

## KUALITAS UDARA DALAM RUANGAN SEKOLAH (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub>, DAN HCHO) DAN RISIKO KESEHATAN PADA SISWA DI KOTA SERANG

Sicha Andriani Alimin<sup>1</sup>, Nova Wahyuni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitas Banten Jaya, Jl Syech Nawawi Albantani Serang, Banten, Indonesia  
Email: siscaandriani@unbaja.ac.id

### ABSTRACT

*The indoor environment represents an important micro environment for students who spend 6-8 hours in a school room and are susceptible to air pollution. Several respiratory diseases in this group are related to poor air quality. This research aims to provide an overview of air quality in the school environment and assess health risks to students. The research measures air quality (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub>, and HCHO) in three Elementary Schools and then followed by health risk assessment. This research found that the indoor PM<sub>2.5</sub> concentration (A 0.113 mg/m<sup>3</sup>; B 0.119 mg/m<sup>3</sup>; C 0.056 mg/m<sup>3</sup>) and indoor PM<sub>10</sub> concentration (A 0.188 mg/m<sup>3</sup>; B 0.071 mg/m<sup>3</sup>; C 0.229 mg/m<sup>3</sup>) exceeded the standard value in all schools with health risks (HQ > 1) for PM<sub>2.5</sub> in all schools and PM<sub>10</sub> in two schools. Whereas carbon dioxide and formaldehyde concentrations were still safe and did not provide health risks (HQ < 1). The scenario for managing the health risk of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> exposure was to control the exposure concentration at a safe threshold of PM<sub>2.5</sub> 0.035 mg/m<sup>3</sup>; 0.043 mg/m<sup>3</sup> and PM<sub>10</sub> 0.144 mg/m<sup>3</sup> for most of the population at normal school time. It was concluded that the air quality of all elementary schools in this research did not meet the standard value set and was estimated to provide health impact on students so that the control of health risks was required.*

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, Carbon Dioxide, Formaldehyde, School

### ABSTRAK

Lingkungan dalam ruangan merupakan lingkungan mikro yang penting bagi siswa yang menghabiskan 6-8 jam di ruang sekolah dan rentan terhadap polusi udara. Beberapa penyakit pernapasan dalam kelompok ini terkait dengan kualitas udara yang buruk. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran kualitas udara di lingkungan sekolah dan menilai risiko kesehatan pada siswa. Penelitian mengukur kualitas udara (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub>, dan HCHO) di tiga SD kemudian dilanjutkan dengan penilaian risiko kesehatan. Penelitian ini menemukan bahwa konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dalam ruangan (A 0,113 mg/m<sup>3</sup>; B 0,119 mg/m<sup>3</sup>; C 0,056 mg/m<sup>3</sup>) dan konsentrasi PM<sub>10</sub> dalam ruangan (A 0,188 mg/m<sup>3</sup>; B 0,071 mg/m<sup>3</sup>; C 0,229 mg/m<sup>3</sup>) melebihi nilai standar di semua sekolah dengan risiko kesehatan (HQ > 1) untuk PM<sub>2.5</sub> di semua sekolah dan PM<sub>10</sub> di dua sekolah. Sedangkan konsentrasi karbon dioksida dan formaldehida masih aman dan tidak memberikan risiko kesehatan (HQ < 1). Skenario pengelolaan risiko kesehatan dari paparan PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> adalah dengan mengontrol konsentrasi paparan pada ambang batas aman PM<sub>2.5</sub> 0,035 mg/m<sup>3</sup>; 0,043 mg/m<sup>3</sup> dan PM<sub>10</sub> 0,144 mg/m<sup>3</sup> untuk sebagian besar penduduk pada waktu sekolah normal. Disimpulkan bahwa kualitas udara seluruh SD dalam penelitian ini belum memenuhi standar nilai yang ditetapkan dan diperkirakan memberikan dampak kesehatan pada siswa sehingga diperlukan pengendalian risiko kesehatan.

**Kata Kunci:** PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, Karbon Dioksida, Formaldehida, Sekolah

### INTRODUCTION

Lingkungan dalam ruangan merupakan lingkungan mikro yang penting karena saat ini manusia menghabiskan sebagian besar waktunya (sekitar 80-90%) di dalam ruangan setiap

hari. Beberapa penelitian melaporkan bahwa polusi udara 2 - 3 kali lebih tinggi dibandingkan dengan di luar ruangan. Oleh karena itu, paparan polutan udara dalam ruangan (yang berasal dari luar dan dalam ruangan) berkontribusi lebih besar daripada paparan polutan luar ruangan kepada penduduk (Leung, 2015; WHO, 2013). Polutan udara dalam ruangan berasal dari berbagai sumber seperti pembakaran bahan bakar, asap rokok, polutan udara luar ruangan, bahan bangunan dan furnitur, serta ventilasi dan fasilitas pendingin udara yang tidak memadai (WHO, 2006). Ruang kelas di sekolah memiliki karakteristik yang unik seperti kepadatan yang lebih tinggi dari ruang kantor, keragaman aktivitas siswa, dan berbagai sistem ventilasi yang mempengaruhi kualitas udara dalam ruangan (U.S. EPA, 2005). Polutan udara dalam ruangan yang menjadi fokus penelitian ini adalah PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan formaldehida (HCHO). Paparan partikulat (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), karbon dioksida, dan formaldehid yang terhirup dikaitkan dengan gejala penyakit pernapasan seperti asma, mengi, bronkitis, dan infeksi saluran pernapasan bagian bawah (Pražnikar & Pražnikar, 2012; Xing, Xu, Shi, & Lian, 2016). Selain itu, partikulat juga dilaporkan mempengaruhi perkembangan paru-paru pada anak-anak sementara konsentrasi karbon dioksida yang tinggi dikaitkan dengan kantuk, lesu, fug dan bahkan penurunan kemampuan belajar (Gauderman et al., 2002; Mahyuddin, Awbi, & Alshitawi, 2008; Shaughnessy, Nevalainen & Moschandreas, 2005). Formaldehida bekerja sebagai karsinogen bagi manusia sebagaimana dibuktikan dalam penelitian pada hewan. Selain itu, paparan formaldehida akut dan kronis terkait dengan efek kesehatan non-kanker seperti iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan (ATSDR, 2010; U.S. EPA, 1989).

Secara khusus, siswa sekolah menghabiskan sekitar 30% dari waktu mereka di kelas (Annesi-Maesano et al., 2013; Zwoździak, Sówka, Worobiec, Zwoździak, & Nych, 2015). Kelompok usia ini tergolong rentan terhadap polusi udara dalam dan luar ruangan karena frekuensi pernafasan yang lebih tinggi, aktivitas fisik yang lebih tinggi, dan perkembangan sistem pernafasan terkait dengan penyakit pernafasan yang umum pada kelompok ini ditemukan terkait dengan kualitas air di dalam kelas. (Alves, Nunes, Silva & Duarte, 2013; Madureira et al., 2015; Mohamad, Latif, & Khan, 2016; Rovelli et al., 2014). Kesehatan siswa penting dalam prestasi belajar sehingga pemerintah Indonesia menjalankan program usaha kesehatan sekolah namun kualitas udara belum menjadi perhatian dalam program ini. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran kualitas udara di lingkungan sekolah dan menilai risiko kesehatan pada siswa sehingga dapat mendukung pembangunan kesehatan sekolah.

## METHOD

Pengukuran parameter kualitas udara ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $CO_2$ , dan HCHO) dilakukan pada bulan Mei 2021 dengan alat yang berbeda yaitu DustTrak™ II Aerosol Monitor 8532 ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ), TSI Q-Trak™ Indoor Air Quality Monitor 8532 ( $CO_2$ , suhu, kelembaban), dan Demeter Formal HtV (HCHO). Lokasi pengukuran kualitas udara dilakukan di sepuluh ruang kelas dan tiga lapangan dari tiga SD yang berada di kecamatan dengan karakteristik lingkungan yang berbeda yaitu Cipocok Jaya (sekolah A), Penancangan (sekolah B), dan Taktakan (sekolah C). Sekolah A berada di pinggir jalan raya dan dikelilingi oleh kompleks perkantoran dan perumahan. Sekolah B berada di tengah-tengah pemukiman penduduk. Sedangkan sekolah C terletak di pusat kota dekat jalan raya utama.

Pengukuran dilakukan pada jam sekolah dengan masing-masing parameter diukur selama satu jam per titik (ruang kelas dan lapangan) kecuali formaldehida yang hanya diukur selama 30 menit per titik kelas. Luas lantai dan ventilasi ruang kelas juga diukur menggunakan pita pengukur. Pengukuran  $PM_{2.5}$  dan  $PM_{10}$  tidak dilakukan secara bersamaan karena keterbatasan alat yang tersedia. Pengukuran kualitas udara dalam dan luar ruangan tidak dilakukan bersamaan karena keterbatasan alat yang tersedia.

Dari ketiga sekolah tersebut dilakukan survei terhadap 357 siswa kelas 6 untuk mendapatkan data berat badan, tinggi badan, dan pola aktivitas yang menggambarkan populasi siswa SD di Serang. Pengukuran berat badan dan tinggi badan menggunakan timbangan digital dan *microtoise*, sedangkan data pola aktivitas dikumpulkan melalui angket yang diisi langsung oleh siswa.

Data kualitas udara, antropometri, dan pola aktivitas dianalisis secara deskriptif untuk menentukan mean, median, dan distribusi normal data menggunakan perangkat lunak analisis statistik. Ukuran median yang digunakan berupa mean atau median berdasarkan sebaran data. Selanjutnya, uji Mann Whitney non parametrik digunakan untuk membandingkan kualitas udara di dalam dan di luar kelas karena tidak semua data berdistribusi normal meskipun data telah ditransformasi. Uji korelasi dilakukan terhadap rerata konsentrasi  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , dan  $CO_2$  dalam ruangan dan persentase luas ventilasi untuk ukuran kelas masing-masing sekolah.

Penilaian risiko kuantitatif dilakukan dengan mengacu pada *Risk Assessment and Management Handbook* 1996. Data kualitas udara kelas, data antropometrik, dan data aktivitas siswa digunakan untuk memperkirakan asupan harian  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , karbon dioksida, dan formaldehida (Dewan Riset Nasional, 1983; US-EPA, 2014). Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$CDI \text{ or } LADD = \frac{C \times R \times t_E \times f_E \times D_E}{W_b \times t_{avg}}$$

Perhitungan asupan harian non-karsinogenik dan karsinogenik (CDI atau LADD, mg/kg/hari) menggunakan konsentrasi polutan rata-rata atau median (C, mg/m<sup>3</sup>) tergantung pada distribusi data. Untuk asupan harian karbon dioksida dan formaldehida, nilai konsentrasi ppm diubah menjadi mg/m<sup>3</sup> dengan persamaan gas ideal pada suhu terukur. Sedangkan laju inhalasi (R) menggunakan nilai laju inhalasi usia 11-16 tahun yaitu 15,7 m<sup>3</sup>/hari (US EPA, 2011). SD di kota Serang menerapkan waktu sekolah (t<sub>E</sub>, jam/hari) 6 jam/hari, 5 hari/minggu. Berdasarkan kalender akademik 2020/2021 yang ditetapkan oleh Dinas Pendidikan Provinsi Banten diperoleh 218 hari/tahun hari sekolah termasuk hari ujian yang kemudian dikurangi dengan rata-rata hari ketidakhadiran sesuai survei pola aktivitas siswa sehingga frekuensi paparan (f<sub>E</sub>, hari/tahun) diperoleh. Selain itu, siswa juga melakukan kegiatan ekstrakurikuler setelah jam sekolah normal 6 sehingga perhitungan asupan harian juga dilakukan berdasarkan rata-rata waktu dan frekuensi kegiatan ekstrakurikuler di dalam kelas. Durasi paparan (D<sub>E</sub>) berdasarkan wajib belajar sekolah menengah pertama selama 3 tahun. Selanjutnya dibagi dengan nilai berat badan siswa (W<sub>b</sub>, kg) dan rata-rata lama paparan karsinogenik harian (D<sub>E</sub> x 365 hari/tahun). Oleh karena itu, nilai asupan harian adalah jumlah asupan harian normal (CDI<sub>n</sub> atau LADD<sub>n</sub>) dan asupan harian tambahan (CDI<sub>t</sub> atau LADD<sub>t</sub>). Nilai asupan harian akan digunakan untuk menghitung tingkat risiko paparan non-karsinogenik (HQ) dan karsinogenik (ECR) dengan rumus sebagai berikut:

Risiko non-karsinogenik:

$$HQ = \frac{CDI}{RfC}$$

Risiko karsinogenik::

$$ECR = LADD \times IUR$$

Perhitungan tingkat risiko (HQ) dampak kesehatan non-karsinogenik melalui jalur inhalasi dilakukan pada paparan PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, karbon dioksida, dan formaldehida dengan membandingkan asupan harian dengan nilai perkiraan paparan yang tidak memberikan dampak kesehatan. Untuk jalur inhalasi, nilai ini disebut konsentrasi referensi (R<sub>fc</sub>), yang dapat diperoleh dari NOAEL, LOAEL, atau konsentrasi patokan bersama dengan faktor ketidakpastian. Nilai R<sub>fc</sub> untuk PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, karbon dioksida dan formaldehida tidak tersedia

dalam daftar IRIS. Para peneliti menggunakan nilai pedoman tahunan yang diturunkan berdasarkan nilai default faktor paparan untuk individu dewasa yang direkomendasikan oleh US EPA pada tahun 2014, dan Buku Pegangan Faktor Eksposur 2001 untuk mendapatkan referensi yang aman untuk asupan harian. Nilai pedoman yang digunakan adalah nilai pedoman tahunan  $PM_{2.5}$  (pedoman utama  $0,012 \text{ mg/m}^3$ , sekunder  $0,015 \text{ mg/m}^3$ ) dan  $PM_{10}$  ( $0,5 \text{ mg/m}^3$ ) berdasarkan *National Ambient Air Quality Guidelines* (NAAQS) US EPA tahun 1997 dan 2012, karbon dioksida (1.000 ppm) dari *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) *Guideline 62,1-2016* rekomendasi, dan 30 menit nilai pedoman formaldehida (0,08 ppm) berdasarkan WHO tahun 2010. Nilai referensi Asupan aman yang digunakan adalah  $PM_{2.5}$   $0,002 \text{ mg/kg/hari}$  dan  $0,003 \text{ mg/kg/hari}$ ,  $PM_{10}$   $0,009 \text{ mg/kg/hari}$ , karbondioksida  $338,51 \text{ mg/kg/hari}$ , dan formaldehid  $0,019 \text{ mg/kg/hari}$ . Sedangkan untuk paparan karsinogenik formaldehida, nilai Inhalation Unit Risk (IUR) adalah  $1,3 \times 10^{-8} \text{ mg/m}^3$  (U.S. EPA, 1989).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Results

Ketiga sekolah tersebut memiliki karakteristik seperti terlihat pada tabel 1 dengan persentase ventilasi ruang kelas tertinggi (% V/C) di sekolah C. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 1077/2011 tentang Pedoman Sanitasi Udara Dalam Rumah (Permenkes RI No. 1077/2011), persentase pembukaan ventilasi pada luas ruangan minimal 20%.

**Tabel 1.** Karakteristik Sekolah dan Ruang Kelas

Sekolah	Mean V/C (%)	Permenkes No. 1077/2011	Karakteristik Lingkungan	Classroom Equipment
A	14.39	20%	Di sisi jalan raya, kombinasi area perkantoran dan perumahan. Lantai dan lapangan yang disemen, dengan beberapa halaman yang tidak disemen.	Kipas angin, meja kayu, kursi kayu, papan tulis, dan spidol.
B	14.50		Di tengah pemukiman penduduk. Lantai dan lapangan disemen dan halaman beraspal.	Kipas angin, meja kayu, kursi kayu, papan tulis, dan spidol.
C	29.65		Di pinggir jalan raya utama, kawasan bisnis di pusat kota. Lantai dan halaman yang disemen.	Kipas angin, meja kayu, kursi kayu, papan tulis, dan spidol. Satu kelas dengan karpet.

Hasil pengukuran kualitas udara pada tabel 2 menunjukkan konsentrasi paparan di masing-masing sekolah. Nilai PM<sub>2.5</sub> tertinggi berada di sekolah B dengan median 0,119 mg/m<sup>3</sup> untuk udara dalam ruangan dan rata-rata 0,144 mg/m<sup>3</sup> untuk udara luar. Terendah berada di sekolah C dengan median 0,056 mg/m<sup>3</sup> untuk udara dalam ruangan. Sedangkan PM<sub>10</sub> dalam dan luar ruangan ditemukan paling tinggi di sekolah C dengan rata-rata 0,229 mg/m<sup>3</sup> dan median masing-masing 0,218 mg/m<sup>3</sup>. Konsentrasi terendah PM<sub>10</sub> dalam ruangan diukur di sekolah B dengan median 0,071 mg/m<sup>3</sup> dan luar ruangan di sekolah A dengan rata-rata 0,065 mg/m<sup>3</sup>. Nilai konsentrasi karbon dioksida tertinggi dalam dan luar ruangan ditemukan di sekolah B (556 ppm dalam ruangan, 270 ppm di luar ruangan) diikuti oleh A dan C. Kecenderungan pusat formaldehida secara substansial sama antara ketiga sekolah. Nilai formaldehida tertinggi 0,025 ppm terdapat di sekolah C. Nilai rerata suhu ruangan di sekolah A (30,67<sup>0</sup>C) sedikit lebih tinggi dari sekolah B, dan C. Sedangkan nilai rerata kelembaban dalam ruangan di sekolah B (73,09%). Rh). Pada tabel 2, kami membandingkan parameter terukur terhadap beberapa pedoman yaitu *National Ambient Air Quality Guidelines* (NAAQS) US EPA, pedoman kualitas udara WHO, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.41/1999 tentang Pengelolaan Lingkungan (PP No.41/1999), Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 1077/2011 tentang Pedoman Sanitasi Udara Dalam Rumah (Permenkes RI No. 1077/2011).

**Tabel 2.** Kualitas Udara Dalam Ruangan Sekolah A, B dan C

Parameter & Lokasi	Sekolah A		Sekolah B		Sekolah C		Guideline	
	Mean/ Media n	Min – Max	Mean/ Media n	Min – Max	Mean/ Media n	Min – Max	<sup>1</sup> NAAQ S U.S. EPA 1997, <sup>2</sup> NAAQ S U.S. EPA 2012, <sup>3</sup> WHO, 2010	<sup>4</sup> Peratur an Pemerin tah No.41/19 99, <sup>5</sup> Perme nkes RI No. 1077/201 1
<b>Temperatur (°C)</b>								
Dalam Ruang	30.76	28.30 - 32.60	29.54	26.90- 31.60	29.98	28.80 - 30.90		<sup>5</sup> 18-30
Luar Ruang	37.03	33.50 - 38.80	33.60	32.40 - 34.10	36.60	33.30 - 37.80		
<b>Kelembaban (% Rh)</b>								
Dalam Ruang	68.83	57.80 - 82.70	73.09	61.90 - 84.90	69.31	61.60 - 79.00		<sup>5</sup> 40-60
Luar Ruang	38.60	33.00 - 55.00	52.71	49.50 - 55.40	44.50	41.20 - 58.10		

Parameter & Lokasi	Sekolah A		Sekolah B		Sekolah C		Guideline	
	Mean/ Media n	Min – Max	Mean/ Media n	Min – Max	Mean/ Media n	Min – Max	<sup>1)</sup> NAAQ S U.S. EPA 1997, <sup>2)</sup> NAAQ S U.S. EPA 2012, <sup>3)</sup> WHO, 2010	<sup>4)</sup> Peratur an Pemerin tah No.41/19 99, <sup>5)</sup> Perme nkes RI No. 1077/201 1
<b>PM<sub>2.5</sub> (mg/m<sup>3</sup>)</b>								
Dalam Ruang	0.113	0.081 - 0.143	0.119	0.078 - 0.390	0.056	0.033 - 0.124		<sup>5)</sup> 0.035, 24 hours
Luar Ruang	0.053	0.048 - 0.057	0.144	0.120 - 0.173	0.057	0.041 - 0.084	<sup>1)</sup> 0.012 - 0.015, 1 year <sup>1)</sup> 0.035, 24 hours	<sup>4)</sup> 0.065, 24 hour <sup>4)</sup> 0.015, 1 year
<b>PM<sub>10</sub> (mg/m<sup>3</sup>)</b>								
Dalam Ruang	0.188	0.103 - 0.558	0.071	0.052 - 0.203	0.229	0.131 - 0.334		<sup>5)</sup> 0.70, 24 hours
Luar Ruang	0.065	0.059 - 0.070	0.087	0.066 - 0.162	0.218	0.194 - 0.271	<sup>1)</sup> 0.15, 24 hours <sup>2)</sup> 0.05, 1 year	<sup>4)</sup> 0.15, 24 hours
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>								
Dalam Ruang	408.7	297.0 - 660.0	572.4	279.0 - 878.0	368.0	315.0 - 1000		<sup>5)</sup> 1000, 8 hours
Luar Ruang	250.8	232.0 - 293.0	268.0	261.0 - 302.0	250.0	240.0 - 1231		
<b>CO (ppm)</b>								
Dalam Ruang	0.000	0.000 - 1.100	0.000	0.000 - 1.800	0.000	0.000 - 0.500		<sup>5)</sup> 9.00, 8 hours
Luar Ruang					0.000	0.000 - 2.800	<sup>1)</sup> 35, 1 hour	<sup>4)</sup> 25, 1 hour
<b>Formaldehyde (ppm)</b>								
Dalam Ruang	0.020	0.010 - 0.060	0.020	0.010 - 0.050	0.025	0.010 - 0.070		<sup>3)</sup> 0.08, 30 minutes

Pengukuran kualitas udara *indoor* dan *outdoor* dilakukan pada jam yang berbeda tetapi pada hari yang sama, sehingga diasumsikan mewakili kualitas udara outdoor sepanjang pengukuran pada hari yang sama. Nilai I/O ratio > 1 pada tabel 3 menunjukkan bahwa parameter tertentu ditemukan lebih tinggi pada indoor. Nilai rasio konsentrasi PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, dan CO<sub>2</sub> dalam ruangan terhadap luar ruangan ditemukan lebih dari satu di sekolah A (I/O PM<sub>2.5</sub> 2,13; PM<sub>10</sub> 2,89; CO<sub>2</sub> 1,64) dan secara statistik dan signifikan berbeda. Rasio konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> dalam ruangan terhadap luar ruangan di sekolah B dan C tidak lebih dari satu, tidak secara statistik dan signifikan untuk sekolah C. Sedangkan nilai rasio karbon dioksida dalam

ruangan terhadap luar ruangan di semua sekolah lebih dari satu dan berbeda secara statistik dan signifikan.

Table 3. Ratio Kualitas Udara Indoor dan Outdoor

Parameter	Sekolah A		Sekolah B		Sekolah C	
	I/O	p value	I/O	p value	I/O	p value
PM <sub>2.5</sub>	2.13	0.000	0.83	0.001	0.98	0.593
PM <sub>10</sub>	2.89	0.000	0.82	0.000	1.05	0.089
CO <sub>2</sub>	1.63	0.000	2.14	0.000	1.47	0.000

### Penilaian Risiko Kesehatan Non-Karsinogenik dan Karsinogenik

Penilaian risiko dilakukan selama tiga tahun akademik paparan siswa sekolah menengah pertama sehingga perhitungan nilai asupan harian berdasarkan data antropometrik dan pola aktivitas kelompok masing-masing. Asupan harian (CDI atau LADD) dihitung dengan menjumlahkan asupan harian normal (CDIn atau LADDn) dan asupan harian tambahan (CDIe atau LADDe), seperti yang ditunjukkan pada tabel 4. Asupan harian normal menggambarkan asupan selama jam sekolah normal sementara asupan harian tambahan menggambarkan asupan selama kegiatan ekstrakurikuler setelah jam sekolah normal. Asupan harian normal dan tambahan menggunakan data antropometri berdasarkan hasil survey terhadap 357 siswa sebagai responden terdiri dari 157 laki-laki (44%) dan 200 perempuan (56%) dengan median berat badan 46 kg, usia 10-17 tahun dari kelas 6 SD. Laju inhalasi siswa menurut Exposure Factors Handbook 2001 untuk usia 11-16 tahun adalah 15,7 m<sup>3</sup>/hari.

Tabel 4. Asupan Harian Paparan Non-Karsinogenik dan Karsinogenik selama 3 Tahun

Efek & Eksposur	Sumber		
	Sekolah A	Sekolah B	Sekolah C
<b>Non-carcinogenic</b>			
PM <sub>2.5</sub>	0.006	0.006	0.003
PM <sub>10</sub>	0.010	0.004	0.012
CO <sub>2</sub>	0.011	0.004	0.013
Formaldehyde	3.705E+01	5.056E+01	3.345E+01
<b>Carcinogenic</b>			
Formaldehyde	1.175E-03	1.242E-03	1.736E-03

Berdasarkan survei, median hari ketidakhadiran adalah 2 hari/tahun yang mengurangi jumlah hari sekolah normal (218 hari/tahun), sehingga frekuensi paparan (fEn) adalah 216 hari. Durasi paparan (DE) adalah 3 tahun sesuai dengan masa akademik sekolah menengah pertama. Kegiatan ekstrakurikuler di kelas membutuhkan median 0,75 jam/hari (tEe), 1 hari/minggu.

Diasumsikan siswa melakukan kegiatan selama 30 minggu/tahun di luar minggu ujian sehingga dapat memperoleh kegiatan ekstrakurikuler (fEt) selama 30 hari/tahun..

**Tabel 5.** Risiko Paparan Non-Karsinogenik dan Karsinogenik

Efek & Eksposur	Rfc/ IUR	HQ		
		Sekolah A	Sekolah B	Sekolah C
<b>Non-carcinogenic</b>				
PM <sub>2.5</sub> <sup>(1)</sup>	0.002	2.57	2.71	1.27
PM <sub>2.5</sub> <sup>(2)</sup>	0.003	2.06	2.17	1.02
PM <sub>10</sub>	0.009	1.03	0.39	1.25
CO <sub>2</sub>	338.51	1.17	0.41	1.25
Formaldehyde	3.39E+02	1.11E-01	1.49E-01	9.88E-02
<b>Carcinogenic</b>				
Formaldehyde	1.30E-08	6.89E-13	6.92E-13	8.64E-13

Perhitungan kesehatan risiko nonkarsinogenik PM<sub>2.5</sub> adalah HQ > 1 di ketiga sekolah, dan PM<sub>10</sub> adalah HQ > 1 di dua sekolah, sehingga paparan partikulat diperkirakan berdampak kesehatan pada siswa SD (Tabel 5). Manajemen risiko kemudian dilakukan dengan menetapkan nilai ambang batas aman (Tabel 6).

**Tabel 6.** Ambang Aman Paparan PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>

Ekposur (mg/ m <sup>3</sup> )	Karakteristik			
	Kegiatan Belajar Biasa		Kegiatan Belajar Normal & Tambahan	
	Wb = 46 kg	Wb = 35.5 kg <sup>3)</sup>	Wb = 46 kg	Wb = 35.5 kg <sup>3)</sup>
PM <sub>2.5</sub> <sup>1)</sup>	0.045	0.035	0.044	0.034
PM <sub>2.5</sub> <sup>2)</sup>	0.056	0.043	0.055	0.042
PM <sub>10</sub>	0.186	0.144	0.183	0.141

## Discussion

Pola partikulat di antara ketiga sekolah berbeda yang mungkin terkait dengan karakteristik lingkungan sekolah masing-masing. Sekolah A memiliki konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dalam ruangan yang lebih rendah daripada sekolah B dan PM<sub>10</sub> dalam ruangan daripada sekolah C tetapi dengan konsentrasi partikel luar ruangan yang paling rendah di antara semua sekolah. Rendahnya partikulat outdoor kemungkinan disebabkan oleh hujan yang terjadi sehari sebelum pengukuran di sekolah A, sehingga diharapkan hujan tersebut melarutkan sebagian besar partikulat outdoor namun tidak banyak mempengaruhi udara indoor. Penelitian ini tidak

mencatat kondisi meteorologi tetapi beberapa penelitian melaporkan bahwa kondisi meteorologi seperti angin dan hujan dapat mengurangi konsentrasi partikulat (Rovelli et al., 2014; Wang & Ogawa, 2015). Dengan mempertimbangkan karakteristik lingkungan sekolah A, partikulat dapat bersumber dari lalu lintas, bukan halaman sekolah yang disemen, atau partikulat yang menempel pada siswa (Chuersuwan et al., 2008; Mohamad et al., 2016). Partikulat mungkin terperangkap di dalam kelas, tidak banyak terpengaruh oleh hujan pada hari sebelumnya. Akibatnya, sekolah A memiliki rasio I/O tertinggi untuk kedua partikel di antara semua sekolah. Konsentrasi  $PM_{2.5}$  dan  $PM_{10}$  di sekolah A melebihi pedoman 24 jam dan tahunan NAAQS US EPA, PP RI No. 41/1999, dan Permenkes RI No. 1077/2011.

Sedangkan pengukuran konsentrasi  $PM_{2.5}$  di sekolah B yang terletak di kawasan pemukiman menunjukkan  $PM_{2.5}$  *indoor dan outdoor* tinggi. Sedangkan  $PM_{10}$  lebih rendah dari  $PM_{2.5}$  dan paling rendah dibandingkan dengan sekolah A dan C yang terletak dekat dengan lalu lintas. Pembakaran dan pemasakan biomassa merupakan sumber utama pencemar  $PM_{2.5}$  di kawasan pemukiman. Menurut penelitian Alves et al., partikel tanah dari halaman yang tidak disemen di sekitar sekolah menyebabkan tingginya konsentrasi  $PM_{2.5}$  dalam ruangan di sekolah yang terletak di daerah tempat tinggal (Alves et al., 2013). Konsentrasi  $PM_{2.5}$  dan  $PM_{10}$  di sekolah B melebihi pedoman nilai 24 jam dan tahunan NAAQS US EPA, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia 41/1999, dan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/2011.

Serupa dengan sekolah A, pengukuran di sekolah C dilakukan setelah hari hujan tetapi dengan hasil yang berbeda. Hujan diperkirakan melarutkan  $PM_{2.5}$  sehingga terukur serendah di sekolah A namun masih menyisakan  $PM_{10}$  cukup tinggi. Material partikulat tinggi dapat bersumber dari lalu lintas padat karena sekolah C berada di tepi jalan raya utama di pusat kota. Aktivitas lalu lintas menjadi salah satu sumber  $PM_{10}$  *indoor dan outdoor* akibat pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor (Chuersuwan et al., 2008). Sebuah penelitian tentang  $PM_{10}$  dalam ruangan melaporkan bahwa debu jalan raya merupakan komponen utama dan terkait dengan tingginya tingkat  $PM_{10}$  dalam ruangan (Mohamad et al., 2016). Komponen kimia  $PM_{10}$  dapat dianalisis lebih lanjut sehingga dapat menunjukkan sumber  $PM_{10}$  *indoor dan outdoor* (Madureira et al., 2016; Mohamad et al., 2016). Konsentrasi  $PM_{2.5}$  dan  $PM_{10}$  di sekolah C melebihi pedoman 24 jam dan tahunan NAAQS U.S. EPA, PP RI No. 41/1999, dan Permenkes RI No. 1077/2011.

Semua ukuran konsentrasi nilai median karbon dioksida indoor dan outdoor di semua sekolah tidak melebihi pedoman Permenkes RI No. 1077/2011 dan Pedoman ASHRAE 62.1-

2016. Tingkat konsentrasi karbon dioksida sekolah A dan B lebih tinggi dari sekolah C. Tingginya kadar karbon dioksida di dalam ruangan dinilai karena faktor ventilasi. Rata-rata V/C % sekolah A dan B berada di bawah nilai pedoman 20% menurut Permenkes RI No. 1077/2011 sehingga menjadi faktor risiko kualitas udara yang buruk. Konsentrasi karbon dioksida dalam ruangan berkaitan dengan beberapa faktor, antara lain aktivitas penghuni, kepadatan ruangan, dan lama hunian. Selain itu, ukuran, jumlah, posisi dan jenis ventilasi mempengaruhi konsentrasi karbon dioksida di udara kelas menggunakan ventilasi alami (Griffiths & Eftekhari, 2008; Krawczyk, Rodero, Gładyszewska-Fiedoruk, & Gajewski, 2016). Sedangkan konsentrasi formalin selama 30 menit di semua sekolah tidak melebihi nilai pedoman Permenkes RI No. 1077/2011. Formaldehida di dalam ruang kelas dapat bersumber dari spidol, furniture meja dan kursi kayu, atau cat tembok yang diamati pada saat pengukuran.

### **Penilaian Risiko Kesehatan Non-Karsinogenik dan Karsinogenik**

Penelitian ini memperkirakan bahwa paparan  $PM_{2.5}$  di kelas menyebabkan masalah kesehatan pada siswa. Paparan  $PM_{2.5}$  dinilai lebih berbahaya bagi kesehatan dibandingkan  $PM_{10}$  karena ukurannya yang aerodinamis sehingga memungkinkan masuk ke paru-paru. Pedoman  $PM_{2.5}$  tahunan adalah  $0,012 \text{ mg/m}^3$  dan  $0,015 \text{ mg/m}^3$  berdasarkan EPA AS untuk perlindungan berkelanjutan dari efek kesehatan yang terkait dengan paparan jangka panjang termasuk kematian dini dan perkembangan penyakit pernapasan kronis. Paparan  $PM_{2.5}$  dianggap sebagai faktor risiko yang lebih berbahaya daripada  $PM_{10}$  karena ukuran partikel yang lebih kecil yang masuk ke paru-paru dan mengandung lebih banyak bahan beracun. Pada anak-anak, paparan  $PM_{2.5}$  jangka pendek dan jangka panjang dikaitkan dengan sejumlah efek kesehatan pernapasan seperti penurunan perkembangan, perkembangan penyakit pernapasan kronis, seperti asma, peningkatan kunjungan ke rumah sakit, dan keadaan darurat untuk efek pernapasan, seperti serangan asma. , peningkatan kasus batuk, mengi dan sesak napas; dan penurunan fungsi paru, terutama pada anak dengan penyakit paru seperti asma (U.S. EPA, 2012; WHO, 2003). Dilaporkan bahwa hari tidak hadirnya anak dengan asma berhubungan dengan peningkatan  $PM_{2.5}$ . Bahkan, anak-anak dengan fungsi paru-paru yang baik juga rentan terhadap asma sesuai dengan peningkatan  $PM_{2.5}$  (Anderson, Thundiyil, & Stolbach, 2012; Gauderman et al., 2002). Penelitian Pope et.al pada tahun 2002 melaporkan bahwa dalam paparan jangka panjang, setiap peningkatan  $PM_{2.5}$   $10 \text{ g/m}^3$  terkait dengan peningkatan risiko kematian sebesar 8% hingga 18%. Penelitian mereka menunjukkan rata-rata 9% peningkatan mortalitas kardiopulmonal (95% CI, 3-16%) untuk setiap  $10\text{-}\mu\text{g/m}^3$  peningkatan  $PM_{2.5}$ . Di

negara-negara Uni Eropa,  $PM_{2.5}$  mengurangi rata-rata rentang hidup hingga 8,6 bulan. Penelitian lain menemukan tingkat prevalensi penyakit pernapasan meningkat sebesar 2,07%, sedangkan tingkat rawat inap meningkat 8%, ketika  $PM_{2.5}$  harian meningkat  $10 \text{ g/m}^3$  (Anderson et al., 2012; Orru et al., 2011; Pope et al., 2002; WHO, 2003; Xing et al., 2016).

Penilaian risiko kesehatan  $PM_{10}$  dalam penelitian ini dikuantifikasi menggunakan pedoman tahunan  $PM_{10}$  menurut NAAQS US EPA 1997 dan perkiraan risiko kesehatan pada siswa. Saat ini, NAAQS US EPA  $PM_{10}$  menetapkan paparan 24 jam ke nilai paparan jangka pendek  $150 \text{ mg/m}^3$  karena tidak menemukan bukti yang cukup tentang hubungan paparan jangka panjang  $PM_{10}$  dengan kondisi saat ini dengan efek kesehatan. Namun, WHO tetap merekomendasikan pedoman tahunan  $PM_{10}$   $50 \text{ mg/m}^3$ ,  $PM_{2.5}$   $25 \text{ mg/m}^3$  dalam Target Interim, yang diharapkan dapat mengurangi risiko kematian dini sebesar 6% dibandingkan Target Interim 1,  $PM_{10}$   $70 \text{ mg/m}^3$ ,  $PM_{2.5}$   $35 \text{ mg/m}^3$  (WHO, 2006). Konsentrasi  $PM_{10}$  dalam ruangan di sekolah A dan C juga melebihi nilai pedoman jangka pendek  $150 \text{ mg/m}^3$  selama 24 jam. Paparan jangka pendek terhadap  $PM_{10}$  mungkin terkait dengan kematian dini dan kunjungan ke rumah sakit dan unit gawat darurat untuk penyakit terkait jantung dan paru-paru. Berbagai studi toksikologi paparan jangka panjang menunjukkan bahwa  $PM_{10}$  terkontaminasi logam berat dan polutan lainnya seperti *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs) yang dapat langsung masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi, kontak kulit dan mulut sehingga meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular dan pernapasan, dan kanker paru-paru terutama bagi anak sekolah yang terpapar  $PM_{10}$  dalam jangka panjang (Madureira et al., 2016; Mohamad et al., 2016; Wispriyono et al., 2016). Selanjutnya, risiko kesehatan dapat dinilai berdasarkan komposisi  $PM_{10}$ .

Tingkat konsentrasi  $PM_{2.5}$  dan  $PM_{10}$  yang melebihi nilai pedoman dan dapat menimbulkan risiko kesehatan ( $HQ > 1$ ) memerlukan manajemen risiko. Skenario kontrol yang paling memungkinkan adalah mengontrol konsentrasi  $PM_{2.5}$  dan  $PM_{10}$  sehingga nilai intake harian lebih rendah dari RfC. Jam sekolah dan tahun ajaran dikaitkan dengan kualitas pendidikan dan prestasi siswa, tidak untuk diubah. Berdasarkan berat badan siswa 35,5 kg dan jam sekolah normal tanpa aktivitas tambahan, ambang batas aman  $PM_{2.5}$  adalah  $0,035 \text{ mg/m}^3$ ;  $0,043 \text{ mg/m}^3$  dan  $PM_{10}$   $0,144 \text{ mg/m}^3$ . Konsentrasi ini lebih tinggi dari nilai pedoman yang ditetapkan dan aman untuk 90% populasi hanya selama jam sekolah normal. Pengendalian konsentrasi partikulat dapat dilakukan dengan pembersihan ruangan secara berkala untuk mengurangi penumpukan partikulat, pengaturan pembukaan ventilasi ke area kelas agar sesuai dengan pedoman, penggunaan air purifier di dalam kelas, dan lokasi sekolah tidak boleh berdekatan dengan sumber pencemar. seperti jalan atau industry.

Studi risiko berbasis karbon dioksida memperkirakan tidak ada efek kesehatan dari paparan karbon dioksida dalam ruangan pada siswa. Selain itu, nilai rekomendasi 1000 ppm terkait dengan terbentuknya bau badan yang mengganggu kenyamanan penghuni ruangan dan tidak berdampak serius bagi kesehatan (Madureira et al., 2016; U.S. EPA, 2005). Penelitian di Portugal menggunakan nilai referensi 984 ppm melaporkan bahwa paparan CO<sub>2</sub> yang tinggi secara statistik terkait dengan konsentrasi siswa (Ferreira & Cardoso, 2014).

Paparan formaldehida yang rendah di semua sekolah diharapkan tidak memberikan efek kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik. Pada konsentrasi 0,1-0,5 ppm paparan formaldehida melalui jalur inhalasi menyebabkan efek iritasi pada mata dan saluran hidung, efek neurologis, dan peningkatan risiko asma atau alergi. Sementara itu, efek kesehatan karsinogenik pada manusia, ATSDR 1989 mengklasifikasikan formaldehida sebagai kelompok B1 atau mungkin karsinogen karena bukti yang terbatas untuk kejadian kanker pada manusia..

## CONCLUSIONS

Penelitian ini menemukan bahwa konsentrasi paparan PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> di kelas Sekolah A, B, dan C melebihi nilai pedoman jangka pendek dan jangka panjang dan memberikan tingkat risiko HQ > 1 untuk siswa SMP. Sedangkan konsentrasi paparan karbon dioksida dan formaldehida masih sesuai dengan nilai pedoman yang berlaku. Skenario manajemen risiko paparan PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> adalah dengan mengendalikan tingkat konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> sepanjang tahun pada ambang batas aman PM<sub>2.5</sub> sebesar 0,035 mg/m<sup>3</sup>; 0,043 mg/m<sup>3</sup> dan PM<sub>10</sub> 0,144 mg/m<sup>3</sup>. Konsentrasi ini masih lebih tinggi dari pedoman yang berlaku, tetapi diperkirakan aman untuk 90% populasi selama jam sekolah normal. Pengendalian partikulat dapat dilakukan dengan pembersihan ruangan secara berkala untuk mengurangi akumulasi material partikulat, penggunaan air purifier, pemantauan kualitas udara secara berkala, pengaturan bukaan ventilasi ke area kelas agar sesuai dengan nilai pedoman, dan lokasi sekolah tidak boleh berdekatan dengan polutan. sumber seperti jalan atau industri.

Selanjutnya, penelitian ini dapat ditingkatkan dengan melakukan pemantauan kualitas udara yang lebih lama dan simultan dan metode penilaian kesehatan lanjutan, penghitungan kondisi meteorologi dan studi epidemiologi untuk menemukan hubungan antara tingkat paparan dan status kesehatan siswa.

## ACKNOWLEDGMENT

Ucapan terima kasih kami berikan kepada SDN Penancangan 3 Kota Serang yang telah menjadi lokasi penelitian mahasiswa Universitas Banten Jaya dan laboratorium Fakultas Kedokteran Universitas

Indonesia yang membantu dalam melakukan pengujian laboratorium

## REFERENCES

- Alves, C., Nunes, T., Silva, J., & Duarte, M. (2013). Comfort parameters and particulate matter (PM10 and PM2.5) in school classrooms and outdoor air. *Aerosol and Air Quality Research*. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.11.0321>
- Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2012). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166–175. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
- ATSDR. (2010). Addendum to The Toxicological Profile for Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology and Environmental Medicine, (October).
- Bo, M., Salizzoni, P., Clerico, M., & Buccolieri, R. (2017). Assessment of indoor-outdoor particulate matter air pollution: A review. *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos8080136>
- Chuersuwan, N., Nimrat, S., Lekphet, S., & Kerdkumrai, T. (2008). Levels and major sources of PM2.5 and PM10 in Bangkok Metropolitan Region. *Environment International*, 34(5), 671–677. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.018>
- Leung, D. Y. C. (2015). Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00069>
- Madureira, J., Paciência, I., Rufo, J., Ramos, E., Barros, H., Teixeira, J. P., & de Oliveira Fernandes, E. (2015). Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms. *Atmospheric Environment*, 118(July), 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.028>
- Krawczyk, D. A., Rodero, A., Gładyszewska-Fiedoruk, K., & Gajewski, A. (2016). CO2 concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—Measurements and simulations. *Energy and Buildings*, 129, 491–498. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.003>
- Shaughnessy, R., Nevalainen, A., & Moschandreas, D. (2005). Carbon Dioxide Concentrations in Classrooms and Association with Student Performance: A Preliminary Study, 373–376.
- U.S. EPA. (1989). Formaldehyde Chemical Assessment Summary. *Integrated Risk Information System (IRIS)*, 1–16. Retrieved from [https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris\\_documents/documents/subst/0419\\_summary.pdf](https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0419_summary.pdf)
- U.S. EPA. (2005). IAQ Reference Guide. Retrieved from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1009QR0.TXT>
- U.S. EPA. (2012). Particle Pollution and Health, 2–4. Retrieved from [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/health\\_2012\\_factsheet.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-04/documents/health_2012_factsheet.pdf)
- US-EPA. (2014). Framework for Human Health Risk Assessment to Inform Decision Making, 76.

Retrieved from <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/hhra-framework-final-2014.pdf>

US EPA. (2011). Inhalation Rates, Exposure Factors Handbook. *Exposure Factors Handbook*, (September), EPA/600/R-09/052F. <https://doi.org/EPA/600/R-09/052F>

WHO. (2003). Health effects of particulate matter. Retrieved from [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf)

WHO. (2006). Air Quality Guidelines. Retrieved from [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/78638/E90038.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf)

Wispriyono, B. et al. (2016). Pulmonary Function and Malondialdehyde (MDA) Content in Blood Due to Chromium Exposure Among Tannery Workers in Sukaregang, Garut. *Research Journal of Environmental Toxicology*, 10(3), 183–188. <https://doi.org/10.3923/rjet.2016.183.188>