

ANALISIS PENGARUH *AIR CHANGES PER HOUR* (ACH) DAN AKTIVITAS MEROKOK TERHADAP KONSENTRASI POLUTAN UDARA DALAM RUANGAN PADA VENTILASI ALAMI KAMAR KOS MAHASISWA DI KECAMATAN LOWOKWARU

Ghalib Nabil Putra¹, Ridwan Muhamad Rifai², Vita Ayu Kusuma Dewi^{3*}, Revan Ferdiansyah⁴

¹Program Studi S1 Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang

²Program Studi S1 Teknik Lingkungan, Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang

³Program Studi S1 Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang

⁴Program Studi S1 Teknik Lingkungan, Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang

* E-mail Corresponding: vita.ayu.kusuma.ft@um.ac.id

Abstrak: Kualitas udara dalam ruangan kamar kos mahasiswa berisiko menurun akibat keterbatasan ventilasi alami dan tingginya aktivitas penghuni, khususnya merokok, yang dapat memicu akumulasi polutan berbahaya dan meningkatkan risiko kesehatan penghuni ruangan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh kinerja ventilasi alami terhadap kualitas udara dalam kamar kos mahasiswa melalui analisis *Air Changes per Hour* (ACH), konsentrasi polutan utama (TVOC, HCHO, dan PM_{2.5}), dinamika akumulasi polutan selama waktu paparan, serta penilaian kondisi udara terintegrasi menggunakan *Indoor Air Quality Index* (IAQI). Penelitian dilakukan pada 40 kamar kos mahasiswa di Kecamatan Lowokwaru dengan ventilasi alami. Pengukuran konsentrasi TVOC, HCHO, dan PM_{2.5} dilakukan selama periode hunian 8 jam. Nilai *Air Changes per Hour* (ACH) dihitung dan diklasifikasikan berdasarkan standar ASHRAE, kemudian dianalisis secara deskriptif menggunakan pendekatan keseimbangan massa dan *Indoor Air Quality Index* (IAQI). Hasil menunjukkan peningkatan ACH berkaitan dengan penurunan konsentrasi rata-rata polutan gas, namun kurang efektif terhadap PM_{2.5}. Kamar dengan aktivitas merokok memiliki konsentrasi dan variabilitas polutan lebih tinggi pada seluruh kategori ACH. Analisis temporal dan IAQI menunjukkan ventilasi efektif pada kondisi tanpa aktivitas merokok, tetapi tidak mampu mengendalikan akumulasi polutan pada kondisi merokok.

Kata Kunci: Kualitas udara dalam ruangan, ACH, Kamar kos, Aktivitas merokok, Ventilasi alami

Abstract: The air quality in student dorm rooms is at risk of deteriorating due to limited natural ventilation and high levels of activity among occupants, particularly smoking, which can trigger the accumulation of harmful pollutants and increase health risks for room occupants. This study aims to evaluate the effect of natural ventilation performance on indoor air quality in student dorm rooms through analysis of *Air Changes per Hour* (ACH), concentrations of major pollutants (TVOC, HCHO, and PM_{2.5}), pollutant accumulation dynamics during exposure time, and integrated air quality assessment using the *Indoor Air Quality Index* (IAQI). The study was conducted in 40 student dorm rooms in Lowokwaru District with natural ventilation. Measurements of TVOC, HCHO, and PM_{2.5} concentrations were taken during an 8-hour occupancy period. *Air Changes per Hour* (ACH) values were calculated and classified based on ASHRAE standards, then analyzed descriptively and using a mass balance approach. The results showed that an increase in ACH was associated with a decrease in the average concentration of gaseous pollutants, but this was not consistent for PM_{2.5}. Rooms with smoking activities had higher pollutant concentrations and variability in all ACH categories. Temporal analysis and IAQI showed that ventilation was effective in conditions without smoking activities, but was unable to control pollutant accumulation in smoking conditions.

Keywords: Indoor air quality, ACH, Students dorms rooms, Smoking activities, Natural ventilation

PENDAHULUAN

Kualitas udara dalam ruangan merupakan menjadi isu dan aspek penting dalam kinerja bangunan hunian, terutama pada ruang dengan ventilasi terbatas. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi polutan dalam ruangan, seperti formaldehida (HCHO), *total volatile organic compounds* (TVOC), dan partikulat halus (PM_{2.5}), dapat melebihi ambang batas kesehatan akibat kombinasi sumber emisi internal dan rendahnya laju pertukaran udara (Cincinelli & Martellini, 2017; EPA, 2025; Salthammer dkk., 2010). Paparan jangka pendek maupun panjang terhadap polutan tersebut dikaitkan dengan gangguan pernapasan, iritasi, serta penurunan kenyamanan dan produktivitas penghuni (Jones, 1999; Joshi, 2008; WHO, 2024). Pada bangunan hunian, ventilasi menjadi mekanisme utama dalam mengendalikan konsentrasi polutan melalui proses pengenceran dan pengeluaran udara tercemar (Chenari dkk., 2016; Haghighat dkk., 1988).

Pada bangunan hunian seperti Indonesia yang beriklim tropis, ventilasi alami masih menjadi sistem dominan karena pertimbangan energi dan biaya. Kinerja ventilasi alami umumnya direpresentasikan melalui *Air Changes per Hour* (ACH), yang menggambarkan frekuensi pergantian udara dalam ruang. Sejumlah studi menunjukkan bahwa peningkatan ACH berkaitan dengan penurunan konsentrasi polutan gas seperti HCHO dan VOC (Allen & Ibrahim, 2021; Liu dkk., 2023), meskipun respons terhadap PM_{2.5} cenderung bervariasi akibat pengaruh infiltrasi udara luar dan aktivitas penghuni (Chen & Zhao, 2011; Quang dkk., 2013). Standar seperti ASHRAE 62.2 merekomendasikan nilai minimum 0,35 ACH sebagai batas dasar ventilasi hunian, namun nilai tersebut tidak selalu merepresentasikan kinerja ventilasi aktual pada bangunan dengan konfigurasi ruang dan pola bukaan yang berbeda (Aguilera Benito dkk., 2021; ASHRAE 62.2, 2022).

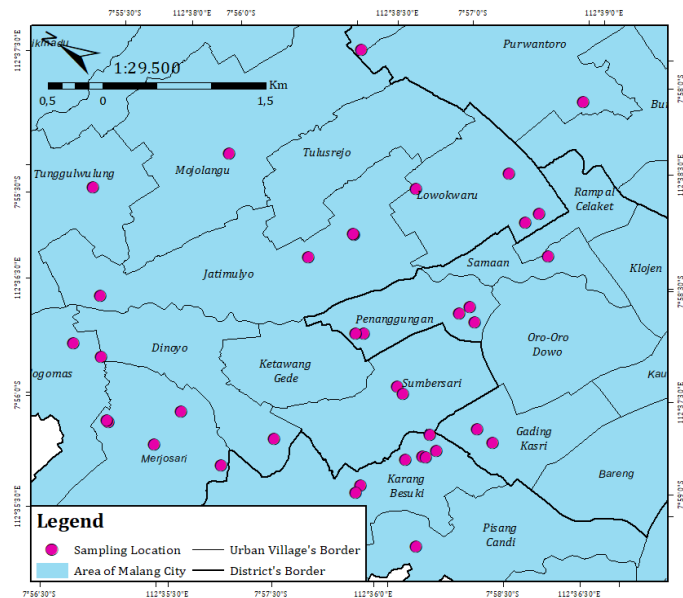
Bangunan kos mahasiswa merupakan tipe hunian dengan kerentanan tinggi terhadap penurunan kualitas udara dalam ruangan. Di kawasan akademik padat seperti Kota Malang, tercatat 7.476 mahasiswa tinggal di kamar kos dengan ukuran ruang terbatas, rasio bukaan rendah, serta ketergantungan tinggi pada ventilasi alami (Dana dkk., 2017). Karakteristik ruang yang relatif kecil, rasio bukaan terbatas, serta dominasi ventilasi satu sisi menyebabkan efektivitas aliran udara menjadi rendah (Gusti & Risandi, 2021; Latif, 2020). Selain faktor desain, aktivitas penghuni seperti merokok berkontribusi signifikan terhadap peningkatan konsentrasi polutan, khususnya PM_{2.5} dan senyawa volatil (Hyland dkk., 2008; Megatsari dkk., 2023; Repace, 2024). Meskipun penelitian terkait IAQ telah berkembang, sebagian besar studi masih berfokus pada bangunan formal atau hanya mengkaji satu jenis polutan, serta belum mengintegrasikan analisis multipolutan dengan indikator kinerja ventilasi berbasis ACH dan perilaku penghuni secara simultan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja ventilasi alami pada kamar kos mahasiswa di Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang, melalui analisis *Air Changes per Hour* (ACH) dan konsentrasi polutan udara (HCHO, TVOC, dan PM_{2.5}). Penelitian ini juga membandingkan kondisi hunian dengan dan tanpa aktivitas merokok, serta menganalisis dinamika kualitas udara dalam ruang menggunakan pendekatan keseimbangan massa dan *Indoor Air Quality Index* (IAQI).

METODE

Lokasi Penelitian

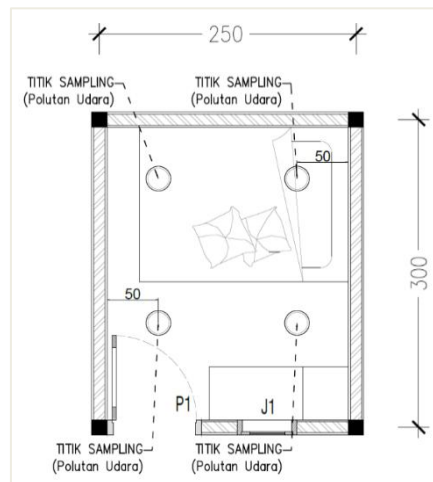
Penelitian dilakukan menggunakan metode kuantitatif deskriptif. Pengambilan data dilakukan pada 40 kamar kos mahasiswa yang tersebar di Kelurahan Sumbersari, Lowokwaru, Dinoyo, dan Ketawang Gede, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang. Wilayah ini dipilih karena merupakan kawasan dengan konsentrasi hunian mahasiswa tinggi dan karakter bangunan kos yang didominasi ventilasi alami dengan ukuran ruang relatif terbatas. Pemilihan sampel dilakukan menggunakan *stratified random sampling* berdasarkan wilayah kelurahan. Kriteria pemilihan unit meliputi: (1) kamar kos aktif yang dihuni mahasiswa, (2) luas ruang 5–12 m², (3) rasio bukaan ventilasi terhadap luas lantai berkisar 1–20% untuk menghasilkan variasi nilai ACH, serta (4) lokasi bangunan berada dalam radius ≤1 km dari jalan utama guna meminimalkan perbedaan karakteristik udara ambien luar. Untuk menyederhanakan analisis, tipe dan mekanisme bukaan ventilasi dianggap setara, dengan fokus utama pada luas bukaan efektif.



Gambar 1. Sebaran Geografis Titik Pengambilan Sampel di wilayah Kecamatan Lowokwaru (Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Pengukuran Polutan, Kamar Kos dan Kecepatan Angin

Konsentrasi HCHO, TVOC, dan PM_{2.5} diukur menggunakan *air quality monitor digital* pada setiap kamar kos. Pengukuran dilakukan dengan metode *multi-point sampling* pada empat titik di dalam ruangan (Gambar 2b) untuk memperoleh distribusi polutan yang representatif. Sensor ditempatkan pada ketinggian 1,5 m dari lantai sebagai representasi *breathing zone* penghuni dan berjarak 0,5–1 m dari dinding. Setiap titik diukur selama 10 menit, kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh nilai konsentrasi polutan per ruang. Selanjutnya, nilai rata-rata ruang digunakan sebagai dasar evaluasi kualitas udara dan perhitungan indeks IAQI.



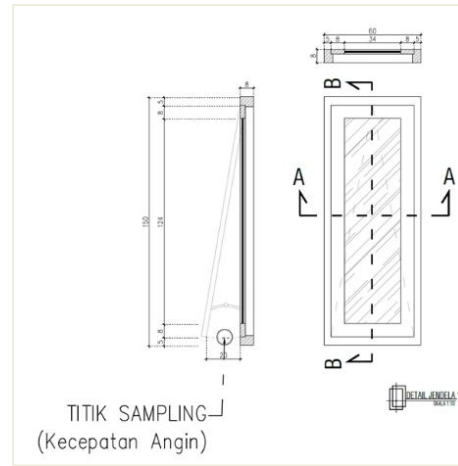
Gambar 2. (a) Kamar tampak dalam (b) Titik Sampling Polutan Udara

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Kecepatan angin pada bukaan ventilasi alami diukur menggunakan *anemometer digital* selama 1 menit untuk memperoleh nilai rata-rata kecepatan angin sesaat sebagai indikator kondisi ventilasi alami saat pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 3b. Pengukuran ini tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan durasi pengukuran polutan, melainkan sebagai parameter input untuk menghitung laju ventilasi aktual. Dimensi ruang (panjang, lebar, tinggi) dan luas bukaan ventilasi diukur menggunakan *laser distance meter digital* untuk menghitung volume ruangan dan laju aliran udara. Data kecepatan angin dan dimensi ruang digunakan untuk menghitung nilai ACH (*Air Changes per Hour*).



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Kamar tampak luar (b) Titik Sampling Kecepatan Angin

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Tabel 1. Spesifikasi dan detail instrument pengambilan data

Alat	Pabrik	Model	Parameter	Akurasi	Rentang
<i>Air quality monitor digital</i>	BOSEAN	TZ01	Polutan Udara (HCHO, TVOC, PM _{2.5})	± 10%	HCHO: 0 – 1,999 mg/m ³ TVOC: 0 – 9,999 mg/m ³ PM _{2.5} : 0 – 999 µg/m ³
<i>Laser distance meter digital</i>	Krisbow	QPDM 150	Jarak	± 1.5 mm	0,05 - 150 meter
<i>Anemometer digital</i>	Benetechco	GM816	Kecepatan Angin	± 5%	0 - 30 m/s

Data Aktivitas Penghuni

Data aktivitas penghuni dikumpulkan melalui kuesioner tertutup yang disebarikan kepada penghuni pada 40 kamar kos untuk mengidentifikasi keberadaan aktivitas merokok di dalam ruang. Kuesioner ini digunakan untuk mengklasifikasikan kamar menjadi dua kelompok, yaitu kamar dengan aktivitas merokok dan tanpa aktivitas merokok, sebagai representasi keberadaan sumber emisi internal. Informasi tersebut kemudian dimanfaatkan sebagai variabel pengelompokan dalam analisis kualitas udara, sehingga evaluasi kinerja ventilasi alami berdasarkan nilai *Air Changes per Hour* (ACH) dapat dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh aktivitas penghuni terhadap variasi konsentrasi polutan dalam ruangan.

Waktu Pengambilan Sampel

Pengukuran polutan dilakukan selama 1 jam pada setiap kamar kos untuk merepresentasikan kondisi kualitas udara dalam ruangan pada periode pengamatan dengan ventilasi alami dan aktivitas penghuni yang berlangsung. Durasi ini digunakan untuk memperoleh nilai konsentrasi yang relatif stabil dalam satu siklus pengukuran tanpa membedakan dinamika temporal secara rinci. Pengambilan data dilakukan pada dua periode waktu, yaitu pagi (06.00 – 10.00 WIB) dan malam (16.00 – 20.00 WIB), yang ditetapkan sebagai strategi operasional untuk efisiensi pengumpulan data dalam satu hari. Perbedaan waktu pengukuran tidak diperlakukan sebagai variabel analisis, melainkan sebagai bagian dari prosedur pengambilan sampel.

Analisis Data

Analisis dilakukan dengan menghitung nilai ACH menggunakan (Persamaan 1), pada semua sampel data yang dikumpulkan, yang kemudian dikategorikan ke dalam empat kelompok (lihat Tabel 2). Kemudian, data dibagi menjadi dua kelompok: perokok dan non-perokok, untuk membandingkan konsentrasi polutan di dalam ruangan

antara penghuni kamar kos perokok dan non-perokok.

$$ACH = \left(\frac{Q}{V}\right) \times 3600 \dots \dots \dots \text{pers. 1}$$

dimana,

- ACH = pergantian udara per jam (h^{-1})
- Q = laju udara ventilasi (m^3/s) = $v \times A$
- V = volume ruangan (m^3)

Tabel 2. Kategori ACH

ACH Kategori	Nilai ACH (h^{-1})
Kat. 1	$< 0,35$
Kat. 2	$0,35 - 0,5$
Kat. 3	$0,5 - 1$
Kat. 4	> 1

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Nilai ACH digunakan sebagai input dalam mass balance equation (Persamaan 2) untuk mensimulasikan perubahan konsentrasi polutan selama 8 jam hunian. Simulasi dilakukan dengan asumsi kondisi terburuk ($k=0$) guna menggambarkan potensi terburuk akumulasi polutan. Nilai laju emisi polutan diambil berdasarkan jurnal/literatur. Hasilnya ditampilkan dalam grafik garis yang menunjukkan perubahan kualitas udara seiring waktu.

$$C_{t+1} = C_t + \Delta t \times \left(\frac{S}{V} - \left(\frac{Q}{V} + k\right) \times C_t\right) \dots \dots \dots \text{pers. 2}$$

dimana,

- C_t = konsentrasi polutan (mg/m^3)
- Δt = interval waktu (hour)
- S = laju emisi polutan (mg/h)
- V = volume ruangan (m^3)
- Q = laju udara ventilasi (m^3/h) = $ACH \times V$
- k = laju penghilangan spesifik polutan (h^{-1})

Konsentrasi polutan pada waktu awal dan akhir dianalisis menggunakan pendekatan *Environmental Indoor Air Quality Index* (EIAQ) yang dikembangkan oleh Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (USEPA, 2024) yang disebut *Air Quality Index Calculator* (Persamaan 3) untuk mengklasifikasikan kualitas udara ke dalam kategori Good hingga Hazardous, sehingga memungkinkan perbandingan kondisi kualitas udara antar tingkat ventilasi dan aktivitas penghuni.

$$I_p = \left[(C_p - BP_{Lo}) \times \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} \right] + BP_{Lo} \dots \dots \dots \text{pers. 3}$$

dimana,

- I_p = indeks polutan p
- C_p = konsentrasi polutan yang dibulatkan p
- BP_{Hi} = titik ambang yang lebih besar dari atau sama dengan C_p
- BP_{Lo} = titik ambang yang kurang dari atau sama dengan C_p
- I_{Hi} = nilai AQI yang sesuai dengan BP_{Hi}
- I_{Lo} = nilai AQI yang sesuai dengan BP_{Lo}

Tabel 3. Breakpoint Tabel untuk status IAQI

IAQI	Status	TVOC (mg/m^3)	PM _{2.5} ($\mu g/m^3$)	HCHO (mg/m^3)
100 – 76	Good	0 – 0,281	0 – 7,14	0 – 0,021

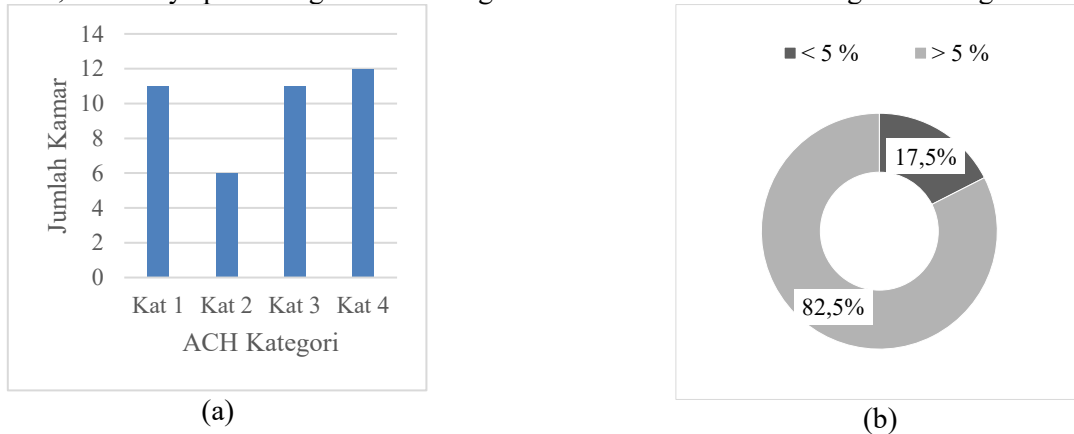
75 – 51	Moderate	0,282 – 0,843	7,15 – 53,57	0,022 – 0,107
50 – 26	Unhealthy	0,844 – 1,389	53,58 – 64,29	0,108 – 0,123
25 – 0	Hazardous	1,390 – 9,687	64,30 – 214,29	0,124 – 0,614

Sumber: (EPA, 2025; Saad dkk., 2017).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh *Air Changes per Hour* (ACH) terhadap Konsentrasi Polutan Udara

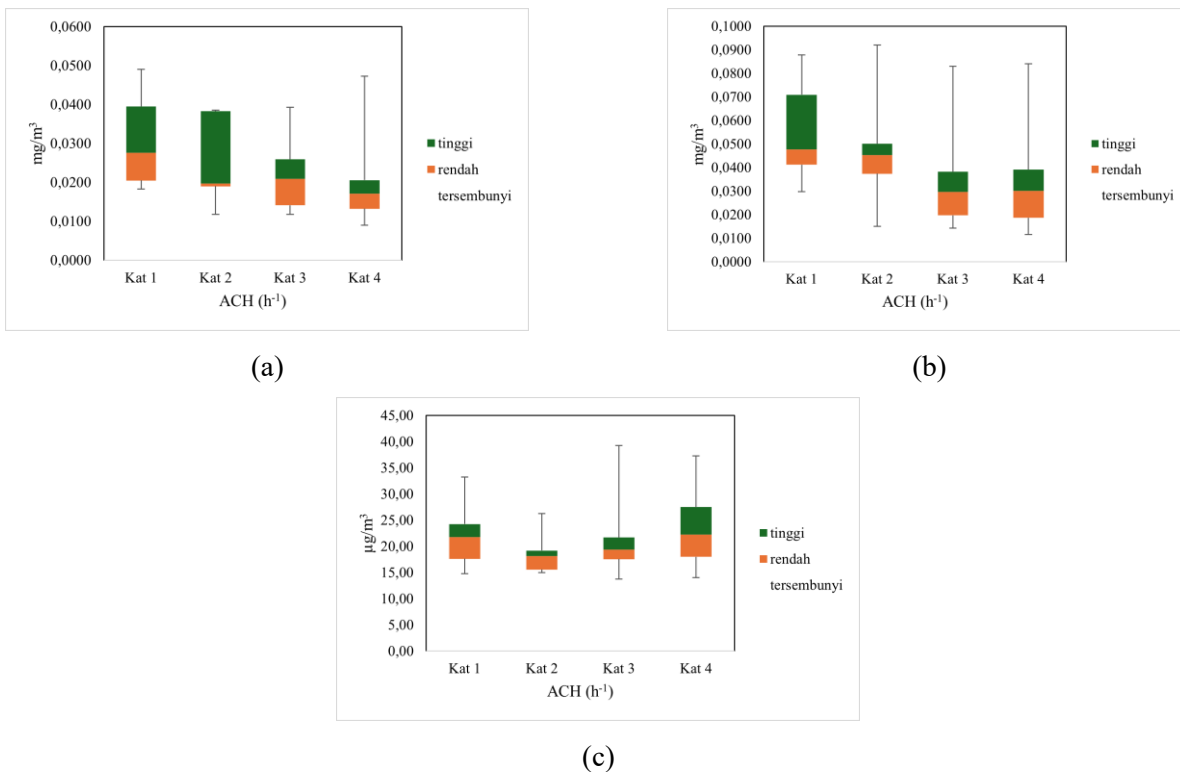
Hasil pengukuran pada 40 kamar kos mahasiswa menunjukkan bahwa nilai *Air Changes per Hour* (ACH) bervariasi cukup besar meskipun sebagian besar kamar telah memenuhi rasio bukaan ventilasi minimum secara geometris. Temuan ini menegaskan bahwa pemenuhan rasio bukaan tidak selalu berbanding lurus dengan kinerja ventilasi aktual, khususnya pada bangunan kos dengan ventilasi satu sisi dan konfigurasi ruang terbatas.



Gambar 4. Proporsi jumlah kamar berdasarkan (a) tingkat ACH, (b) rasio bukaan

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Secara umum, peningkatan kategori ACH berkaitan dengan penurunan konsentrasi median polutan gas, khususnya HCHO dan TVOC. Pola ini lebih konsisten pada TVOC dibandingkan formaldehida. Temuan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan laju pertukaran udara cenderung efektif dalam mengendalikan polutan gas yang bersifat mudah terbuang melalui ventilasi. Sebaliknya, konsentrasi PM_{2.5} tidak menunjukkan hubungan linier dengan peningkatan ACH, dengan variasi konsentrasi yang tetap tinggi pada beberapa kamar dengan ventilasi lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa dinamika PM_{2.5} dipengaruhi tidak hanya oleh ventilasi, tetapi juga oleh infiltrasi udara luar dan aktivitas penghuni di dalam ruangan. (Chenari dkk., 2016; Hendrawati, 2021).



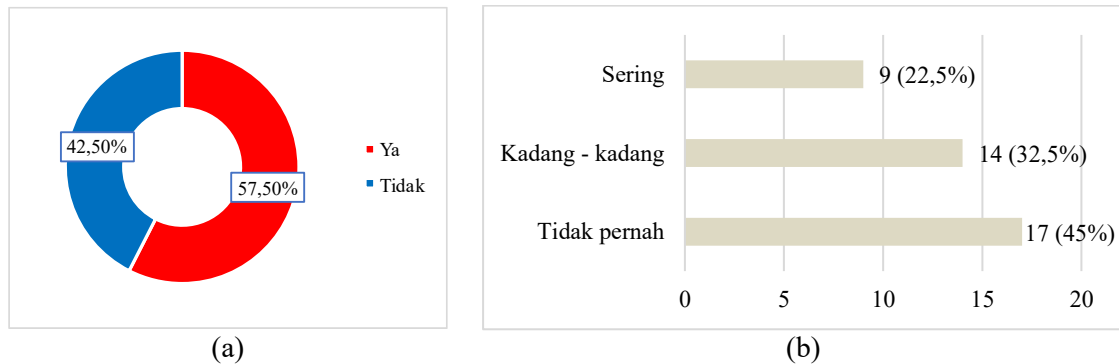
Gambar 5. Visualisasi *Box Plot* sebaran konsentrasi polutan udara dalam ruangan (a) HCHO, (b) TVOC, (c) PM_{2.5} berdasarkan tingkat *Air Changes per Hour* (ACH)

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Interpretasi ini konsisten dengan teori keseimbangan massa polutan dalam ruang tertutup, di mana ventilasi berperan sebagai mekanisme penghilangan utama untuk polutan gas, namun memiliki efektivitas terbatas terhadap partikel halus yang juga dipengaruhi oleh sumber eksternal dan proses resuspensi. Hasil ini sejalan dengan temuan Chen & Zhao (2011) serta Quang dkk. (2013), yang menunjukkan bahwa ventilasi alami dapat menurunkan polutan gas tetapi tidak selalu menurunkan PM_{2.5} secara konsisten, terutama di lingkungan perkotaan.

Perbandingan Konsentrasi Polutan Udara pada Kondisi Hunian dengan Aktivitas Merokok dan Tidak Merokok

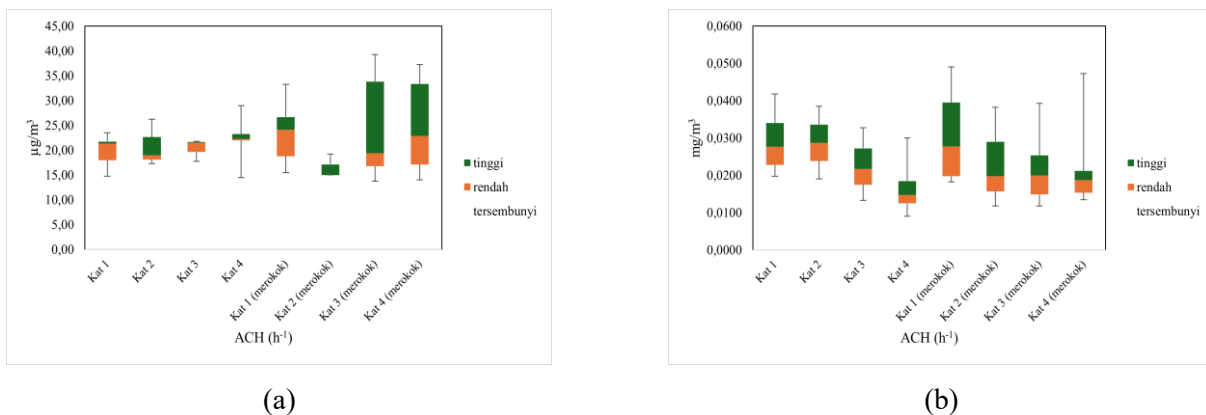
Berdasarkan hasil kuesioner terhadap 40 penghuni kamar kos mahasiswa di Kecamatan Lowokwaru (Gambar 6a), sebanyak 23 kamar (57,5%) dikategorikan sebagai kamar tanpa aktivitas merokok di dalam ruangan, sedangkan 17 kamar (42,5%) dikategorikan sebagai kamar dengan aktivitas merokok di dalam ruangan. Pada kelompok dengan aktivitas merokok (Gambar 6b), intensitas merokok bervariasi, dengan 32,5% responden menyatakan merokok sesekali dan 22,5% menyatakan merokok secara rutin di dalam kamar kos, sementara 45% responden menyatakan tidak pernah merokok di dalam kamar.

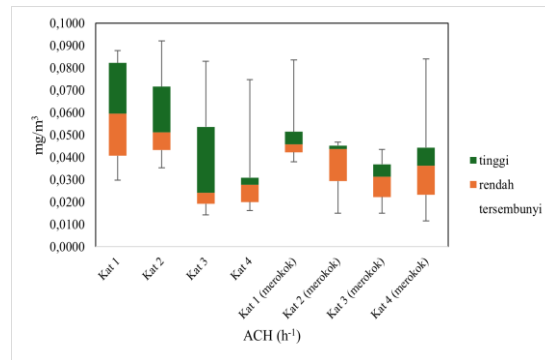


Gambar 6. (a) Persentase jumlah responden perokok dan non-perokok, (b) Frekuensi merokok responden pada kamar kos

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Perbandingan antara kamar kos dengan dan tanpa aktivitas merokok (Gambar 7) menunjukkan perbedaan kualitas udara yang jelas pada seluruh kategori ACH. Kamar dengan aktivitas merokok secara konsisten memiliki konsentrasi polutan yang lebih tinggi, sebaran data yang lebih luas, serta nilai maksimum yang lebih ekstrem dibandingkan kamar tanpa aktivitas merokok, meskipun berada pada tingkat ventilasi yang sama. Temuan ini menunjukkan bahwa aktivitas merokok merupakan sumber emisi internal yang dominan, sehingga peningkatan ACH saja tidak cukup untuk meniadakan dampaknya. Pada kamar tanpa aktivitas merokok, peningkatan ACH cenderung diikuti oleh penurunan konsentrasi rata-rata polutan dan stabilitas kualitas udara yang lebih baik. Sebaliknya, pada kamar dengan aktivitas merokok, ventilasi hanya berperan menurunkan konsentrasi rata-rata secara terbatas, sementara lonjakan konsentrasi dan variabilitas tetap tinggi.





(c)

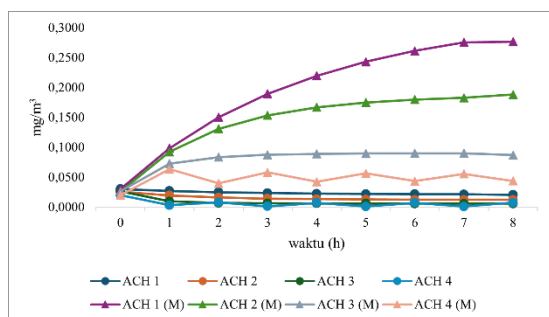
Gambar 7. Sebaran konsentrasi polutan (a) PM_{2.5}, (b) HCHO dan (c) TVOC berdasarkan variasi ACH dan aktivitas merokok

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

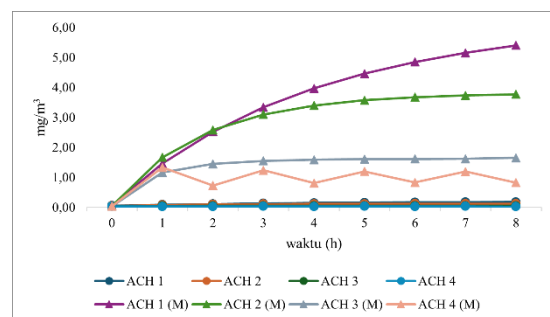
Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa asap rokok merupakan sumber emisi partikulat halus dan senyawa volatil dengan laju yang tinggi, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi polutan dalam ruangan (Hyland dkk., 2008; Repace, 2024). Dalam kondisi ini, ventilasi alami mampu mengurangi konsentrasi polutan gas (HCHO dan TVOC) melalui proses pengeluaran udara, namun nilai konsentrasi yang relatif tinggi masih dijumpai pada beberapa kondisi pengamatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.a. Hal ini menggambarkan bahwa keberadaan sumber emisi internal yang kuat, seperti aktivitas merokok, tetap membentuk karakteristik kualitas udara dalam ruangan meskipun ventilasi alami tersedia.

Dinamika Temporal Akumulasi Polutan berdasarkan ACH dan Aktivitas Merokok

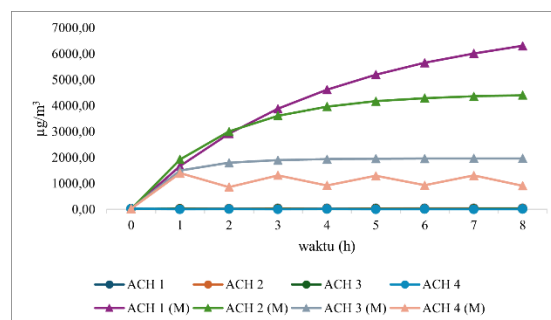
Analisis dinamika temporal berbasis simulasi keseimbangan massa menunjukkan perbedaan mendasar antara kamar kos tanpa dan dengan aktivitas merokok. Pada kondisi tanpa aktivitas merokok, peningkatan ACH mempercepat tercapainya kondisi mendekati steady-state dengan konsentrasi polutan yang relatif stabil dan rendah. Pola ini menunjukkan bahwa ventilasi alami mampu mengimbangi laju emisi latar belakang yang relatif kecil dan konstan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8. Akumulasi konsentrasi polutan selama periode 8 jam pada berbagai tingkat ACH dalam kondisi tidak merokok dan merokok (M); (a) HCHO, (b) TVOC, (c) PM_{2.5}

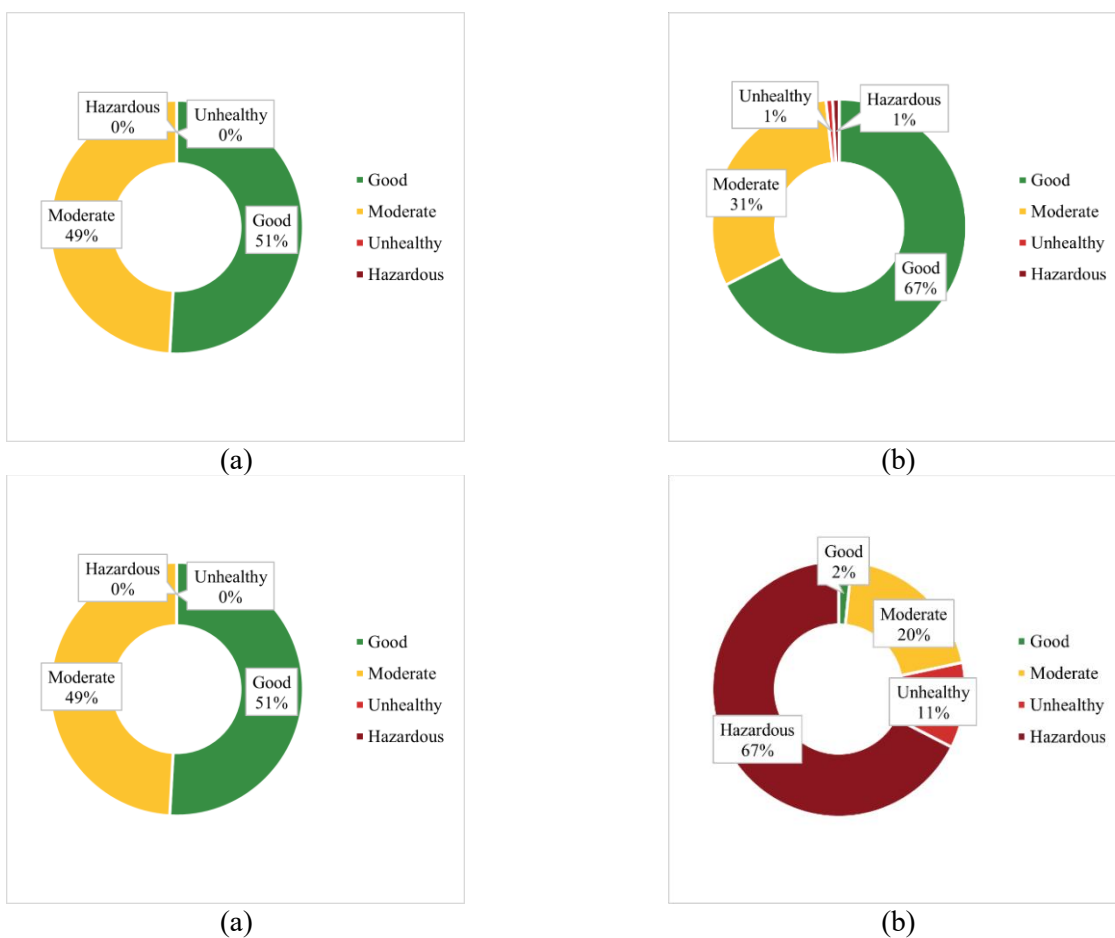
(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Sebaliknya, pada kondisi dengan aktivitas merokok, konsentrasi polutan terus meningkat sepanjang periode paparan, terutama pada ACH rendah hingga menengah, tanpa indikasi tercapainya kondisi keseimbangan. Bahkan pada ACH yang lebih tinggi, peningkatan konsentrasi tetap terjadi meskipun dengan laju yang lebih lambat. Hal ini menunjukkan bahwa laju emisi dari aktivitas merokok melampaui kapasitas penghilangan ventilasi alami, sehingga peningkatan ACH hanya mengurangi kemiringan kurva akumulasi, bukan membalikkan tren peningkatan konsentrasi.

Temuan ini memperkuat konsep bahwa efektivitas ventilasi sangat bergantung pada keseimbangan antara laju emisi dan laju pertukaran udara (Haghighat dkk., 1988). Dalam konteks kamar kos dengan aktivitas merokok, ventilasi alami tidak cukup untuk mencegah akumulasi polutan, sehingga risiko paparan meningkat seiring waktu hunian. Selain itu, dinamika temporal menunjukkan bahwa paparan puncak (*peak exposure*) dapat terjadi dalam waktu singkat, yang tidak selalu tercermin oleh nilai rata-rata konsentrasi.

Evaluasi Perubahan Indoor Air Quality Index (IAQI) terhadap Waktu Paparan

Pendekatan berbasis *Indoor Air Quality Index* (IAQI) memberikan gambaran terintegrasi mengenai perubahan kualitas udara dalam ruangan akibat kombinasi berbagai polutan. Pada kamar tanpa aktivitas merokok, distribusi IAQI menunjukkan pergeseran menuju kualitas udara yang lebih baik setelah periode paparan, yang mencerminkan peran ventilasi alami dalam menurunkan akumulasi polutan pada kondisi emisi rendah.



Gambar 9. Distribusi kategori IAQI pada kondisi tanpa asap rokok: (a) Kondisi awal (t0), (b) Kondisi akhir (t8) dan dengan asap rokok (c) Kondisi awal (t0), (d) Kondisi akhir (t8)

(Sumber: Data Pengolahan Peneliti)

Sebaliknya, pada kamar dengan aktivitas merokok, distribusi IAQI pada Gambar 9 menunjukkan perbedaan yang jelas antara kondisi awal dan akhir paparan. Pada kondisi tanpa asap rokok, Gambar 9a (t0) memperlihatkan distribusi IAQI yang didominasi kategori *Good* dan *Moderate*, yang kemudian pada Gambar 9b (t8) bergeser ke arah kategori yang lebih baik dengan peningkatan proporsi *Good*. Pada kondisi dengan asap rokok, Gambar 9c (t0) menunjukkan distribusi awal yang relatif serupa dengan dominasi kategori *Good* dan *Moderate*, namun pada Gambar 9d (t8) terjadi pergeseran distribusi yang sangat signifikan menuju kategori *Unhealthy* hingga *Hazardous* dengan peningkatan proporsi kategori yang berisiko pada kualitas udara.

Perbedaan pola ini menunjukkan bahwa pada kondisi dengan sumber emisi internal, perubahan distribusi IAQI

selama waktu paparan tetap menunjukkan dominasi kategori kualitas udara yang lebih rendah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Hyland dkk. (2008) dan Repace (2024) bahwa paparan asap rokok dalam ruang tertutup dapat meningkatkan konsentrasi PM_{2.5} secara cepat hingga melampaui ambang aman dalam waktu singkat dan emisi asap rokok menghasilkan akumulasi partikel halus dan senyawa berbahaya yang tinggi sehingga meningkatkan tingkat paparan secara signifikan selama periode hunian. Hasil ini juga menunjukkan bahwa pada kondisi dengan sumber emisi internal, perubahan distribusi IAQI selama waktu paparan cenderung bergeser ke kategori kualitas udara yang lebih rendah dan IAQI mampu menggambarkan perubahan kualitas udara secara menyeluruh selama periode paparan.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi HCHO, TVOC, dan PM_{2.5} pada 40 kamar kos mahasiswa di Kecamatan Lowokwaru memiliki variasi pada setiap kategori *Air Changes per Hour* (ACH), meskipun sebagian besar ruang telah memenuhi rasio bukaan ventilasi minimum. Nilai median HCHO dan TVOC umumnya lebih rendah pada kategori ACH yang lebih tinggi, dengan pola yang lebih konsisten pada TVOC, sedangkan PM_{2.5} menunjukkan sebaran konsentrasi yang tetap bervariasi pada seluruh tingkat ACH. Temuan ini menegaskan bahwa kinerja ventilasi alami lebih merepresentasikan pertukaran udara aktual dalam ruang dibandingkan sekadar pemenuhan parameter geometris bukaan.

Perbedaan kondisi hunian menunjukkan bahwa aktivitas merokok menjadi faktor dominan yang meningkatkan konsentrasi polutan, memperlebar variasi data, dan menghasilkan nilai maksimum yang lebih ekstrem pada seluruh kategori ACH. Analisis berbasis keseimbangan massa menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa merokok, ventilasi alami mampu menghasilkan kondisi mendekati stabil, sedangkan pada kondisi dengan merokok, konsentrasi polutan terus meningkat tanpa mencapai keseimbangan, yang mengindikasikan bahwa laju emisi melampaui kapasitas penghilangan ventilasi alami.

Evaluasi berbasis *Indoor Air Quality Index* (IAQI) memperlihatkan bahwa tanpa aktivitas merokok kualitas udara cenderung berada pada kategori yang lebih baik, sementara pada kondisi merokok terjadi pergeseran cepat menuju kategori berbahaya dalam periode paparan 8 jam. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa variasi kualitas udara dalam kamar kos ditentukan oleh interaksi antara kinerja ventilasi alami dan keberadaan sumber emisi internal. Upaya peningkatan kualitas udara perlu dilakukan melalui perancangan ventilasi alami yang mengoptimalkan efektivitas aliran udara serta pengendalian sumber emisi internal seperti pembatasan aktivitas merokok, dan untuk pengembangan penelitian selanjutnya diperlukan kajian lanjutan terkait karakteristik bangunan dan lingkungan untuk memperkuat dasar teknis perancangan hunian kos.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilera Benito, P., Piña Ramírez, C., Viccione, G., & Lepore, E. (2021). Ventilation for Residential Buildings: Critical Assessment of Standard Requirements in the COVID-19 Pandemic Context. *Frontiers in Built Environment*, 7. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.656718>
- Allen, J. G., & Ibrahim, A. M. (2021). Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-CoV-2 Transmission. *JAMA*, 325(20), 2112. <https://doi.org/10.1001/jama.2021.5053>
- ASHRAE 62.2. (2022). *Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings*. www.ashrae.org/continuous-maintenance
- Chen, C., & Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. Dalam *Atmospheric Environment* (Vol. 45, Nomor 2, hlm. 275–288). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- Chenari, B., Dias Carrilho, J., & Gameiro da Silva, M. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1426–1447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074>
- Cincinelli, A., & Martellini, T. (2017). Indoor air quality and health. Dalam *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 14, Nomor 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>
- Dana, A. A., Setyadin, B., & Sunandar, A. (2017). *Analisis Faktor-Faktor yang Menjadi Pertimbangan Mahasiswa dalam Memilih Tempat Kos di Kelurahan Sumber Sari Kota Malang*.
- EPA. (2025). *The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality*. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/inside-story-guide-indoor-air-quality#concerns>

- Gusti, A., & Risandi, R. (2021). Sanitasi Lingkungan dan Perilaku Sehat pada Rumah Kos Mahasiswa di Lingkungan Kampus Universitas Andalas. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 20(2), 74–81. <https://doi.org/10.14710/jkli.20.2.74-81>
- Haghighat, F., Fazio, P., & Unny, T. E. (1988). *A Predictive Stochastic Model For Indoor Air Quality* (Vol. 23, Nomor 3).
- Hendrawati, D. (2021). Natural Ventilation Performance for Schools During a Pandemic and the Post-Pandemic COVID 19. *Journal of Architectural Research and Design Studies*, 5(2). <https://doi.org/10.20885/jars.vol5.iss2.art6>
- Hyland, A., Travers, M. J., Dresler, C., Higbee, C., & Cummings, K. M. (2008). A 32-country comparison of tobacco smoke derived particle levels in indoor public places. *Tobacco Control*, 17(3), 159–165. <https://doi.org/10.1136/tc.2007.020479>
- Jones, A. P. (1999). Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33(28), 4535–4564. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00272-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00272-1)
- Joshi, S. (2008). The sick building syndrome. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 12(2), 61. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.43262>
- Latif, S. (2020). Sistem Ventilasi Alami Satu Sisi pada Kamar Kos dengan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD). *Jurnal Perumahan*, 15(2), 95. <https://doi.org/10.31815/jp.2020.15.95-106>
- Liu, N., Fang, L., Liu, W., Kan, H., Zhao, Z., Deng, F., Huang, C., Zhao, B., Zeng, X., Sun, Y., Qian, H., Mo, J., Sun, C., Guo, J., Zheng, X., Bu, Z., Weschler, L. B., & Zhang, Y. (2023). Health effects of exposure to indoor formaldehyde in civil buildings: A systematic review and meta-analysis on the literature in the past 40 years. *Building and Environment*, 233, 110080. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110080>
- Megatsari, H., Astutik, E., Gandeswari, K., Sebayang, S. K., Nadhiroh, S. R., & Martini, S. (2023). Tobacco advertising, promotion, sponsorship and youth smoking behavior: The Indonesian 2019 Global Youth Tobacco Survey (GYTS). *Tobacco Induced Diseases*, 21(December). <https://doi.org/10.18332/tid/174644>
- Quang, T. N., He, C., Morawska, L., & Knibbs, L. D. (2013). Influence of ventilation and filtration on indoor particle concentrations in urban office buildings. *Atmospheric Environment*, 79, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.009>
- Repace, J. L. (2024). Secondhand smoke Infiltration in multiunit housing: Health effects and nicotine levels. *Indoor Environments*, 1(2), 100013. <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2024.100013>
- Saad, S. M., Shakaff, A. Y. M., Saad, A. R. M., Yusof, A. M., Andrew, A. M., Zakaria, A., & Adom, A. H. (2017). *Development of indoor environmental index: Air quality index and thermal comfort index*. 020043. <https://doi.org/10.1063/1.4975276>
- Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R. (2010). Formaldehyde in the Indoor Environment. *Chemical Reviews*, 110(4), 2536–2572. <https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- USEPA. (2024). *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*.
- WHO. (2024). *Household air pollution*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.

