau memerlukan rujukan dan rawat inap di rumah sakit.

Pemahaman terhadap kedua sistem klasifikasi ini penting dalam konteks penelitian kesehatan lingkungan, karena memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi apakah paparan faktor lingkungan tertentu, seperti $PM_{2,5}$, lebih berkaitan dengan peningkatan insidensi ISPA secara umum, atau justru berkaitan dengan peningkatan derajat keparahan pada kasus yang sudah terjadi.

4. Faktor Risiko ISPA

Kejadian ISPA dipengaruhi oleh berbagai faktor risiko yang dapat dikelompokkan menjadi faktor *host* (pejamu), faktor lingkungan, dan faktor perilaku. Ketiga kelompok faktor ini saling berinteraksi dalam menentukan kerentanan seseorang terhadap infeksi saluran pernapasan (Ardian S. Leky et al., 2022). Faktor *Host*. Usia merupakan salah satu faktor risiko utama, di mana balita dan lansia menjadi kelompok yang paling rentan. Pada balita, hal ini disebabkan oleh sistem imun yang belum berkembang sempurna serta ukuran saluran napas yang masih sempit, sehingga lebih mudah mengalami obstruksi. Pada lansia, penurunan fungsi imun *(imunosenescence*) serta seringnya disertai penyakit penyerta (*komorbiditas*) meningkatkan kerentanan terhadap infeksi maupun komplikasi yang lebih berat. Status gizi juga berperan penting, di mana anak dengan gizi kurang atau gizi buruk memiliki daya tahan tubuh yang lebih rendah, sehingga lebih rentan mengalami infeksi termasuk ISPA dan mengalami perjalanan penyakit yang lebih berat.

Riwayat pemberian ASI eksklusif turut memengaruhi risiko ISPA pada bayi, karena ASI mengandung berbagai komponen imunologis seperti *imunoglobulin A* (IgA) yang berperan dalam melindungi saluran napas dari infeksi. Bayi yang tidak mendapatkan ASI eksklusif cenderung memiliki risiko ISPA yang lebih tinggi dibandingkan bayi yang mendapatkan ASI eksklusif selama enam bulan pertama kehidupan. Status imunisasi, khususnya imunisasi campak, *pertusis* (DPT), dan Hib, juga berperan dalam mencegah komplikasi ISPA, mengingat beberapa penyakit tersebut dapat menyebabkan komplikasi pneumonia apabila anak tidak mendapatkan imunisasi lengkap.

Faktor Lingkungan. Kepadatan hunian dan ventilasi rumah yang buruk meningkatkan risiko penularan agen infeksius antar penghuni rumah, sekaligus memperburuk kualitas udara dalam ruangan akibat akumulasi polutan (Ardian S. Leky et al., 2022). Penggunaan bahan bakar biomassa (kayu bakar, arang) untuk memasak tanpa cerobong asap yang memadai juga menjadi sumber utama pencemaran udara dalam ruangan di banyak rumah tangga, khususnya di wilayah pedesaan. Selain itu, paparan terhadap polutan udara luar ruangan seperti $PM_{2,5}$ dari kendaraan bermotor, industri, maupun kebakaran lahan turut berkontribusi terhadap peningkatan risiko ISPA di tingkat populasi.

Faktor Perilaku. Paparan asap rokok, baik sebagai perokok aktif maupun pasif (*secondhand smoke*), merupakan salah satu faktor risiko perilaku yang signifikan, terutama pada anak-anak yang tinggal serumah dengan perokok. Selain itu, kondisi sosial ekonomi keluarga turut memengaruhi akses terhadap fasilitas kesehatan, pengetahuan tentang pencegahan penyakit, serta kemampuan dalam menyediakan lingkungan rumah yang sehat (Ardian S. Leky et al., 2022). Kombinasi dari berbagai faktor risiko tersebut menjelaskan mengapa kejadian ISPA seringkali lebih tinggi pada kelompok masyarakat dengan kondisi sosial ekonomi rendah yang tinggal di lingkungan dengan kualitas udara buruk, sehingga intervensi pencegahan ISPA idealnya dilakukan secara multisektor, tidak hanya berfokus pada aspek klinis semata.

5. Tanda dan Gejala ISPA

Manifestasi klinis ISPA sangat bervariasi, mulai dari gejala ringan yang bersifat self-limiting hingga gejala berat yang mengancam jiwa, tergantung pada lokasi infeksi, agen penyebab, serta kondisi imunitas penderita (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). Pengenalan tanda dan gejala ISPA secara dini sangat penting dalam upaya deteksi awal dan pencegahan komplikasi.

Pada ISPA ringan, gejala yang paling umum ditemukan adalah batuk dan pilek (rinorea), yang dapat disertai dengan bersin-bersin, hidung tersumbat, dan nyeri tenggorokan ringan. Gejala-gejala ini umumnya muncul akibat infeksi pada saluran napas atas dan biasanya membaik dengan sendirinya dalam waktu 7-10 hari tanpa memerlukan pengobatan khusus, kecuali terapi simtomatik untuk meredakan keluhan.

Demam merupakan gejala yang sering menyertai ISPA, baik pada infeksi saluran napas atas maupun bawah, sebagai respons sistemik tubuh terhadap infeksi. Derajat demam dapat bervariasi dari ringan (*subfebris*) hingga tinggi, tergantung pada jenis agen infeksius dan respons imun individu. Pada anak-anak, demam tinggi yang disertai gejala pernapasan perlu diwaspadai sebagai tanda kemungkinan progresi ke ISPA bawah yang lebih berat.

Pada kasus ISPA yang lebih berat, terutama yang melibatkan saluran napas bawah, dapat ditemukan gejala napas cepat atau takipnea, yaitu peningkatan frekuensi napas melebihi batas normal sesuai kelompok usia. Gejala ini merupakan salah satu indikator klinis utama dalam mengklasifikasikan pneumonia menurut pedoman MTBS (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). Selain itu, dapat pula ditemukan tarikan dinding dada bagian bawah ke dalam (*chest indrawing*) saat inspirasi, yang menandakan adanya peningkatan upaya bernapas akibat obstruksi atau kekakuan pada jaringan paru.

Pada kondisi yang lebih parah, dapat muncul *stridor*, yaitu suara napas kasar bernada tinggi yang terdengar saat inspirasi akibat penyempitan saluran napas atas, terutama pada laring atau *trakea*. Apabila *stridor* terdengar bahkan saat anak dalam kondisi tenang (bukan hanya saat menangis), hal ini mengindikasikan derajat *obstruksi* yang signifikan dan memerlukan penanganan segera. Gejala paling berat yang dapat muncul adalah sianosis, yaitu perubahan warna kebiruan pada bibir, kuku, atau kulit akibat kekurangan oksigen dalam darah, yang menandakan kondisi kegawatdaruratan dan memerlukan penanganan medis segera. Selain gejala-gejala klasik tersebut, ISPA juga dapat menimbulkan gejala penyerta lain seperti nyeri kepala, nyeri otot (*mialgia*), lemas, penurunan nafsu makan, serta pada anak-anak dapat disertai rewel dan gangguan tidur. Pada kasus tertentu, terutama yang berkaitan dengan paparan polutan udara seperti $PM_{2,5}$, gejala dapat berupa penurunan kapasitas fungsi paru yang terukur secara objektif melalui pemeriksaan spirometri, meskipun secara klinis penderita belum menunjukkan gejala berat.

6. Diagnosis ISPA

Penegakan diagnosis ISPA dilakukan secara bertahap, dimulai dari anamnesis riwayat penyakit, dilanjutkan dengan pemeriksaan fisik, dan apabila diperlukan didukung dengan pemeriksaan penunjang untuk memastikan diagnosis dan

menentukan tatalaksana yang tepat (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). *Anamnesis* dilakukan untuk menggali riwayat gejala yang dialami penderita, meliputi onset dan durasi batuk atau pilek, ada tidaknya demam beserta pola dan derajatnya, riwayat kesulitan bernapas atau napas cepat, riwayat kontak dengan penderita ISPA lain, riwayat imunisasi, status gizi, serta riwayat paparan terhadap faktor risiko lingkungan seperti asap rokok, penggunaan bahan bakar biomassa, atau tinggal di lingkungan dengan kualitas udara buruk. *Anamnesis* yang lengkap membantu tenaga kesehatan dalam memperkirakan kemungkinan etiologi serta tingkat keparahan penyakit. Pemeriksaan Fisik. Pemeriksaan fisik yang dilakukan meliputi pengukuran tanda vital seperti suhu tubuh, frekuensi napas, dan frekuensi nadi. Frekuensi napas menjadi parameter kunci dalam menentukan ada tidaknya takipnea sesuai ambang batas usia menurut pedoman MTBS, yaitu ≥60 kali/menit untuk bayi kurang dari 2 bulan, ≥50 kali/menit untuk usia 2-12 bulan, dan ≥40 kali/menit untuk usia 1-5 tahun (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023). Selain itu, dilakukan pula inspeksi untuk melihat ada tidaknya tarikan dinding dada ke dalam, serta auskultasi paru untuk mendeteksi suara napas tambahan seperti ronki, wheezing, atau penurunan suara napas yang dapat mengindikasikan adanya konsolidasi atau obstruksi saluran napas.

Pemeriksaan Penunjang. Pada fasilitas kesehatan primer, diagnosis ISPA umumnya cukup ditegakkan berdasarkan anamnesis dan pemeriksaan fisik sesuai algoritma MTBS, tanpa memerlukan pemeriksaan penunjang lanjutan. Namun pada kasus yang lebih kompleks atau memerlukan konfirmasi lebih lanjut, dapat dilakukan pemeriksaan penunjang seperti *pulse oximetry* untuk menilai saturasi oksigen dalam darah, yang penting untuk mendeteksi hipoksemia pada kasus pneumonia berat.

Pemeriksaan foto *rontgen toraks* dapat dilakukan apabila dicurigai adanya pneumonia atau komplikasi lain seperti efusi pleura, untuk melihat gambaran infiltrat atau konsolidasi pada jaringan paru. Pemeriksaan laboratorium seperti hitung jenis leukosit dan *C-Reactive Protein* (CRP) dapat membantu membedakan kemungkinan etiologi infeksi virus (umumnya leukosit normal atau limfositosis) dengan infeksi bakteri (umumnya leukositosis dengan dominasi neutrofil serta CRP yang meningkat signifikan). faktor lingkungan seperti paparan $PM_{2,5}$, diagnosis

ISPA umumnya diperoleh melalui data sekunder rekam medis di fasilitas pelayanan kesehatan, seperti diagnosis klinis oleh tenaga medis yang tercatat dalam sistem informasi kesehatan (misalnya SIMPUS atau e-Puskesmas), maupun melalui kuesioner terstruktur yang mengacu pada kriteria gejala ISPA sesuai pedoman yang berlaku, guna memastikan konsistensi dan validitas data yang digunakan dalam analisis hubungan antara paparan $PM_{2,5}$ dan kejadian ISPA.

7. Paparan $PM_{2,5}$ sebagai Faktor Risiko ISPA

Paparan $PM_{2,5}$ berkontribusi kuat pada terjadinya iritasi saluran napas, peningkatan kasus ISPA, asma, dan bronkitis. Penelitian oleh Elsa (2020) menunjukkan bahwa paparan akut $PM_{2,5}$ sebesar 91–151 μg/m³ selama beberapa jam menurunkan fungsi paru FVC dan FEV1 secara signifikan pada siswa sekolah dasar di Bandung hal ini memperlihatkan bahwa paparan singkat pun dapat menurunkan kapasitas respirasi dan menyebabkan gangguan aktivitas fisik harian (Elsa, 2020).Paparan $PM_{2,5}$ yang melebihi baku ambang batas 55 μg/m³ meningkatkan risiko infeksi saluran pernapasan akut pada balita dan lansia hingga dua kali lipat dibanding paparan rendah hal ini disebabkan oleh tingginya konsentrasi partikel yang lolos hingga *alveoli* dan menimbulkan *stres oksidatif*, peradangan, serta memperburuk gejala asma (Negara et al., 2021).Lompatan kejadian ISPA hingga 32% pada anak-anak usia sekolah setelah puncak musim polusi, khususnya di kelas ber-AC dan ventilasi minim. Paparan kronik $PM_{2,5}$ berkaitan dengan penurunan indeks massa tubuh dan kenaikan berat absensi (Dewi et al., 2022). Konsentrasi $PM_{2,5}$ di Jakarta pada musim kemarau hampir rutin melampaui baku *WHO* lonjakan sampai 75–100 μg/m³ menyebabkan ISPA naik 20–50% di Puskesmas ibu kota, terutama di kecamatan padat lalu lintas.

Kondisi ini makin parah saat terjadi kebakaran lahan, dengan lonjakan pasien ISPA di atas 30% pada kelompok rentan (BMKG, 2024).Paparan jangka panjang $PM_{2,5}$ berkorelasi erat dengan peningkatan prevalensi Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK), kematian dini akibat penyakit kardiopulmoner, serta potensi tekanan darah tinggi setelah paparan berulang selama 6-12 bulan, khususnya di kawasan industri Batam, Semarang, dan Surabaya (Adi Prasetyo, 2023).Tika, dkk (2021) menunjukkan peningkatan 1,5 kali lipat kejadian pneumonia dan ISPA di rumah tangga dengan rata-rata $PM_{2,5}$ dalam ruangan harian 60–120 μg/m³ angka ini

jauh di atas PBM nasional dan memperkuat peran $PM_{2,5}$ sebagai pencetus ISPA dan komplikasi pernapasan (Tika et al., 2021). Penelitian oleh Irwansyah dan Azzahra (2023) membuktikan bahwa rata-rata tingkat $PM_{2,5}$ di rumah tangga urban Padang dan Banda Aceh di musim kemarau mencapai 110–180 μg/m³, prevalensi asma dan eksaserbasi ISPA meningkat proporsional dengan paparan tersebut (Irwansyah & Azzahra, 2023).

E. Low Cost Sensor

Low Cost Seinsor (LCS) adalah seibuiah alat atauì seibuiah seinsor uintuik meinguikuir kuialitas uidara yang meimiliki biaya reilatif reindah dibadingkan deingan seinsor lainnya teitapi tidak meimiliki peirbeidaan yang signifikan dari alat atauì seinsor yang meimiliki harga leibih tinggi.

Peimantauian poluisi uidara, teirmasuik seinsor beirbiaya reindah dan meitodei inovatif lainnya, hanyalah salah satuì aspeik dari manajeimein kuialitas uidara. Seilain data peimantauian, peirkiraan eimisi poluitan dari suimbeir uitama haruis diguinakan uintuik meinginformasikan reincana aksi uidara beirsih uintuik meinguirangi eimisi beirbahaya (Kuishwaha Meieinakshi eit al., 2020).

Low- Cost Seinsors / LCSs teilah muincuil dalam beibeirapa tahuin teirakhir seibagai alat peileingkap yang keitika dikombinasikan deingan peiralatan konveinsional, meimuingkinkan peimantauian kuialitas uidara meinjadi leibih eifeiktif, seicara signifikan meiningkatkan reisoluisi spasial data peimantauian uidara dan seicara eifeiktif meilibatkan warga dalam peinguikuiran eikspeirimeintal (Robinson, J.A., 2018).

F. Air Quality Detector

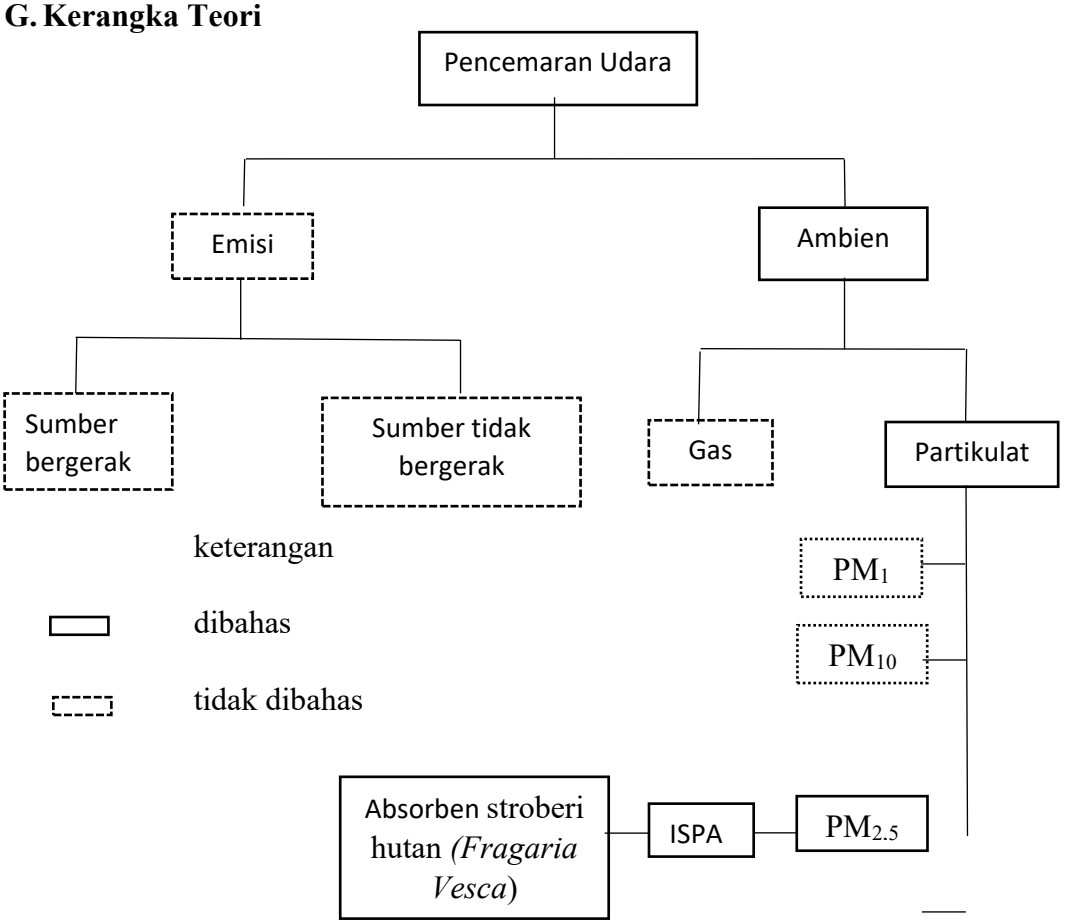
Air Quality Detector merupakan alat ukur portabel merek KKMOON tipe H8 Plus yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur kualitas udara di suatu ruangan atau lingkungan secara langsung (*real time*). Alat ini mampu melakukan enam pengukuran sekaligus dalam satu perangkat, yaitu karbon dioksida (CO2), karbon monoksida (CO), formaldehida (HCHO), *total volatile organic compounds* (TVOC), PM2.5, dan PM10 (KKMOON, 2024). Alat ini bekerja dengan mengombinasikan tiga teknologi sensor, yaitu teknologi deteksi inframerah, teknologi deteksi laser, dan teknologi deteksi elektrokimia, sehingga mampu menghasilkan data pengukuran yang akurat secara *real time*. Hasil pengukuran

ditampilkan pada layar LCD yang dilengkapi indikator warna (alarm warna) untuk memudahkan interpretasi kualitas udara, yaitu hijau yang menunjukkan kualitas udara baik (*good*), kuning (*slight*), oranye (*moderate*), dan merah yang menunjukkan kualitas udara buruk (*serious*) (KKMOON, 2024).

Alat ini memiliki rentang pengukuran PM2.5 sebesar 0–999 μg/m³, PM10 sebesar 0–999 μg/m³, HCHO sebesar 0–1.999 mg/m³, TVOC sebesar 0–1.999 mg/m³, CO sebesar 0–999 ppm, dan CO2 sebesar 400–5.000 ppm, dengan tingkat akurasi ±15%. Alat ini terbuat dari material ABS dengan dimensi unit 7 x 3,5 x 9 cm serta ditenagai oleh baterai berkapasitas 1.200 mAh yang dapat diisi ulang melalui kabel USB Type-C, sehingga mudah dibawa dan digunakan di berbagai lokasi pengukuran (KKMOON, 2024).

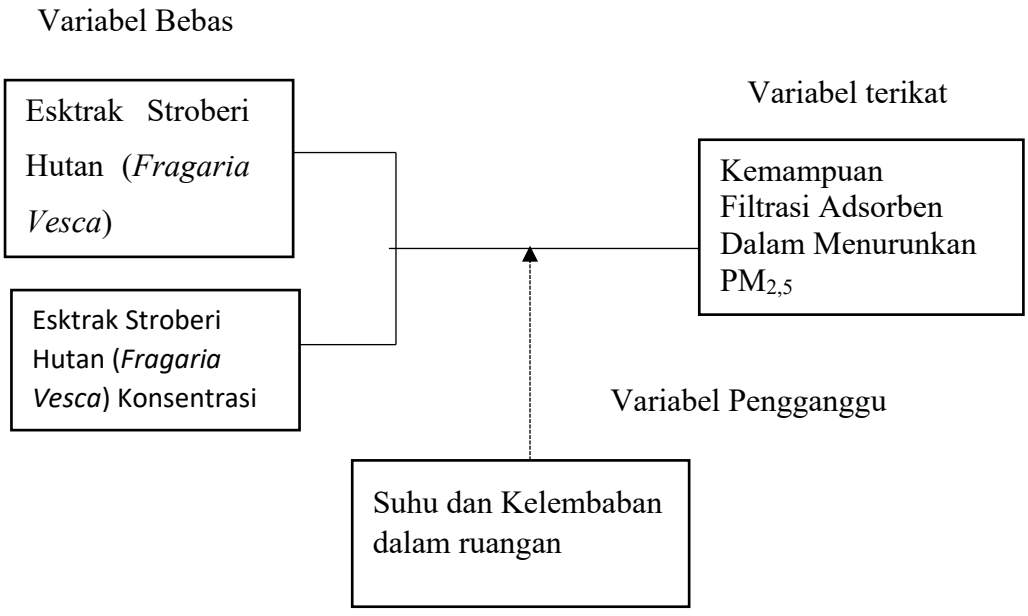
Dalam penggunaannya, alat dinyalakan dan diletakkan pada titik pengukuran dengan posisi datar serta tidak terhalang oleh benda lain, kemudian dibiarkan beberapa saat hingga sensor stabil membaca kondisi udara di sekitarnya, setelah itu nilai konsentrasi yang muncul pada layar dicatat sebagai hasil pengukuran. Meskipun alat ini memiliki enam parameter pengukuran, dalam penelitian ini parameter yang digunakan hanya konsentrasi PM2.5 (μg/m³), yaitu partikel debu halus berdiameter ≤2,5 mikrometer yang dapat berasal dari debu, asap kendaraan, maupun proses pembakaran. Partikel PM2.5 yang berukuran sangat halus ini dapat masuk hingga ke saluran pernapasan bagian bawah dan memengaruhi fungsi paru-paru serta kesehatan pernapasan penghuni rumah (WHO, 2021). Oleh karena itu, pengukuran PM2.5 dalam penelitian ini digunakan sebagai salah satu indikator kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) di lingkungan rumah responden, yang menggambarkan kondisi lingkungan fisik rumah yang dapat berhubungan dengan kesehatan dan kenyamanan penghuninya.

G. Kerangka Teori



Gambar 3 Kerangka Teori
Sumber (Karliansyah, 2020)

H. Kerangka Konsep



Gambar 4 Kerangka Konsep

I. Definisi Operasional (DO)

Tabel 2 Definisi Operasional

NO	Variabel	Definisi	Alat Ukur	Hasil Ukur	Skala Ukur
1	Stroberi Hutan *(Fragaria Vesca*)	Bahan yang digunakan untuk menurunkan konsentrasi $PM_{2,5}$ melalu proses maserasi dengan konsentrasi 10% dan 15%	Timbang	gr	Rasio
2	PM $_{2,5}$	$PM_{2,5}$ adalah partikel udara yang berukuran lebih kecil dari atau sama dengan 2,5 mikrometer (µm) yang ada pada rumah penderita ispa di ukur sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan filter dengan bahan ekstrak stroberi hutan *(Fragaria Vesca*) konsentrasi 10% dan 15% .	Air Quality dan Low Cost Sensor	Konsentrasi masa µg/m3	Rasio
3	Filtrasi	Sistem penyaringan udara *indoor* berbasis adsorben menggunakan bahan ekstrak stroberi hutan (*Fragaria vesca*) untuk menangkap dan mengurangi $PM_{2,5}$	-	-	Rasio

4	Kejadian ISPA (Infeksi Saluran Pernapasan Akut)	Kondisi seseorang yang mengalami gejala ISPA seperti batuk, pilek, demam, atau sesak napas dalam 2 minggu terakhir, berdasarkan data kesehatan atau wawancara	Wawancara	Kuesioner	Kejadian ISPA

J. Hipotesis

H0: Tidak Terdapat perbedaan penurunan kadar $PM_{2,5}$ antara kadar konsentrasi Stroberi Hutan *(Fragaria Vesca*) 10% dan konsentrasi 15 %

Ha: Terdapat perbedaan penurunan kadar $PM_{2,5}$ antara kadar konsentrasi Stroberi Hutan *(Fragaria Vesca*) 10% dan konsentrasi 15 %