

Konsentrasi PM₁₀, PM_{2,5} dan PM₁ di Lingkungan *Indoor* Perumahan pada Area *Urban*: Kajian Literatur

Mila Dirgawati, Didin Agustian Permadi, Dzakiyyah Afifah Aurora*

Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung

*Koresponden email: dzakiyyahafifah83@gmail.com

Diterima: 23 Agustus 2025

Disetujui: 2 September 2025

Abstract

Indoor air pollution has not yet received as much attention as outdoor air pollution. It is estimated that indoor air pollutant concentrations can be 2-5 times higher than outdoor air, even though people spend more than 80% of their time indoors. It has been recorded that 4,3 million people have died due to poor indoor air quality. Fine particulates with sizes $\leq 1 \mu\text{m}$ (PM₁), $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2,5}), and $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) are the main pollutants that can degrade indoor air quality. The purpose of this study is to review previous research on the concentrations of PM₁₀, PM_{2,5}, and PM₁ in indoor residential environments in urban areas, and to identify the influencing factors. The results show that concentrations of PM₁₀, PM_{2,5}, and PM₁ can be influenced by human activities (such as cooking, smoking, heating, and cleaning), building characteristics (including ventilation, materials, and humidity), and infiltration from outdoor air. The indoor/outdoor (I/O) ratio value determines the dominant sources of particulates, with a value $>1,2$ indicating indoor dominance and $<0,8$ indicating outdoor dominance. The correlation (r) between indoor and outdoor concentrations was found to be positive and strong, reinforcing the impact of outdoor air quality on indoor air quality.

Keywords: *fine particulate, particulate matter, indoor housing, urban area*

Abstrak

Pencemaran udara *indoor* (dalam ruangan) masih belum menjadi perhatian penting dibandingkan pencemaran udara *outdoor* (di luar ruangan). Diperkirakan konsentrasi pencemar udara di dalam ruangan bisa mencapai 2-5 kali lebih besar dibandingkan udara di luar ruangan, padahal manusia menghabiskan lebih dari 80% waktunya di dalam ruangan. Tercatat 4,3 juta orang meninggal akibat dari pencemaran udara di dalam ruangan yang buruk. Partikulat halus dengan ukuran $\leq 1 \mu\text{m}$ (PM₁), $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2,5}), dan $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) merupakan polutan utama yang dapat menurunkan kualitas udara di dalam ruangan (*indoor*). Tujuan studi ini adalah untuk mengkaji berbagai penelitian terdahulu mengenai konsentrasi PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ di dalam ruangan rumah pada area perkotaan dan mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhinya. Hasil studi menunjukkan konsentrasi PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ dapat dipengaruhi oleh aktivitas manusia (memasak, merokok, pemanas, dan kebersihan rumah), karakteristik bangunan (ventilasi, material, kelembapan), serta infiltrasi dari udara luar merupakan faktor utama. Nilai rasio *indoor/outdoor* (I/O) menentukan sumber dominan partikulat, dengan nilai $>1,2$ menunjukkan dominasi *indoor* dan $<0,8$ dari *outdoor*. Korelasi (r) antara konsentrasi *indoor* dan *outdoor* ditemukan bernilai positif dan kuat, yang memperkuat pengaruh kualitas udara *outdoor* terhadap kualitas udara *indoor*.

Kata Kunci: *partikulat halus, particulate matter, indoor perumahan, daerah perkotaan*

1. Pendahuluan

Udara merupakan faktor penting dalam kehidupan setiap makhluk hidup [86], tetapi dapat mengalami penurunan mutu akibat kontaminasi dan pencemaran dari berbagai aktivitas manusia baik di dalam ruangan (*indoor*) maupun di luar ruangan (*outdoor*) [26]. Masalah pencemaran udara pada lingkungan *indoor* dan *outdoor* merupakan tantangan yang kompleks untuk mencapai *Sustainable Development Goals* (SDGs 3) dilihat dari dampaknya pada aspek kesehatan [46]. Paparan di dalam ruangan (*indoor*) dapat lebih besar dibanding paparan di luar ruangan (*outdoor*) di wilayah perkotaan [56]. Hal tersebut dipengaruhi dari kebiasaan manusia yang sebagian besar dari waktunya ($> 80\%$) melakukan aktivitas di dalam ruangan (*indoor*) [50]. Orang Indonesia umumnya menghabiskan waktu >7 jam di dalam ruangan terutama pada saat akhir pekan [83].

Pencemaran udara di dalam ruangan belum mendapat perhatian dibandingkan pencemaran udara *outdoor*, terutama di daerah yang sangat terindustrialisasi atau dengan lalu lintas yang padat. Akan tetapi, ancaman yang ditimbulkan oleh paparan pencemaran udara dalam ruangan dalam jangka panjang menjadi

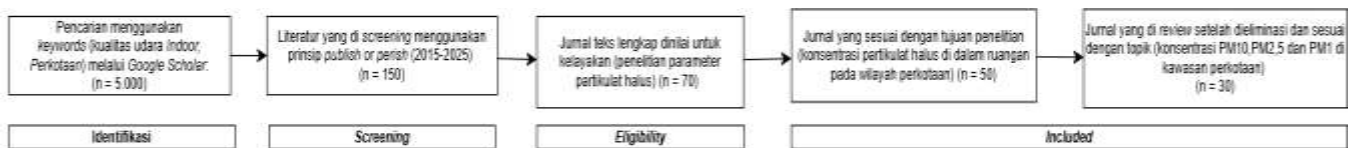
lebih nyata dalam beberapa tahun terakhir [25]. Hal ini disebabkan karena semakin banyak bangunan yang tertutup dari lingkungan luar untuk menghemat penggunaan energi pemanasan dan pendinginan. Sebaliknya, semakin berkurang bangunan yang sepenuhnya menggunakan ventilasi mekanis untuk mengalirkan kembali udara dalam ruangan dengan tingkat pengenceran udara luar ruangan. Kondisi ini menyebabkan akumulasi polutan dalam ruangan. Dalam dekade terakhir dilaporkan bahwa pencemaran udara di dalam rumah merupakan kontributor utama angka morbiditas global, dengan dampak besar pada sistem pernapasan dan kardiovaskular [64]. Selain itu, dinyatakan bahwa pencemaran udara memberikan kontribusi signifikan terhadap jumlah total kematian dini [64] dan WHO memperkirakan bahwa setiap tahun 4,3 juta orang meninggal dini akibat penyakit yang disebabkan oleh pencemaran udara dalam ruangan [88]. Pencemaran udara terjadi terutama di negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah, dengan sumber utama berasal dari proses pembakaran dalam ruangan untuk kegiatan memasak atau memanaskan [88]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Wang et. al. (2021) [55] menunjukkan bahwa PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ dapat menimbulkan penyakit pneumonia atau gangguan pada paru-paru. Pada konsentrasi PM₁₀ yang mencapai 150 µg/m³, konsentrasi PM_{2,5} yang mencapai 100 µg/m³, dan konsentrasi PM₁ yang berbahaya apabila terpapar secara langsung.

Pencemaran udara di dalam ruangan dapat bersumber dari berbagai aktivitas manusia di dalam rumah yaitu memasak, merokok, dan penghangat ruangan. Selain itu, penurunan kualitas udara di dalam ruangan (*indoor*) dapat terjadi karena infiltrasi atau masuknya polutan dari luar ruangan (*outdoor*) melalui ventilasi, jendela, serta bukaan lainnya [44]. Tingkat konsentrasi partikulat indoor juga dapat dipengaruhi oleh intrusi dari outdoor yang konsentrasinya sangat tergantung pada aktivitas manusia (lalu lintas jalan raya, industri, dan sebagainya). Selain itu, polutan sekunder mungkin dihasilkan oleh reaksi fase gas dalam ruangan dari senyawa lain yang ada di udara dalam ruangan [72]. Akan tetapi, informasi mengenai keberadaan dan tingkat konsentrasi partikulat di dalam ruangan masih sangat terbatas, sehingga diperlukan studi yang mengkaji hal ini. Tujuan studi ini adalah untuk mengetahui konsentrasi polutan udara khususnya partikulat (PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁) dalam ruangan, sumber nya di dalam ruangan, dan faktor – faktor yang mempengaruhi konsentrasi. Hasil studi akan memberikan informasi penting yang menjadi dasar untuk perancangan strategi pencegahan dan pengendalian pencemaran partikulat di dalam ruangan.

2. Metode Studi Literatur

Literatur ditelusuri melalui *Google Scholar*, buku, dan jurnal dengan kata kunci: Partikulat, PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁, Perkotaan Asia, *Indoor*, dan Perumahan. Pemilihan literatur menggunakan kriteria sebagai berikut: dipublikasikan dalam kurun waktu 10 tahun terakhir (2015-2025), di Nasional dan Internasional (Asia), dan merupakan literatur lengkap yang mencakup seluruh hasil penelitian. Kriteria dan sistematika pemilihan literatur dapat dilihat pada **Gambar 1** dibawah ini.

Gambar 1: Skema Pemilihan Literatur



3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Partikulat

Partikulat yang berada di udara ambien adalah campuran dari berbagai komponen padat dan cair yang tersuspensi di udara [1]. Berdasarkan ukurannya partikulat memiliki ukuran diameter yang berbeda-beda yaitu PM₁₀ (*coarse particles*), PM_{2,5} (*fine particles*), dan PM₁ (*ultrafine particles*) [3]. Ketiga jenis partikulat tersebut sangat penting terutama ditinjau dari dampak terhadap manusia akibat paparan nya di dalam ruangan. Semakin kecil ukuran suatu partikulat yang terhirup maka semakin berbahaya terhadap kesehatan manusia [15].

Tabel 1. Jenis Partikulat

Jenis Partikulat	Karakteristik		Referensi
	Fisik	Kimia	
PM ₁₀	≤10 µm	Sulfat, ammonium, nitrat, unsur karbon, senyawa organik terkondensasi, dan logam berat (arsenik, selenium, cadmium, dan seng)	(Alias dkk., 2007)
PM _{2,5}	≤2,5 µm	Ion organik, butiran mineral, dan karbon	(Nirmala & Prasasti, 2015).
PM ₁	≤1 µm	Aluminium, kalsium, besi, Si, magnesium, dan mangan	(Bari dkk., 2015)

3.1.1. PM₁₀

PM₁₀ merupakan salah satu jenis partikulat debu yang berukuran $\leq 10 \mu\text{m}$. PM₁₀ terdiri dari partikel halus berukuran kecil dari $2,5 \mu\text{m}$ dan sebagian partikel kasar yang berukuran $2,5-10 \mu\text{m}$. PM₁₀ dapat berasal dari pergerakan manusia di dalam ruangan [58]. PM₁₀ merupakan salah satu bahan pencemar udara yang digolongkan ke dalam kelompok pencemar primer (*primary pollutant*), yaitu bahan pencemar yang diemisikan langsung ke udara dari sumber cemaran, seperti kendaraan bermotor [87]. Selain mengganggu estetika, partikel berukuran kecil ini juga dapat mempengaruhi kesehatan dengan terhisap ke dalam sistem pernapasan dan menyebabkan gangguan pernapasan serta kerusakan pada paru-paru [5].

3.1.2. PM_{2,5}

Partikulat PM_{2,5} memiliki ukuran diameter sebesar $< 2,5 \mu\text{m}$ sehingga termasuk kedalam jenis partikulat halus yang berbahaya serta memberi dampak kronis terhadap kesehatan mulai dari gangguan paru-paru, kanker, struk dan kematian [36]. PM_{2,5} umumnya terdiri dari ion anorganik, karbon, dan butiran mineral. PM_{2,5} di dalam ruangan dapat bersumber dari material bangunan, pelapisan dari barang dirumah, pembakaran lilin dan penghangat ruangan [65]. Karena ukuran PM_{2,5} sangat kecil dibanding PM₁₀ jenis partikulat ini dapat menyebar lebih jauh dari sumber pencemar, cenderung stagnan sehingga dapat terakumulasi di udara, dan waktu tinggal lebih lama dibanding partikulat jenis lain [77].

3.1.3. PM₁

PM₁ memiliki diameter $< 1,0 \mu\text{m}$ beberapa penelitian menyebutkan bahwa paparan jangka pendek maupun panjang dari PM₁ akan menyebabkan penurunan fungsi paru [91]. Walaupun dampak PM₁ pada kesehatan sangat berbahaya WHO ataupun pemerintah Indonesia belum menetapkan baku mutu pada parameter karena masih terbatasnya data serta metode yang digunakan. Umumnya sumber PM₁ di dalam ruangan (*indoor*) dihasilkan dari asap rokok dan pembakaran lilin [8]. Semakin kecil ukuran suatu partikulat kemampuan mengendapnya pun menurun sehingga PM₁ cenderung stagnan di udara selama berminggu-minggu dan terakumulasi dengan polutan lainnya [47].

3.1.4. Sumber Pencemar Partikulat Indoor

Konsentrasi partikulat di dalam ruangan (*indoor*) dapat meningkat dipengaruhi dari berbagai aktivitas di dalam ruangan [84].

Tabel 2. Sumber Pencemar Partikulat di Dalam Ruangan (*Indoor*)

Judul	Sumber Pencemar	Jenis Partikulat yang Dihasilkan	Referensi
<i>Emissions of soot, PAHs, ultrafine particles, NOx, and other health relevant compounds from stressed burning of candles in indoor air</i>	Pembakaran lilin	UFP (PM _{0,1} = 2,4-100 nm)	(Andersen dkk., 2021)
<i>Relationship between domestic smoking and metals and rare earth elements concentration in indoor PM_{2,5}</i>	Asap rokok	PM _{2,5}	(Drago dkk., 2018)
<i>Sources of household air pollution and their association with fine particulate matter in low-income urban homes in India</i>	Aktivitas memasak	PM ₁₀ , PM _{2,5} , dan PM ₁	(Elf dkk., 2018)
<i>Indoor air quality of low and middle income urban households in Durban, South Africa</i>	Aktivitas memasak	PM ₁₀ , PM _{2,5} , dan PM ₁	(Jafta dkk., 2017)
<i>An evaluation of air quality, home heating and well-being under Beijing's programme to eliminate household coal use</i>	Pemanas ruangan	PM _{2,5}	(Leigh dkk., 2019)
<i>Domestic activities and pm generation: a contribution to the understanding of indoor sources of air pollution</i>	Aktivitas memasak	PM ₁₀ , PM _{2,5} , dan PM ₁	(Schiavon dkk., 2015)
<i>Physical properties and lung deposition of particles emitted from five major indoor sources</i>	Aktivitas bersih-bersih	PM ₁₀ , PM _{2,5} , dan PM ₁	(Vu dkk., 2017)
<i>Experiments and simulations of human walking-induced particulate matter resuspension in indoor environments</i>	Pergerakan manusia	PM _{2,5}	(Wang dkk., 2021)

Partikulat halus PM_{2,5} dihasilkan dari aktivitas pembakaran lilin. Lilin yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah lilin yang tidak memiliki wangi dan berwarna putih, pengukuran dilakukan secara langsung diatas api dari lilin dengan jarak 4 cm pada 3 jam pengukuran. Hasil dari pengukuran tersebut

menunjukkan bahwa partikulat yang dihasilkan dari pembakaran lilin rata-rata dalam ukuran *Ultra Fine Particle* (UFP) ($PM_{0.1}$; 2,4-100 nm) [6].

Partikulat halus dapat dihasilkan dari proses pembakaran rokok di dalam ruangan. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan secara simultan selama 48 jam di dalam rumah, didapatkan konsentrasi $PM_{2.5}$ di dalam ruangan lebih tinggi dibandingkan di luar ruangan dikarenakan sirkulasi udara yang tidak baik [19].

Aktivitas memasak dapat mengemisikan PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1 . Penggunaan gas LPG dan kompor elektrik untuk memasak dominan dilakukan di daerah perkotaan. Penggunaan gas LPG sebagai bahan bakar utama untuk memasak di dalam ruangan dapat menghasilkan $PM_{2.5}$ hingga $167 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dimana konsentrasi tersebut telah melebihi standar yang direkomendasikan oleh WHO yaitu $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Selain itu, penggunaan kompor elektrik juga dapat mengemisikan PM_{10} dan PM_1 apabila tidak menggunakan *cooker hood* untuk mencegah partikulat menyebar ke seluruh ruangan di dalam rumah [68]. Cara memasak menggunakan kayu bakar masih sering dilakukan di pedesaan karena lebih murah tetapi, cara memasak tersebut menghasilkan konsentrasi partikulat halus lebih banyak hingga kadar konsentrasi partikulat halus dan ultra halus mencapai ratusan [90].

Pemanas ruangan dapat mengemisikan partikulat halus $PM_{2.5}$. Pemanas ruangan umumnya dilakukan di wilayah perkotaan di negara empat musim. Leigh et al (2019) [43] melaporkan dengan konsentrasi $0,098 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$ diemisikan dari pemanas ruangan yang menggunakan arang. Walaupun konsentrasinya cenderung rendah tetapi jika kegiatan pemanasan ruangan dilakukan secara terus-menerus dengan kondisi ventilasi yang tidak memadai dapat mengakibatkan akumulasi partikulat di dalam ruangan [90].

Aktivitas pembersihan rumah dapat memberikan kontribusi keberadaan PM_{10} dan $PM_{2.5}$ di dalam rumah. Studi terdahulu menunjukkan rata-rata konsentrasi partikulat halus PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1 berturut-turut sebesar $3,2 \mu\text{m}^{-3}$, $133,6 \mu\text{m}^{-3}$, dan $149,6 \mu\text{m}^{-3}$ [82]. Selain itu lebih dari 98% dari total partikel ultra halus PM_1 berasal dari aktivitas penyedot debu. Hal tersebut karena partikulat dihasilkan dari proses mekanis mesin dengan sikat grafit dan komutator tembaga serta pelepasan percikan listrik yang terjadi pada tegangan diatas 100 V antara dua elektroda karbon di dalam motor penyedot debu [75].

Partikulat halus $PM_{2.5}$ dapat ditimbulkan dari pergerakan manusia juga dapat mengemisikan $PM_{2.5}$ di dalam ruangan [84] Partikulat halus $PM_{2.5}$ mengalami *resuspension* akibat dari pergerakan manusia di tiga titik sebesar 1,30; 1,25; dan $1,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [84]. Konsentrasi partikulat halus $PM_{2.5}$ dihasilkan lebih besar pada saat manusia bergerak, tetapi saat pergerakan manusia menurun konsentrasinya pun berkurang [84].

3.2 Metode Pengumpulan dan Analisis Partikulat

Pengukuran konsentrasi PM di udara dapat dilakukan dengan cara *active sampling* atau *passive sampling* [95]. *Active sampling* umumnya dilakukan untuk pemantauan secara kontinyu untuk menghasilkan data temporal dalam jumlah yang banyak untuk mengetahui tren tahunan [34].

Pengukuran partikulat halus di dalam ruangan dengan *active sampling* umumnya menggunakan alat *low volume sampler*, *particle counters*, dan *personal aerosol monitors*. Hal tersebut karena pengukuran prinsip *active sampling* memungkinkan volume udara yang besar dapat masuk ke dalam media (filter untuk partikulat dan sorben untuk gas) dalam periode waktu tertentu (jam/hari) [34]. Seperti yang dilakukan pada penelitian [2] yang mengukur PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_4 , PM_7 , PM_{10} dan TSP di dalam ruangan, [10] mengukur $PM_{2.5}$ di dalam ruangan, [27] mengukur $PM_{2.5}$ di dalam ruangan, dan [67] mengukur PM_{10} dan $PM_{2.5}$ di dalam ruangan.

Pengukuran menggunakan prinsip *passive sampling* dapat menggunakan alat dengan *low-cost sensor*, dimana alat tersebut mampu mengukur konsentrasi secara langsung dengan efisien. *Passive sampling* memiliki prinsip difusi kimia dari udara menuju ke media. *Passive sampling* biasanya dapat dilakukan bulanan hingga tahunan selain itu keuntungan yang dimiliki adalah harga yang lebih terjangkau serta mudah dioperasikan tanpa memerlukan sumber energi tambahan [33]. *Passive sampling* dalam pengukuran partikulat halus dilakukan oleh Bousiotis dkk., (2023) [11] yang mengukur PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1 dan Shidki dkk., (2020) [71] yang mengukur $PM_{2.5}$.

Keuntungan dari metode *passive sampling* untuk pengukuran partikulat halus di dalam ruangan (*indoor*), karena cukup sederhana (mengandalkan baterai tidak perlu adanya listrik tambahan), harga yang murah, dan *real time* [42]. Pada *active sampling* memiliki tingkat akurat dan presisi yang lebih tinggi yang tidak terpengaruh dari faktor-faktor lingkungan lain (angin dan suhu). Adapun dibawah ini adalah penelitian terdahulu yang melakukan pengukuran partikulat dengan berbagai macam metode di berbagai negara.

Tabel 3. Teknik Pengumpulan Data Partikulat

Judul	Teknik/Alat Pemantau	Tujuan Penelitian	Prinsip Alat Pemantau	Prinsip Pengukuran	Referensi
<i>Particulate matters and gaseous pollutants in indoor environment and Association of ultra-fine particulate matters (PM₁) with lung function</i>	Aerocet-531S	Pengukuran PM ₁ , PM _{2,5} , PM ₄ , PM ₇ , PM ₁₀ dan TSP	Light Scattering	Active sampling	(Akther dkk., 2019)
<i>Monitoring and apportioning sources of indoor air quality using low-cost particulate matter sensors.</i>	Alphasense OPC-N3	Pengukuran PM ₁₀ dan PM _{2,5} dan PM ₁	Sensor based	Passive sampling	(Bousiotis dkk., 2023)
<i>Indoor air quality in urban and rural kindergartens: short-term studies in Silesia, Poland</i>	Atmoservice LVS	Pengukuran PM _{2,5}	Filter based	Active sampling	(Błaszczuk dkk., 2017)
Pengukuran kualitas udara particulate matter (PM _{2,5}) dalam ruangan di PT. Rekind Daya Mamuju	Particle Counters HT-9600	Pengukuran PM _{2,5}	Sensor based	Active sampling	(Farhan dkk., 2025)
Analisis kualitas udara dalam ruangan pada kantor terbuka di Universitas Telkom	Low-cost sensors SENO177	Pengukuran PM _{2,5}	Sensor based	Passive sampling	(Shidki dkk., 2020)
<i>Impact of wind speed and apartment ventilation on indoor concentrations of PM₁₀ and PM_{2,5} in Kraków, Poland</i>	SidePak AM510 personal aerosol monitors	Pengukuran PM ₁₀ dan PM _{2,5}	Light scattering	Active sampling	(Ścibor dkk., 2020)

3.2.1. Karakteristik Ruangan

Karakteristik rumah/ruangan yang terdiri dari: ventilasi, umur rumah serta tipe material rumah, suhu dalam ruang, dan kelembapan akan mempengaruhi polutan partikulat yang berada di dalam ruangan [37].

3.2.1.1. Ventilasi

Sistem ventilasi membantu pergerakan udara di dalam ruangan ke luar ruangan. Sistem ventilasi harus sesuai dengan peraturan pemerintah dari negara masing-masing agar dapat bekerja dengan baik sehingga, proses pemasukan udara (bersih) dan pengeluaran udara yang berkualitas buruk dapat berjalan dengan baik [51]. Ukuran ventilasi di Negara Indonesia berdasarkan SNI 6572.2:2024, dimana sistem ventilasi yang baik harus memiliki luas bukaan >5% dari luas lantai. Apabila bukaan sistem ventilasi tidak sesuai dengan peraturan terkait dapat menyebabkan meningkatnya *sick building syndrome* [81].

Ventilasi merepresentasikan *Air Exchange Rates* (AERs) yang akan mempengaruhi kualitas udara di dalam ruang. Ketika nilai AERs >1 pertukaran/jam, maka sumber partikulat dalam ruang tidak memberikan pengaruh karena konsentrasi partikulat dalam ruangan sejalan dengan konsentrasi di luar ruangan [80].

3.2.1.2. Umur Rumah

Umur rumah dapat mempengaruhi kualitas udara dalam ruangan karena adanya degradasi kualitas material yang dapat meningkatkan partikulat halus dalam ruangan sehingga mempengaruhi kesehatan penghuninya [49]. Umur bangunan >50 tahun dapat menimbulkan retakan bangunan, akibat dari degradasi material bangunan dimana akan menyebabkan infiltrasi partikulat di luar ruangan menuju ke dalam ruangan [59]. Pada penelitian [59] ditemukan bahwa konsentrasi PM_{2,5} pada umur bangunan <5 tahun lebih rendah, hal tersebut karena struktur bangunan masih berfungsi dengan baik.

3.2.1.3. Material Rumah

Jenis material suatu bangunan akan mempengaruhi kualitas udara di dalam ruangan [61]. Material dalam ruangan yang dapat melepaskan partikulat halus adalah *asbestos*, dimana *asbestos* digunakan sebagai atap, dinding, dan pelapis lainnya di dalam rumah karena tahan terhadap panas, harga yang murah serta ringan. Akan tetapi dalam penelitian [69] menyatakan bahwa material *asbestos* dapat melepaskan partikulat halus apabila terjadi retakan yang akan mempengaruhi kesehatan manusia., di Indonesia material *asbestos* sudah dilarang penggunaannya karena sifatnya yang karsinogenik terhadap manusia.

3.2.1.4. Temperatur dan Kelembapan

Temperatur dan kelembapan di dalam ruangan (*indoor*) akan berpengaruh pada konsentrasi partikulat halus. Pada penelitian [18] konsentrasi PM₁₀ meningkat saat temperatur lebih rendah, pada kelembapan >80% konsentrasi PM₁₀ sangat meningkat. Konsentrasi PM_{2,5} meningkat pada kelembapan 45-55% hal tersebut sejalan dengan penelitian [89] yang menyatakan bahwa tingginya kelembapan akan meningkatkan partikulat halus PM_{2,5}.

Pada penelitian yang dilakukan oleh [39] temperatur yang rendah (cuaca dingin) akan menyebabkan partikulat halus lebih banyak dihasilkan daripada saat temperatur tinggi (cuaca panas), karena umumnya manusia akan menyalakan penghangat yang akan memicu dihasilkannya partikulat halus. Timbulnya gaya *thermophoretic* dan intensitas turbulen akan meningkatkan deposisi partikulat, pengeluaran energi yang besar akibat dari gaya *thermophoretic* akan menurunkan konsentrasi partikulat tersuspensi pada saat yang sama kuatnya aliran udara akan meningkatkan deposisi partikel [15].

3.3 Infiltrasi Outdoor terhadap Indoor

Terdapat dua faktor primer yang dapat menyebabkan partikulat di luar ruangan masuk ke dalam ruangan. Pertama, pergerakan manusia yang berasal dari luar ruangan menuju ke dalam ruangan akan meningkatkan konsentrasi partikulat karena adanya *resuspension* dari partikulat di dalam ruangan [79]. Kedua, dipengaruhi dari karakteristik bangunan yaitu retakan bangunan, pintu, dan ventilasi yang memungkinkan partikulat halus masuk ke dalam ruangan dan mempengaruhi kualitas udara di dalam ruangan [28], seperti yang telah disebutkan pada **sub bab 3.2.1**. Berikut dibawah ini merupakan **Tabel 4** mengenai penelitian terdahulu terkait infiltrasi *outdoor* terhadap *indoor*.

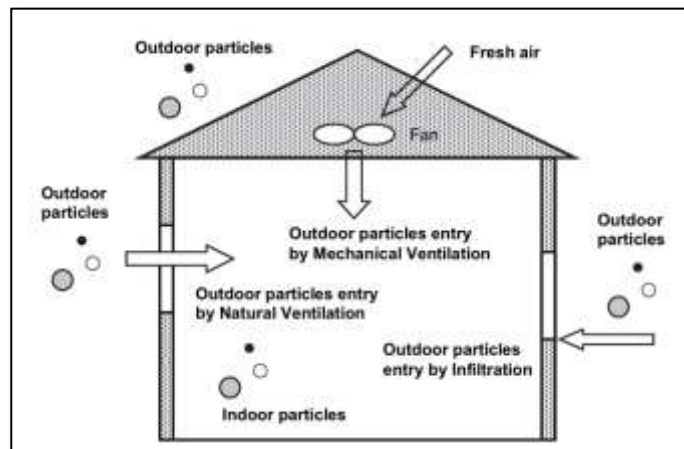
Tabel 4. Infiltrasi *Outdoor* terhadap *Indoor*

Judul	Lokasi Studi	Jalur Infiltrasi	Referensi
<i>Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou, China</i>	Rumah	Retakan bangunan	(Cheng & Li, 2017)
<i>Experimental and numerical analysis of indoor air quality affected by outdoor air particulate levels (PM_{1,0}, PM_{2,5} and PM₁₀), room infiltration rate, and occupants' behaviour</i>	Rumah	Ventilasi, jendela, dan pintu	(Fu dkk., 2022)
<i>Analysis of the air infiltration through the doorway of a refrigerated room using different approaches</i>	Sekolah	Ventilasi, jendela, dan pintu	(Gonçalves dkk., 2019)
<i>Factors affecting variability in infiltration of ambient particle and gaseous pollutants into home at urban environment</i>	Rumah	Ventilasi dan jendela	(Hossain dkk., 2021)
<i>Contribution of outdoor-originating particles, indoor-emitted particles and indoor secondary organic aerosol (SOA) to residential indoor PM_{2,5} concentration: A model-based estimation</i>	Rumah	Jendela	(Ji & Zhao, 2015)
<i>Outdoor and indoor factors influencing particulate matter and carbon dioxide levels in naturally ventilated urban homes</i>	Rumah	Jendela dan pintu	(Salam, 2021)

Berdasarkan analisis infiltrasi *outdoor* ke *indoor* di perkotaan dapat berpengaruh dari setiap bukaan di dalam ruangan (jendela, pintu, dan ventilasi). Berdasarkan penelitian [38] ditemukan konsentrasi PM_{2,5} sebesar 28,5 µg/m³ pada saat jendela tertutup, lebih rendah dibandingkan pada saat jendela terbuka. Ditemukan pula, infiltrasi konsentrasi PM_{2,5} mengalami peningkatan sebanyak 0,26-0,32 pada saat jendela terbuka [35]. Infiltrasi dari *outdoor* menuju *indoor* juga dapat dipengaruhi dari jarak rumah ke sumber pencemar pada rentang jarak 50-250 m [66].

Penelitian terdahulu yang melakukan analisis infiltrasi *outdoor* ke *indoor* adalah [16] menurutnya infiltrasi dapat berasal dari retakan bangunan, [28] infiltrasi dapat berasal dari ventilasi, jendela, dan pintu,

[30] infiltrasi berasal dari ventilasi, jendela, dan pintu, [35] infiltrasi dapat berasal dari ventilasi dan jendela, [38] infiltrasi dapat berasal dari jendela, dan menurut [66] infiltrasi dapat berasal dari jendela dan pintu. Adapun dibawah ini merupakan ilustrasi masuknya partikulat dari luar ruangan (*outdoor*) ke dalam ruangan (*indoor*).



Gambar 2. Alur Masuknya Polutan Partikel *Outdoor* ke Lingkungan *Indoor*
Sumber: Chen & Zhao, 2011

3.3.1. Hubungan Konsentrasi *Indoor* dan *Outdoor*

Analisis korelasi antara partikulat PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1 dilakukan untuk mengetahui hubungan konsentrasi partikulat di dalam ruangan dan di luar ruangan (*outdoor*) [32]. Jika koefisien korelasi $> 0,50$ dianggap berhubungan kuat, apabila dalam rentang $0,4-0,49$ dianggap korelasi sedang, dan $< 0,39$ maka korelasi dianggap rendah [48]. Arti dari korelasi kuat dan positif menunjukkan bahwa konsentrasi partikulat di dalam ruangan dan di luar ruangan saling mempengaruhi satu sama lain, apabila konsentrasi partikulat di luar ruangan meningkat begitu pula dengan di dalam ruangan [55]. Sebaliknya apabila korelasi bersifat negatif dan lemah partikulat tidak saling mempengaruhi satu sama lain [55]. Penelitian mengenai hubungan konsentrasi dan pengaruh nya melalui hasil analisis korelasi disajikan pada **Tabel 5** dibawah ini.

Tabel 5. Analisis Korelasi PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1

Judul	Lokasi Studi	Hasil Korelasi			Referensi
		PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_1	
<i>Characterization of indoor/outdoor PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1 and radon concentrations in Imam Khomeini hospital</i>	Rumah sakit	R = 0,99	R = 0,99	R = 0,99	(Kazemi dkk., 2016)
<i>Investigating the Indoor and Outdoor Respirable Suspended Particulates of Coarse (PM_{10}), Fine ($PM_{2.5}$) and Ultrafine (PM_1)</i>	Area komersial dan industri	R = 0,99	R = 0,99	R = 0,99	(Mansor dkk., 2022)
<i>Variations in PM_{10}, $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors</i>	Apartemen	R = 0,92	R = 0,84	R = 0,98	(Li dkk., 2015)
<i>Vertical distribution of air particulate matter (PM_1, $PM_{2.5}$, and PM_{10}) in different regions of Tehran</i>	Apartemen	R = 0,98	R = 0,99	R = 0,98	(Roostaei dkk., 2024)
<i>Seasonal patterns of PM_{10}, $PM_{2.5}$, and $PM_{1.0}$ concentrations in a naturally ventilated residential underground garage</i>	Garasi	R = 0,96	R = 0,96	R = 0,96	(Zhao dkk., 2017)

Koefisien korelasi (R) dari studi terdahulu pada tabel diatas, antara partikulat PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1 memiliki rentang $0,92-0,96$. Korelasi bersifat positif dan berada dalam rentang $>0,50$ yang bersifat sangat kuat dan saling berpengaruh satu sama lain. Korelasi bersifat kuat memiliki arti dimana ketiga parameter partikulat akan saling berbanding lurus satu sama lain, apabila konsentrasi PM_{10} meningkat begitu pula dengan $PM_{2.5}$ dan PM_1 . Korelasi kuat ini juga dipengaruhi dari keadaan ventilasi alami yang terus terbuka sehingga memungkinkan udara dari luar ruangan masuk ke dalam ruangan.

3.3.2. Rasio I/O terhadap PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁

Analisis konsentrasi PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ di lingkungan *indoor* dan *outdoor* dilakukan untuk mengetahui sumber polutan partikel. Menurut [62] rasio I/O mempengaruhi faktor sumber polutan udara dengan kriteria rasio apabila $I/O > 1,2$ maka polutan bersumber dari aktivitas di dalam ruangan, sedangkan ketika $0,8 > I/O > 1,2$ sumber polutan yang berasal dari dalam ruangan (*indoor*) dan luar ruangan (*outdoor*) seimbang, dan ketika $I/O > 0,8$ sumber polutan berasal dari luar ruangan (*outdoor*). Berikut dibawah ini adalah tabel yang memuat penelitian terdahulu serta rasio I/O terhadap parameter PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁.

Tabel 6. Penelitian Terdahulu Mengenai Rasio I/O

Judul	Lokasi Studi	Hasil I/O			Referensi
		PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁	
<i>Indoor/outdoor relationships of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ mass concentrations and their water-soluble ions in a retirement home and a school dormitory</i>	Panti jompo dan asrama	0,67	0,78	0,47	(Hassanvand dkk., 2014)
<i>Air quality in archives housed in historic buildings: assessment of concentration of indoor particles of outdoor origin</i>	Bangunan bersejarah	0,41	0,51	0,53	(Mašková dkk., 2020)
<i>Investigating the Indoor and Outdoor Respirable Suspended Particulates of Coarse (PM₁₀), Fine (PM_{2.5}) and Ultrafine (PM₁)</i>	Area komersial dan industri	3,06	3,22	3,26	(Mansor dkk., 2022)
<i>Indoor and outdoor concentration of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM removal.</i>	Apartemen	0,54	0,71	0,81	(Nadali dkk., 2020)
<i>A multivariate study for characterizing particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) in Seoul metropolitan subway stations, Korea</i>	Stasiun kereta bawah tanah	2,56	6,4	5,9	(Kwon dkk., 2015)

Hasil rasio I/O pada kawasan perkotaan dengan aktivitas kendaraan yang cukup ramai hingga padat untuk PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ berturut-turut sebesar 0,41; 0,51; dan 0,53 yang menunjukkan bahwa sumber partikel berasal dari lingkungan *outdoor*. Hal tersebut dapat dipengaruhi dari sumber polutan partikel terdekat dari kawasan pengukuran yaitu kawasan perkotaan dengan tingginya aktivitas kendaraan, sehingga partikel dihasilkan dari aktivitas tersebut [49].

Rasio I/O di kawasan perkotaan area komersial dan industri pada masing-masing partikel PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ sebesar 3,06; 3,22; dan 3,26 yang menunjukkan bahwa partikel dominan berasal dari aktivitas di dalam ruangan (*indoor*). Tingginya hasil rasio I/O yang diperoleh dipengaruhi dari aktivitas manusia di lokasi penelitian. Selain itu saat melakukan pengukuran pintu, jendela, dan ventilasi udara tertutup yang menyebabkan polutan udara terakumulasi sehingga udara tidak mengalami sirkulasi yang baik [48].

Hasil rasio I/O di kota Qom, Iran yang menjadi Kota terbesar ke-8 dengan jumlah populasi mencapai > 1 juta jiwa. Pada kawasan ini dominan memiliki temperatur yang cukup panas dan kering, pada musim panas temperatur dapat mencapai 39,4°C sedangkan musim dingin dapat mencapai -1,6°C. Penelitian dilakukan di rumah warga pada setiap ruangan di dalam rumah selama 24 jam. Rasio I/O yang dihasilkan pada masing-masing partikel PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ sebesar 0,54; 0,71; dan 0,81 yang menunjukkan bahwa partikel PM₁₀ dan PM_{2,5} dihasilkan dari lingkungan *outdoor* sedangkan PM₁ berasal dari lingkungan *indoor* [52].

Hasil rasio I/O dari pengukuran selama 24 jam menunjukkan bahwa rasio I/O dari PM₁₀ yang dihasilkan adalah sebesar 0,67; 0,78 untuk PM_{2,5} dan 0,47 untuk PM₁. Artinya ketiga partikel dihasilkan dari aktivitas di luar ruangan (*outdoor*), hal tersebut dipengaruhi dari dekatnya gurun pasir dengan kawasan kota sehingga partikel pasir terbawa oleh arah angin. Apabila terjadi badai pasir konsentrasi partikel dapat meningkat hingga 1,6-1,9 kali lipat yang memperburuk kualitas udara di sekitar lokasi [31]. [41] yang melaksanakan penelitian pada stasiun kereta bawah tanah di Seoul Korea Selatan. Perhitungan rasio I/O memiliki hasil sebesar 2,56; 6,4; 5,9 tingginya rasio I/O yang dihasilkan berasal dari aktivitas kereta serta pergerakan manusia yang berada di stasiun bawah tanah.

4. Kesimpulan

Konsentrasi partikulat halus PM₁₀, PM_{2,5}, dan PM₁ di dalam ruangan (*indoor*) pada wilayah perkotaan dipengaruhi beberapa faktor *indoor* (memasak, merokok, pembakaran lilin, pemanas ruangan, dan aktivitas bersih-bersih) dan faktor infiltrasi dari *outdoor*. Infiltrasi *outdoor* dipengaruhi dari karakteristik suatu bangunan (material rumah, suhu dan kelembapan, serta umur rumah). Semakin tua umur rumah semakin besar potensi kerusakan struktur bangunan yang berkontribusi terhadap emisi PM_{2,5} di

dalam ruangan. Konsentrasi partikulat (PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1) *indoor* berkorelasi baik dengan konsentrasi *outdoor* ($r > 0,8$). Menunjukkan bahwa konsentrasi partikulat saling mempengaruhi satu sama lain pada saat ventilasi alami (terbuka) dimana aliran udara terus mengalir tanpa ada hambatan. Rasio I/O menunjukkan PM_{10} , $PM_{2.5}$, dan PM_1 dominan dihasilkan dari dalam ruangan dengan I/O >1 hal ini terjadi pada saat manusia di dalam ruangan melakukan kegiatan merokok dan pergerakan sehingga *resuspension* terjadi.

5. Referensi

- [1] Adams, K., Greenbaum, D. S., Shaikh, R., van Erp, A. M., & Russell, A. G. (2015). Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(5), 544-558.
- [2] Akther, T., Ahmed, M., Shohel, M., Ferdousi, F. K., & Salam, A. (2019). Particulate matters and gaseous pollutants in indoor environment and association of ultra-fine particulate matters (PM_1) with lung function. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6), 5475-5484.
- [3] Anggraini, F. J., Shalsabila, A., & Rodhiyah, Z. (2023). Sebaran Particulate Matter (PM_{10} , $PM_2.5$, PM_1 , PM_0 , 1) di SMP Negeri 1 Kota Jambi Menggunakan Model CFD (Computational Fluid Dynamics). *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(4), 690-702.
- [4] Alias, M., Hamzah, Z., Kenn, L., S. (2007). "PM10 dan Total Suspended Particulates (TSP) Measurements in Various Power Station". *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*. Vol. 1: 255-261
- [5] Alves, C. A., Vicente, A. M., Custódio, D., Cerqueira, M., Nunes, T., Pio, C., Lucarelli, F., Calzolari, G., Nava, S., Diapouli, E., Eleftheriadis, K., Querol, X., and Bandowe, B. A. 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives (nitro-PAHs, oxygenated PAHs and azaarenes) in PM from Southern European cities, *Science of the Total Environment*. 595:494-504
- [6] Andersen, C., Omelekhina, Y., Rasmussen, B. B., Nygaard Bennekov, M., Skov, S. N., Køcks, M., ... & Wierzbicka, A. (2021). Emissions of soot, PAHs, ultrafine particles, NO_x, and other health relevant compounds from stressed burning of candles in indoor air. *Indoor Air*, 31(6), 2033-2048.
- [7] Andriani, S. (2021). Kualitas Udara Dalam Ruangan Sekolah ($PM_2.5$, PM_{10} , CO₂, Dan HCHO) Dan Risiko Kesehatan Pada Siswa Di Kota Serang. *Journal Of Baja Health Science*, 1(02), 141-155.
- [8] Bari, M. A., Kindzierski, W. B., Wallace, L. A., Wheeler, A. J., MacNeill, M., & Héroux, M. E. (2015). Indoor and outdoor levels and sources of submicron particles (PM_1) at homes in Edmonton, Canada. *Environmental Science & Technology*, 49(11), 6419-6429.
- [9] Barrington-Leigh, C., Baumgartner, J., Carter, E., Robinson, B. E., Tao, S., & Zhang, Y. (2019). An evaluation of air quality, home heating and well-being under Beijing's programme to eliminate household coal use. *Nature Energy*, 4(5), 416-423.
- [10] Błaszczuk, E., Rogula-Kozłowska, W., Klejnowski, K., Kubiesa, P., Fulara, I., & Mielżyńska-Švach, D. (2017). Indoor air quality in urban and rural kindergartens: short-term studies in Silesia, Poland. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(10), 1207-1220.
- [11] Bousiotis, D., Alconcel, L. N. S., Beddows, D. C., Harrison, R. M., & Pope, F. D. (2023). Monitoring and apportioning sources of indoor air quality using low-cost particulate matter sensors. *Environment International*, 174, 107907.
- [12] Burdová, E. K., Vilčeková, S., & Kapalo, P. (2020). Indoor and Outdoor Measurements of Particulate Matter Concentrations: A Case Study Košice-Sever, Slovakia. *Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering*, 15(1), 77-88.
- [13] Cichowicz, R., & Dobrzański, M. (2021). Spatial analysis (measurements at heights of 10 m and 20 m above ground level) of the concentrations of particulate matter (PM_{10} , $PM_2.5$, and $PM_1.0$) and gaseous pollutants (H₂S) on the university campus: a case study. *Atmosphere*, 12(1), 62.
- [14] 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.
- [15] Chen, X., Li, J., Zhang, X., Liu, S., Franky, K., Li, W., & Bi, W. (2021). The effects of warm air heater on the dispersion and deposition of particles in an enclosed environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(7), 200620.
- [16] Cheng, P. L., & Li, X. (2018). Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou, China. *Energy and Buildings*, 164, 219-225.
- [17] Cheriyan, D., Hyun, K. Y., Jaegoo, H., & Choi, J. H. (2020). Assessing the distributional characteristics of PM_{10} , $PM_2.5$, and PM_1 exposure profile produced and propagated from a construction activity. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124335.

- [18] Danek, T., Weglinska, E., Zareba, M., (2022). The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration: a geostatistical case study from Krakow, Poland. *Sci. Rep.* 12, 11050. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15160-3>.
- [19] Drago, G., Perrino, C., Canepari, S., Ruggieri, S., L'Abbate, L., Longo, V., ... & RESPIRA Collaborative Project Group. (2018). Relationship between domestic smoking and metals and rare earth elements concentration in indoor PM_{2.5}. *Environmental Research*, 165, 71-80.
- [20] Driejana, K. (2020). AINK, dan Santoso, M.(2020): Komposisi Kimia Pencemar Partikulat Kasar dan Halus di DKI Jakarta Pada Musim Hujan dan Musim Kemarau. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 522-530.
- [21] Elf, J. L., Kinikar, A., Khadse, S., Mave, V., Suryavanshi, N., Gupte, N., ... & Golub, J. E. (2018). Sources of household air pollution and their association with fine particulate matter in low-income urban homes in India. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 28(4), 400-410.
- [22] Estrada, J.M., Kraakman, N.J.R.B., Munoz, R., Lebrero, R., 2011. A comparative analysis ~ of odour treatment technologies in wastewater treatment plants. *Environ. Sci. Technol.* 45, 1100e1106. <https://doi.org/10.1021/es103478j>. EU Council, 2008. Council Directive 1976L0769.
- [23] European Commission, (2003). Indoor Air Pollution: New EU Research Reveals Higher Risks than Previously Thought. European Commission.
- [24] European Environment Agency. (2017). Air Quality in Europe d 2017 Report. <https://doi.org/10.2800/850018>. European Environmental Agency, 2019. Air Quality in Europe d 2019 Report. <https://doi.org/10.2800/822355>.
- [25] European Environment Agency. (2013). Air Quality in Europe d 2013 Report: EEA Report No 9/2013. European Union.
- [26] Faroqi, A., Halim, D. K., Sanjaya, M., & Ph, D. W. S. (2017). Perancangan Alat Pendeteksi Kadar Polusi Udara Menggunakan Sensor Gas MQ-7 Dengan Teknologi Wireless HC-05. *Jurnal Istek*, Vol. 10, No.2, Juli, 33–47. <https://journal.uinsgd.ac.id>
- [27] Farhan, M., & Islam, F. (2025). Pengukuran Kualitas Udara Particulat Matter (PM_{2.5}) Dalam Ruangan Di PT. Rekind Daya Mamuju. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Mapaccing*, 3(1), 7-16.
- [28] Fu, N., Kim, M. K., Huang, L., Liu, J., Chen, B., & Sharples, S. (2022). Experimental and numerical analysis of indoor air quality affected by outdoor air particulate levels (PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀), room infiltration rate, and occupants' behaviour. *Science of The Total Environment*, 851, 158026.
- [29] Giordano, M. R., Malings, C., Pandis, S. N., Presto, A. A., McNeill, V. F., Westervelt, D. M., ... & Subramanian, R. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors. *Journal of Aerosol Science*, 158, 105833.
- [30] Gonçalves, J. C., Costa, J. J., & Lopes, A. M. G. (2019). Analysis of the air infiltration through the doorway of a refrigerated room using different approaches. *Applied thermal engineering*, 159, 113927.
- [31] Hassanvand, M. S., Naddafi, K., Faridi, S., Arhami, M., Nabizadeh, R., Sowlat, M. H., ... & Yunesian, M. (2014). Indoor/outdoor relationships of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ mass concentrations and their water-soluble ions in a retirement home and a school dormitory. *Atmospheric Environment*, 82, 375-382.
- [32] Huang, L., Pu, Z., Li, M., & Sundell, J. (2015). Characterizing the indoor-outdoor relationship of fine particulate matter in non-heating season for urban residences in Beijing. *PloS one*, 10(9), e0138559.
- [33] Herkert, N. J., Spak, S. N., Smith, A., Schuster, J. K., Harner, T., Martinez, A., & Hornbuckle, K. C. (2018). Calibration and evaluation of PUF-PAS sampling rates across the Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS) network. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(1), 210-219.
- [34] Hung, H, A.A. Katsoyiannis, E. Brorstrom-Lunden, K. Olafsdottir, W. Aas, K. Breivik, P. Bohlin-Nizzetto, A. Sigurdsson, H. Hakola, R. Bossi, H. Skov, E. Sverko, E. Barresi, P. Fellin, S. Wilson, Temporal trends of persistent organic pollutants (POPs) in arctic air: 20 years of monitoring under the arctic monitoring and assessment programme (AMAP), *Environ. Pollut.* 217 (2016) 52e61
- [35] Hossain, M. S., Che, W., Frey, H. C., & Lau, A. K. (2021). Factors affecting variability in infiltration of ambient particle and gaseous pollutants into home at urban environment. *Building and Environment*, 206, 108351.

- [36] Ilenič, A., Pranjčić, A. M., Zupančič, N., Milačič, R., & Ščančar, J. (2024). Fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure assessment among active daily commuters to induce behaviour change to reduce air pollution. *Science of The Total Environment*, 912, 169117.
- [37] Isaxon, C., Gudmundsson, A., Nordin, E. Z., Lönnblad, L., Dahl, A., Wieslander, G., ... & Wierzbicka, A. (2015). Contribution of indoor-generated particles to residential exposure. *Atmospheric Environment*, 106, 458-466.
- [38] Ji, W., & Zhao, B. (2015). Contribution of outdoor-originating particles, indoor-emitted particles and indoor secondary organic aerosol (SOA) to residential indoor PM_{2.5} concentration: A model-based estimation. *Building and environment*, 90, 196-205.
- [39] Kapwata, T., Language, B., Piketh, S., & Wright, C. Y. (2018). Variation of indoor particulate matter concentrations and association with indoor/outdoor temperature: a case study in rural Limpopo, South Africa. *Atmosphere*, 9(4), 124.
- [40] Kazemi, K. V., Mansouri, N., Moattar, F., & Khezri, S. M. (2016). Characterization of indoor/outdoor PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ and radon concentrations in Imam Khomeini hospital. *Bulg. Chem. Commun*, 48, 345-350.
- [41] Kwon, S. B., Jeong, W., Park, D., Kim, K. T., & Cho, K. H. (2015). A multivariate study for characterizing particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) in Seoul metropolitan subway stations, Korea. *Journal of hazardous materials*, 297, 295-303.
- [42] Lai, F. Y., Rauert, C., Gobelius, L., & Ahrens, L. (2019). A critical review on passive sampling in air and water for per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 121, 115311.
- [43] Leigh, B., C., Baumgartner, J., Carter, E., Robinson, B. E., Tao, S., & Zhang, Y. (2019). An evaluation of air quality, home heating and well-being under Beijing's programme to eliminate household coal use. *Nature Energy*, 4(5), 416-423.
- [44] Leung, D. Y. (2015). Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 69.
- [45] Li, Y., Chen, Q., Zhao, H., Wang, L., & Tao, R. (2015). Variations in PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors. *Atmosphere*, 6(1), 150-163.
- [46] Madonsela, B. S., Maphanga, T., & Mahlakwana, G. (2023). Advancement in the Monitoring Techniques of Particulate Matter and Nitrogen Oxides in African States: A Systematic Review with Meta Analysis. *International Journal of Environmental Impacts*, 6(1), 37-47.
- [47] Mainka, A., & Zajusz-Zubek, E. (2019). PM₁ in ambient and indoor air—urban and rural areas in the Upper Silesian Region, Poland. *Atmosphere*, 10(11), 662.
- [48] 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.
- [49] Mašková, L., Smolík, J., Ondráček, J., Ondráčková, L., Travnícková, T., & Havlica, J. (2020). Air quality in archives housed in historic buildings: assessment of concentration of indoor particles of outdoor origin. *Building and Environment*, 180, 107024.
- [50] Mendoza, D. L., Benney, T. M., & Boll, S. (2021). Long-term analysis of the relationships between indoor and outdoor fine particulate pollution: A case study using research grade sensors. *Science of The Total Environment*, 776, 145778.
- [51] Moerdjoko, M. (2004). Kaitan Sistem Ventilasi Bangunan Dengan Keberadaan Mikroorganisme Udara. *DIMENSI: Journal of Architecture and Built Environment*, 32(1).
- [52] Nadali, A., Arfaenia, H., Asadgol, Z., & Fahiminia, M. (2020). Indoor and outdoor concentration of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM removal. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 32(1), 47-55.
- [53] Nirmala, D. S., & Prasasti, C. I. (2014). Konsentrasi PM_{2.5} dan Analisis Karakteristik Pekerja Terhadap Keluhan Kesehatan Pekerja Pengasapan Ikan di Kelurahan Tambak Wedi Surabaya. *Kesehatan Lingkungan*, 8(1), 57-68.
- [54] N.J. Herkert, S.N. Spak, A. Smith, J.K. Schuster, T. Harner, A. Martinez, K.C. Hornbuckle, Calibration and evaluation of PUF-PAS sampling rates across the global atmospheric passive sampling (GAPS) network, *Environ. Sci. Process Impacts* 20 (1) (2018) 210e219.
- [55] Pan, H., Wang, H., Qian, Y., & Tang, Y. (2021). Correlation analysis of indoor and outdoor PM_{2.5} and exploration of prevention methods. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 634, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.

- [56] Prihardanu, E. G., Kusnoputranto, H., & Herdiansyah, H. (2021). Indoor air quality in urban residential: Current status, regulation and future research for Indonesia. *International Journal of Public Health Science (IJPHS)*, 10(4), 824.
- [57] Purwaka PB, Wijanarko SA. 2022. Uji Banding Kinerja Alat High Volume Air Sampler untuk Pengukuran Total Suspended Particulate (TSP) di Udara Ambien. *ECOLAB*. 16(2): 87-98.
- [58] Qian J, Peccia J, Ferro AR. (2014). Walking-induced particle resuspension in indoor environments. *Atmos Environ* 89:464–481. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.035>
- [59] Ramadhan, M. A. N., Nugroho, A. S. B., & Irawati, I. S. (2023). Analisis Pengaruh Umur Bangunan Terhadap Tingkat Kepuasan Penghuni. *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 12(2), 63-72.
- [60] Raysoni, A. U., Pinakana, S. D., Mendez, E., Wladyka, D., Sepielak, K., & Temby, O. (2023). A review of literature on the usage of low-cost sensors to measure particulate matter. *Earth*, 4(1), 168-186.
- [61] Rivas, I., Fussell, J. C., Kelly, F. J., & Querol, X. (2019). Indoor sources of air pollutants.
- [62] Rojano, R., Vengoechea, A. M., & Arregocés, H. A. (2023). Indoor/outdoor relationship of particulate matter (PM10) and its chemical composition in a coastal region of Colombia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100397.
- [63] Roostaei, V., Abbasi, A., Gharibzadeh, F., Faridi, S., Naddafi, K., Yunesian, M., & Hassanvand, M. S. (2024). Vertical distribution of air particulate matter (PM1, PM2.5, and PM10) in different regions of Tehran. *Aerosol and Air Quality Research*, 24, 240036.
- [64] Royal College of Physicians, 2016. Every Breath We Take: the Lifelong Impact of Air Pollution. Report of a working party, London.
- [65] Saggiu GS, Mittal SK. (2020). Source apportionment of PM10 by positive matrix factorization model at a source region of biomass burning. *J Environ Manag* 266:110545. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110545>
- [66] Salam A, M. M. (2021). Outdoor and indoor factors influencing particulate matter and carbon dioxide levels in naturally ventilated urban homes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(1), 60-69. <https://doi.org/10.1016/J.REFFIT.2017.03.002>
- [67] Ścibor, M., Bokwa, A., & Balcerzak, B. (2019). Impact of wind speed and apartment ventilation on indoor concentrations of PM10 and PM2.5 in Kraków, Poland. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13(5), 553-562.
- [68] Schiavon, M., Rada, E. C., Ragazzi, M., Antognoni, S., & Zanoni, S. (2015). Domestic activities and PM generation: A contribution to the understanding of indoor sources of air pollution. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 2015(10: 3), 347-360.
- [69] Schulze, F., Gao, X., Virzonis, D., Damiani, S., Schneider, M. R., & Kodzius, R. (2017). Air quality effects on human health and approaches for its assessment through microfluidic chips. *Genes*, 8(10), 244.
- [70] Septiyana, D., Sukmono, A., & Yusuf, M. A. (2023). Pemantauan Kualitas Udara ISPU (PM10, SO2, NO2) Menggunakan Citra Landsat 8 dan 9 untuk Kecamatan Mijen Selama Pandemi Covid-19. *Jurnal Geodesi Undip*, 12(3), 271-280.
- [71] Shidki, H., Chandra, I., & Djunaedy, E. (2020). Analisis kualitas udara dalam ruangan pada kantor terbuka di Universitas Telkom. *eProceedings of Engineering*, 7(1).
- [72] Shrestha, R. M., Kim Oanh, N. T., Shrestha, R. P., Rupakheti, M., Rajbhandari, S., Permadi, D. A., Kanabkaew, T., dan Iyngararasan, M. (2019). Atmospheric Brown Clouds: Emission Inventory Manual
- [73] Srimuruganandam, B., & Nagendra, S. M. S. (2016). Analysis and interpretation of particulate matter—PM10, PM2.5 and PM1 emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway. *Atmospheric Pollution Research*, 1(3), 184-194.
- [74] Sumeru, K. (2021). Pengaruh Asap Rokok pada Konsentrasi Partikulat PM10 di Dalam Rumah. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol. 12, pp. 814-820).
- [75] Szymczak W, Menzel N, Keck L (2007) Emission of ultrafine copper particles by universal motors controlled by phase angle modulation. *J Aerosol Sci* 38:520–531
- [76] Tan CCL, Finney KN, Chen Q et al (2013) Experimental investigation of indoor air pollutants in residential buildings. *Indoor Built Environ* 22:471–489. <https://doi.org/10.1177/1420326X12441806>

- [77] Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y. C. (2022). Recent insights into particulate matter (PM_{2.5})-mediated toxicity in humans: an overview. *International journal of environmental research and public health*, 19(12), 7511.
- [78] Tofful L, Canepari S, Sargolini T, Perrino C (2021) Indoor air quality in a domestic environment: combined contribution of indoor and outdoor PM sources. *Build Environ* 202:108050. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108050>.
- [79] Um, C.Y., Zhang, N., Kang, K., Na, H., Choi, H., Kim, T., (2022). Occupant behavior and indoor particulate concentrations in daycare centers. *Sci. Total Environ.* 824, 153206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153206>
- [80] Vardoulakis, S., Giagloglou, E., Steinle, S., Davis, A., Sleuwenhoek, A., Galea, K. S., ... & Crawford, J. O. (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.
- [81] Vasile, V., Iordache, V., & Radu, V. M. (2023). The influence of ventilation on indoor air quality in buildings with variable pollutant emissions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1185, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- [82] Vu, T. V., Ondracek, J., Zdímal, V., Schwarz, J., Delgado-Saborit, J. M., & Harrison, R. M. (2017). Physical properties and lung deposition of particles emitted from five major indoor sources. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 1-14.
- [83] Wadoe, M., Syifaudin, D. S., Alfianna, W., Aifa, F. F., Narlika, D. P., Savitri, R. A., ... & Sulistyarini, A. (2019). Penggunaan Dan Pengetahuan Sunscreen Pada Mahasiswa Unair. *Jurnal Farmasi Komunitas*, 6(1), 1-8.
- [84] Wang, X., Xu, Z., Su, H., Ho, H. C., Song, Y., Zheng, H., ... & Cheng, J. (2021). Ambient particulate matter (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) and childhood pneumonia: the smaller particle, the greater short-term impact?. *Science of The Total Environment*, 772, 145509.
- [85] Watson, J. G., Tropp, R. J., Kohl, S. D., Wang, X., & Chow, J. C. (2017). Filter processing and gravimetric analysis for suspended particulate matter samples. *Aerosol Science and Engineering*, 1, 93-105.
- [86] Widiatmono, B. R., Kurniati, E., & Imaya, A. T. (2020). Analisis sebaran polutan SO₂, NO_x dan pm₁₀ dari sumber bergerak pada jalan arteri Kota Malang. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 6(3), 40–51.
- [87] Wijayanti, R. N. 2010. Analisis Pengaruh Kepadatan Lalu Lintas Terhadap Konsentrasi PM₁₀. Teknik Lingkungan. Universitas Diponegoro. Semarang.
- [88] WHO Regional Office for Europe, 2015. Economic Cost of the Health Impact of Air Pollution in Europe: Clean Air. health and wealth.
- [89] Wolkoff, P. (2018). Indoor air humidity, air quality, and health—An overview. *International journal of hygiene and environmental health*, 221(3), 376-390.
- [90] Wu, F., Wang, W., Man, Y.B., Chan, C.Y., Liu, W., Tao, S., Wong, M.H., (2015). Levels of PM_{2.5}/PM₁₀ and associated metal(loid)s in rural households of Henan Province, China. *Sci. Total Environ.* 512–513, 194–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.01.041>.
- [91] Yang, B. Y., Guo, Y., Bloom, M. S., Xiao, X., Qian, Z. M., Liu, E., ... & Dong, G. H. (2019). Ambient PM₁ air pollution, blood pressure, and hypertension: Insights from the 33 Communities Chinese Health Study. *Environmental Research*, 170, 252-259.
- [92] Younis, M. W., Kallapu, B., Hejamadi, R. M., Jijo, J., Ramesh, R. K., Aslam, M., & Jilani, S. F. (2024). Exploring the Influence of Tropical Cyclones on Regional Air Quality Using Multimodal Deep Learning Techniques. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(21), 6983.
- [93] Yudhi Puspa Tia. (2018). Renovation 101: Pencahayaan & Penghawaan Alami Dalam Rumah. Diakses online pada Tanggal 09 November 2024 (<https://www.livingloving.net/2018/more-articles/home/renovation-101-pencahayaan-penghawaan-alami-dalam-rumah/>).
- [94] Zareba, M., Weglinska, E., & Danek, T. (2024). Air pollution seasons in urban moderate climate areas through big data analytics. *Scientific Reports*, 14(1), 3058.
- [95] Zhang, X., Saini, A., Hao, C., & Harner, T. (2020). Passive air sampling and nontargeted analysis for screening POP-like chemicals in the atmosphere: Opportunities and challenges. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 132, 116052.
- [96] Zhao, Y., Song, X., Wang, Y., Zhao, J., & Zhu, K. (2017). Seasonal patterns of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{1.0} concentrations in a naturally ventilated residential underground garage. *Building and Environment*, 124, 294-314.