



Analisis Kualitas Udara dalam Ruang dengan Gangguan Fungsi Paru pada Siswa MAN 1 Aceh Besar

Tiara Mairani^{1*}, Agustina², Naimah³, Wardiati⁴, Phossy Vionica Ramadhana⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas

Muhammadiyah Aceh

Email: ^{1*}tiara.mairani@unmuha.ac.id

Abstract

Indoor air pollution in schools often shows high PM_{2.5} concentrations, primarily due to outdoor air infiltration and dust suspended by student activities. This study aims to analyze the relationship between indoor air quality and lung function impairment among students at MAN 1 Aceh Besar, located in an area with high vehicle density. Using a descriptive-analytical design with a cross-sectional approach, the study involved 78 students selected through proportional random sampling. Results showed that 17.9% of students experienced lung function impairment. PM_{2.5} concentrations in 65.4% of classrooms were found to exceed the threshold limit value (TLV) of 25 µg/m³, although statistically, it did not show a significant relationship with lung function impairment (p=0.07). However, students in rooms with high PM_{2.5} levels were 3.8 times more likely to experience impairment compared to those in rooms with PM_{2.5} levels below the TLV. Physical factors such as temperature (74.4% abnormal) and humidity (50% abnormal) also showed no statistically significant relationship with the students' lung function. Conversely, a significant relationship was found between smoking habits and lung function impairment (p=0.008), where students who smoke are 4.8 times more likely to experience lung function impairment. In conclusion, smoking habits are a risk factor that can increase PM_{2.5} concentration, damage the respiratory tract, and trigger lung function impairment in students.

Keywords: Air Quality, PM_{2.5}, Smoking Habits, Lung Function, Students.

Abstrak

Polusi udara dalam ruang sekolah sering menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} yang cukup tinggi, karena infiltrasi udara luar dan debu yang tersuspensi oleh aktivitas siswa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kualitas udara dalam ruang dengan gangguan fungsi paru pada siswa MAN 1 Aceh Besar yang berlokasi di area dengan kepadatan kendaraan tinggi. Menggunakan desain deskriptif analitik dengan pendekatan cross-sectional, penelitian ini melibatkan 78 siswa sebagai sampel yang dipilih melalui teknik proportional random sampling. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 17,9% siswa mengalami gangguan fungsi paru. Konsentrasi PM_{2.5} di 65,4% ruang kelas ditemukan melebihi nilai ambang batas (NAB) 25 µg/m³, meskipun secara statistik tidak menunjukkan hubungan signifikan dengan gangguan fungsi paru (p=0,07). Namun, siswa di ruangan dengan kadar PM_{2.5} tinggi memiliki risiko 3,8 kali lebih besar mengalami gangguan tersebut dibandingkan siswa di ruangan dengan PM_{2.5} di bawah NAB. Faktor fisik seperti suhu (74,4% tidak normal) dan kelembaban (50% tidak normal) juga tidak berhubungan signifikan secara statistik terhadap fungsi paru siswa. Sebaliknya, ditemukan hubungan yang signifikan antara kebiasaan merokok dengan gangguan fungsi paru (p=0,008), di mana siswa yang memiliki kebiasaan merokok berisiko 4,8 kali lebih tinggi mengalami gangguan fungsi paru. Kesimpulan, kebiasaan merokok merupakan faktor risiko yang dapat meningkatkan konsentrasi PM_{2.5} dan merusak saluran napas dan memicu gangguan fungsi paru pada siswa.

Kata Kunci: Kualitas Udara, PM_{2.5}, Kebiasaan Merokok, Fungsi Paru, Siswa.

1. PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan ancaman kesehatan global yang signifikan, terdapat 9 dari 10 orang seluruh dunia menghirup udara yang mengandung konsentrasi polutan tinggi sekitar 7 juta kematian prematur terjadi setiap tahun akibat polusi udara. Polusi udara dalam ruang menunjukkan *Particulate Matter* (PM_{2.5}) yang cukup tinggi, terutama karena infiltrasi udara luar dan debu yang tersuspensi oleh aktivitas dalam ruang. Partikulat halus dengan diameter 2.5 mikrometer (PM_{2.5}) merupakan polutan paling berbahaya karena dapat menembus sistem pernapasan hingga masuk ke aliran darah dan menyebabkan gangguan fungsi paru (US EPA, 2025a; World Health Organization (WHO), 2026).

Dampak kesehatan yang timbulkan dari konsentrasi PM_{2.5} adalah penurunan fungsi paru pada manusia. Paparan PM_{2.5} di dalam ruang sering melampaui batas pedoman WHO dan berkaitan dengan penurunan parameter spirometri (FEV₁, FVC, PEF) serta pola gangguan paru pada anak dan remaja. Anak dan remaja sangat sensitif terhadap paparan PM_{2.5} dengan efek kesehatan sejak dini selama anak dalam proses pengembangan paru-paru dapat menyebabkan dampak jangka panjang pada fungsi paru dan banyak waktu dihabiskan di dalam ruangan (G A Engwa, C Anye, 2023; Korukire et al., 2025; Yan et al., 2020).

Gangguan fungsi paru akibat paparan PM_{2.5} pada remaja di Indonesia menunjukkan bahwa 32% remaja usia 15-18 tahun yang tinggal di area dengan konsentrasi PM_{2.5} tinggi mengalami penurunan fungsi paru dengan nilai FEV₁ (Forced Expiratory Volume in 1 second) kurang dari 80%. Paparan PM_{2.5} tinggi pada remaja dapat menyebabkan gangguan fungsi paru yang permanen karena paru-paru masih dalam tahap perkembangan hingga usia 20-25 tahun. Penurunan fungsi paru sebesar 10% pada usia remaja dapat meningkatkan risiko penyakit respiratori kronis dan kebiasaan merokok remaja secara signifikan merusak jaringan paru-paru serta memiliki nilai volume ekspirasi paksa (FEV-1) dan kapasitas vital paksa (FVC) yang lebih rendah dibandingkan remaja yang tidak memiliki kebiasaan merokok. Gangguan fungsi paru pada remaja dapat menyebabkan penurunan kemampuan konsentrasi, frekuensi penyakit respiratori meningkat, dan penurunan prestasi akademik (Buthelezi, 2024; Kemenkes RI, 2024; Vildania et al., 2025; Xu et al., 2020).

Di Indonesia, polusi udara menjadi masalah serius terutama kota besar dengan pertumbuhan kendaraan bermotor yang pesat. Indonesia termasuk dalam kategori memiliki kualitas udara buruk, dengan konsentrasi PM_{2.5} melebihi baku mutu nasional (25 µg/m³ untuk rata-rata tahunan). Wilayah Aceh, khususnya Aceh Besar, mengalami peningkatan konsentrasi PM_{2.5} secara signifikan akibat kepadatan kendaraan di jalan raya utama seperti Jalan Raya Banda Aceh-Medan. Data Stasiun Pemantauan Kualitas Udara Aceh Besar menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{2.5} di sepanjang jalan raya utama mencapai 40-60 µg/m³ pada siang hari, jauh melebihi Nilai Ambang Batas (NAB) nasional 55 µg/m³ untuk udara luar ruang dan 25 µg/m³ untuk udara dalam ruang (IQAIR, 2024; IQAir Indonesia, 2026; Jeanly Syahputri et al., 2023; Kementerian Kesehatan RI, 2023). Konsentrasi PM_{2.5} di area ini juga berkorelasi erat dengan faktor suhu dan kelembaban udara dalam ruang: peningkatan suhu memicu emisi dari material bangunan dan mempercepat reaksi kimia di udara, sementara penurunan suhu mendorong peningkatan kelembaban yang menyebabkan partikel debu menggumpal dan tersuspensi lebih lama (IQAir, 2024; Zhang et al., 2022).

Sekolah yang terletak dekat jalan raya dengan kepadatan lalu lintas tinggi memiliki konsentrasi PM_{2.5} dua hingga tiga kali lebih tinggi dibandingkan sekolah di lokasi yang lebih jauh dari sumber polusi. Polusi udara di lingkungan sekolah dan kedekatan dengan jalan raya terbukti berkaitan dengan gejala pernapasan dan penurunan fungsi paru pada

siswa (Korukire et al., 2025; Meo et al., 2024; Yan et al., 2020). Siswa sekolah, khususnya remaja, merupakan kelompok rentan terhadap dampak polusi ini tidak hanya karena fungsi paru yang masih berkembang, tetapi juga karena durasi paparan di lingkungan sekolah yang berlangsung cukup lama setiap harinya. Upaya mitigasi seperti jarak yang lebih jauh dari jalan raya, peningkatan ruang hijau, ventilasi yang baik, dan penggunaan pemurni udara terbukti dapat menurunkan paparan dan berpotensi melindungi fungsi paru siswa (Garcia et al., 2022; IQAIR, 2024; Korukire et al., 2025).

Meskipun sejumlah penelitian telah mengkaji hubungan antara paparan PM_{2.5} dan fungsi paru, sebagian besar studi difokuskan pada kelompok anak usia sekolah dasar di kawasan metropolitan besar, dan belum mempertimbangkan interaksi simultan antara konsentrasi PM_{2.5} dalam ruang, kondisi suhu, kelembaban, serta kebiasaan merokok sebagai faktor perancu secara bersamaan. Data spesifik mengenai dampak paparan PM_{2.5} terhadap fungsi paru pada siswa SMA yang beraktivitas di lingkungan sekolah dekat jalan raya utama masih sangat terbatas, terlebih di wilayah Aceh Besar yang memiliki karakteristik iklim tropis dengan suhu dan kelembaban tinggi yang dapat memengaruhi distribusi dan konsentrasi partikulat (Garcia et al., 2022; Korukire et al., 2025). Hingga saat ini, belum ada penelitian yang secara khusus mengkaji hubungan antara konsentrasi PM_{2.5} dalam ruang kelas, faktor suhu dan kelembaban, kebiasaan merokok, serta fungsi paru siswa SMA di koridor Jalan Raya Banda Aceh–Medan sebagai satu kesatuan analisis multifaktor.

Penelitian ini merupakan studi yang secara komprehensif menganalisis hubungan antara konsentrasi PM_{2.5} dalam ruang kelas, kondisi suhu dan kelembaban udara, serta kebiasaan merokok terhadap fungsi paru siswa SMA di Sekolah yang berada dekat jalan raya Banda Aceh–Medan, Aceh Besar. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan populasi spesifik remaja SMA yang selama ini belum terwakili dalam literatur terkait, pendekatan multifaktor yang mengintegrasikan variabel lingkungan fisik (PM_{2.5}, suhu, kelembaban) dan perilaku (kebiasaan merokok), serta konteks geografis Aceh Besar dengan karakteristik iklim tropis dan transportasi padat yang belum pernah menjadi subjek studi fungsi paru. Temuan penelitian ini diharapkan dapat memberikan bukti empiris berbasis data lokal yang kuat sebagai landasan kebijakan pengendalian kualitas udara sekolah di Indonesia, khususnya di wilayah Aceh Besar.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain deskriptif analitik dengan pendekatan *cross sectional*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui analisis kualitas udara dalam ruang dengan gangguan fungsi paru pada siswa. Penelitian ini dilakukan di sekolah yang berada dekat jalan raya pada bulan November 2025 di MAN 1 Aceh Besar dan populasi dalam penelitian ini adalah siswa kelas X dan XI berusia 14-16 tahun sebanyak 360 siswa dan jumlah sampel penelitian sebanyak 78 siswa dihitung menggunakan rumus slovin oleh Mark J. Slovin pada tahun 1960 dengan tingkat kepercayaan 95% dengan menggunakan rumus berikut:

$$n = \frac{N}{1 + N(e)^2}$$

Keterangan:

n = Jumlah sampel yang dicari

N = Jumlah total populasi (360)

e = Batas toleransi kesalahan atau *margin of error*

Teknik sampling menggunakan *proportional random sampling* setiap kelas mewakili 6-7 siswa per kelas dari total 12 kelas. Kriteria inklusi dalam penelitian ini siswa kelas X dan XI yang masih aktif terdaftar di sekolah dan bersedia berpartisipasi sebagai responden dengan telah menandatangani *Informed Consent* Sedangkan, kriteria eksklusi pada penelitian ini adalah siswa yang memiliki riwayat penyakit pernapasan dan bawaan serta alergi.

Pengumpulan data primer dilakukan dengan pengukuran konsentrasi PM_{2.5} menggunakan *Particle Counter Air Quality Detector Monitor Dust merek HTI model HT-9600* hasil pengukuran dalam ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), suhu dengan hasil pengukuran dalam ($^{\circ}\text{C}$) dan kelembaban dengan hasil pengukuran dalam (%RH) diukur menggunakan *Temperature Humidity Meter Merk FLUKE Model 971* dan pengukuran fungsi paru menggunakan *Spirometer System Merk UBREATH Model PF280* serta kuesioner yang berisi pertanyaan tentang kebiasaan merokok dan karakteristik responden. Analisis data dilakukan secara univariat untuk menggambarkan besar masalah melalui distribusi frekuensi setiap variabel. Analisis bivariat menggunakan uji chi-square untuk mengetahui ada tidaknya hubungan yang signifikan antara variabel penelitian dan menganalisis keeratan hubungan antara dua variabel dengan nilai p-value dan *Odds Ratio* (OR) serta analisis multivariat menggunakan Regresi Logistik Ganda untuk menilai pengaruh PM_{2.5} terhadap fungsi paru sekaligus mengontrol variabel perancu (confounding) seperti kebiasaan merokok.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

3.1.1 Analisis Univariat

Responden penelitian sebanyak 78 siswa dengan umur siswa 13-15 tahun dengan rata-rata siswa berumur 14 tahun dan jenis kelamin yang paling banyak perempuan (51,3%) dan laki-laki (48,7%). Gangguan fungsi paru mayoritas siswa tidak mengalami gangguan fungsi paru sebesar (82,1%) dan siswa yang mengalami gangguan fungsi paru sebesar (17,9%) dengan konsentrasi PM_{2.5} disekolah melebihi nilai ambang batas 65,4% dan konsentrasi PM_{2.5} dibawah melebihi nilai ambang batas yaitu 34,6%. Sedangkan variabel faktor fisik disekolah seperti suhu mayoritas tidak normal sebesar 81,3 % dan kelembaban mayoritas tidak normal disekolah dengan presentase sebesar 58,8% serta variabel kebiasaan merokok menunjukkan bahwa mayoritas siswa adalah tidak merokok sebesar 76,9% dan siswa yang merokok 23,1% (Tabel 1).

Tabel 1. Distribusi Frekuensi Gangguan Fungsi Paru, Konsentrasi PM_{2.5}, Suhu, Kelembaban dan Kebiasaan Merokok

Variabel	Jumlah	Persentase (%)
Umur		
13 Tahun	20	25,6
14 Tahun	42	53,8
15 Tahun	16	20,5
Jenis Kelamin		
Laki-Laki	38	48,7
Perempuan	40	51,3
Gangguan Fungsi Paru		
Ada Gangguan	14	17,9
Tidak Ada Gangguan	64	82,1
Konsentrasi PM_{2.5}		
> NAB 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	51	65,4
< NAB 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	27	34,6

Variabel	Jumlah	Persentase (%)
Suhu		
Tidak Normal	58	74,4
Normal	20	25,6
Kelembaban		
Tidak Normal	39	50
Normal	39	50
Kebiasaan Merokok		
Merokok	18	23,1
Tidak Merokok	60	76,9

Sumber: Data primer diolah tahun 2026

3.1.2 Analisis Bivariat

Hasil analisis bivariat menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan yang bermakna antara konsentrasi PM_{2.5} dengan gangguan fungsi paru pada siswa MAN 1 Aceh Besar (nilai p = 0,07). Siswa yang berada disekolah dengan konsentrasi PM_{2.5} > NAB 25 µg/m³ akan berisiko 3,8 kali mengalami gangguan fungsi paru dibandingkan siswa yang berada di sekolah dengan konsentrasi PM_{2.5} < NAB 25 µg/m³. Hasil analisis menunjukkan tidak ada hubungan yang signifikan antara faktor fisik sekolah suhu dan kelembaban dengan gangguan fungsi paru. Diketahui suhu sekolah tidak normal melebihi standar baku mutu suhu dalam ruang 74,4% memiliki resiko 5,4 kali siswa dapat mengalami gangguan fungsi paru dan kelembaban tidak normal sebesar 50% ruang kelas tidak normal. Namun berbeda dengan kebiasaan merokok terdapat hubungan yang bermakna dengan gangguan fungsi paru pada siswa (nilai p = 0,008). Siswa yang memiliki kebiasaan merokok berisiko 4,8 kali mengalami gangguan fungsi paru dibandingkan siswa yang tidak memiliki kebiasaan merokok (Tabel 2).

Tabel 2. Analisis Konsentrasi PM_{2.5}, Suhu, kelembaban dan kebiasaan merokok terhadap Gangguan Fungsi Paru pada Siswa MAN 1 Aceh Besar

Variabel	Gangguan Fungsi Paru				Jumlah		OR (95% CI)	Nilai p
	Ada Gangguan		Tidak Ada Gangguan					
	n	%	n	%	n	%		
Konsentrasi PM_{2.5}								
>NAB 25 µg/m ³	12	23,5	39	76,5	51	100	3,8	0,07
<NAB 25 µg/m ³	2	7,4	25	92,6	27	100	(0,79 – 18,6)	
Suhu								
Tidak Normal	13	22,4	45	77,6	58	100	5.4	0,08
Normal	1	5	19	95	20	100	(0,67– 44,9)	
Kelembaban								
Tidak Normal	6	15,4	33	84,6	39	100	0.7	0,55
Normal	8	20,5	31	79,5	39	100	(0,21 – 2,26)	
Kebiasaan Merokok								
Merokok	7	38,9	11	61,1	18	100	4,8	0,008
Tidak Merokok	7	11,7	53	88,3	60	100	(1,4–16,5)	

Sumber: Data primer diolah tahun 2026

3.2. Pembahasan

3.2.1 Konsentrasi PM_{2.5} dengan Gangguan Fungsi Paru Pada Siswa

Konsentrasi PM_{2.5} di dalam ruang melampaui > NAB 25 µg/m³ sebesar 65,4% ruang kelas dengan konsentrasi PM_{2.5} > NAB 25 µg/m³ dan berkaitan dengan penurunan parameter spirometri (FEV₁, FVC, PEF) serta pola gangguan paru pada anak dan remaja.

Anak lebih rentan karena paru masih berkembang dan banyak waktu dihabiskan di dalam ruangan. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan tidak terdapat hubungan yang signifikan antara konsentrasi PM_{2.5} dengan gangguan fungsi paru pada siswa dengan p-value 0,07 namun, siswa yang berada disekolah dengan konsentrasi PM_{2.5} > NAB 25 µg/m³ akan berisiko 3,8 kali mengalami gangguan fungsi paru dibandingkan konsentrasi PM_{2.5} < NAB 25 µg/m³. Hasil ini mendekati signifikansi statistik namun, tidak melewati p < 0,05 dengan jumlah sampel terbatas terjadi kurangnya statistik power yang memunculkan Type II error kegagalan menolak Ho.

Peningkatan konsentrasi PM_{2.5} secara biologis membebani sistem respirasi karena ukurannya yang sangat mikroskopis (< 2,5 mikrometer dapat terhirup dan menembus hingga ke alveoli paru. Partikel ini memicu pembentukan Reactive Oxygen Species (ROS) yang merusak lapisan epitel saluran napas. Keberadaan partikel ini mengaktifkan makrofag alveolar dan sel epitel untuk melepaskan mediator inflamasi. Jika ini berlangsung terus-menerus, akan terjadi penyempitan jalan napas dan penurunan volume berdampak langsung pada parameter fungsi paru yang diuji melalui spirometri, seperti (FEV₁) Volume Ekspirasi Paksa Detik Pertama atau (FVC) Kapasitas Vital Paksa (Nitschke et al., 2016; Xing et al., 2016). Hasil *borderline* sering kali menunjukkan bahwa arah hubungan sudah sesuai dengan teori medis yang ada (semakin tinggi polusi, semakin rendah fungsi paru), namun terhalang oleh jumlah observasi yang kurang.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Takebayashi et al (2022) menyatakan rata-rata tahunan keseluruhan tingkat PM_{2.5} adalah 13,5 µg/m³ (10,4-19,0 µg/m³) dan tidak ada hubungan antara indikator peningkatan PM_{2.5} dengan fungsi paru-paru pada anak-anak dari kedua jenis kelamin (Takebayashi et al., 2022). Sebaliknya penelitian ini tidak sejalan dengan Korukire et al (2025) berdasarkan hasil analisis regresi terdapat hubungan bermakna antara konsentrasi PM_{2.5} dengan fungsi paru-paru pada anak sekolah dengan p = 0,05. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{2.5} dua hingga lima kali lebih tinggi, daripada pedoman kualitas udara WHO. Efek buruk yang signifikan dari paparan PM_{2.5} terhadap fungsi paru-paru anak-anak di sekolah-sekolah yang dipilih. Oleh karena itu, perlu dilakukan tindakan untuk meningkatkan kualitas udara dan melindungi kesehatan masyarakat sekolah (Korukire et al., 2025). Konsentrasi PM_{2.5} memberikan efek pada fungsi paru tanpa ada pengendalian terhadap polusi udara di sekolah terutama kualitas udara dalam ruang karena, siswa menghabiskan waktu lebih lama dalam ruang secara terus menerus.

Particulate Matter 2,5 (PM_{2.5}) merupakan partikel halus yang memiliki diameter kurang atau sama dengan 2,5 µm terdiri dari ratusan bahan kimia yang berbeda. Pengaruh partikel berukuran kecil di dalam tubuh yang pertama kali dirugikan adalah saluran pernafasan dan menembus ke bagian tempat pertukaran gas pada paru-paru, serta melewati penghalang pernafasan dan masuk ke sistem peredaran darah, sehingga menyebar keseluruh tubuh. PM_{2.5} meningkatkan potensinya untuk tersangkut jauh di dalam saluran pernafasan. Pada ukuran 2,5 mikron, PM_{2.5} dapat memasuki sistem peredaran darah dan bahkan otak serta gejala jangka pendek akibat paparan partikel tingkat tinggi meliputi iritasi tenggorokan, saluran pernafasan, batuk, dan kesulitan bernapas. Paparan polusi dalam ruang dari pembakaran bahan bakar padat pada api terbuka, kompor tradisional, dan asap tembakau dalam ruang juga merupakan sumber PM_{2.5} yang dapat meningkatkan risiko infeksi saluran pernafasan akut, penurunan fungsi paru dan kematian pada anak-anak (IQAir AS, 2025; US EPA, 2025b; World Health Organization (WHO), 2021). Maka perlu, pengendalian PM_{2.5} dalam ruang dengan ventilasi yang baik, filtrasi, pemurni udara, pengurangan sumber polusi dari dalam ruang dan luar dengan peningkatan ruang hijau untuk menurunkan paparan agar dapat melindungi fungsi paru siswa.

3.2.2 Suhu dengan Gangguan Fungsi Paru Pada Siswa

Suhu dalam ruang kelas mayoritas tidak normal sebesar 74,4 % dapat meningkatkan aktivitas molekuler dan sirkulasi udara sehingga, menghirup udara panas yang terkontaminasi memicu peradangan serta iritasi pada saluran pernapasan pada siswa. Variabel suhu tidak memiliki hubungan yang signifikan dengan gangguan fungsi paru dengan nilai p-value 0,08 dengan nilai OR menunjukkan bahwa siswa yang berada dalam ruang dengan suhu yang tidak normal dalam batasan terlalu dingin atau terlalu panas akan berisiko 5,4 kali mengalami gangguan fungsi paru dibandingkan dengan siswa yang berada dalam ruang dengan suhu normal. Penelitian ini tidak sejalan dengan Sudarmaji et al (2026) menunjukkan korelasi yang signifikan secara statistik variabel suhu ruangan dengan kesehatan pernapasan dengan p-value 0,029. Suhu dalam ruangan memiliki hubungan yang kecil, tetapi signifikan, dengan variasi jangka pendek dalam fungsi paru-paru anak (Sudarmaji et al., 2026).

Suhu dalam ruang memengaruhi konsentrasi PM_{2,5} di ruang kelas yang tinggi secara konsisten berkaitan dengan penurunan fungsi paru (FEV₁, FVC, PEF) dan pola gangguan paru pada siswa. Suhu dalam ruang secara langsung memperkuat efek PM_{2,5} terhadap fungsi paru masih terbatas, tetapi kombinasi ruangan panas tertutup dan paparan PM_{2,5} tinggi jelas merupakan kondisi berisiko bagi kesehatan pernapasan anak dengan kondisi dengan tingkat panas yang mempengaruhi kenyamanan suatu ruangan (US EPA, 2026; World Health Organization, 2025a, 2025b)

Udara merupakan media dalam mekanisme untuk panas dimana kecepatan udara berpengaruh dengan proses pendinginan. Jika suhu udara <18% °C perlu menggunakan alat pemanas ruangan dan bila suhu udara > 28 °C perlu menggunakan alat penetral udara seperti Air Conditioner (AC), dan kipas angin. Air Conditioner (AC) berpengaruh terhadap kualitas udara ruangan, karena AC yang digunakan untuk mengatur suhu ruangan secara kontinu dapat mengeluarkan bahan polutan dan suhu dapat menyebabkan penyakit yang berkaitan dengan pernapasan dan peredaran darah, jika kondisi suhu di suatu ruang tidak sesuai dengan standar (Lee et al., 2021; Petrou et al., 2025; US EPA, 2026).

3.2.3 Kelembaban dengan Gangguan Fungsi Paru Pada Siswa

Mayoritas kelembaban tidak normal disekolah dengan presentase sebesar 50% dan rata-rata kelembaban di sekolah adalah 68,9 %Rh, tetapi tidak ada hubungan yang signifikan antara kelembaban dan gangguan fungsi paru pada siswa dengan p-value 0,55 namun, kelembaban tidak normal dapat memperburuk kualitas udara dengan memicu pertumbuhan jamur dan memengaruhi partikel debu memicu iritasi saluran napas, asma, dan ISPA pada siswa. Penelitian ini tidak sejalan dengan penelitian yang dilakukan Sudarmaji et al (2026) menunjukkan korelasi yang signifikan antara kelembaban dengan kesehatan pernapasan dengan p-value 0,049. Kelembaban dan polusi udara secara signifikan memengaruhi kesehatan pernapasan dan berinteraksi saling memengaruhi fungsi paru-paru pada masa remaja. Studi yang dilakukan Areal et al (2023) menilai hubungan interaktif antara kelembaban dan polusi udara terhadap fungsi paru-paru, yaitu kapasitas vital paksa (FVC) dan volume ekspirasi paksa dalam satu detik (FEV₁) pada remaja di Jerman. Peningkatan kelembaban sebesar 5% dikaitkan dengan peningkatan FEV₁ ($\beta = 0,040-0,045$; 95% CI: 0,008 hingga 0,076) dan FVC ($\beta = 0,007-0,012$; 95% CI: $-0,023$ hingga 0,045) dalam model asosiasi utama. Dalam model interaksi, terdapat penurunan signifikan pada FEV₁ ($\beta = -0,211$; 95% CI: $-0,361$ hingga $-0,062$) dan FVC ($\beta = -0,258$; 95% CI: $-0,403$ hingga $-0,0113$) per peningkatan RH sebesar 5% pada hari-hari dengan polusi tinggi (Areal et al., 2023; Suryadinata & Lorensia, 2023).

Kenyamanan dalam ruang yang berkaitan dengan interaksi fisik dari setiap individu dengan lingkungan. Parameter udara yang berhubungan dengan kenyamanan termasuk bau, kondisi panas, kelembaban relatif, dan kecepatan udara. Nilai kelembaban yang memenuhi persyaratan kesehatan adalah kelembaban yang berada diantara 40-70%. Indeks panas dalam tingkat tinggi yang menggabungkan suhu dan kelembaban mempengaruhi pajanan dan berdampak terhadap kesehatan dan kelembaban menyebabkan penyakit yang berkaitan dengan peredaran darah dan jantung. Temperatur dan kelembaban juga berperan dalam perubahan yang dialami oleh polutan gas (Areal et al., 2023; Kementerian Kesehatan RI, 2023).

3.2.4 Kebiasaan Merokok dengan Gangguan Fungsi Paru Pada Siswa

Rokok dapat menyebabkan gangguan kesehatan dari kandungan yang terdapat pada rokok tersebut. Perokok pasif menghirup nikotin dan bahan kimia berbahaya sama besarnya dengan perokok aktif. Semakin banyak asap rokok yang terhirup, maka semakin banyak pula bahan kimia berbahaya pada diri perokok yang dapat mengganggu saluran pernapasan. Hasil analisis menyatakan ada hubungan yang signifikan antara kebiasaan merokok dengan gangguan fungsi paru pada siswa dengan p-value 0,008 dan siswa yang memiliki kebiasaan merokok berisiko 4,8 kali mengalami gangguan fungsi paru dibandingkan siswa yang tidak memiliki kebiasaan merokok. Penelitian ini sejalan dengan penelitian Suryadinata & Lorensa (2023) menunjukkan ada peningkatan risiko gangguan fungsi paru pada kelompok perokok dibandingkan kelompok non perokok dan perbedaan pada kedua kelompok ($p < 0,05$). Permasalahan kesehatan akibat rokok belum diperlihatkan pada perokok usia remaja. Namun perokok pada usia remaja memiliki risiko yang lebih besar terkena gangguan fungsi paru dibandingkan dengan non perokok (Suryadinata & Lorensia, 2023).

Kebiasaan merokok di dalam rumah (perokok pasif) diidentifikasi sebagai faktor pengubah (modifier) yang memperburuk dampak polusi udara terhadap sistem pernapasan remaja. Penelitian menunjukkan bahwa asosiasi antara paparan PM_{2.5} dan penurunan fungsi paru menjadi lebih kuat pada anak-anak yang tinggal di rumah dengan perokok. Selain itu, merokok di dalam ruangan berkontribusi langsung pada peningkatan konsentrasi polutan dalam ruangan, termasuk logam dan elemen tanah jarang (rare earth elements) yang berpotensi memicu gejala pernapasan pada remaja (Xu et al., 2020). Merokok merupakan masalah kesehatan global yang meluas, berkontribusi secara signifikan terhadap beban penyakit pernapasan dan menimbulkan risiko besar bagi perokok dan mereka yang terpapar asap rokok pasif. Dampak buruk paparan rokok menjadi masalah kesehatan masyarakat yang signifikan, terutama bagi anak-anak, yang lebih rentan berdampak pada sistem pernapasan dan kekebalan tubuh yang masih berkembang. Merokok dikenal sebagai penyebab utama berbagai penyakit paru-paru dan masalah kesehatan lainnya. Rokok berisi ribuan zat kimia berbahaya, beberapa di antaranya bisa memicu kanker. Zat-zat ini masuk ke paru-paru saat kita menghisap asap rokok, dan bisa merusak jaringan paru-paru serta organ lain dalam tubuh (Holipah et al., 2020; Pavić et al., 2024).

3.2.5 Analisis Multivariat

Regresi logistik biner, seluruh variabel independen yang telah memenuhi syarat pada uji bivariat ($p\text{-value} < 0,25$) diikutsertakan ke dalam model untuk mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap gangguan fungsi paru setelah dikontrol secara bersamaan. Analisis ini bertujuan untuk menghindari efek perancu (confounding) dan mengetahui hubungan yang paling kuat dari setiap variabel setelah variabel lainnya diperhitungkan secara simultan (Tabel 3).

Variabel	OR	95%CI	P value
Kebiasaan Merokok	4,3	1,22-15,1	0,023

Sumber: Data primer diolah tahun 2026

Berdasarkan Tabel 3, menyajikan hasil analisis regresi logistik multivariat yang mengidentifikasi faktor risiko mempengaruhi gangguan fungsi paru pada siswa. Analisis ini memahami pengaruh masing-masing faktor dengan mengendalikan pengaruh dari variabel lainnya. Analisis dilakukan dalam dua tahap, yaitu bivariat dan multivariat, untuk melihat pengaruh masing-masing variabel secara terpisah maupun setelah dikontrol dengan variabel lain. Hasil analisis bivariat menunjukkan bahwa kebiasaan merokok yang berpengaruh signifikan terhadap gangguan fungsi paru. Selanjutnya hanya variabel yang memenuhi syarat ($p < 0,25$) yang dapat ikut kedalam analisis multivariat, yaitu Konsentrasi PM_{2.5}, Suhu, dan kebiasaan merokok. Hasil analisis multivariat menunjukkan bahwa variabel yang tetap signifikan setelah dimasukkan ke dalam model regresi akhir dan faktor yang paling dominan dalam penelitian ini adalah kebiasaan merokok, di mana siswa yang memiliki kebiasaan merokok memiliki peluang 4,3 kali mengalami gangguan fungsi paru dibandingkan siswa yang tidak memiliki kebiasaan merokok (P-Value = 0,023; OR = 4,3; 95% CI = 1,22-15,1). Dalam model regresi dampak perokok pasif belum sepenuhnya dikontrol. Jika siswa yang dikategorikan "tidak memiliki kebiasaan merokok" ternyata sering terpapar asap rokok pasif, data tersebut bisa mengaburkan hasil analisis (underestimate atau overestimate) karena, asap rokok yang dihirup oleh perokok pasif (baik dari anggota keluarga di rumah maupun orang di lingkungan sosial) terbukti secara klinis dapat memicu inflamasi saluran napas. Maka, perlu untuk menilai bahaya yang lebih akurat membandingkan kapasitas vital paru secara spesifik melalui pemeriksaan klinis (seperti spirometri) di antara tiga kelompok: perokok aktif, perokok pasif, dan siswa yang benar-benar bersih dari paparan asap (kelompok kontrol).

3.2.6 Keterbatasan Penelitian (Study Limitations)

Keterbatasan penelitian ini adalah ada nilai Confidence Interval (CI) yang relatif lebar pada beberapa variabel yang disebabkan oleh ukuran sampel yang terbatas sehingga presisi estimasi menjadi rendah. Penelitian ini dengan desain cross-sectional tidak dapat memastikan hubungan sebab-akibat, dan paparan di luar lingkungan sekolah atau di rumah (seperti perokok pasif di rumah) belum sepenuhnya dikontrol. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan dengan jumlah sampel yang besar dan desain yang lebih kuat untuk melihat sebab-akibat.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis hubungan antara kualitas udara dalam ruang (konsentrasi PM_{2.5}, suhu, kelembaban) dan kebiasaan merokok terhadap gangguan fungsi paru pada 78 siswa MAN 1 Aceh Besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 17,9% siswa mengalami gangguan fungsi paru, dengan 65,4% ruang kelas memiliki konsentrasi PM_{2.5} yang melebihi Nilai Ambang Batas (NAB) 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Secara statistik, konsentrasi PM_{2.5}, suhu, dan kelembaban tidak menunjukkan hubungan yang signifikan terhadap gangguan fungsi paru ($p > 0,05$). Namun demikian, siswa yang berada di ruang kelas dengan PM_{2.5} di atas NAB berisiko 3,8 kali lebih besar mengalami gangguan fungsi paru, dan siswa di ruang dengan suhu tidak normal berisiko 5,4 kali lebih tinggi, yang secara biologis relevan meskipun tidak mencapai signifikansi statistik — kemungkinan akibat keterbatasan ukuran sampel yang menyebabkan type II error. Satu-satunya variabel yang memiliki hubungan bermakna secara statistik adalah kebiasaan merokok ($p = 0,008$; OR = 4,8; 95% CI = 1,4–16,5). Hasil analisis multivariat mengonfirmasi bahwa kebiasaan

merokok merupakan faktor risiko paling dominan terhadap gangguan fungsi paru setelah mengontrol variabel perancu lainnya (OR = 4,3; 95% CI = 1,22–15,1; p = 0,023). Siswa perokok berisiko 4,3 kali lebih tinggi mengalami gangguan fungsi paru dibandingkan siswa yang tidak merokok. Kebiasaan merokok adalah faktor risiko utama yang secara langsung merusak saluran pernapasan, sekaligus berkontribusi pada peningkatan konsentrasi PM_{2.5} dalam ruang dan memperburuk dampak paparan polutan terhadap fungsi paru siswa. Intervensi prioritas yang perlu dilakukan adalah penguatan program pencegahan merokok pada remaja di lingkungan sekolah, disertai upaya pengendalian kualitas udara dalam ruang melalui perbaikan ventilasi, pemantauan PM_{2.5} secara berkala, dan pengaturan kondisi termal ruang kelas agar sesuai standar baku mutu kesehatan lingkungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada FKM UNMUHA dan pihak sekolah MAN 1 Aceh Besar yang sudah memberikan kesempatan dan dukungan untuk melaksanakan penelitian. Penelitian ini juga telah lulus uji etik penelitian yang dilakukan oleh Komite Etik Penelitian Kesehatan PRODI MKM Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Aceh dengan nomor: 19a/EA/KEPK/UNMUHA/X/2025 pada tanggal 01 Oktober 2025.

REFERENCES

- Areal, A. T., Singh, N., Zhao, Q., Berdel, D., Koletzko, S., von Berg, A., Gappa, M., Heinrich, J., Standl, M., & Schikowski, T. (2023). The association of relative humidity and air pollution interaction on lung function in adolescents. *Frontiers in Environmental Health*, 2(2), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fenvh.2023.1250523>
- Buthelezi, M. S. (2024). *ISEE E Short-term , lagged association of airway inflammation , lung function , and asthma symptom score with PM 2 . 5 exposure among schoolchildren within a high air pollution region in South Africa. 0.* <https://doi.org/10.1097/EE9.0000000000000354>
- G A Engwa, C Anye, B. N. Nk. C. (2023). Relationship of indoor particulate matter and lung function in children from the Eastern Cape Province of South Africa.pdf. *South African Journal of Child Health*, 17(2), 63–65.
- Garcia, E., Rice, M. B., & Gold, D. R. (2022). Air pollution and lung function in children. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 148(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2021.05.006>
- Holipah, H., Sulistomo, H. W., & Maharani, A. (2020). Tobacco smoking and risk of all-cause mortality in Indonesia. *PLoS ONE*, 15(12 December), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242558>
- IQAir. (2024). *Kualitas udara dalam ruangan di sekolah adalah masalah serius* (Issue 1).
- IQAIR. (2024). *Kualitas udara di Indonesia.* In <https://www.Iqair.Com/>. <https://www.iqair.com/id/indonesia>
- IQAir AS. (2025). *Particulate Matter 2.5* (Issue 1).
- IQAir Indonesia. (2026). *Kualitas Udara di dekat Kabupaten Aceh Besar.*
- Jeanly Syahputri, Suarga, E. B., Rahman, I., Zahari, T. N., & Ramdani, D. A. (2023). *Dampak Polusi Udara dari Transportasi terhadap Kesehatan di Indonesia.*
- Kemendes RI. (2024). *Bahaya Polusi Udara bagi Kesehatan : Dampak , Penyebab dan Pencegahannya.*
- Kementerian Kesehatan RI. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Kesehatan Lingkungan. In *Kementerian Kesehatan Republik Indonesia* (Issue 55).

- Korukire, N., Godson, A., Mukamurigo, J., Habimana, J. D. D., Josias, I., & Ntakirutimana, T. (2025). *Effects of indoor air pollution exposure on lung function of children in selected schools in Kigali, Rwanda*. 1–12.
- Lee, J., Noh, J. H., Noh, K. C., Kim, Y. W., & Yook, S. J. (2021). Effect of a system air conditioner on local air quality in a four-bed ward. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(5). <https://doi.org/10.4209/aaqr.200533>
- Meo, S. A., Salih, M. A., Alkhalifah, J. M., Alsomali, A. H., & Almushawah, A. A. (2024). Environmental pollutants particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen dioxide (NO₂), Sulfur dioxide (SO₂), and Ozone (O₃) impact on lung functions. *Journal of King Saud University - Science*, 36(7), 103280. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103280>
- Nitschke, M., Appleton, S. L., Li, Q., Tucker, G. R., Shah, P., Bi, P., Pisaniello, D. L., & Adams, R. J. (2016). Lung function reductions associated with motor vehicle density in chronic obstructive pulmonary disease: A cross-sectional study. *Respiratory Research*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12931-016-0451-3>
- Pavić, I., Topalušić, I., Poljičanin, T., Hofmann Jaeger, O., Žaja, S., & Stipić Marković, A. (2024). Secondhand Smoke Exposure and Its Impact on Pediatric Lung Function, Aerobic Fitness, and Body Mass: Evidence from a Cross-Sectional Study. *Children*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/children11101250>
- Petrou, G., Hamada, A., Ashdown, M., Simpson, C., & Davies, M. (2025). Exploring the impact of air conditioning on the indoor air quality of UK homes. *Journal of Physics: Conference Series*, 3140(9), 092012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3140/9/092012>
- Sudarmaji, Ardyan, D., Rohmah, F. A., Arfiani, N. D., & Syaiful, D. A. (2026). Correlation Between Physical and Chemical Indoor Air Quality With Respiratory Health. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 18(2), 171–178. <https://doi.org/10.20473/jkl.v18i2.2026.171-178>
- Suryadinata, R. V., & Lorensia, A. (2023). Studi Risiko Gangguan Fungsi Paru Terhadap Perokok Di Kalangan Remaja (Study Risk of Lung Function Disorders Smokers in Adolescents). *Indonesian Journal of ...*, 4(1), 1–5. http://repository.ubaya.ac.id/44595/%0Ahttp://repository.ubaya.ac.id/44595/1/RivanVirlando_STUDI_RISIKO_GANGGUAN_FUNGSI_PARU.pdf
- Takebayashi, T., Taguri, M., Odajima, H., Hasegawa, S., Asakura, K., Milojevic, A., Takeuchi, A., Konno, S., Morikawa, M., Tsukahara, T., Ueda, K., Mukai, Y., Minami, M., Nishiwaki, Y., Yoshimura, T., Nishimura, M., & Nitta, H. (2022). Exposure to PM_{2.5} and Lung Function Growth in Pre- and Early-Adolescent Schoolchildren: A Longitudinal Study Involving Repeated Lung Function Measurements in Japan. *Annals of the American Thoracic Society*, 19(5), 763–772. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.202104-511OC>
- US EPA. (2025a). *Indoor Air Quality and Changing Outdoor Environments | US EPA*. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-quality-and-changing-outdoor-environments>
- US EPA. (2025b). *Introduction to Indoor Air Quality | US EPA*. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality#health>
- US EPA. (2026). *Improving Indoor Air Quality Información*.
- Vildania, N., Sabri, Y. S., & Ermayanti, S. (2025). HUBUNGAN DERAJAT MEROKOK TERHADAP PENURUNAN FUNGSI PARU : SEBUAH KAJIAN LITERATUR Nisrina. *Jurnal Riset Ilmiah*, 2(2), 676–690.
- World Health Organization. (2025a). *Health risks of air pollution in Europe : HRAPIE-2 project*. WHO European Centre for Environment and Health Platz.
- World Health Organization. (2025b). *WHO strategic approach on air quality, energy access and health 1*. WHO Geneva, Switzerland.
- World Health Organization (WHO). (2021). WHO global air quality guidelines. In *WHO European Centre for Environment and Health Platz*. WHO European Centre for Environment and Health Platz.

- World Health Organization (WHO). (2026). *Air quality indexes*. WHO European Centre for Environment and Health. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-quality-and-changing-outdoor-environments>
- Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., & Lian, Y. X. (2016). The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E69–E74. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19>
- Xu, D., Chen, Y., Wu, L., He, S., Xu, P., Zhang, Y., Luo, J., Ye, X., Chen, Z., Wang, X., & Lou, X. (2020). Acute effects of ambient PM_{2.5} on lung function among schoolchildren. *Scientific Reports*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61003-4>
- Yan, Y. X., Bo, W. E. N., Feng, H. A. N., Chong, W., & Ping, Z. S. (2020). Particulate Matter on Pulmonary Function in Schoolchildren. *Biomedical and Environmental Sciences*, 33(9), 647–659. <https://doi.org/10.3967/bes2020.086>
- Zhang, W., Ma, R., Wang, Y., Jiang, N., Zhang, Y., & Li, T. (2022). The relationship between particulate matter and lung function of children: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 309(7), 119735. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119735>