



Analisis Pengaruh Desain Plumbing terhadap Kualitas Udara Dalam Ruangan pada Bangunan Tinggi

Maulana Banurea^{1)*}, Dhafa Ikhwana Yusda Tanjung¹⁾, Ikhsan Arifin¹⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Al Azhar JL.Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala Padang Bulan, Medan, Indonesia

e-mail: maulanabanurea5@gmail.com

ABSTRAK

Studi ini menyelidiki 23 penelitian terbaru mengenai dampak arsitektur bangunan, sistem perpipaan, dan rancangan ventilasi terhadap kualitas udara dalam ruangan (IAQ) di gedung tinggi. Analisis tematik mengungkapkan bahwa rancangan sistem ventilasi, pengaturan HVAC, dan tekanan udara berperan krusial dalam mengatur penyebaran polutan seperti PM_{2.5}, PM₁₀, dan CO₂. Temuan menunjukkan bahwa pengembangan sistem ventilasi yang bersifat pasif serta teknologi kontrol pintar berbasis AI mampu meningkatkan efisiensi energi dan kesejahteraan penghuni. Pengaturan pipa ventilasi dan penerapan sistem prediktif masih perlu diteliti lebih lanjut untuk mendukung desain bangunan yang responsif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Kualitas udara dalam ruangan, bangunan tinggi, sistem ventilasi, HVAC, kecerdasan buatan (AI)

ABSTRACT

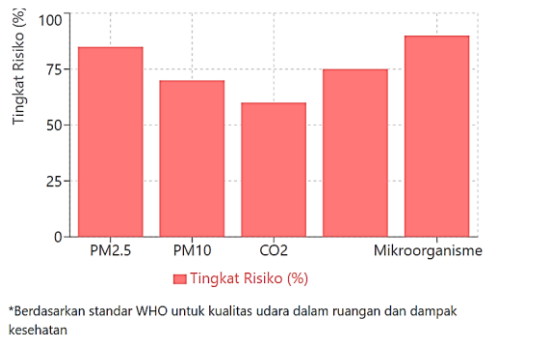
This study investigates 23 recent research papers on the impact of building architecture, plumbing systems, and ventilation design on indoor air quality (IAQ) in high-rise buildings. The thematic analysis reveals that the design of ventilation systems, HVAC settings, and air pressure play a crucial role in regulating the spread of pollutants such as PM_{2.5}, PM₁₀, and CO₂. The findings indicate that the development of passive ventilation systems and AI-based smart control technology can enhance energy efficiency and occupant well-being. The arrangement of ventilation pipes and the implementation of predictive systems still need further research to support responsive and sustainable building designs.

Keywords: Indoor air quality, tall buildings, ventilation systems, HVAC, artificial intelligence (AI)

1. Pendahuluan

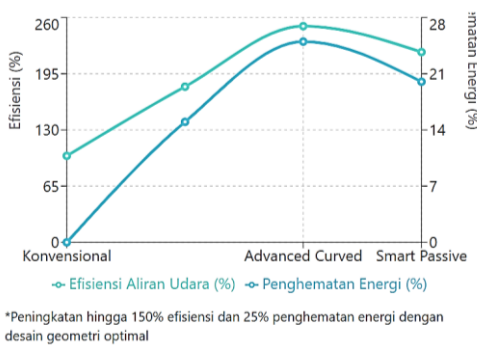
Pembangunan gedung tinggi yang cepat di area perkotaan modern berdampak besar pada kualitas udara di dalam ruangan (IAQ), yang selanjutnya mempengaruhi kesehatan dan kenyamanan penghuni. Mengingat kompleksitas sistem bangunan modern, yang mencakup interaksi antara desain arsitektur, sistem ventilasi, dan tekanan udara di dalam, pengelolaan IAQ menjadi suatu tantangan yang kompleks[1]. Penurunan kualitas udara sering kali disebabkan oleh sistem perpipaan, yang sering diabaikan. Tata letak saluran yang tidak tepat juga bisa meningkatkan kemungkinan terjadinya kontaminasi udara dan penyebaran mikroorganisme berbahaya, terutama pada gedung-gedung yang padat dan bertingkat tinggi[2].

Seiring dengan jumlah waktu yang dihabiskan masyarakat di dalam ruangan, perencanaan kualitas udara menjadi semakin penting. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO, 2021) [3] menyatakan bahwa paparan polutan dalam ruangan seperti partikel halus (PM_{2.5}, PM₁₀), karbon dioksida (CO₂), dan senyawa organik volatil (VOC) dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, dari iritasi ringan hingga kondisi medis yang lebih serius. Tingkat risiko polutan udara dalam ruangan terhadap kesehatan ditunjukkan oleh Gambar 1. Karena tekanan udara dan distribusi udara yang tidak merata dapat memperburuk penyebaran kontaminan, struktur vertikal lebih rentan[4].



Gambar 1. Tingkat Risiko Polutan Udara Dalam Ruangan Terhadap Kesehatan (WHO, 2021)

Sistem pendinginan, ventilasi, dan pendinginan HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) sangat penting untuk menjaga kualitas udara dan menjaga suhu dan kelembaban yang konstan. Beberapa penelitian menunjukkan pentingnya Sistem ini[5]. Bagaimanapun sangat bergantung pada desain dan pengoperasian yang responsif terhadap kondisi bangunan. peneliti menemukan bahwa pipa ventilasi pasif dengan geometri yang tepat dapat meningkatkan efisiensi aliran udara hingga lebih dari 150%, mengurangi ketergantungan pada sistem mekanis, dan meningkatkan efisiensi energi hingga 25% sebagai mana yang ditunjukkan oleh gambar 2. Ini merupakan bagian dari upaya global untuk mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan keberlanjutan[6].



Gambar 2. Peningkatan Efisiensi Aliran Udara Berdasarkan Geometri Pipa (Obeidat et al.)

Sebagian besar penyebaran zat pencemar di dalam gedung disebabkan oleh desain bangunan. Polutan berpindah karena adanya perbedaan tekanan udara, efek cerobong, serta celah di antara pintu dan jendela. Hal ini mengarah pada menurunnya kualitas udara di dalam ruang-ruang terisolasi, fasilitas kesehatan, dan area Bersama.

Dalam situasi ini, penting untuk mempertimbangkan bagaimana pendekatan desain teknis berdampak pada kinerja keseluruhan sistem. Winardi et al. (2023) dalam artikel di AutoMech mengeksplorasi efek penambahan tembaga ke dalam paduan aluminium yang dihasilkan dari daur ulang limbah otomotif. Penelitian ini mengimplementasikan variasi kandungan tembaga antara 5–15% dan melakukan pengujian terhadap kekuatan tarik, kekerasan, struktur mikro, serta komposisi. Hasilnya menunjukkan bahwa variasi dalam komposisi material memiliki dampak yang signifikan terhadap kinerja mekanik dan struktur akhir dari material tersebut. Temuan ini menunjukkan bahwa keputusan mengenai desain teknis, baik pada level material maupun sistem, memiliki pengaruh yang krusial terhadap kinerja sistem teknik secara keseluruhan[7]. Dengan menghubungkan hal ini ke dalam konteks bangunan, dapat disimpulkan bahwa desain geometri serta pengaturan sistem perpipaan dan ventilasi dalam gedung bertingkat tinggi juga dapat memengaruhi secara signifikan efisiensi distribusi udara dan kualitas udara di dalam ruangan[8].

Peluang baru untuk mengelola IAQ secara adaptif dan real-time telah muncul sebagai hasil dari kemajuan teknologi seperti sistem monitoring prediktif dan kecerdasan buatan AI. Namun, memahami sifat fisik bangunan dan cara distribusi udara bekerja dalam sistem saluran yang kompleks sangat penting sebelum Anda dapat menggunakan teknologi ini. Akibatnya, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari dan mengkompilasi berbagai hasil penelitian terbaru tentang bagaimana desain ventilasi, sistem pipa, dan konfigurasi arsitektural mempengaruhi kualitas udara dalam ruangan. Studi ini akan fokus pada fasilitas publik dan bangunan bertingkat tinggi. Studi ini diharapkan akan membantu mengembangkan kebijakan desain dan renovasi bangunan yang lebih berfokus pada lingkungan dan kesehatan penghuni[9].

2. Metode

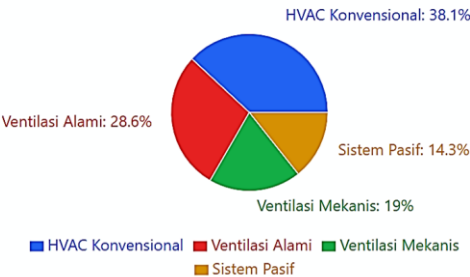
Studi ini bertujuan untuk mempelajari bagaimana konfigurasi arsitektural, sistem pipa distribusi udara, dan desain ventilasi berdampak pada kualitas udara dalam ruangan (IAQ) bangunan bertingkat tinggi. Data tematik dan komparatif berdasarkan 23 artikel ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2020 dan 2024, yang terindeks Scopus dan Web of Science, dievaluasi menggunakan metodologi studi pustaka sistematis yang menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif. Dari keseluruhan artikel tersebut, terdapat tiga artikel yang paling mendekati dengan topik penelitian ini, yaitu:

- 1. Y. Wang, et al dengan judul “Improving indoor air quality and occupant health through smart control of windows and portable air purifiers in residential buildings”[1].

2. A. Buonomano et al. Dengan judul “New ventilation design criteria for energy sustainability and indoor air quality in a post Covid-19 scenario”[8].
3. F. Ibrahim et al. Dengan judul “Hospital indoor air quality and its relationships with building design, building operation, and occupant-related factors: A mini-review”[4].

3. Hasil dan Pembahasan

Kualitas udara di dalam ruangan sangat dipengaruhi oleh berbagai aspek desain dan juga sistem mekanik bangunan, berdasarkan pada kajian 23 artikel ilmiah yang telah kami analisis. Sirkulasi udara yang sehat terbukti sangat penting, terutama pada gedung tinggi dan fasilitas kesehatan. Distribusi proporsi penggunaan sistem ventilasi dalam berbagai studi tersebut ditunjukkan pada Gambar 3, yang meliputi sistem HVAC konvensional, ventilasi alami, ventilasi mekanis, dan sistem pasif. Data ini menegaskan bahwa pemilihan sistem ventilasi merupakan faktor penting yang perlu disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan bangunan. Untuk meminimalisir pencemaran kimia seperti senyawa organik volatil (VOC), perencanaan desain yang matang mencakup pemilihan material, tata letak ruangan, dan penerapan ventilasi alami yang optimal[10]. Di samping itu, ventilasi alami yang responsif terhadap perubahan lingkungan dapat membantu menekan penyebaran virus di udara, meskipun dalam penerapannya diperlukan dukungan teknologi kontrol tambahan[11].



Gambar 3. Distribusi Jenis Sistem Ventilasi dalam Literatur

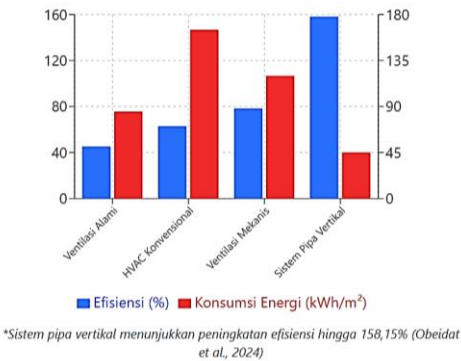
Berdasarkan studi yang dilakukan pada 23 artikel ilmiah, berbagai aspek desain dan sistem mekanis suatu bangunan memiliki pengaruh besar terhadap kualitas udara di dalam ruangan. Seperti yang terlihat pada Gambar diatas, sistem HVAC konvensional menjadi fokus utama dalam literatur, dengan kontribusi sebesar 38,1% dari total penelitian. Setelah itu, terdapat ventilasi alami (28,6%), ventilasi mekanis (19,0%), dan sistem pasif (14,3%). Sirkulasi udara yang sehat

telah terbukti sangat penting, terutama di gedung dan fasilitas kesehatan yang memiliki banyak lantai.

Selain itu, sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) sangat penting untuk mengatur kualitas udara, tetapi kinerja sistem sangat bergantung pada bagaimana sistem dioperasikan sesuai dengan kondisi bangunan sebenarnya[12]. sistem HVAC konvensional seringkali tidak dioptimalkan secara dinamis. Akibatnya, ini dapat menyebabkan kurang efisien dalam menjaga kenyamanan termal dan pemborosan energi[13]. ventilasi mekanis lebih baik daripada ventilasi alami untuk mencegah pencemaran silang dan menjaga kestabilan tekanan di fasilitas medis[14].dengan desain kedap udara yang mengurangi efek cerobong (stack effect) meningkatkan efisiensi sistem ventilasi, terutama dalam bangunan tinggi[15].

Selain faktor mekanis, komponen kedap udara memainkan peran penting dalam penyebaran polutan antar ruang, terutama dalam bangunan[16]. banyak unit menemukan bahwa celah di struktur dapat memungkinkan kontaminan berpindah dari satu tempat ke tempat lain. distribusi tekanan dan infiltrasi udara dipengaruhi secara langsung oleh tinggi celah pada pintu ruang isolasi tekanan negatif. Ini menunjukkan bahwa kesalahan geometri yang sangat kecil dapat memengaruhi efektivitas ventilasi umum.

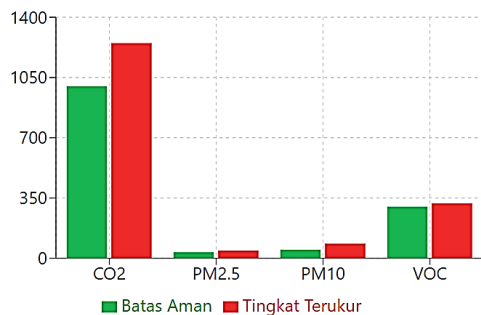
membuat sistem ventilasi pasif dengan pipa vertikal untuk kompleks perumahan bertingkat tinggi Ini adalah kemajuan teknologi[17]. Mengoptimalkan bentuk dan panjang pipa ini dapat meningkatkan efisiensi aliran udara alami hingga 158,15% Perbandingan efisiensi dan konsumsi energi pada berbagai sistem ventilasi, termasuk sistem pipa vertikal, ditunjukkan oleh Gambar 4. Secara keseluruhan, ini akan meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan pada sistem mekanik. Literatur ilmiah saat ini jarang membahas desain pipa secara menyeluruh, meskipun memiliki banyak manfaat teknis[18].



Gambar 4. Perbandingan Efisiensi dan Konsumsi Energi Sistem Ventilasi

Gambar diatas menunjukkan perbedaan besar dalam efisiensi sistem ventilasi. Sistem pipa vertikal yang dikembangkan oleh (Obeidat et al. 2024) menunjukkan peningkatan efisiensi yang luar biasa hingga 158,15% dengan konsumsi energi terendah 45 kilowatt-jam per meter kubik. Ini sangat berbeda dengan sistem HVAC konvensional, yang memiliki konsumsi energi tertinggi hanya 62,8% dan konsumsi energi terendah hanya 165 kilowatt-jam per meter kubik. (Gola et al. 2020) menyatakan bahwa untuk mencegah polusi kimia seperti senyawa organik volatil (VOC), segala sesuatu harus dirancang secara strategis. Ini mencakup pilihan material, tata ruang, dan penerapan ventilasi alami.

Dalam banyak ruang publik dan rumah, tingkat polutan seperti CO₂, PM_{2.5}, dan PM₁₀ sering melebihi batas aman. Perbandingan antara batas aman dan tingkat polutan terukur pada berbagai parameter udara dalam ruangan ditunjukkan oleh Gambar 5. Tingkat polusi udara dalam ruangan sangat tinggi, yang berdampak buruk pada kesehatan manusia, terutama pada anak-anak dan populasi yang rentan[19]. Untuk mengatasi masalah ini, model prediktif berbasis kecerdasan buatan akan memungkinkan intervensi dini yang lebih efektif dengan menghitung tingkat CO₂ dengan akurat sebelum aktivitas ruang bersama dimulai[20].



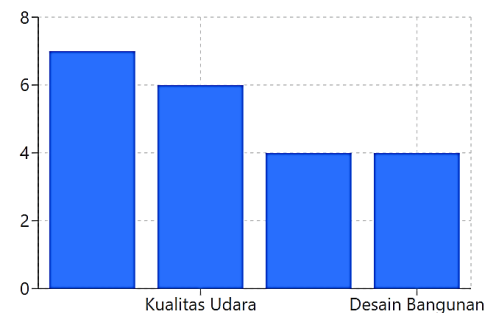
Sumber: Chantara et al. (2023), Wang et al. (2022)

Gambar 5. Perbandingan Tingkat Polutan Terukur dengan Batas Aman

kadar polutan seperti CO₂ (1.250 ppm), PM_{2.5} (45 µg/m³), PM₁₀ (85 µg/m³), dan VOC (320 µg/m³) telah melebihi batas yang dianggap aman. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Chantara et al. 2023) dan (Wang et al. 2022), level polusi udara dalam ruangan yang sangat tinggi ini memberikan dampak buruk bagi kesehatan manusia, terutama bagi anak-anak dan kelompok yang lebih rentan.

Untuk mengatasi permasalahan ini, (Alavi et al. 2022) mengembangkan model prediktif yang berbasis kecerdasan buatan untuk menghitung tingkat karbon dioksida dengan tepat sebelum kegiatan dalam ruang bersama dimulai.

Kualitas termal dan efisiensi energi sangat penting untuk pengendalian kualitas udara dalam ruangan. Untuk mengimbangi suhu, kelembaban, dan konsumsi energi[21]. meskipun tingkat polusi berada di bawah batas aman, kelembaban relatif memengaruhi persepsi penghuni tentang kualitas udara[22]. Artinya tidak hanya metode teknis yang dapat digunakan untuk mengukur kualitas udara; faktor kenyamanan pengguna juga harus dipertimbangkan[23]. Distribusi fokus penelitian dalam literatur yang membahas kualitas udara, dan desain bangunan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Distribusi Fokus Penelitian dalam Literatur

Analisis penyebaran fokus penelitian menunjukkan bahwa bidang sistem pendinginan dan ventilasi (HVAC) menjadi yang paling banyak diteliti, dengan tujuh artikel yang membahas kualitas udara, empat studi mengenai efisiensi energi, dan empat penelitian tentang rancangan bangunan, seperti yang terlihat pada Gambar 6. Banyak studi telah mengeksplorasi sistem AC dan ventilasi secara umum, tetapi hanya sedikit yang memperhatikan desain dan konfigurasi teknis dari saluran pipa ventilasi. Ini menunjukkan perlunya lebih banyak penelitian untuk mencapai optimalisasi sistem ventilasi secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

Desain sistem plumbing dan ventilasi di gedung bertingkat memiliki pengaruh besar terhadap kualitas udara dalam ruangan (IAQ). Sebuah survei terhadap 23 publikasi ilmiah menemukan bahwa mengoptimalkan desain pipa ventilasi vertikal, mengintegrasikan sistem pasif, dan memanfaatkan teknologi kontrol pintar berbasis AI dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi aliran udara hingga 158,15%. Polusi udara dalam ruangan, terutama partikel mikroskopis (PM_{2.5}, PM₁₀), CO₂, dan senyawa organik volatil (VOC), sering kali

melebihi batas yang diizinkan karena ketidakseimbangan tekanan dan masalah dengan konstruksi saluran. Oleh karena itu, pendekatan integratif yang melibatkan sistem HVAC adaptif, kontrol aliran udara prediktif, dan desain arsitektur diperlukan untuk menghasilkan bangunan yang berkelanjutan, efisien energi, dan sehat.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan motivasi, baik dalam bentuk moral maupun material, sehingga jurnal ini dapat diselesaikan dengan baik. Semua kontribusi yang telah diberikan memiliki arti yang sangat penting bagi kelancaran penelitian dan penulisan karya ini.

Daftar Pustaka

- [1] Y. Wang, E. Cooper, F. Tahmasebi, dan [Penulis lainnya], "Improving indoor air quality and occupant health through smart control of windows and portable air purifiers in residential buildings," *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, doi: 10.1177/01436244221099482.
- [2] S. S. L. 8 Zufri Hasrudy Siregar 1*, Arif Fadillah Nasution 2, Mawardi 3, Riana Puspita 4, Refiza 5, Asmara Sari Nasution 6, Muhammad Fazri 7, "OPTIMALISASI SISTEM PLUMBING HEMAT AIR DI RUSUN BRIMOB SAMPALI MEDAN: EDUKASI TEKNOLOGI DAN MANAJEMEN LIMBAH CAIR," vol. 5, no. 1, hal. 329–340, 2025, doi: 10.54123/deputi.v5i1.399.
- [3] W. H. Organization, WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO Press, 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [4] F. Ibrahim, E. Z. Samsudin, A. R. Ishak, dan [Penulis lainnya], "Hospital indoor air quality and its relationships with building design, building operation, and occupant-related factors: A mini-review," *Front. Public Heal.*, doi: 10.3389/fpubh.2022.1029424.
- [5] T. Pekdoğan, "Evaluating the impact of building materials on indoor air quality: A critical analysis," *Sak. Univ. J. Sci.*, doi: 10.16984/saufenbilder.1457545.
- [6] L. M. Obeidat, J. R. Jones, D. M. Mahaftha, dan [Penulis lainnya], "Optimizing indoor air quality and energy efficiency in multifamily residences: Advanced passive pipe system parametrics study," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, doi: 10.1007/s13762-024-05624-6.
- [7] yoyok; A. winardi Nanang Suffiandi; Syah, Moch. Aziz Zulian; Sudarno, Sudarno; Arifin, Rizal; Munaji, Munaji, "Analisis Pengaruh Penambahan Unsur Tembaga Pada Pengecoran Ulang Alumunium Limbah Otomotif Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Bahan," *AutoMech J. Tek. Mesin*, no. Vol 3, No 01 (2023): Mei, 2023. Tersedia pada: <https://journal.umpo.ac.id/index.php/JTM/article/view/6882/2650>
- [8] A. Buonomano, C. Forzano, G. F. Giuzio, dan [Penulis lainnya], "New ventilation design criteria for energy sustainability and indoor air quality in a post Covid-19 scenario," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, doi: 10.1016/j.rser.2023.113378.
- [9] M. Gola, G. Settimo, dan S. Capolongo, "How can design features and other factors affect the indoor air quality in inpatient rooms? Check-lists for the design phase, daily procedures and maintenance activities for reducing the air concentrations of chemical pollution," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, doi: 10.3390/IJERPH17124280.
- [10] V. Vasile, V. Iordache, dan V. M. Radu, "The influence of ventilation on indoor air quality in buildings with variable pollutant emissions," *IOP Conf. Ser.*, doi: 10.1088/1755-1315/1123/1/012042.
- [11] O. S. Brittain, H. Wood, dan P. Kumar, "Prioritising indoor air quality in building design can mitigate future airborne viral outbreaks", doi: 10.1080/23748834.2020.1786652.
- [12] B. Galla dan J. Antony, "Enhancement and homogenization of indoor air quality in a classroom using a vertical airflow ventilation scheme," *Toxics*, doi: 10.3390/toxics10090545.
- [13] M. M. Ma, C. Cao, Y. Xu, dan [Penulis lainnya], "Using CONTAM to design ventilation strategy of negative pressure isolation ward considering different height of door gaps," *Energy Built Environ.*, doi: 10.1016/j.enbenv.2022.07.005.
- [14] S. B. Mohd Saupi, H. Tan, R. Abdul Rahim, dan [Penulis lainnya], "How different ventilation system's designs affected their applications in healthcare facilities: A comprehensive review," *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, doi: 10.37934/araset.57.2.234257.
- [15] B. Brown, "A parametric analysis of internal airflow patterns in supertall passive house multi-unit residential buildings", doi: 10.1088/1755-1315/1185/1/012006.
- [16] P. Mckeen dan Z. Liao, "The influence of airtightness on contaminant spread in MURBs in cold climates,"

Build. Simul., doi: 10.1007/S12273-021-0787-6.

- [17] G. Panaras, R. Gropca, dan G. Papadopoulos, "Ventilation requirements and energy aspects: The case of hospitals," *IOP Conf. Ser.*, doi: 10.1088/1755-1315/1123/1/012042.
- [18] S.-J. Cao, C. W. Yu, dan [Penulis lainnya], "Heating, ventilating and air conditioning system and environmental control for wellbeing," *Indoor Built Environ.*, doi: 10.1177/1420326X20951967.
- [19] S. Chantara, W. Naksen, S. Bootdee, dan [Penulis lainnya], "Indoor air quality assessment to design a model for indoor air quality management and health impact assessment in Northern Thailand," *E3S Web Conf.*, doi: 10.1177/1420326X20951967.
- [20] H. S. Alavi, S. Zhong, dan D. Lalanne, "Indoor air quality forecast in shared spaces– Predictive models and adaptive design proposals," *Spool*, doi: 10.47982/spool.2022.1.05.
- [21] P. Gaonkar, A. Nakkeeran, J. Bapat, dan [Penulis lainnya], "Air quality and thermal comfort management for energy-efficient large public buildings," *Archit. Struct. Constr.*, doi: 10.1051/e3sconf/202339601096.
- [22] W. F. Mohammad Yusoff, "The effects of various opening sizes and configurations to air flow dispersion and velocity in cross-ventilated building", doi: 10.11113/JT.V82.14537.
- [23] G. Torriani, I. Lara-Ibeas, dan F. Babich, "Enhancing indoor air quality in office buildings: Insight from a field study," *E3S Web Conf.*, doi: 10.1051/e3sconf/202452306007.