Bab V
Kualitas Udara dalam Ruang: Analisis, Evaluasi, dan Upaya Mitigasi

Indra Chandra

A. Pentingnya Pemahaman Terhadap Kualitas Udara Dalam Ruang

Kualitas udara dalam ruang merupakan salah satu aspek penting dalam kesehatan lingkungan yang sering kali terabaikan. Meskipun kita lebih sering mendengar tentang polusi udara ambien, kenyataannya adalah manusia menghabiskan sebagian besar waktunya di dalam ruangan.

Beberapa faktor penyebab buruknya kualitas udara dalam ruang meliputi material bangunan (seperti bahan kimia bangunan),

I. Chandra
Universitas Telkom, *e-mail*: indrachandra@telkomuniversity.ac.id

© 2026 Editor & Penulis

Chandra, I. (2026). Kualitas Udara Dalam Ruang:Analisis, Evaluasi, dan Upaya Mitigasi. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (75–100). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1809
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

aktivitas manusia (seperti memasak dan membersihkan rumah), serta masuknya polutan dari luar ruangan (Mfarrej et al., 2020; Notman, 2020; Saad et al., 2017). Sumber emisi tersebut meningkatkan konsentrasi gas dan partikel berbahaya di udara yang dapat berimplikasi pada kesehatan penghuninya (Mfarrej et al., 2020; Saad et al., 2017). Selain itu, kondisi lingkungan seperti temperatur, kelembapan, dan ventilasi juga dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruang.

Lebih jauh, kegiatan memasak atau penggunaan pemanas ruangan dapat menghasilkan nitrogen oksida ($NO_x \approx NO + NO_2$) (Kumie et al., 2009). Senyawa *volatile organic compound* (VOC) seperti formaldehida dapat berasal dari interior bangunan (Harčárová, 2020). Keberadaan NO_x dan VOC tersebut bersama oksigen (O_2) jika terpapar sinar matahari dapat membentuk ozon (O_3) (Lazaridis dan Aleksandropoulou, 2009), yang sama berbahayanya terhadap kesehatan manusia. Di sisi lain, pembakaran arang dan kayu dapat menghasilkan sulfur dioksida (SO_2) (Seow et al., 2015). Selain itu, proses pembakaran yang tidak sempurna dapat menghasilkan konsentrasi massa partikulat dengan berbagai ukuran (Isaxon et al., 2015; Morawska et al., 2017).

Logam berat yang berasal dari berbagai kegiatan di dalam ruang, seperti pembakaran rokok (Cd, Pb, atau Cr), penyolderan di laboratorium (Pb, Cu, atau Zn), atau produk kosmetik (Pb, Cd, atau Hg), dan/atau infiltrasi udara luar juga dapat ditemukan (Hashemi et al., 2020; Jha et al., 2020). Logam berat tersebut dapat bersifat karsinogenik, contohnya arsenik, kadmium, dan timbal, yang merupakan beberapa penyebab kanker. Logam berat non-karsinogenik seperti kromium, kobalt, dan aluminium, apabila terpapar dalam jumlah yang cukup besar dan jangka waktu yang lama dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan. Sejalan dengan itu, gas radioaktif seperti radon umumnya ditemukan di dalam ruangan karena berasal dari tanah, batuan, atau air tanah yang mengandung unsur uranium dan torium. Gas ini merupakan hasil peluruhan alami unsur radioaktif tersebut dan dapat masuk ke dalam bangunan melalui retakan pada dinding, celah fondasi,

saluran pipa, maupun pori-pori material bangunan (Lugg & Probert, 1997).

Selain sumber polusi dalam bentuk gas dan partikulat, mikroorganisme juga dapat menimbulkan masalah kesehatan. Mikroorganisme seperti bakteri, virus, dan jamur yang berasal dari manusia, hewan peliharaan, tanaman, saluran air, pendingin ruangan, dan/atau ventilasi, disebut juga sebagai bioaerosol karena pola penyebarannya melalui udara atau menempel pada partikulat yang kemudian menyebar di dalam ruangan (Srikant et al., 2008).

Studi yang dilakukan Mousavi et al. (2019) dan Andhikari et al. (2006) menunjukkan bahwa parameter temperatur, kelembapan, dan ventilasi dapat meningkatkan secara signifikan terhadap konsentrasi bioaerosol dan jenis polutan lainnya. Sirkulasi udara yang baik melalui ventilasi yang tepat dapat meminimalisasi kemungkinan buruknya kualitas udara dalam ruang.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, paparan terhadap berbagai polutan dalam ruang dapat menyebabkan masalah kesehatan, mulai dari iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, hingga kondisi yang lebih serius seperti penyakit jantung dan paru-paru. Beberapa polutan dalam ruang bahkan telah terbukti bersifat karsinogenik, seperti gas radon yang berasal dari tanah dan batuan di bawah bangunan, senyawa organik volatil (VOC) (misalnya formaldehida dan benzena) dari cat, perekat, serta furnitur kayu olahan, dan partikulat halus ($PM_{2.5}$) yang membawa senyawa berbahaya seperti logam berat dan hidrokarbon aromatik polisiklik.

Paparan jangka panjang terhadap zat-zat ini dapat meningkatkan risiko kanker paru, nasofaring, maupun leukemia, terutama apabila ventilasi ruangan buruk dan sumber emisi tidak terkendali. Namun, meskipun kualitas udara dalam ruang diakui penting, masih banyak yang perlu diketahui tentang dampaknya terhadap kesehatan manusia (Velichkova et al., 2019). Misalnya, kita perlu lebih memahami bagaimana polutan udara dalam ruangan berinteraksi satu sama lain serta bagaimana polutan udara memengaruhi kesehatan manusia dalam jangka panjang (Vardoulakis et al., 2020). Kita juga perlu

lebih memahami bagaimana faktor-faktor seperti ventilasi dan kelembapan memengaruhi konsentrasi polutan udara dalam ruang.

Dengan makin berkembangnya sains dan teknologi, pengembangan sensor dan kinerjanya merupakan langkah penting dalam memantau polutan udara dan kondisi iklim mikro. Perangkat tersebut diharapkan dapat membantu dalam pemahaman kondisi kualitas udara dan iklim mikro, terutama di dalam ruangan.

Teknologi *Internet of Things* (IoT) telah dimanfaatkan di berbagai negara untuk pemantauan kualitas udara dalam ruang secara *real-time*, sehingga memungkinkan pengumpulan data berkelanjutan mengenai konsentrasi polutan dan kondisi iklim mikro di lingkungan tertutup. Sementara itu, penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) dapat mengakselerasi interpretasi data dan prediksi paparan polutan serta dampak jangka pendek dan panjang terhadap kesehatan manusia (Mani et al., 2021; Saini et al., 2021).

Penerapan langsung di antaranya telah dilakukan Kitchilan et al. (2022) dengan mengembangkan perangkat berbasis IoT yang hemat biaya dan pemanfaatan AI untuk prediksi dalam penilaian kualitas udara. Rajasekar et al. (2020) menambahkan kemampuan prediksi penyakit dari pengukuran berbasis IoT.

Penelitian secara komprehensif tentang kualitas udara dalam ruang sangat dibutuhkan. Diperlukan pemantauan dan metode bagaimana agar kualitas udara dalam ruang dapat dijaga dengan baik, terutama di lingkungan publik seperti fasilitas kesehatan dan pendidikan, dalam upaya menjaga kesehatan penghuninya (Śmiełowska et al., 2017). Hal tersebut memerlukan upaya kolaboratif dalam mengembangkan strategi yang lebih efisien untuk mengurangi paparan terhadap polutan udara dalam ruang. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai sumber polutan akan memberikan landasan bagi implementasi langkah-langkah preventif.

Ruangan pada fasilitas publik memerlukan kebijakan yang bersifat proaktif untuk menjaga kebersihan udara. Dengan demikian, kebijakan tersebut tidak hanya perlu melibatkan para pihak, tetapi juga perlu mendukung penelitian terus-menerus dalam

meningkatkan pemahaman dan tindakan untuk menjaga kualitas udara di ruang-ruang vital ini.

B. Baku Mutu Dan Kebijakan Kualitas Udara Dalam Ruang

Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memperkirakan bahwa setiap tahunnya terdapat sekitar 3,8 juta kematian yang disebabkan oleh polusi udara dalam ruang di seluruh dunia, terutama di negara berkembang (Balmes, 2019). Pembakaran bahan bakar padat organik untuk keperluan memasak atau pemanas memiliki mekanisme pembakaran yang serupa dengan pembakaran tembakau, yaitu sama-sama menghasilkan konsentrasi partikulat dan gas.

Berdasarkan panduan WHO, terdapat senyawa organik seperti hidrokarbon aromatik (*benzene*, *naphthalene*, dan *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs)) dan klorokarbon (*trichloroethylene*, *tetrachloroethylene*), atau senyawa organik yang mudah menguap (VOC) seperti formaldehida (WHO, 2010). Selain itu, konsentrasi karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), dan radon, merupakan sumber emisi lainnya di dalam ruang. Secara khusus, WHO (2014) memberikan panduan normatif mengenai batas paparan polutan hasil pembakaran di rumah, termasuk nilai ambang untuk partikulat halus ($PM_{2.5}$), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), dan senyawa organik volatil (VOC) seperti formaldehida. Panduan tersebut juga menekankan pentingnya penggunaan bahan bakar bersih serta sistem ventilasi yang memadai untuk mencegah akumulasi polutan berbahaya di dalam ruang.

Baku mutu kualitas udara dalam ruang ditetapkan untuk melindungi kesehatan manusia dari dampak negatif polutan udara terhadap organ vital tubuh. Beberapa polutan utama memiliki batas ambang paparan tertentu yang apabila terlampaui dapat meningkatkan risiko gangguan pada sistem pernapasan, darah, atau organ lain, sebagaimana dirangkum pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Baku Mutu dan Risiko Kesehatan Beberapa Polutan Udara dalam Ruang

Polutan	Konsentrasi / Batas Paparan	Risiko / Efek Kesehatan Utama	Organ/Sistem Tubuh yang Terdampak
Benzena	17 µg/m³	Risiko 1:10.000 gangguan darah dan leukemia	Sumsum tulang, sistem hematopoietik
PAHs (Benzo[a] pyrene)	1,2 ng/m³	Risiko 1:10.000 kanker paru/hati	Paru, hati
Klorokarbon (*trichloroethylene, tetrachloroethylene*)	230 µg/m³	Risiko 1:10.000 kanker hati/paru-paru	Hati, paru
Formaldehida (VOC)	>0,1 mg/m³ (rerata 30 menit)	Iritasi mata, hidung, tenggorokan	Saluran pernapasan atas
Karbon monoksida (CO)	≤35 mg/m³ (1 jam)	Gangguan transpor oksigen, hipoksia	Otak, jantung
Nitrogen dioksida (NO_2)	≤200 µg/m³ (1 jam)	Peradangan saluran napas, asma	Paru, bronkus
Radon (Rn-222)	67 Bq/m³	Risiko kanker paru 1:100	Paru-paru

Sumber: WHO (2009; 2010; 2014)

Sementara itu, WHO juga mengeluarkan panduan kualitas udara secara global, mencakup partikulat ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}), O_3, NO_2, SO_2, dan CO (WHO, 2021). Terdapat target akhir dan target sementara (interim) yang dikeluarkan oleh WHO. Rekomendasi jangka pendek (rerata 24 jam) dan panjang (1 tahun) untuk setiap polutan adalah sebagai berikut: $PM_{2.5}$ sebesar 15 µg/m³ (jangka pendek) dan 5 µg/m³ (jangka panjang); PM_{10} sebesar 45 µg/m³ dan 15 µg/m³; serta NO_2 sebesar 25 µg/m³ dan 10 µg/m³. CO dan SO_2 rerata konsentrasi per harinya adalah masing-masing 4 mg/m³ dan 40 µg/m³, sedangkan O_3 berdasarkan rerata per 8 jam, yaitu 100 µg/m³. Perubahan level konsentrasi tersebut merefleksikan adanya bukti empiris pada paparan konsentrasi rendah terhadap kesehatan manusia dan diharapkan dapat memengaruhi kebijakan kualitas udara di seluruh dunia untuk ke depannya (Hoffmann et al., 2021).

Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (USEPA) bekerja sama dengan WHO dalam mengatasi dampak kesehatan

lingkungan, baik di dalam maupun luar ruangan, termasuk upaya pengurangan emisi polutan, peningkatan kesadaran lingkungan, serta penanganan polusi lintas batas di negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah. USEPA menetapkan standar nasional kualitas udara ambien yang mencakup enam polutan utama, yaitu karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), ozon (O_3), partikulat (PM), dan timbal (Pb) (USEPA, 2023). Meskipun standar ini diterapkan untuk udara luar ruangan karena dampaknya yang signifikan terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan, kriteria tersebut tetap relevan untuk dijadikan acuan dalam penilaian kualitas udara dalam ruang.

Di Indonesia, pengaturan kualitas udara dalam ruang telah ditetapkan melalui Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023, yang merupakan pelaksanaan dari Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Regulasi ini mencakup penetapan parameter dan ambang batas kualitas udara dalam ruang untuk melindungi kesehatan masyarakat, menggantikan dan memperbarui ketentuan sebelumnya yang tertuang dalam Keputusan Menteri Kesehatan Nomor 829 Tahun 1999 tentang Persyaratan Kesehatan Perumahan dan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1077 Tahun 2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah.

Hal ini diperkuat oleh pemerintah dengan memasukkan isu kualitas udara dan perubahan iklim ke dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2025–2029, sebagai bagian dari agenda prioritas pembangunan berkelanjutan dan ketahanan lingkungan. Namun, penerapan di lapangan masih memerlukan strategi operasional dan intervensi lintas sektor agar tidak bersifat *business as usual*. WHO juga mendukung Pemerintah Indonesia, melalui Kementerian Kesehatan (Kemenkes), untuk meninjau kembali kebijakan, rencana implementasi, serta peraturan relevan dari berbagai Kementerian dan Lembaga guna memperkuat upaya pengendalian polusi udara dan mitigasi dampak kesehatan akibat perubahan iklim.

Dalam upayanya tersebut, Kemenkes mengeluarkan naskah "*Peta Jalan Kualitas Udara Dalam Ruang 2022–2030*" sebagai acuan bagi pemerintah dan pihak terkait dalam merencanakan, menyusun, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kebijakan dan strategi terkait kualitas udara dalam ruang. Peta jalan mencakup perencanaan untuk pengelolaan dan pengawasan aspek kesehatan dalam kualitas udara dalam ruang di area perumahan dan tempat umum. Hal ini berfokus pada enam isu prioritas: (1) pengembangan kebijakan, (2) pengawasan, (3) pengembangan sistem pendukung pengelolaan, (4) pengembangan kapasitas sumber daya manusia, (5) pemberdayaan masyarakat dan penguatan institusi, dan (6) pemanfaatan kajian dan perkembangan teknologi terkait kualitas udara dalam ruang.

Target periodik peta jalan pengelolaan kualitas udara dalam ruang di lingkungan permukiman, tempat kerja, tempat rekreasi, serta tempat dan fasilitas umum (termasuk fasilitas pelayanan kesehatan) diselaraskan dengan arah kebijakan RPJMN 2025–2029, yang menempatkan pembangunan kesehatan lingkungan dan pengendalian risiko pencemaran udara sebagai bagian dari agenda prioritas peningkatan kualitas hidup manusia dan ketahanan iklim. Peta jalan tersebut terbagi menjadi tiga tonggak utama, yaitu Periode I (2025–2026) *"Penguatan komitmen dan koordinasi lintas sektor dalam pengelolaan kualitas udara dalam ruang"*; Periode II (2027–2028) *"Pengembangan kapasitas sumber daya manusia, sistem, dan infrastruktur pemantauan kualitas udara dalam ruang"*; serta Periode III (2029–2030) *"Tercapainya implementasi pengelolaan kualitas udara dalam ruang yang bersih, sehat, dan berkelanjutan."*

Dalam dokumen tersebut, polutan dikelompokkan ke dalam lima kelompok besar, yaitu bahan kimia anorganik (CO_2, CO, NO_2, SO_2, O_3, radon), bahan kimia organik (formaldehida, PAHs, VOC), polutan biologis (alergen, fungi, mikroorganisme, serbuk sari), partikulat (PM1, $PM_{2.5}$, PM_{10}), dan lainnya (*asbestos*, pestisida). Menurut Permenkes No. 1077 tahun 2011, persyaratan kualitas udara dalam ruang rumah terdiri atas kualitas fisik (partikulat, temperatur, kelembapan, pencahayaan, dan laju udara bersih), kualitas kimia

(berbagai jenis polutan), serta kualitas biologi (seperti bakteri dan jamur) di lingkungan permukiman, tempat kerja, tempat rekreasi, serta tempat umum (sekolah, fasilitas pelayanan kesehatan, pasar rakyat, prasarana transportasi).

Tentu saja, ada beberapa catatan terkait implementasi kebijakan yang perlu diperhatikan oleh pemerintah. Diperlukan fokus pada mekanisme pemantauan dan evaluasi yang kuat untuk memastikan bahwa kebijakan dan strategi yang diterapkan benar-benar efektif dalam meningkatkan kualitas udara dalam ruangan. Mengingat bahwa isu kualitas udara dalam ruang melibatkan berbagai sektor, perlu ada upaya lebih lanjut untuk memperkuat kolaborasi. Hal ini dapat mencakup kerja sama antara berbagai kementerian, lembaga pemerintah, organisasi masyarakat sipil, dan kelompok masyarakat. Untuk mencapai tujuan jangka panjang, diperlukan pula langkah tambahan untuk meningkatkan pendidikan dan kesadaran masyarakat tentang pentingnya kualitas udara dalam ruang dan bagaimana mereka dapat berkontribusi dalam upaya-upaya tersebut.

C. Teknik Pengukuran dan Analisis Kualitas Udara Dalam Ruang

Pemantauan polutan dalam ruang merupakan aspek penting dalam pengelolaan kualitas udara. Ada berbagai metode dan teknik yang dapat digunakan untuk mengukur dan menganalisis kualitas udara dalam ruang, mulai dari instrumen mahal dengan metode referensi hingga sensor mikro berbiaya murah.

Instrumen berstandar referensi biasa digunakan dalam pemantauan dan pengukuran kualitas udara karena memiliki tingkat akurasi dan keandalan yang tinggi. Teknologi seperti spektrometri massa atau analisis kromatografi gas dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi polutan udara dalam ruang dengan resolusi yang sangat tinggi. Instrumen-instrumen ini memungkinkan *stakeholder* terkait untuk mendeteksi konsentrasi polutan yang mungkin tidak dapat dideteksi oleh metode lain dengan tingkat presisi yang sangat tinggi.

Namun demikian, perangkat standar juga memiliki tantangan dalam hal biaya yang mahal dan memerlukan pelatihan khusus sebelum dan selama digunakan. Beberapa perangkat menggunakan metode pengambilan sampel udara dan dianalisis di laboratorium, yang dapat memakan waktu dan sumber daya. Peralatan lainnya dapat mengukur secara *real-time*, namun selain mahal, juga memerlukan perawatan khusus, dan terkadang harus dikirim kembali ke vendornya dengan biaya yang cukup tinggi. Sebagai alternatifnya, mikrosensor dapat digunakan untuk memantau kualitas udara dalam ruang. Sensor-sensor ini biasanya lebih mudah digunakan dan lebih terjangkau daripada instrumen standar, dan menjadi pilihan yang baik untuk penelitian yang bersifat indikatif atau untuk aplikasi ketika biaya menjadi pertimbangan utama.

Mikrosensor dapat digunakan untuk mengukur berbagai polutan udara dalam ruang, termasuk partikel, gas, dan mikroorganisme. Selain itu, dapat digunakan untuk memantau kondisi lingkungan seperti temperatur, kelembapan, dan intensitas cahaya, yang dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruang.

Mikrosensor memiliki beberapa keterbatasan, dan tidak seakurat atau seandal instrumen standar. Perangkat ini lebih rentan terhadap gangguan dari faktor-faktor lingkungan dan memerlukan kalibrasi secara teratur untuk memastikan hasil yang akurat. Walaupun demikian, dengan berbagai peningkatan kinerja sensor dan sistem pendukung lainnya, perangkat berbasis mikrosensor dapat digunakan untuk memantau kualitas udara di dalam ruang. Villa-López et al. (2017) mengukur VOC menggunakan resonator dengan mendiferensiasi konsentrasi di lingkungan terhadap nilai referensinya. Perubahan massa akibat penyerapan molekul VOC di dalam lapisan polimer akan menyebabkan pergeseran frekuensi resonator. Biasanya, sensor ini memiliki sensitivitas yang cukup tinggi untuk mendeteksi satu atau lebih senyawa VOC.

Teknologi lainnya berbasis semikonduktor menggunakan material nano oksida seng (ZnO) pada elektroda platinum (Pt) untuk mengukur berbagai konsentrasi gas seperti *benzene*, formaldehida,

dan NO_2 (Gonzalez-Chavarri et al., 2014). Aplikasi berbasis *Metal-Oxide Semiconductor* (MOS) untuk pengukuran konsentrasi gas (ekuivalen CO_2, total VOC (TVOC)) dan aplikasi berbasis optik untuk konsentrasi massa partikulat ($PM_{2.5}$, PM_{10}) telah dilakukan oleh Palomeque-Mangut et al. (2021).

Material dengan struktur nano seperti 0D (*nanoparticle*), 1D (*nanotube*), 2D (lapisan atom tunggal), dan 3D (struktur berpori) yang bersifat resistif telah dikembangkan dan diaplikasikan untuk pemantauan berbagai polutan di dalam dan luar ruangan (Santos et al., 2020). Penggunaan mikrosensor dengan teknologi elektrokimia juga dapat mendeteksi toksisitas udara melalui pemantauan konsentrasi CO, hidrogen sulfida (H_2S), NO, NO_2, O_3, dan SO_2 (Spyropoulos et al., 2021).

Chandra et al. (2021a) lebih lanjut menjelaskan penggunaan mikrosensor yang telah digunakan secara luas dalam berbagai lingkungan, mulai dari area perkotaan dan berpolusi hingga area bersih seperti pedesaan, serta dari stasiun ukur pada ketinggian rendah sampai tinggi. Mikrosensor ini memungkinkan pemantauan kualitas udara secara *real-time* dan *online* dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi.

Beberapa metode kalibrasi sensor di laboratorium untuk deteksi konsentrasi gas dan partikulat perlu dilakukan sebelum dipasang di lapangan. Kolokasi berupa tandem mikrosensor dengan alat utama di lingkungan yang sebenarnya perlu diuji terlebih dahulu. Hasil yang didapat berupa kesesuaian data yang tinggi untuk sensor partikulat. Sementara itu, sensor gas dengan sensitivitas rendah masih dapat mendeteksi fluktuasi konsentrasi gas di udara. Perlu dicatat bahwa data kualitas udara dari mikrosensor bukan merupakan data yang dapat digunakan untuk regulasi saat ini, tetapi bersifat indikatif. Oleh karena itu, persiapan jalur pengambilan sampel yang baik, ruang pengukuran yang sesuai, serta penghindaran emisi langsung atau kondisi lembap, akan menjaga validitas dan kualitas udara.

Penggabungan dan perkembangan teknologi IoT dan AI, atau disebut sebagai *Artificial Intelligence of Things* (AIoT), dalam

pemantauan kualitas udara dalam ruang kian mempertajam proses deteksi polutan dalam memberikan peringatan dini ataupun mitigasi ke depannya. Yang et al. (2021) menjelaskan bahwa penggunaan mikrosensor partikulat secara masif, penanganan data berskala besar, serta penerapan AI langsung di sensor yang terhubung ke IoT memungkinkan analisis data dilakukan secara *real-time.* Dengan analisis data yang dilakukan secara *real-time*, pengambilan keputusan dapat dilakukan secara cepat karena data tidak perlu dikirimkan terlebih dahulu ke *cloud* atau pusat data untuk pemrosesan. Integrasi AIoT dalam asesmen kualitas udara dalam ruang memungkinkan berbagai permasalahan dilihat secara bersamaan dalam satu kerangka kerja yang terpadu, yakni penghuni dan aktivitas yang dilakukan, sumber emisi dalam dan luar ruangan, struktur dan tata letak ruangan/bangunan, serta teknologi untuk pemantauan dan pengendalian polutan di dalam ruangan (Saini et al., 2022).

Lembaga profesional *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) mengeluarkan panduan nomor 42-2023 terkait upaya untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruangan di bangunan komersial dan institusi. Aspek yang dikaji meliputi identifikasi sumber polutan dalam ruang, sistem ventilasi, teknologi pemantauan dan pengendalian kualitas udara dalam ruang, edukasi dan pelatihan, serta evaluasi secara berkelanjutan. Sementara itu, organisasi internasional untuk standardisasi (*International Organization for Standardization,* disingkat *ISO*) mengeluarkan beberapa dokumen standar, yaitu ISO 16000 terkait formaldehida dan VOC, ISO 17772 terkait evaluasi paparan manusia terhadap polutan di dalam ruang dan metode penilaiannya, serta ISO 16814 terkait teknik perhitungan dan pengukuran untuk mengevaluasi kinerja sistem pengendalian udara dalam bangunan. Ketiga dokumen tersebut, setidaknya, membantu mengarahkan lebih lanjut bagaimana teknik pengukuran dan analisis kualitas udara dalam ruang dapat dilakukan oleh para pemangku kepentingan.

Setelah data tentang kualitas udara dalam ruang telah dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah menganalisis dan

memahami data tersebut. Salah satu cara untuk melakukan ini adalah melalui visualisasi data. Visualisasi data melibatkan penggunaan teknik grafis untuk mewakili data, membuatnya lebih mudah untuk dipahami dan dianalisis. Misalnya, peta panas (*heat map*) dengan pengklasifikasian berdasarkan warna dapat digunakan untuk mewakili konsentrasi polutan udara dalam ruang (Jalasena et al., 2023). Selain itu, teknik seperti *Kriging* (Putri et al., 2022; Jung et al., 2023) dan pendekatan AI (Sundari et al., 2023; Kapoor et al., 2023; Kalamaras et al., 2019) dapat digunakan untuk menganalisis dan memvisualisasikan data kualitas udara dalam ruang. Teknik-teknik ini dapat membantu peneliti untuk mengidentifikasi pola dan tren dalam data, membuat prediksi, dan mengembangkan strategi yang lebih efektif tentang pengelolaan kualitas udara dalam ruang di masa depan.

D. Studi Kasus Asesmen Kualitas Udara dalam Ruang di Lingkungan Yayasan Pendidikan Telkom

Kualitas udara dalam ruang di lingkungan pendidikan, seperti sekolah dan perguruan tinggi, memegang peranan penting dalam kesehatan dan kinerja akademik. Sebagai contoh, di Yayasan Pendidikan Telkom (YPT), aktivitas sehari-hari seperti tingkat okupansi (jumlah pelajar), kegiatan belajar-mengajar, dan praktikum, dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruang. Peningkatan konsentrasi CO_2, terutama saat sirkulasi udara atau ventilasi tidak memadai, dapat terjadi akibat aktivitas tersebut. Selain itu, kegiatan seperti eksperimen sains dan teknologi serta memasak juga dapat melepaskan polutan ke udara. Untuk mengevaluasi kualitas udara dalam ruang, berbagai teknik pengukuran dan analisis dapat digunakan, termasuk penggunaan mikrosensor untuk pemantauan *real-time*. Hasil penilaian dapat memberikan wawasan tentang sumber polutan dan karakteristik kualitas udara dalam ruang, yang penting untuk pengembangan strategi mitigasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Shidki et al. (2020) di empat tipe ruang perkantoran di Universitas Telkom mengidentifikasi

paparan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 yang melebihi baku mutu kualitas udara dalam ruang selama jam kerja. Tingginya konsentrasi CO_2 tidak sebanding dengan laju udara bersih yang tersedia, yang menunjukkan adanya pertukaran udara yang tidak memadai dan ventilasi yang buruk. Kondisi seperti ini memicu pertumbuhan berbagai jenis bakteri, termasuk *staphylococcus*, *streptococcus*, dan *enterobacteriaceae*.

Ruangan dengan tingkat okupansi tinggi cenderung memiliki jumlah mikroorganisme yang lebih tinggi. Parameter non-biologi diukur dengan menggunakan mikrosensor $PM_{2.5}$ (SKU:SEN0177, DFRobot), CO_2 (SKU:SEN0219, DFRobot), serta temperatur udara dan kelembapan relatif (DHT22). Sementara itu, pengukuran pasif sampel mikroorganisme menggunakan media kultivasi berupa Trypticase Soy Agar (TSA), MacConkey Agar (MCA), Mannitol Salt Agar (MSA), dan Sabouraud Dextrose Agar (SDA). Perbedaan media kultivasi tersebut bertujuan untuk mendeteksi berbagai jenis bakteri yang dapat ditemukan di lingkungan kampus.

Di ruangan lain di Universitas Telkom, yang memiliki ketinggian yang berbeda, ditemukan rerata konsentrasi bioaerosol sebesar 1200–6000 CFU/m^3 (Firdaus et al., 2020). Satuan CFU/m^3 mengindikasikan jumlah koloni mikroorganisme per volume udara. Kurangnya sirkulasi udara memfasilitasi pertumbuhan mikroorganisme di titik-titik tertentu dengan tingkat kelembapan yang tinggi.

Jenis aktivitas yang dilakukan oleh penghuni ruangan juga memperburuk situasi ini. Beberapa jenis bakteri yang teridentifikasi antara lain *enterobacteriaceae*, *bacillus*, *streptococcus*, *enterococcus*, dan *staphylococcus*. Untuk pengukuran, digunakan alat pengambil sampel aktif dengan metode impaktor (BioStage Single Stage, SKC Inc.) dengan laju alir udara 28,3 L/menit pada ketinggian 1,5 meter di atas lantai (Shania et al., 2021). Secara terpisah, paparan bioaerosol secara personal cenderung lebih tinggi di lokasi-lokasi dengan aktivitas seperti pembakaran sampah secara terbuka (Nafisah et al., 2021).

Dalam analisis kualitas udara dalam praktikum Fisika Dasar dan Algoritma Pemrograman di Universitas Telkom yang dilakukan oleh Tahsiin et al. (2020), ditemukan bahwa konsentrasi polutan di dalam ruangan dipengaruhi oleh infiltrasi udara luar ruangan, tingkat okupansi, dan laju ventilasi. Penggunaan *Air Conditioning* (AC) dalam ruangan mampu menjaga konsentrasi CO_2 pada level < 1000 ppm selama 8 jam. Namun demikian, konsentrasi tersebut meningkat melebihi baku mutu ketika sejumlah praktikan melakukan kegiatan praktikum. Sementara itu, konsentrasi massa $PM_{2.5}$ cenderung mengikuti kualitas udara luar, terlepas dari keberadaan penghuni di dalam ruangan. Sebagai upaya intervensi, penelitian menunjukkan bahwa memasukkan tanaman jenis *dieffenbachia* sp. dalam 10 pot dapat meningkatkan konsentrasi O_2 dan menurunkan konsentrasi CO_2. Strategi ini terbukti efektif ketika tanaman tersebut mendapatkan intensitas cahaya matahari yang cukup.

Secara terpisah, dilakukan pengukuran kualitas udara dalam ruangan di *Telkom School*, yaitu SMP, SMA, SMK, dan SMK Pariwisata Telkom Bandung (Jalasena et al., 2023). Tahapan pekerjaan mencakup *profiling*, pemantauan, survei, dan analisis pada empat tipe ruangan di setiap sekolah tersebut, mulai dari ruangan dengan okupansi dan aktivitas tinggi hingga ruangan yang jarang digunakan. Rerata konsentrasi CO_2 dan $PM_{2.5}$ di beberapa ruangan cukup tinggi dan melebihi standar baku mutu udara dalam ruangan, kecuali untuk ruangan yang jarang digunakan yang mengikuti konsentrasi udara ambien. Detektor gas karbon monoksida (CO; SKU:SEN0132, DFRobot) mendeteksi tingginya konsentrasi gas tersebut (> 9 ppm) karena adanya aktivitas kelas memasak. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil *profiling* dan survei, yang menunjukkan bahwa jumlah penghuni dan jenis aktivitas, penggunaan AC, dan jumlah ventilasi berpengaruh pada hasil pengukuran tersebut.

Dari beragam penelitian yang dilakukan, salah satu aspek yang memengaruhi kualitas udara dalam ruangan adalah kondisi udara ambien. Oleh karena itu, penting bagi tempat hunian dan perkantoran untuk memiliki ruang terbuka hijau, terutama dengan

tutupan vegetasi yang memadai (Diener & Mudu, 2021). Hal ini bertujuan untuk mengurangi dampak buruk udara luar yang dapat langsung memengaruhi kualitas udara di dalam ruangan. Sebagai contoh, Universitas Telkom Kampus Bandung memiliki luas total 49 hektar, dengan kawasan hijau sekitar 11,5 hektar di dalamnya. Luasnya kawasan hijau ini memberikan kesempatan untuk penyerapan polutan dan memberikan pasokan konsentrasi O_2 yang cukup bagi seluruh sivitas akademika. Penelitian yang dilakukan oleh Rahmadani et al. (2021) menggunakan detektor portabel yang dapat mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$, CO_2, dan O_3. Hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ berada dalam kisaran 5–25 $\mu g/m^3$, konsentrasi CO_2 di bawah 520 ppm, dan konsentrasi O_3 di bawah 150 ppb. Namun, penting untuk dicatat bahwa pengukuran dilakukan selama masa pembatasan sosial berskala besar yang dilakukan karena pandemi Covid-19.

E. Dampak Buruknya Kualitas Udara dalam Ruang dan Upaya Mitigasinya

Kualitas udara dalam ruang memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia. Paparan terhadap polutan udara dalam ruang dapat menimbulkan berbagai masalah kesehatan, mulai dari iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, hingga kondisi yang lebih serius seperti penyakit jantung dan paru-paru. Partikel halus ($PM_{2.5}$), gas seperti nitrogen dioksida (NO_2), dan senyawa organik volatil (VOC) dapat menyebabkan iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan. Paparan jangka panjang terhadap polutan ini dapat menyebabkan atau memperburuk kondisi seperti asma, bronkitis, dan penyakit paru obstruktif kronis (PPOK) (Bălă et al., 2021; Mainka & Żak, 2022; Paterson et al., 2021).

Beberapa polutan udara dalam ruangan juga diketahui menjadi penyebab kanker. Sebagai contoh, formaldehida, yang sering ditemukan dalam banyak produk rumah tangga dan bahan bangunan, telah diklasifikasikan sebagai karsinogen manusia (Adamović et al., 2022; Protano et al., 2022). Paparan jangka panjang terhadap formaldehida dapat meningkatkan risiko kanker paru-

paru (Kwak et al., 2020). Selain itu, polutan udara dalam ruangan juga dapat memengaruhi kesehatan mental dan kognitif (Du, 2020; Manisalidis et al., 2020; Wang et al., 2021; Yin et al., 2020). Sebagai contoh, penelitian menunjukkan bahwa paparan terhadap polutan udara dalam ruangan dapat memengaruhi fungsi kognitif dan berkontribusi terhadap masalah kesehatan mental seperti depresi dan kecemasan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Chandra et al. (2021b), dilakukan analisis terhadap data pasien dari rumah sakit yang berlokasi dalam radius 6 km dari lokasi pengukuran konsentrasi partikulat halus ($PM_{2.5}$) dan kasar (PM_{10}). Hasil analisis menunjukkan adanya keterkaitan antara paparan partikulat udara tersebut dengan penyakit pernapasan, dengan potensi dampak jangka panjang berupa PPOK dan penyakit jantung.

Lokasi pasien cenderung sangat terpapar oleh sumber polusi seperti daerah industri, jalan raya, perkembangan perumahan, dan kegiatan pembakaran sampah secara langsung. Evaluasi risiko kesehatan dilakukan menggunakan perangkat lunak AirQ+ dari WHO, yang memerlukan data masukan berupa rata-rata konsentrasi massa $PM_{2.5}$ dan PM_{10}, jumlah populasi, serta jumlah pasien yang menderita penyakit pernapasan. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa kondisi lingkungan udara luar sangat memengaruhi kualitas udara di dalam ruangan (Almetwally et al., 2020; Kumar et al., 2023; Usmani et al., 2020).

Perubahan iklim memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas udara dalam ruangan melalui beberapa mekanisme yang kompleks (Fuller et al., 2022; Masson et al., 2020). Salah satunya, peningkatan temperatur udara dapat memperbesar emisi polutan dari sumber-sumber dalam ruangan, seperti bahan bangunan dan perabot. Tidak hanya itu, peningkatan temperatur juga dapat meningkatkan kadar ozon di permukaan tanah (Li et al., 2020), yang kemudian dapat meresap ke dalam ruangan dan memengaruhi kualitas udara dalam ruangan tersebut. Selain itu, penggunaan pendingin udara yang lebih sering pada saat temperatur meningkat

dapat menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya (Dong et al., 2021; Sovacool et al., 2021).

Perubahan pola cuaca yang diakibatkan oleh perubahan iklim juga dapat memengaruhi tingkat polutan udara luar, seperti partikel halus dan gas nitrogen dioksida, yang pada akhirnya akan berdampak pada kualitas udara di dalam ruangan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami dengan lebih baik bagaimana perubahan iklim dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruangan. Hal ini penting untuk mengembangkan strategi yang lebih efektif dalam mengurangi paparan terhadap polutan udara dalam ruangan serta melindungi kesehatan manusia dari dampak negatif perubahan iklim.

Untuk itu, diperlukan strategi mitigasi yang konkret dan terukur untuk mengatasi dampak negatif dari polusi udara di dalam ruangan. Ada tiga strategi utama yang dapat diambil, yaitu pengendalian sumber emisi, peningkatan ventilasi, dan penggunaan pembersih udara (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2024).

Pengendalian sumber emisi, misalnya, melibatkan langkah-langkah praktis seperti mengganti produk pembersih yang mengandung senyawa organik volatil dengan alternatif yang lebih ramah lingkungan, atau memberlakukan larangan merokok di dalam ruangan. Penting juga untuk memahami jenis polutan yang ada, sumber emisinya, dan dampak kesehatannya terhadap penghuni ruangan (Tran et al., 2020). Dengan memperhatikan berbagai panduan yang dikeluarkan oleh organisasi seperti WHO atau USEPA, langkah-langkah pengendalian ini dapat diterapkan dengan lebih efektif. Namun, diperlukan penekanan lebih lanjut pada bagaimana langkah-langkah ini dapat diimplementasikan secara praktis dalam lingkungan sehari-hari. Dengan memperbaiki strategi mitigasi dan memberikan panduan praktis untuk implementasinya, kita dapat lebih efektif dalam menjaga kualitas udara dalam ruangan dan melindungi kesehatan penghuninya.

Peningkatan ventilasi menjadi langkah penting berikutnya dalam mengurangi konsentrasi polutan udara dalam ruangan.

Ventilasi yang baik tidak hanya membantu menghilangkan polutan yang ada dalam ruangan, tetapi juga menghadirkan udara segar yang lebih bersih. Sebagai contoh, dapur sering kali menjadi sumber utama polusi dalam ruangan, terutama selama aktivitas memasak, yang dapat menghasilkan partikel $PM_{2.5}$ dan gas CO_2 yang merugikan (Liu et al., 2020). Dalam penelitian terpisah, hal ini terlihat jelas dengan peningkatan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ akibat perbedaan ventilasi di dua tipe rumah yang berbeda (Chandra et al., 2022). Hasil penelitian lainnya yang memanfaatkan teknik *Kriging* menunjukkan bahwa sumber utama CO_2 berasal dari aktivitas memasak dan jumlah penghuni, sementara partikel halus juga berasal dari infiltrasi udara luar (Putri et al., 2022). Namun, peningkatan ventilasi harus dilakukan secara hati-hati untuk mencegah masuknya polutan udara luar tambahan. Oleh karena itu, strategi ventilasi yang tepat dan efisien menjadi kunci dalam memastikan udara dalam ruangan tetap bersih dan sehat.

Terakhir, pembersih udara menjadi salah satu solusi untuk menghilangkan polutan dari udara dalam ruangan. Jenis pembersih udara termasuk filter udara, pembersih udara ionisasi, dan pembersih udara adsorpsi, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya sendiri. Sebagai contoh, penelitian oleh Rachmawati et al. (2023) mengembangkan "*smart air purifier*" yang mampu mengontrol kecepatan kipas untuk mengurangi konsentrasi partikulat di dalam ruang.

Dalam pengukuran yang dilakukan, tercatat pengurangan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ kurang dari 35 $\mu g/m^3$ memerlukan waktu sekitar 150 detik dengan laju reduksi partikulat 0,01–0,02 per detik, laju udara bersih 0,07 m^3/menit, dan konsumsi daya sebesar 6,52 watt. Di sisi lain, penelitian oleh Sundari et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan tanaman yang dimodifikasi dengan penambahan karbon, kipas, dan cahaya biru, dapat secara aktif meningkatkan daya serap polutan di dalam ruangan. Dalam rangka mencapai kesehatan yang optimal bagi penghuni ruang, diperlukan strategi mitigasi yang tepat dan kesadaran dari berbagai pihak untuk mengimplementasikan langkah-langkah pencegahan yang efektif.

Daftar Pustaka

Adamović et al. (2022). Occupational exposure to formaldehyde and cancer risk assessment in an anatomy laboratory. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*, 11198.

Almetwally et al. (2020). Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: An overview. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 24815–24830.

Andhikari et al. (2006). Correlation of ambient inhalable bioaerosols with particulate matter and ozone: A two-year study. *Environmental Pollution*, *140*(1), 16–28.

Bălă et al. (2021). Air pollution exposure—the (in)visible risk factor for respiratory diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 19615–19628.

Balmes. (2019). Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, *143*(6), 1979–1987.

Chandra et al. (2021a). Utilization of microsensors for air-quality monitoring systems. In *Handbook of Advanced Approaches Towards Pollution Prevention and Control, Volume 1* (pp. 307–324). [perlu dilengkapi: nama editor, penerbit]

Chandra et al. (2021b). Preliminary study: Health risk analysis of PM2.5 and PM10 mass concentrations in Bandung Metropolitan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *824*. [perlu nomor artikel]

Chandra et al. (2022). Pra-studi analisis paparan konsentrasi PM2,5 dan CO2 di dalam [judul tampak terpotong, cek naskah asli]. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *24*(1), 98–106.

Diener & Mudu. (2021). How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective—with implications for urban planning. *Science of the Total Environment*, *796*, 148605.

Dong et al. (2022). Greenhouse gas emissions from air conditioning and refrigeration service expansion in developing countries. *Annual Review of Environment and Resources*, *46*, 59–83.

Du et al. (2020). Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review. *Indoor Air*, *30*(6), 1067–1082.

Firdaus et al. (2020). Prastudi pemantauan bioaerosol di dalam ruangan dan analisisnya. *e-Proceeding of Engineering*, *7*(1), 1320.

Fuller et al. (2022). Pollution and health: A progress update. *Lancet Planetary Health*, *6*(6), 535–547.

Gonzalez-Chavarri et al. (2014). High-sensitivity indoor-air-quality sensor through localized growth of ZnO nanostructures. *Procedia Engineering*, *87*, 983–986.

Harčárová et al. (2020). Building materials as potential emission sources of VOC in the indoor environment of buildings. *Key Engineering Materials*, *838*, 74–80.

Hashemi et al. (2020). Occurrence, potential sources, in vitro bioaccessibility and health risk assessment of heavy metal in indoor dust from different microenvironment of Bushehr, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, *42*, 3641–3658.

Hoffmann et al. (2021). WHO air quality guidelines 2021—aiming for healthier air for all: A joint statement by medical, public health, scientific societies and patient representative organisations. *International Journal of Public Health*, *66*, 1604465.

Isaxon et al. (2015). Contribution of indoor-generated particles to residential exposure. *Atmospheric Environment*, *106*, 458–466.

Jalasena et al. (2023). Preliminary study of urgency to monitor indoor air quality at Telkom Education Area in the post-pandemic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1194*. [perlu nomor artikel]

Jha et al. (2020). Sources of heavy metal in indoor air quality. In Siddiqui et al. (Eds.), *Advances in air pollution profiling and control* (pp. xx–xx). Springer. [perlu rentang halaman & inisial nama editor]

Jung et al. (2023). Enhancing indoor air quality estimation: A spatially aware interpolation scheme. *International Journal of Geo-Information*, *12*(8), 347.

Kalamaras et al. (2019). Visual analytics for exploring air quality data in an AI-enhanced IoT environment. *Proceedings of the 11th International Conference on Management of Digital EcoSystems*, 103–110.

Kapoor et al. (2023). Prediction of indoor air quality using artificial intelligence. In *Machine Intelligence, Big Data Analytics, and IoT in Image Processing: Practical Applications* (pp. xx–xx). Scrivener Publishing. [perlu editor & rentang halaman]

Kitchilan et al. (2022). Air quality monitoring and prediction using IoT and machine learning approaches. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *12*(3), 34–39.

Kumar et al. (2023). Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Science of the Total Environment*, *872*, 162163.

Kumie et al. (2009). Magnitude of indoor NO2 from biomass fuels in rural settings of Ethiopia. *Indoor Air*, *19*(1), 14–21.

Kwak et al. (2020). Occupational exposure to formaldehyde and risk of lung cancer: A systematic review and meta-analysis. *American Journal of Industrial Medicine*, *63*(4), 312–327.

Lazaridis & Aleksandropoulou. (2009). Sources and variability of indoor and outdoor gaseous aerosol precursors (O3, NOx and VOCs). *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, *9*, 3–13.

Li et al. (2020). Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: Anthropogenic and meteorological influences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(19), 11423–11433.

Liu et al. (2020). Improving indoor air quality and thermal comfort in residential kitchens with a new ventilation system. *Building and Environment*, *180*, 107016.

Lugg & Probert. (1997). Indoor radon gas: A potential health hazard resulting from implementing energy-efficiency measures. *Applied Energy*, *56*(2), 93–196. [cek rentang halaman, tampak tidak wajar]

Mainka & Żak. (2022). Synergistic or antagonistic health effects of long- and short-term exposure to ambient NO2 and PM2.5: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(21), 14079.

Mani et al. (2021). AI powered IoT based real-time air pollution monitoring and forecasting. *Journal of Physics: Conference Series*, *2115*, 012016.

Manisalidis et al. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, *8*, Article 14. [cek: apakah "14" nomor artikel]

Masson et al. (2020). Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, *45*, 411–444.

Mfarrej et al. (2020). Investigation of indoor air quality inside houses from UAE. *Air, Soil and Water Research*, *13*. [perlu nomor artikel/ halaman]

Morawska et al. (2017). Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. *Environment International*, *108*, 75–83.

Mousavi et al. (2019). Investigating the effect of several factors on concentrations of bioaerosols in a well-ventilated hospital environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*, 407.

Nafisah et al. (2021). Analisis paparan bioaerosol secara personal dalam kegiatan sehari-hari. *e-Proceeding of Engineering*, *8*(2), 1768.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). *Health risks of indoor exposure to fine particulate matter and practical mitigation solutions*. The National Academies Press.

Notman. (2020). How human biology and behavior affect indoor air quality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(37), 22619–22622.

Palomeque-Mangut et al. (2021). Electronic system for citizens' air quality mapping. *2021 IEEE Sensors*, Sydney, Australia, 1–4.

Paterson et al. (2021). Indoor PM2.5, VOCs and asthma outcomes: A systematic review in adults and their home environments. *Environmental Research*, *202*, 111631.

Protano et al. (2022). The carcinogenic effects of formaldehyde occupational exposure: A systematic review. *Cancers*, *14*(1), 165.

Putri et al. (2022). Spatial modelling of indoor air pollution distribution at home. *Journal of Physics: Conference Series*, *2243*. [perlu nomor artikel]

Rachmawati et al. (2023). Development of smart air purifier for reducing indoor particulate matter. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1157*. [perlu nomor artikel — urutan dipindah sebelum Rajasekar]

Rahmadani et al. (2021). Pengaruh ruang terbuka hijau dalam pengendalian konsentrasi PM2.5, CO2, dan O3 di Universitas Telkom. *e-Proceeding of Engineering*, *8*(2), 1852.

Rajasekar et al. (2020). Air quality monitoring and disease prediction using IoT and machine learning. *International Journal of Innovative Research in Computer Science and Technology*, *8*(6), 389–395.

Saad et al. (2017). Analysis of feature selection with probabilistic neural network (PNN) to classify sources influencing indoor air quality. *AIP Conference Proceedings*, *1808*(1), 020042.

Saini et al. (2021). Predicting indoor air quality: Integrating IoT with artificial intelligence. In *Internet of Things for Indoor Air Quality Monitoring* (pp. 51–67). Springer.

Saini et al. (Eds.). (2022). *Integrating IoT and AI for indoor air quality assessment*. Springer International Publishing.

Santos et al. (2020). Air quality monitoring using nanosensors. In *Nanomaterials for Air Remediation* (pp. 9–31). [perlu penerbit]

Seow et al. (2015). Indoor concentrations of nitrogen dioxide and sulfur dioxide from burning solid fuels for cooking and heating in Yunnan Province, China. *Indoor Air*, *26*(5), 776–783.

Shania et al. (2021). Pemantauan kualitas udara dalam ruang menggunakan impaktor di Gedung Deli, Universitas Telkom, Bandung. *e-Proceeding of Engineering*, *8*(2), 1820.

Shidki et al. (2020). Analisis kualitas udara dalam ruangan pada kantor terbuka di Universitas Telkom. *e-Proceeding of Engineering*, *7*(1), 1121.

Śmiełowska et al. (2017). Indoor air quality in public utility environments: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 11166–11176.

Sovacool et al. (2021). Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *141*, 110759.

Spyropoulos et al. (2021). Performance of aether low-cost sensor device for air pollution measurements in urban environments: Accuracy evaluation applying the air quality index (AQI). *Atmosphere*, *12*(10), 1246.

Srikant et al. (2008). Bio-aerosols in indoor environment: Composition, health effects and analysis. *Indian Journal of Medical Microbiology*, *26*(4), 302–312.

Sundari et al. (2023). Artificial neural network based prediction of PM2.5 mass concentration. *29th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Toba, Indonesia, 1–6.

Sundari et al. (2024). Improved dynamic botanical air purifier with light effect for reducing CO2 concentration in chamber. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, *7*(1), 18–29.

Tahsiin et al. (2020). Analysis of indoor air quality based on low-cost sensors. *International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information Technology*, *10*(6), 2627–2633.

Tran et al. (2020). Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(8), 2927.

Usmani et al. (2020). Air pollution and its health impacts in Malaysia: A review. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *13*, 1093–1118.

Vardoulakis et al. (2020). Indoor exposure to selected air pollutants in the home environment: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(23), 8972.

Velichkova et al. (2019). Influence of indoor pollution and parameters on human health. In *Proceedings of the International Conference on Innovations in Science and Education* (pp. xx–xx). [perlu detail lengkap]

Villa-López et al. (2017). Indoor air quality monitor based on solidly mounted resonators for the detection of VOCs. *2017 IEEE Sensors*, Glasgow, UK, 1–3.

Wang et al. (2021). How indoor environmental quality affects occupants' cognitive functions: A systematic review. *Building and Environment*, *193*, 107647.

WHO Regional Office for Europe. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants*. [perlu penerbit]

WHO. (2014). *WHO guidelines for indoor air quality: Household fuel combustion*. World Health Organization.

WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide*. World Health Organization.

Yang et al. (2021). Current advances and future challenges of AIoT applications in particulate matters (PM) monitoring and control. *Journal of Hazardous Materials*, *419*, 126442.

Yin et al. (2020). Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: A between-subjects experiment in virtual reality. *Environment International*, *136*, 105427.