

Pengaruh Konsentrasi PM_{2,5} Melalui Rasio Indoor/Outdoor: Kajian Literatur

Muhammad Irham Anshari¹, Didin Agustian Permadi¹

1. Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional Bandung

Email : irhamanshari10@gmail.com

ABSTRAK

Particulate Matter (PM) menjadi salah satu dari 10 faktor risiko utama bagi kesehatan manusia. Partikulat halus PM_{2,5} dapat menembus lebih dalam ke paru-paru hingga mencapai aliran darah. Tujuan studi ini adalah untuk mengkaji berbagai penelitian terdahulu mengenai konsentrasi PM_{2,5} melalui rasio Indoor/Outdoor (I/O). Metode yang digunakan berupa telaah penelitian terdahulu melalui artikel nasional dan internasional antara tahun 2013-2024 dengan kata kunci Indoor air quality dan indoor/outdoor. Hasil kajian menunjukkan bahwa kualitas udara dalam ruangan dipengaruhi oleh kualitas udara di luar ruangan, dengan rasio I/O yang bervariasi tergantung pada ventilasi, aktivitas penghuni, desain bangunan, serta sumber polutan di dalam ruangan. Rasio I/O $\geq 1,2$ menunjukkan dominasi polutan indoor, sedangkan $\leq 0,8$ menunjukkan pengaruh signifikan dari polutan outdoor. Penelitian ini menegaskan pentingnya strategi pengendalian bangunan (ventilasi dan struktur bangunan) untuk mengurangi paparan PM_{2,5} di dalam ruangan.

Kata kunci: Kualitas Udara, PM_{2,5}, Ratio I/O

1. PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan masalah serius yang berdampak pada miliaran orang di seluruh dunia (Lu, 2020). Pencemaran udara merupakan *silent killer*, 6,7 juta orang meninggal akibat pencemaran udara. Diantaranya, 3,2 juta kematian akibat polusi udara di dalam rumah (WHO, 2022). Paparan dapat terjadi dari berbagai sumber di dalam dan luar ruangan diakibatkan aktivitas manusia dan lingkungan alam (Chamseddine dkk, 2018). Tingkat polusi di udara ambien dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruangan, tempat sebagian besar orang menghabiskan sebagian besar waktunya (>80%) (Alves dkk., 2020).

Partikulat matter (PM) dari sumber yang berbeda dapat memengaruhi kesehatan manusia (Huang dkk, 2015). PM di udara telah diidentifikasi sebagai salah satu dari 10 faktor risiko utama bagi kesehatan manusia (WHO, 2022). PM_{2,5} dapat menyebabkan dampak kesehatan yang lebih serius karena dapat menembus lebih dalam ke paru-paru dan mencapai aliran darah (Feng et al., 2016). Konsentrasi PM_{2,5} di dalam dan luar ruangan sering berkorelasi, kekuatan korelasinya bervariasi antara lokasi mengingat sumber dan kadar polutan, mekanisme penyebaran, dan paparan pribadi dapat bervariasi (Chamseddine dkk, 2018). Kualitas udara dalam ruangan seharusnya lebih baik daripada kualitas udara luar ruangan karena adanya efek perisai bangunan dan kemungkinan pemasangan ventilasi dan pembersih udara. Namun, untuk beberapa studi kualitas udara dalam ruangan dan luar ruangan, lebih dari 2/3 menemukan

konsentrasi polutan udara dalam ruangan lebih tinggi daripada di luar ruangan (Chen dan Zhao, 2011).

Maka dari itu, penting untuk melakukan lebih banyak penelitian untuk meningkatkan pemahaman kita tentang penyebab masalah dan tindakan perbaikan terkait. Banyak penelitian telah mengonfirmasi bahwa kualitas udara dalam ruangan sangat dipengaruhi oleh kualitas udara luar ruangan. Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah polusi, di dalam dan luar ruangan harus dipertimbangkan. Dalam penelitian ini akan dibahas berbagai isu mengenai $PM_{2,5}$ dalam ruangan dan bagaimana hal tersebut dipengaruhi oleh $PM_{2,5}$ luar ruangan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan sebuah *literatur riview*. *Literatur riview* merupakan tinjauan menyeluruh (atau pilihan) literatur dalam bidang tertentu, menyatukan materi dengan cara yang terstruktur dengan jelas, dan memberikan nilai tambah melalui pencapaian beberapa kesimpulan yang menarik. Artikel yang dicari dan digunakan dalam penulisan ini penelitian ini yaitu artikel yang dipublikasikan di internet yang *open access* seperti Google Scholar, Pubmed dan ScienceDirect. Kata kunci yang digunakan dalam studi ini yaitu "indoor air quality", "outdoor air quality", dan "rasio indoor/outdoor". Artikel yang digunakan dalam studi ini yaitu artikel yang diterbitkan mulai dari tahun 2013 sampai tahun 2024. Artikel tersebut dapat bersumber dari berbagai jurnal nasional dan internasional.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Alur Masuknya Polutan Outdoor ke Lingkungan Indoor

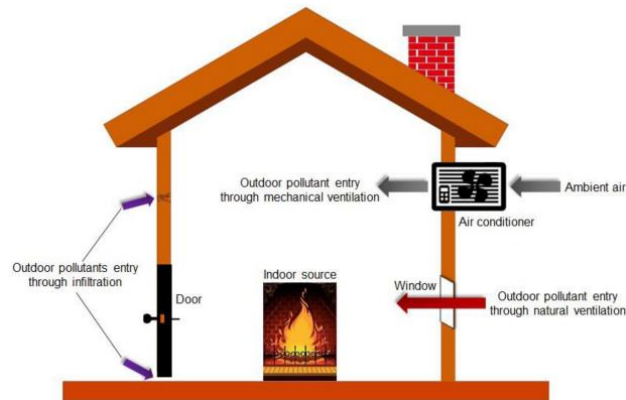
Ada tiga mekanisme utama yang memungkinkan udara luar masuk dan memengaruhi lingkungan dalam ruangan, yaitu ventilasi mekanis, ventilasi alami, dan infiltrasi (Gambar 1). Ventilasi mekanis terjadi melalui kipas ventilasi atau pendingin udara pada rumah tangga, atau melalui sistem pendingin udara pusat pada bangunan, yang semuanya menarik udara luar melalui saluran udara. Ventilasi alami didorong oleh aliran angin yang ada dan terjadi ketika pintu atau jendela ruangan/bangunan dibiarkan terbuka. Bahkan tanpa ventilasi tersebut, pertukaran udara antara lingkungan dalam dan luar ruangan masih dapat terjadi melalui celah atau retakan pada struktur bangunan, sebuah proses yang disebut infiltrasi. Infiltrasi ini dapat menjadi signifikan pada bangunan dengan tingkat kedap udara yang buruk (Leung, 2015).

Melalui ketiga mekanisme ini, polutan udara dari luar dapat masuk ke dalam ruangan, di mana polutan tersebut dapat terdilusi atau terakumulasi tergantung pada kondisi ventilasi.) Hasil penelitian Johnson dkk. (2004) menunjukkan bahwa *Air Exchange Rate* (AER) dipengaruhi oleh suhu dan kecepatan angin, dan cenderung meningkat dengan bertambahnya jumlah pintu dan jendela yang terbuka dan terhubung ke bagian luar. Selain itu, konsentrasi polutan di luar dan di dalam ruangan diidentifikasi sebagai variabel utama untuk memprediksi tingkat konsentrasi polutan dalam ruangan.

3.2 Hubungan Konsentrasi Polutan I/O di Bawah Berbagai Kondisi

Rasio Indoor/Outdoor (I/O) tidak hanya mencerminkan kemampuan bangunan dalam mengubah polutan, tetapi juga mencakup aspek pengoperasian dan aktivitas di dalam bangunan, termasuk keberadaan sumber polutan dalam ruangan (Chen dan Zhao, 2011; Kalimeri dkk., 2019). Rasio I/O dapat menunjukkan variasi yang cukup besar karena dipengaruhi oleh berbagai faktor,

seperti konsentrasi polutan di luar ruangan, variasi spasial, aktivitas di dalam ruangan, desain bangunan, lokasi, dan penggunaan peralatan (Lu dkk., 2023).



Gambar 1. Alur Masuknya Polutan Outdoor ke Lingkungan Indoor

Sumber: Leung, 2015

Penelitian mengenai rasio I/O telah di berbagai jenis bangunan dengan temuan yang beragam (Tabel 1). Rasio I/O yang bernilai $\geq 1,2$ menunjukkan bahwa konsentrasi polutan di dalam ruangan lebih tinggi daripada di luar ruangan, yang biasanya disebabkan oleh sumber polutan dari dalam ruangan. Jika rasio I/O berada dalam rentang $0,8-1,2$, hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi polutan di dalam ruangan seimbang dengan konsentrasi di luar ruangan. Sementara itu, rasio $I/O \leq 0,8$ menunjukkan bahwa konsentrasi di dalam ruangan lebih rendah daripada di luar ruangan, yang mengindikasikan adanya pengaruh signifikan dari polutan luar ruangan (Mansor dkk., 2020).

Tabel 1. Rasio I/O di Berbagai Jenis Bangunan

Penulis	Lokasi	Periode Penelitian	Waktu pengukuran	Alat	jenis bangunan	Rasio I/O
Yulinawati Dkk, 2021	Indonesia	Oktober–Desember 2019	24 jam/hari	LCS Edimax AirBox AI-1001W V3	Rumah sakit	0,8
Xu Dkk, 2020	China	September - Desember 2018	24 jam/hari	SHARP 5030i dan SidePak Personal Aerosol Monitor AM510	Ruang kerja	0,46
Mansor Dkk, 2022	Malaysia	-	24 jam/hari	Dust TraxTM DRX Aerosol Monitor 8534, Kanomax IAQ Model 22b11, and TSI Climomaster Model 9545.	Taman kanak-kanak: • area komersil • area industri	3,22 1,45
Wang Dkk, 2016	China	1 Desember 2014 - 30 Januari 2015	10 jam/hari 8:30 a.m. - 18:30 p.m	TSI Air Dust Track II Aerosol Monitor 8530	• Rumah • Rumah • Rumah • Rumah	0,876 0,463 0,197 0,308

Hassanvand Dkk, 2015	Iran	Mei 2012 - Mei 2013	24 jam/hari	<i>Low volume air samplers</i> (FRM OMNI™ <i>pore-size</i>)	• Panti jompo • asrama sekolah	0,59 0,59
Deng Dkk, 2017	China	Februari - Maret 2014	pagi, siang, dan sore selama 1 jam	TSI 8530 instruments	• Rumah • bangunan umum	0,94 0,69
Kalimeri Dkk, 2019		2011 - 2013	24 jam/hari	-	• 320 ruang kelas di 22 negara • 140 ruang kantor di 8 negara	1,44 0,62
Challoner Dan Gill, 2014	Ireland	Januari 2010 - Januari 2012	24 jam/hari	EPAM-5000, Haz-Dust	10 bangunan komersil diukur saat: • jam kerja • non-jam kerja	1,55 2,7

Kualitas udara dalam ruangan (indoor) sangat dipengaruhi oleh kualitas udara luar ruangan (outdoor) dan sistem ventilasi yang digunakan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. (2016), ditemukan bahwa rasio I/O sangat dipengaruhi oleh tingkat kededapan bangunan. Penelitian ini dilakukan dengan meminimalkan sumber pencemar dari dalam ruangan. Rumah dengan kededapan udara tinggi memiliki konsentrasi $PM_{2,5}$ dalam ruangan yang paling rendah, dengan rasio I/O sebesar 0,197. Sebaliknya, rumah dengan kededapan udara normal memiliki konsentrasi $PM_{2,5}$ dalam ruangan yang lebih tinggi, dengan rasio I/O sebesar 0,876. Penelitian ini menunjukkan bahwa meningkatkan kededapan udara bangunan dapat secara efektif mengurangi konsentrasi $PM_{2,5}$ dalam ruangan. Tanpa adanya sumber pencemar di dalam ruangan, ventilasi berlebihan dapat merusak kualitas udara dalam ruangan dengan memasukkan polutan dari luar (Sundell dkk., 2011).

Challoner dkk. (2014) menemukan bahwa rasio I/O di bangunan komersial meningkat selama jam tidak bekerja. Hal ini disebabkan oleh konsentrasi udara dalam ruangan yang tidak berkurang sebanyak konsentrasi udara luar ruangan pada malam hari, terutama pada bangunan dengan ventilasi mekanis. Banyak bangunan komersial mematikan sistem ventilasi mekanisnya pada malam hari, yang secara signifikan mengurangi laju pertukaran udara. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rackes dan Waring (2016), yang menyatakan bahwa tingkat ventilasi yang lebih tinggi dapat membantu mengurangi paparan penghuni terhadap polutan yang dihasilkan di dalam ruangan.

Dalam penelitian Kalimeri dkk. (2019), rasio I/O $PM_{2,5}$ di kantor berkisar antara 0,1 hingga 1,35 sedangkan di sekolah 0,2 hingga 9,29. Rasio I/O dipengaruhi oleh Penghuni sekolah (siswa) bergerak terus-menerus dan aktivitas mereka melibatkan berbagai kegiatan, sementara pekerjaan di kantor sebagian besar bersifat sedentari (tidak banyak bergerak). Sekolah cenderung lebih padat dibandingkan dengan kantor. Sebagian besar kantor menggunakan ventilasi mekanik, sementara sekolah lebih banyak mengandalkan ventilasi alami yang memungkinkan infiltrasi polutan dari luar.

Deng dkk. (2017) meneliti pengaruh penggunaan pembersih udara terhadap konsentrasi $PM_{2,5}$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio I/O konsentrasi $PM_{2,5}$ sebelum pembersihan udara adalah 1,52, sedangkan setelah penggunaan pembersihan udara adalah 1,40. Perbedaan yang kecil antara rasio I/O sebelum dan sesudah penggunaan pembersih udara menunjukkan bahwa aktivitas manusia di bangunan umum menjadi faktor utama penyebab tingginya konsentrasi $PM_{2,5}$ di dalam ruangan.

Yulinawati dkk. (2021) melakukan pengukuran konsentrasi $PM_{2,5}$ di dalam dan luar ruangan pada sebuah rumah sakit ibu dan anak di Jakarta Barat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi $PM_{2,5}$ di luar ruangan selalu lebih tinggi dibandingkan dengan di dalam ruangan. Konsentrasi $PM_{2,5}$ di dalam ruangan cenderung stabil, sementara konsentrasi di luar ruangan bervariasi sepanjang hari.

Hasil studi Mansor dkk. (2020) menunjukkan bahwa rasio I/O di area komersial (3,222) lebih tinggi dibandingkan dengan di area industri (1,482). PM_{10} umumnya dihasilkan oleh aktivitas manusia, seperti resuspensi debu, sedangkan $PM_{2,5}$ sering kali berasal dari infiltrasi partikel dari lingkungan luar ke dalam ruangan, terutama jika tidak ada sumber aktif seperti memasak atau merokok. Selain itu, jumlah penghuni di suatu area memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas udara dalam ruangan, khususnya di institusi pendidikan

4. KESIMPULAN

Konsentrasi $PM_{2,5}$ di dalam ruangan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu aktivitas di dalam ruangan, sistem ventilasi, kepadatan bangunan, dan infiltrasi dari luar ruangan. Rasio I/O $PM_{2,5}$ bervariasi tergantung dari faktor tersebut. Ventilasi yang baik mampu menurunkan polutan indoor sedangkan ventilasi yang buruk dapat meningkatkan polutan indoor. Rasio I/O yang tinggi menandakan adanya sumber pencemar dari dalam ruangan, sedangkan Rasio I/O yang rendah menandakan dominasi polutan dari luar ruangan.

DAFTAR RUJUKAN

- Alves, C. A., Vicente, E. D., Evtyugina, M., Vicente, A. M., Nunes, T., Lucarelli, F., Calzolari, G., Nava, S., Calvo, A. I., Del Blanco Alegre, C., & Oduber, F. (2020). Indoor and outdoor air quality: A university cafeteria as a case study. *Atmospheric Pollution Research*, 11(3), 531–544.
- Challoner, A., & Gill, L. (2014). Indoor/outdoor air pollution relationships in ten commercial buildings: $PM_{2,5}$ and NO_2 . *Building and Environment*, 80, 159–173.
- Chamseddine, A., Alameddine, I., Hatzopoulou, M., & El-Fadel, M. (2019). Seasonal variation of air quality in hospitals with indoor–outdoor correlations. *Building and Environment*, 148, 689–700.
- Chen, C., & Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45(2), 275–288.
- Deng, G., Li, Z., Wang, Z., Gao, J., Xu, Z., Li, J., & Wang, Z. (2017). Indoor/outdoor relationship of $PM_{2,5}$ concentration in typical buildings with and without air cleaning in Beijing. *Indoor and Built Environment*, 26(1), 60–68.
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., & Wang, X. (2016). The health effects of ambient $PM_{2,5}$ and potential mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 67–74.

- Huang, W., Baumgartner, J., Zhang, Y., Wang, Y., & Schauer, J. J. (2015). Source apportionment of air pollution exposures of rural Chinese women cooking with biomass fuels. *Atmospheric Environment*, 104, 79–87.
- Johnson, T., Myers, J., Kelly, T., Wisbith, A., & Ollison, W. (2004). A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14(1), 1–22.
- Kalimeri, K. K., Bartzis, J. G., Sakellaris, I. A., & de Oliveira Fernandes, E. (2019). Investigation of the PM_{2.5}, NO₂ and O₃ I/O ratios for office and school microenvironments. *Environmental Research*, 179, 108791.
- Leung, D. Y. (2015). Outdoor-indoor air pollution in urban environment: Challenges and opportunity. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 69.
- Lu, C., Liu, Z., Yang, W., Liao, H., Liu, Q., Li, Q., & Deng, Q. (2023). Early life exposure to outdoor air pollution and indoor environmental factors on the development of childhood allergy from early symptoms to diseases. *Environmental Research*, 216, 114538.
- Mansor, A. A., Ghazali, M. I. H., Abdullah, S., Dom, N. C., Ahmed, A. N., & Ismail, M. (2022). Investigating the indoor and outdoor respirable suspended particulates of coarse (PM₁₀), fine (PM_{2.5}) and ultrafine (PM₁). *Malaysian Journal of Medicine & Health Sciences*, 18(Suppl. 12), 138–144.
- Rackes, A., & Waring, M. S. (2016). Do time-averaged, whole-building, effective volatile organic compound (VOC) emissions depend on the air exchange rate? A statistical analysis of trends for 46 VOCs in US offices. *Indoor Air*, 26(4), 642–659.
- Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., ... & Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health: Multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor Air*, 21(3), 191–204.
- Wang, F., Meng, D., Li, X., & Tan, J. (2016). Indoor–outdoor relationships of PM_{2.5} in four residential dwellings in winter in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Pollution*, 215, 280–289.
- World Health Organization. (2022). *Tracking SDG 7: The energy progress report*. World Bank.
- Xu, R., Qi, X., Dai, G., Lin, H., Zhai, P., Zhu, C., Wang, L., & Ding, A. (2020). A comparison study of indoor and outdoor air quality in Nanjing, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(10), 2128–2141.
- Yulinawati, H., Khairani, T., & Siami, L. (2021, April). Analysis of indoor and outdoor particulate (PM_{2.5}) at a women and children's hospital in West Jakarta. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 737, No. 1, p. 012067). IOP Publishing.