



## Pra-Studi Analisis Paparan Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> di dalam Rumah

### Preliminary Study Analysis of Exposure to PM<sub>2.5</sub> and CO<sub>2</sub> Concentrations in the House

INDRA CHANDRA\*, SHERLY LIANA PUTRI, RAHMAT AWALUDIN SALAM, LULU MILLATINA RACHMAWATI, NABIL ANANTA HASMUL, MUHAMMAD FAJRI HADI SYAHPUTRA

Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung

\*indrachandra@telkomuniversity.ac.id

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 6 March 2022

Accepted 2 November 2022

Published 31 January 2023

##### Keywords:

CO<sub>2</sub>

Exposure

PM<sub>2.5</sub>

Relative risks

#### ABSTRACT

*In this COVID-19 pandemic period, the majority of people do their activities indoors. A high number of activities could increase indoor pollution. Some of the pollutants easily found in the house include particulate matter with sizes of <2.5 micrometers (PM<sub>2.5</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Both types of these pollutants can enter the body and interfere with health. This study aims to measure the concentration of pollutants in the house and estimate daily exposure and risk level. This study measured the concentration of PM<sub>2.5</sub> and CO<sub>2</sub> in two houses, house A located in a housing complex in Bandung Regency, and house B, located on the side of Garut City main road. The measuring instruments are placed in 3 points: kitchen, family room, and outdoors. The concentration of PM<sub>2.5</sub> in the neighborhood of house A is higher than the concentration of PM<sub>2.5</sub> in the neighborhood of house B due to the high construction activity. Large ventilation in house A causes the PM<sub>2.5</sub> concentration to follow the outdoor concentration pattern. As for house B, the concentration of PM<sub>2.5</sub> is much influenced by the source from the kitchen. The activities much influence the concentration of CO<sub>2</sub> for both houses in each room. The relative risk of PM<sub>2.5</sub> for cardiovascular and cardiopulmonary disease in each house differed depending on the duration of exposure. Calculation of the relative risk of PM<sub>2.5</sub> was conducted on normal people in house A and house B, and the chef in house B. The highest relative risk was obtained by the chef in house B, followed by normal people in house B and house A. The level of relative risk for the chef at house B is 30% for cardiovascular disease and 34% for cardiopulmonary disease.*

#### INFORMASI ARTIKEL

##### Histori artikel:

Diterima 6 Maret 2022

Disetujui 2 November 2022

Diterbitkan 31 Januari 2023

##### Kata kunci:

CO<sub>2</sub>

dosis harian

PM<sub>2.5</sub>

risiko relatif

#### ABSTRAK

Di masa pandemi COVID-19, mayoritas masyarakat melakukan kegiatannya di dalam rumah. Aktivitas yang tinggi dapat menyebabkan polutan dalam rumah meningkat. Beberapa jenis polutan dapat dengan mudah ditemukan di dalam rumah di antaranya adalah partikulat berukuran <2,5 mikrometer (PM<sub>2.5</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Kedua jenis polutan tersebut dapat masuk ke dalam tubuh dan mengganggu kesehatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur konsentrasi polutan dalam rumah dan mengestimasi paparan harian dan tingkat risikonya. Penelitian ini mengukur konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> di dua tipe rumah, yaitu rumah A yang terletak di perumahan Kota Bandung, dan rumah B, terletak di samping jalan utama kota Garut. Alat ukur diletakan pada tiga ruangan, yaitu dapur, ruang keluarga, dan luar ruang. Lingkungan rumah A memiliki konsentrasi polutan PM<sub>2.5</sub> yang lebih tinggi dari rumah B karena tingginya aktivitas pembangunan permukiman dan jalur kereta cepat. Ventilasi yang besar pada rumah A menyebabkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> cenderung mengikuti pola luar ruang. Sementara itu untuk rumah B, tingginya aktivitas di dapur mempengaruhi konsentrasi polutan PM<sub>2.5</sub> dalam rumah. Konsentrasi CO<sub>2</sub> untuk kedua rumah pun berbeda untuk tiap ruang. Rata-rata sumber CO<sub>2</sub> pada tiap ruang di masing-masing dipengaruhi oleh aktivitas dari tiap ruangan tersebut. Tingkat risiko PM<sub>2.5</sub> terhadap penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner pada masing-masing rumah berbeda tergantung dari durasi paparannya. Perhitungan tingkat risiko PM<sub>2.5</sub> dilakukan pada orang normal di rumah A dan B, dan juru masak di rumah B. Tingkat risiko tertinggi dihasilkan oleh juru masak di rumah B, diikuti dengan orang normal di rumah B dan A. Tingkat risiko pada juru masak di rumah B sebesar 30% untuk penyakit kardiovaskular dan 34% untuk penyakit kardiopulmoner.

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Terjadinya pandemi COVID-19 di Indonesia mengakibatkan mayoritas orang melakukan aktivitasnya di dalam rumah. Aktivitas yang tinggi dapat memicu peningkatan konsentrasi gas dan partikulat di udara dalam ruang sehingga dapat menyebabkan kualitas udara menurun. Kualitas udara yang menurun melebihi standar baku mutu akan berdampak terhadap kesehatan (Cohen *et al.*, 2017; Fang *et al.*, 2013; Poursafa & Kelishadi, 2011). Bahkan menurut WHO sebanyak 3,8 juta orang di dunia telah mengalami kematian dini akibat polusi udara dalam rumah (WHO, 2021b).

Beberapa polutan yang dapat ditemukan di dalam rumah diantaranya adalah *particulate matter* berukuran <2,5 mikrometer (PM<sub>2,5</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Polutan PM<sub>2,5</sub> di dalam rumah dapat berasal dari kegiatan pembakaran, seperti proses memasak (Wallace *et al.*, 2008), merokok dalam ruang (DeCarlo *et al.*, 2018), Sementara CO<sub>2</sub> di dalam ruang dapat ditemukan dari kegiatan memasak di dapur, hasil metabolisme manusia dan lain-lain (US EPA, 2020). Terhirupnya polutan PM<sub>2,5</sub> dan CO<sub>2</sub> dalam konsentrasi tinggi akan berdampak buruk terhadap tubuh. Polutan PM<sub>2,5</sub> diketahui dapat menyebabkan iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, hingga kematian dini pada penderita penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner (US EPA, 2020). Polutan CO<sub>2</sub> dapat menyebabkan sesak napas, detak jantung meningkat, hingga menyebabkan kerusakan organ (WDHS, 2021).

Dikarenakan dampak negatif polutan berpengaruh terhadap kesehatan manusia, maka perhitungan dosis paparan menjadi penting untuk dilakukan. Perhitungan tersebut telah banyak dilakukan oleh para peneliti dengan menggunakan metode perhitungan yang berbeda-beda. Pada tahun 2017 di Surabaya, Indonesia, diketahui bahwa petugas karcis tol terpapar NO<sub>2</sub> dengan dosis paparan sebesar 0,0014 – 0,0198 mg/kg/hari. Perhitungan tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan faktor konsentrasi polutan, berat badan, dan durasi dan frekuensi paparan (Darmawan, 2018). Sementara itu, pada tahun 2018 di daerah Makau, Cina, seseorang yang berlari pada pagi dan malam hari di lintasan lari diketahui terpapar polutan PM<sub>2,5</sub> dan *black carbon* (BC) dengan dosis sebesar 25,2–25,7 µg/m<sup>3</sup> dan 3,1–4 µg/m<sup>3</sup>. Hasil perhitungan tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan faktor konsentrasi polutan dan laju inhalasinya (Liu *et al.*, 2019).

Polutan PM<sub>2,5</sub> diketahui dapat meningkatkan risiko terhadap penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner (Garcia *et al.*, 2016). Sebuah penelitian di daerah cekungan Bandung Raya menunjukkan bahwa tingkat mortalitas tertinggi terjadi pada penyakit paru-paru obstruktif kronis (PPOK) (Chandra *et al.*, 2021). Selain itu, penyakit kardiovaskular juga menyumbang sebesar 32% untuk angka kematian di dunia (WHO, 2021a). Penelitian lebih lanjut

terkait risiko paparan polutan PM<sub>2,5</sub> terhadap penyakit tersebut telah banyak dilakukan. Pada tahun 2017 di daerah Lembang, Bandung, serta di daerah Juwana, Pati dilakukan pengukuran untuk mengestimasi risiko relatif paparan polutan PM<sub>2,5</sub>. Hasil menunjukkan bahwa orang yang terpapar di daerah Lembang memiliki risiko terkena penyakit kardiovaskular sebesar 52% dan kardiopulmoner sebesar 47% lebih tinggi dibandingkan yang tidak terpapar. Sementara itu di daerah Juwana, risiko terkena penyakit kardiovaskular sebesar 44% dan kardiopulmoner sebesar 39% lebih tinggi dibandingkan orang yang tidak terpapar (Huboyo *et al.*, 2018).

Oleh karena di masa pandemi ini berbagai aktivitas dilakukan dari dalam rumah yang dapat menyebabkan kenaikan konsentrasi polutan dalam ruang, maka penulis terdorong untuk melakukan pengukuran konsentrasi polutan PM<sub>2,5</sub> dan CO<sub>2</sub> di dalam rumah. Selain itu juga penulis ingin melakukan perhitungan untuk mengestimasi paparan dan tingkat risikonya terhadap kesehatan. Alat ukur yang digunakan merupakan alat berbasis mikrokontroler yang dipasangkan dengan sensor polutan PM<sub>2,5</sub> dan CO<sub>2</sub>. Pengukuran merupakan jenis pengukuran diam dengan menempatkan alat ukur pada ruangan yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil pengukuran tersebut kemudian akan dilakukan estimasi paparan pada seseorang dan menghitung tingkat risikonya.

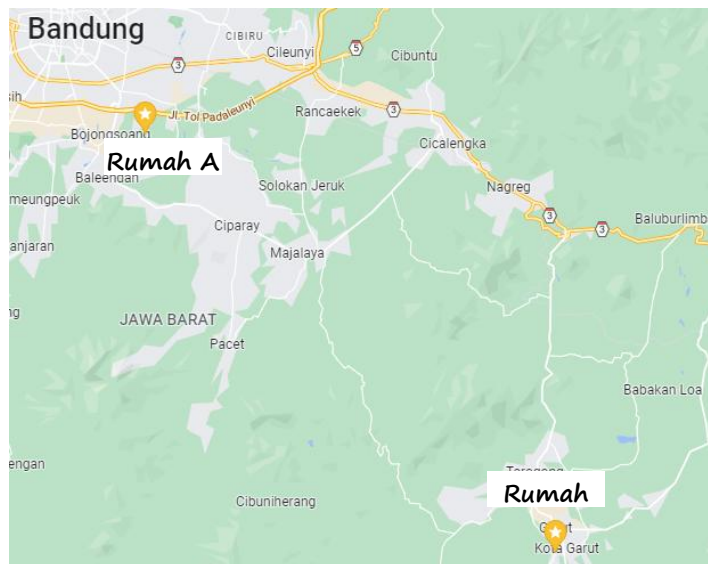
### 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis sumber polutan tiap ruang untuk polutan PM<sub>2,5</sub> dan CO<sub>2</sub> di kedua rumah, mengestimasi paparan harian untuk polutan PM<sub>2,5</sub> dan CO<sub>2</sub> yang terhirup oleh tubuh, dan mengestimasi tingkat resiko paparan polutan PM<sub>2,5</sub> terhadap penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner.

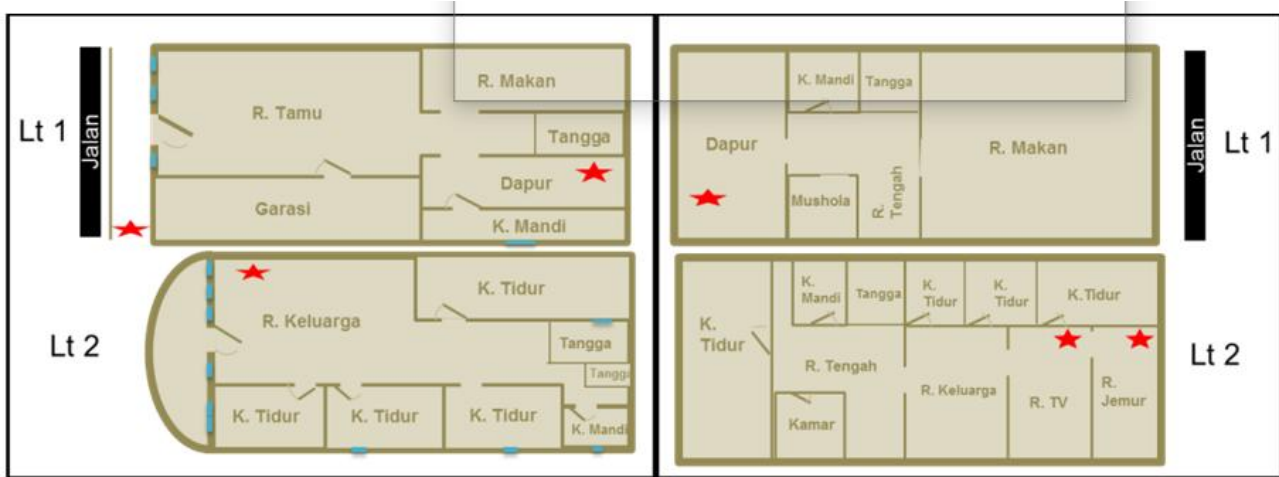
## 2. METODE

### 2.1 Lokasi Penelitian

Pengukuran konsentrasi massa CO<sub>2</sub> dan PM<sub>2,5</sub> dilakukan di dua rumah. Letak kedua rumah tersebut ditunjukkan oleh Gambar 1. Rumah pertama (Rumah A) hanya digunakan sebagai tempat tinggal dan terletak di salah satu perumahan di Kabupaten Bandung. Rumah kedua (Rumah B) tidak hanya digunakan sebagai tempat tinggal tetapi juga sebagai tempat usaha rumah makan. Rumah B terletak di pinggir jalan raya di Kota Garut. Pada kedua lokasi tersebut, alat ukur diletakkan pada tiga ruang, yaitu dapur, ruang keluarga, dan teras rumah. Dapur merupakan tempat yang sering digunakan untuk aktivitas memasak dan berpotensi menjadi sumber emisi dalam ruang. Ruang keluarga merupakan salah satu tempat yang sering digunakan untuk berkumpul dan bersantai. Ruang keluarga tersebut terhubung dengan ruang tidur. Pengukuran juga dilakukan di luar ruang sebagai pembandingan hasil pengukuran dalam ruang. Denah rumah A dan rumah B ditunjukkan oleh Gambar 2. Simbol bintang pada denah tersebut menandakan posisi penyimpanan alat ukur.



Gambar 1. Lokasi pengukuran



Gambar 2. Denah lokasi pengukuran di (a) rumah A dan (b) rumah B

**2.2 Alat Ukur dan Metode Penelitian**

Penelitian ini dilakukan menggunakan alat ukur yang dirancang dengan dua buah sensor *low-cost* untuk mengukur konsentrasi CO<sub>2</sub> dan PM<sub>2.5</sub>. Sensor yang digunakan adalah SKU:SEN0219 untuk sensor pendeteksi gas CO<sub>2</sub> dan SKU:SEN0177 untuk sensor pendeteksi PM<sub>2.5</sub>. Sensor PM<sub>2.5</sub> telah dikalibrasi menggunakan *optical particle counter* (OPC, model KC-01E, Rion Co. Ltd.) serta pengujian tandem di lapangan dengan instrumen utama yaitu Nanosampler (Vaicdan *et al.*, 2019). Sensor CO<sub>2</sub> telah dikalibrasi dengan instrumen referensi Lutron GCH-2018 melalui penelitian (Taishiin *et al.*, 2020). Kedua sensor tersebut kemudian diintegrasikan dengan mikrokontroler yang dihubungkan dengan sebuah *data logger*. *Data logger* tersebut berfungsi untuk menyimpan data hasil pengukuran. Kemudian data yang didapatkan oleh kedua sensor tersebut akan disimpan di dalam media penyimpanan berupa kartu memori. Pengukuran konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> dilakukan selama lima hari untuk masing-masing rumah. Pengukuran di rumah A dilakukan dari tanggal 4–8 September 2020 dan di rumah B dilakukan dari tanggal 17 - 21 September 2020. Pengukuran tersebut merupakan pengukuran statis yang dilakukan selama 5x24 jam. Selain melakukan pengukuran konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub>, juga dilakukan wawancara

dengan penghuni rumah untuk mengetahui durasi aktivitas di setiap ruangan dalam sehari. Setelah data terkumpul, data tersebut dibuat menjadi grafik menggunakan aplikasi SigmaPlot untuk mempermudah pembacaan data. Kemudian dilakukan perhitungan menggunakan analisis regresi linear untuk mengetahui potensi sumber polutan di setiap ruangan. Setelah itu dilakukan perhitungan estimasi paparan terhirup berdasarkan durasi aktivitasnya. Selanjutnya dari data PM<sub>2.5</sub> kemudian dilakukan perhitungan untuk mengetahui estimasi resiko relatif terhadap penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner.

**2.3 Metode Statistik**

Penelitian dilakukan menggunakan uji regresi linear untuk memprediksi sumber potensi tiap ruang. Berdasarkan variabelnya, uji regresi linear ini dibagi menjadi dua, yaitu uji regresi linear sederhana dan berganda. Uji regresi linear sederhana digunakan untuk memprediksi sumber polutan dapur dengan prediktor berasal dari konsentrasi polutan pada dapur dan luar ruangan. Persamaan 1 merupakan rumus uji regresi linear yang digunakan.

$$\check{Y} = b_0 + b_1X_1.....(1)$$

Keterangan :

- Ŷ = Variabel respons
- X<sub>i</sub> = Prediktor untuk subjek ke-i
- b<sub>0</sub> = intersep
- b<sub>1</sub> = Kemiringan (*slope*)

Sementara itu untuk uji regresi linear berganda digunakan untuk memprediksi sumber polutan di ruang keluarga dengan prediktor berasal dari konsentrasi polutan pada ruang keluarga, dapur, dan luar ruangan. Persamaan 2 merupakan rumus uji regresi linear berganda.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{1i} X_{2i} + \varepsilon_i \dots \dots (2)$$

Keterangan :

- Y<sub>i</sub> = Variabel terikat
- β<sub>0</sub>, β<sub>1</sub>, ... = Parameter
- X<sub>1i</sub>, X<sub>2i</sub>, .. = Konstanta yang diketahui

Paparan merupakan suatu kontak antara bahan berbahaya (agen) dengan batas permukaan luar dari reseptor. Paparan terhirup dapat terjadi ketika manusia menghirup udara yang telah terkontaminasi dengan partikel, uap, atau aerosol. Manusia dapat terpapar melalui rute pernapasan selama melakukan berbagai aktivitas di dalam dan di luar ruangan. Persamaan 3 menunjukkan cara menghitung rata-rata paparan harian (Huboyo et al., 2018; Mestl & Edwards, 2011).

$$C = \frac{(T_d \times C_d) + (T_{RK} \times C_{RK}) + (T_o \times C_o)}{sT_d + T_{RK} + T_o} \dots \dots (3)$$

Keterangan :

- C = Rata-rata konsentrasi polutan per 24 jam
- C<sub>d</sub> = Konsentrasi polutan di dapur
- C<sub>RK</sub> = Konsentrasi polutan di Ruang Keluarga (Wallace, Lance; Wang, Fang; Howard-Reed, Cynthia; Persily, Andrew, 2008)
- C<sub>o</sub> = Konsentrasi polutan di *outdoor*
- T<sub>d</sub> = Waktu yang dihabiskan di dapur
- T<sub>RK</sub> = Waktu yang dihabiskan di Ruang Keluarga
- T<sub>o</sub> = Waktu yang dihabiskan di *outdoor*

Dosis merupakan jumlah polutan yang memasuki reseptor. Untuk mengetahui nilai dosis harian, maka dapat menggunakan rumus pada Persamaan 4 (Huboyo et al., 2018; Liu et al., 2019).

$$DD = C + IR \dots \dots (4)$$

Keterangan :

- DD = Dosis harian
- IR = Laju pernapasan (18 m<sup>3</sup>/day)

Paparan polutan PM<sub>2.5</sub> dalam jangka waktu yang lama dapat meningkatkan resiko terhadap penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner. Pada sebuah penelitian di tahun 2016, setiap peningkatan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> sebanyak 10 µg/m<sup>3</sup> dapat meningkatkan resiko terhadap penyakit kardiovaskular sebesar 6--12% dan penyakit kardiopulmoner sebesar 4--9% (Garcia et al., 2016) . Untuk menghitung resiko relatif PM<sub>2.5</sub> terhadap penyakit

kardiovaskular dan kardiopulmoner dapat menggunakan perhitungan pada Persamaan 5, 6, 7, 8, 9, dan 10 (Pope III, 2002).

$$RR(C_p) = 0,1083 \times \ln(DD) + 1,37, R^2 = 0,87 \dots \dots (5)$$

Upper and lower 95% confidence limits :

$$Upper = 0,1014 \times \ln(DD) + 1,55, R^2 = 0,86 \dots \dots (6)$$

$$Lower = 0,1137 \times \ln(DD) + 1,22, R^2 = 0,80 \dots \dots (7)$$

$$RR(C_v) = 0,0978 \times \ln(DD) + 1,33, R^2 = 0,89 \dots \dots (8)$$

Upper and lower 95% confidence limits :

$$Upper = 0,0986 \times \ln(DD) + 1,42, R^2 = 0,86 \dots \dots (9)$$

$$Lower = 0,0969 \times \ln(DD) + 1,20, R^2 = 0,89 \dots \dots (10)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Pengukuran Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> di dalam Rumah

Hasil pengukuran konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di tiap ruang pada kedua rumah menunjukkan hasil yang berbeda-beda. Pada rumah A, rentang pengukuran di dapur berkisar antara 15–42 µg/m<sup>3</sup>, ruang keluarga berkisar antara 28–77 µg/m<sup>3</sup>, dan *outdoor* berkisar antara 30–78 µg/m<sup>3</sup>. Ruang keluarga dan *outdoor* di rumah A memiliki konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di atas batas aman yang telah ditetapkan oleh WHO, yaitu sebesar 25 µg/m<sup>3</sup> (WHO, 2021c) . Kemudian untuk dapur, terdapat beberapa hari dengan nilai konsentrasi berada di bawah batas aman, yaitu pada tanggal 4--6 September 2020. Kemudian untuk hasil pengukuran konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di rumah B memiliki rentang yang berbeda pula, seperti di dapur rentang pengukurannya berkisar antara 31–58 µg/m<sup>3</sup>, ruang keluarga berkisar antara 12--28 µg/m<sup>3</sup>, dan *outdoor* berkisar antara 21--35 µg/m<sup>3</sup>. Pada ruang keluarga terdapat satu hari pengukuran yang menunjukkan nilai di bawah batas aman, yaitu pada tanggal 21 September 2020. Kemudian untuk *outdoor*, konsentrasi PM<sub>2.5</sub> yang terukur cenderung berada di batas aman, namun ada dua hari yang sedikit melebihi batas, yaitu pada tanggal 18 dan 20 September 2020. Data pengukuran di kedua rumah ditampilkan pada Tabel 1.

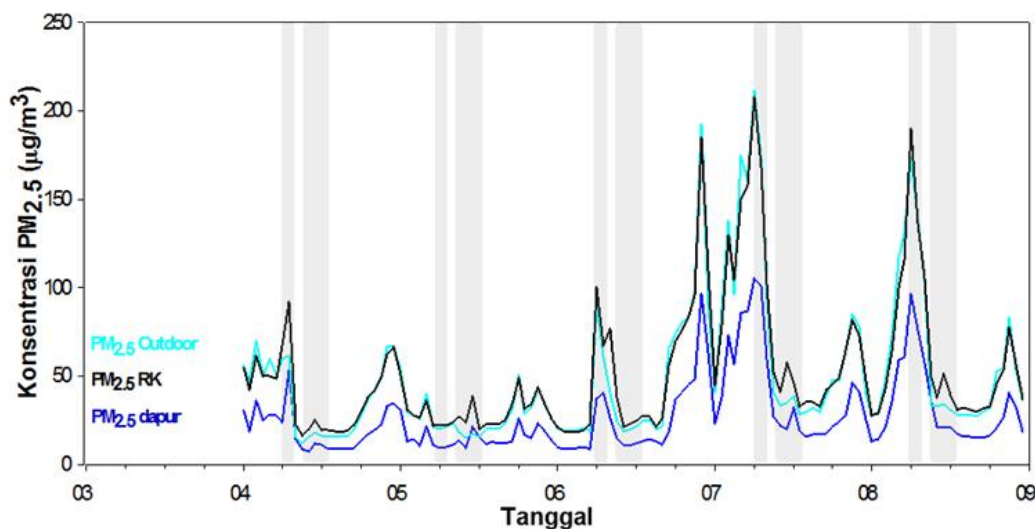
Tabel 1. Perbandingan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di kedua rumah

		PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
		MIN	MAX	AVG	STDEV
Rumah A	Dapur	15	42	27	10
	Ruang Keluarga	28	77	50	19
	<i>Outdoor</i>	30	78	52	19
Rumah B	Dapur	31	58	47	10
	Ruang Keluarga	12	28	22	6
	<i>Outdoor</i>	21	35	31	5

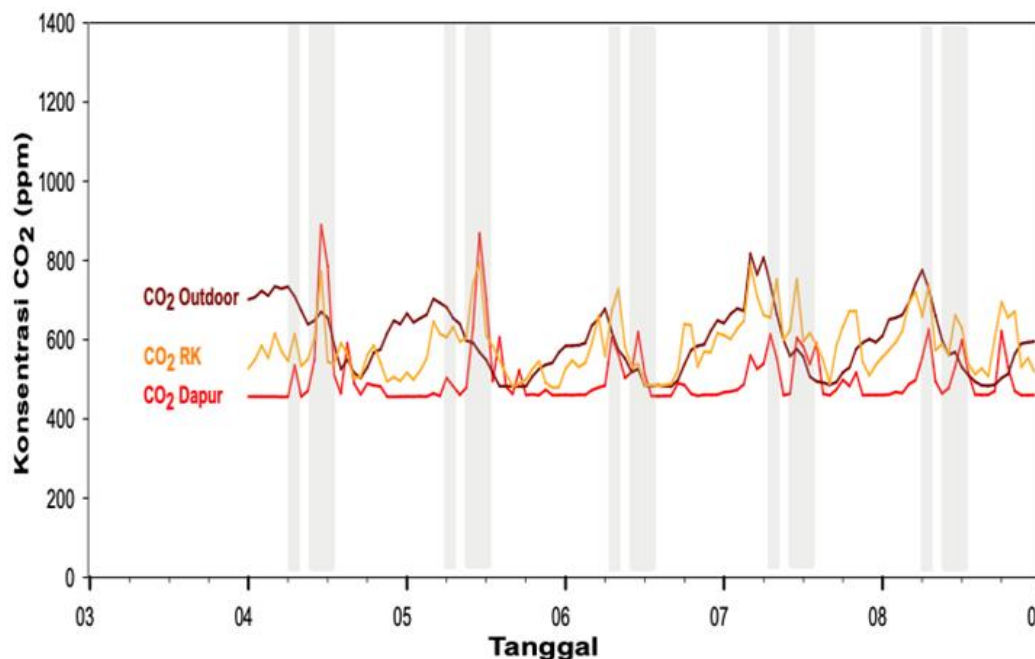
Dilihat dari Gambar 4, konsentrasi PM<sub>2.5</sub> pada *outdoor* di rumah A terlihat cenderung tinggi. Hal ini dapat disebabkan oleh lingkungan rumah A yang berdekatan dengan pembangunan permukiman, dan rel kereta cepat.

Pada tanggal 7–8 September 2020, terjadi lonjakan konsentrasi  $PM_{2.5}$  pada malam hingga dini hari di *outdoor*. Hal ini disebabkan rumah A yang berada di dekat area persawahan yang memungkinkan adanya pembakaran sisa tanaman padi pada jam tersebut. Hasil konsentrasi  $PM_{2.5}$  di ruang keluarga dan dapur menunjukkan kecenderungan pola yang mengikuti pola *outdoor*. Hal ini dapat disebabkan karena banyaknya ventilasi di rumah A sehingga udara luar dapat masuk ke dalam rumah. Selain itu dibukanya pintu utama pada lantai 1 dan 2 sepanjang siang juga ikut mempengaruhi masuknya udara luar ke dalam rumah. Pernyataan tersebut didukung dengan hasil penelitian (Tahsiin *et al.*, 2020), yang menunjukkan bahwa konsentrasi  $PM_{2.5}$  dapat mengikuti pola konsentrasi polutan pada *outdoor*

dan sumber yang berasal dari pergerakan manusia yang keluar masuk ruangan. Pada saat memasak di dapur, baik masak pagi, siang, maupun malam, tidak memiliki efek yang signifikan terhadap peningkatan konsentrasi  $PM_{2.5}$  di dapur. Konsentrasi  $PM_{2.5}$  di dapur rumah B cenderung lebih tinggi dibandingkan ruangan lainnya. Hal ini dapat diakibatkan tingginya aktivitas memasak di dapur tersebut. Selain aktivitas memasak yang tinggi, teknik memasak juga dapat mempengaruhi tingginya konsentrasi  $PM_{2.5}$  di rumah B. Perbedaan konsentrasi  $PM_{2.5}$  akibat perbedaan intensitas aktivitas juga ditemukan pada penelitian (Rizkia, 2021), dimana nilai konsentrasi  $PM_{2.5}$  cenderung meningkat ketika jumlah aktivitas lebih tinggi yang dipicu oleh pergerakan manusia, seperti aktivitas menyapu.



Gambar 3. Konsentrasi  $PM_{2.5}$  di rumah A



Gambar 4. Konsentrasi  $CO_2$  di rumah A

Hasil pengukuran konsentrasi  $CO_2$  di rumah A dan B menunjukkan rentang konsentrasi yang berbeda-beda pada tiap ruang. Data tersebut ditunjukkan oleh Tabel 2. Konsentrasi  $CO_2$  di dapur rumah A berkisar antara 466–590

ppm, ruang keluarga berkisar antara 513 – 723 ppm, dan *outdoor* berkisar antara 499 – 663 ppm. Kemudian untuk konsentrasi  $CO_2$  di dapur rumah B berkisar antara 575–930 ppm, ruang keluarga berkisar antara 575 – 1119 ppm, dan

outdoor berkisar antara 452 – 606 ppm. Berdasarkan data tersebut, rata-rata konsentrasi CO<sub>2</sub> hampir di setiap ruang untuk rumah A dan rumah B berada di bawah batas aman, yaitu 1.000 ppm, kecuali ruang keluarga pada rumah B. Pada tanggal 18 September 2020, rata-rata konsentrasi untuk CO<sub>2</sub> pada pukul 08.00–16.00 telah mencapai 1.119 ppm, namun rata-rata konsentrasi tersebut mengalami penurunan ke batas aman pada delapan jam berikutnya.

Tabel 2. Perbandingan nilai konsentrasi CO<sub>2</sub> di kedua rumah

		CO <sub>2</sub> (ppm)			
		MIN	MAX	AVG	STDEV
Rumah A	Dapur	466	590	503	41
	Ruang Keluarga	513	723	597	72
	Outdoor	499	663	584	44
Rumah B	Dapur	575	930	757	113
	Ruang Keluarga	575	1.119	818	136
	Outdoor	452	606	543	44

Gambar 5 merupakan grafik yang menunjukkan konsentrasi CO<sub>2</sub> di rumah A. Berdasarkan grafik konsentrasi CO<sub>2</sub> di rumah A dapat dilihat terjadi peningkatan yang cukup signifikan terhadap konsentrasi CO<sub>2</sub> di dapur rumah A pada saat jam memasak. Hal ini dapat disebabkan oleh aktivitas pembakaran pada saat memasak yang dapat mempengaruhi tingginya konsentrasi CO<sub>2</sub> di dapur tersebut. Pada rumah A, aktivitas memasak lebih berpengaruh terhadap peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> dibandingkan dengan PM<sub>2,5</sub>. Dilihat dari grafik pengukuran konsentrasi CO<sub>2</sub> di rumah B, konsentrasi CO<sub>2</sub> mengalami peningkatan selama aktivitas memasak berlangsung. Memasak dengan skala besar dan durasi yang cukup lama, yaitu 13 jam membuat konsentrasi CO<sub>2</sub> di dapur cukup tinggi dibandingkan konsentrasi di luar ruangan. Selain itu, ruang keluarga juga memiliki konsentrasi yang cukup tinggi. Hal ini karena ruangan tersebut merupakan ruangan yang sering digunakan untuk tempat bersantai dan berkumpul bersama anggota keluarga lainnya. Selain itu, ruangan tersebut juga sering digunakan untuk merokok. Ventilasi yang kecil di ruang keluarga tersebut juga mempengaruhi tingginya konsentrasi CO<sub>2</sub> akibat kurangnya pertukaran udara dengan udara luar. Selain jenis aktivitas yang mempengaruhi nilai konsentrasi CO<sub>2</sub>, penelitian lain menyebutkan bahwa jumlah orang juga turut mempengaruhi nilai konsentrasi CO<sub>2</sub> (Rizkia, 2021; Tahsiin et al., 2020).

### 3.2 Potensi Sumber Polutan di dalam Ruang

Untuk mengetahui sumber potensi tiap ruang di rumah A dan B dilakukan uji regresi linear untuk memprediksi sumber potensi tersebut. Terdapat dua ruangan yang akan dicari sumber potensinya, yaitu ruang keluarga dan dapur. Untuk mencari sumber potensi di ruang keluarga digunakan uji regresi linear berganda, sedangkan dapur digunakan uji regresi linear sederhana.

Berdasarkan hasil analisis regresi linear untuk ruang keluarga yang ditunjukkan oleh Tabel 3, sumber potensi konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di ruang keluarga rumah A berasal dari outdoor sebesar 51,5%, dapur sebesar 44,5%, dan ruang keluarga sebesar 4%. Sementara konsentrasi CO<sub>2</sub> berasal dari sumber ruang keluarga sebesar 56,3%, dapur sebesar 30,7%, dan outdoor sebesar 13%. Sumber potensi konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di ruang keluarga rumah B berasal dari dapur sebesar 43,4%, ruang keluarga sebesar 36,8%, dan outdoor sebesar 19,8%. Sementara konsentrasi CO<sub>2</sub> berasal dari sumber ruang keluarga sebesar 56,3%, dapur sebesar 30,7%, dan outdoor sebesar 13%.

Tabel 3. Perbandingan hasil uji regresi linear untuk ruang keluarga

	Rumah A		Rumah B	
	PM <sub>2,5</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	PM <sub>2,5</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)
Dapur	44,5	30,7	43,4	6,1
Ruang Keluarga	4	56,3	36,8	88,8
Outdoor	51,5	13	19,8	5,1

Berdasarkan hasil uji regresi linear untuk dapur yang ditunjukkan oleh Tabel 4, sumber potensi konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di dapur rumah A berasal outdoor sebesar 88,5% dan dapur sebesar 11,5%. Sementara sumber potensi konsentrasi CO<sub>2</sub> di dapur berasal dari 99,9% berasal dari dapur dan outdoor sebesar 0,1%. Dapat dikatakan bahwa sumber konsentrasi CO<sub>2</sub> di dapur ini hanya berasal dari kegiatan di dapur saja dan tidak dipengaruhi oleh pengaruh outdoor. Kemudian untuk sumber potensi konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di dapur rumah B berasal dari 67,1% dan outdoor sebesar 32,9%. Sumber potensi konsentrasi CO<sub>2</sub> di dapur rumah B berasal dari 96,2% dapur dan 3,8% outdoor.

Tabel 4. Perbandingan hasil uji regresi linear untuk dapur

	Rumah A		Rumah B	
	PM <sub>2,5</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	PM <sub>2,5</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)
Dapur	11,5	99,9	67,1	96,2
Outdoor	88,5	0,1	32,9	3,8

### 3.3 Estimasi Paparan Harian PM<sub>2,5</sub> dan CO<sub>2</sub>

Paparan yang terhirup oleh tubuh manusia bergantung pada durasi terpaparnya. Estimasi paparan terhirup pada orang yang tinggal di rumah A dan rumah B berbeda tergantung dari pola aktivitas masing-masing rumah. Aktivitas di rumah A dan rumah B dibagi ke dalam tiga ruangan yang dianggap paling sering digunakan, yaitu dapur, ruang keluarga (termasuk ruang tidur) dan outdoor. Estimasi waktu yang dihabiskan di tiap ruangan dalam sehari di rumah A dan B berbeda-beda, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 5.

Tabel 5. Estimasi waktu paparan

	Rumah A	Rumah B	
		Orang Biasa	Juru Masak
Dapur	4 jam	4 jam	13 jam
Ruang Keluarga	18 jam	18 jam	9 jam
<i>Outdoor</i>	2 jam	2 jam	2 jam

Estimasi paparan harian PM<sub>2.5</sub> di rumah A dan B dilakukan dengan menggunakan perhitungan paparan terhirup (Huboyo *et al.*, 2018; Mestl & Edwards, 2011) untuk mendapatkan nilai rata-rata paparan harian. Rata-rata paparan harian di rumah A dan B selama lima hari ditunjukkan oleh Tabel 6. Berdasarkan data tersebut estimasi paparan PM<sub>2.5</sub> tertinggi berada di rumah B untuk juru masak sebesar 41 µg/m<sup>3</sup>, diikuti dengan estimasi paparan untuk orang biasa sebesar 33 µg/m<sup>3</sup>, dan rumah A sebesar 27 µg/m<sup>3</sup>.

Estimasi paparan CO<sub>2</sub> tertinggi berada di rumah B untuk orang biasa sebesar 799 ppm, diikuti dengan juru masak sebesar 792 ppm, dan untuk orang di rumah A sebesar 503 ppm. Estimasi paparan pada kedua rumah, baik di rumah A maupun rumah B masih berada di bawah 10.000 ppm. Diketahui bahwa di beberapa penelitian estimasi paparan CO<sub>2</sub> diatas 10.000 ppm dapat menyebabkan stres metabolik dan peningkatan pernapasan. Pada beberapa penelitian diketahui paparan diatas 500 ppm dapat menyebabkan peningkatan detak jantung, CO<sub>2</sub> dan tekanan darah. Namun efek kesehatan untuk level rendah ini bergantung pada kesehatan tubuh masing-masing.

Tabel 6. Hasil estimasi paparan

	Rumah A		Rumah B			
			Orang Biasa		Juru Masak	
	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> (ppm)	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> (ppm)	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	20	509	33	725	45	747
2	15	509	40	833	50	819
3	25	488	34	806	41	795
4	42	508	36	810	42	771
5	32	498	24	823	28	826
<b>Rata-rata</b>	<b>27</b>	<b>503</b>	<b>33</b>	<b>799</b>	<b>41</b>	<b>792</b>

### 3.4 Resiko Relatif PM<sub>2.5</sub> terhadap Penyakit Kardiovaskular dan Kardiopulmoner

Polutan PM<sub>2.5</sub> yang terhirup ke dalam tubuh dapat meningkatkan risiko terkena penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner. Tingkat risiko terkena penyakit tersebut berbeda-beda bergantung pada paparan hariannya. Estimasi risiko relatif pada seseorang yang terpapar PM<sub>2.5</sub> di rumah A dan B ditunjukkan oleh Tabel 7. Untuk menentukan risiko relatif PM<sub>2.5</sub>, nilai estimasi paparan yang telah dihitung sebelumnya kemudian dikalikan dengan nilai *inhalation rate* yang disarankan, yaitu 18 m<sup>3</sup>/day (Huboyo *et al.*, 2018) untuk mendapatkan nilai dosis harian. Kemudian dilanjutkan dengan menggunakan perhitungan risiko relatif (Pope III, 2002).

Tabel 7. Risiko relatif PM<sub>2.5</sub> terhadap penyakit kardiovaskular dan kardiopolmoner

	24h avg exp, (mg/m <sup>3</sup> )	RR [95% CI]	
		<i>Cardiopulmonary disease</i>	<i>Cardiovascular disease</i>
<b>Rumah A</b>	0,027	1,29 [1,14-1,48]	1,26 [1,13-1,41]
<b>Rumah B</b>			
<b>Orang Biasa</b>	0,033	1,31 [1,16-1,50]	1,28 [1,15-1,43]
<b>Juru Masak</b>	0,040	1,34 [1,19-1,52]	1,30 [1,17-1,45]

Berdasarkan hasil perhitungan, paparan PM<sub>2.5</sub> di rumah A diketahui dapat meningkatkan risiko terkena penyakit kardiopulmoner sebesar 29% dan kardiovaskular sebesar 26% dibandingkan dengan orang yang tidak terpapar. Sementara untuk tingkat risiko PM<sub>2.5</sub> di rumah B untuk orang biasa diketahui dapat meningkatkan pada penyakit kardiopulmoner sebesar 31%, dan penyakit kardiovaskular sebesar 28% dibandingkan dengan orang yang tidak terpapar dan tingkat risiko PM<sub>2.5</sub> di rumah B untuk juru masak meningkat sebesar 34% untuk penyakit kardiopulmoner dan 30% untuk penyakit kardiovaskular. Hal ini didukung dengan penelitian (Wu *et al.*, 2022), yang menyebutkan bahwa kegiatan memasak menjadi kontributor terbesar dalam paparan PM<sub>2.5</sub>. Selain itu, penelitian lain menyebutkan resiko paparan PM<sub>2.5</sub> dapat lebih tinggi pada orang tua serta laki-laki berusia ≥ 65 tahun (Edwards *et al.*, 2021).

## 4. KESIMPULAN

Telah dilakukan pengukuran konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> di dua rumah dengan latar rumah dan pola aktivitas yang berbeda. Rumah A terletak di kawasan perumahan padat penduduk yang berada di daerah Kabupaten Bandung. Rumah B terletak di pinggir jalan raya yang berada di daerah Kota Garut. Rumah A memiliki bukaan ventilasi besar, sedangkan rumah B memiliki bukaan ventilasi yang tidak terlalu besar. Sumber PM<sub>2.5</sub> di rumah A lebih banyak dipengaruhi oleh *outdoor* sedangkan di rumah B lebih banyak dipengaruhi oleh dapur. Hal ini dikarenakan intensitas memasak di dapur rumah B lebih tinggi dibanding rumah A sehingga polutan yang dihasilkan lebih banyak. Sementara sumber CO<sub>2</sub> di kedua rumah lebih banyak dipengaruhi oleh aktivitas di masing-masing ruang dibandingkan pengaruh dari *outdoor*.

Estimasi paparan harian untuk konsentrasi PM<sub>2.5</sub> tertinggi berada pada juru masak yang tinggal di rumah B, yaitu sebesar 41 µg/m<sup>3</sup>, diikuti dengan orang biasa yang tinggal di rumah B, yaitu 33 µg/m<sup>3</sup>, dan orang yang tinggal di rumah A, yaitu 27 µg/m<sup>3</sup>. Sementara estimasi paparan

harian untuk konsentrasi CO<sub>2</sub> tertinggi berada pada orang biasa yang tinggal di rumah B, yaitu sebesar 799 ppm, diikuti dengan juru masak, yaitu sebesar 792 ppm, dan orang yang tinggal di rumah A sebesar 503 ppm. Estimasi paparan harian untuk CO<sub>2</sub> berada dibawah 10.000 ppm yang diketahui dapat meningkatkan stress metabolik dan peningkatan frekuensi pernapasan. Kemudian untuk estimasi paparan harian PM<sub>2,5</sub> dilanjutkan dengan perhitungan tingkat risiko terhadap penyakit kardiovaskular dan kardiopulmoner. Hasil menunjukkan bahwa tingkat risiko PM<sub>2,5</sub> di rumah B pada juru masak lebih tinggi dibandingkan orang biasa di rumah B dan orang yang tinggal di rumah A. Peningkatan risiko PM<sub>2,5</sub> untuk juru masak di rumah B pada penyakit kardiovaskular sebesar 30% dan kardiopulmoner sebesar 34%. Peningkatan risiko PM<sub>2,5</sub> pada orang biasa di rumah B pada penyakit kardiovaskular sebesar 28% dan kardiopulmoner sebesar 31%. Sementara untuk orang yang tinggal di rumah A memiliki risiko terhadap penyakit kardiovaskular sebesar 26% dan kardiopulmoner sebesar 29%.

## PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Telkom, Indonesia, melalui pendanaan penelitian hibah internal untuk pengembangan dan optimalisasi produk pemantauan kualitas udara berbasis *low-cost* sensor, serta kepada Universitas Kanazawa, Jepang, terkait *Joint Research Program, The Institute of Nature and Environmental Technology* periode 2019–2023. Penelitian ini merupakan rangkaian pengujian produk untuk studi kasus pengukuran kualitas udara di dalam ruangan maupun lapangan. Untuk itu, tidak lupa penulis ucapkan terima kasih kepada Batan dan Lapan (saat ini tergabung dalam BRIN) atas kolaborasi secara langsung ataupun tidak dalam pengembangan produk tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chandra, I., Nisa, K., & Rosdiana, E. (2021). Preliminary study: health risk analysis of PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub> mass concentrations in Bandung Metropolitan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/824/1/012049>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., ... Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Darmawan, R. (2018). Environmental Health Risk Assessment of NO<sub>2</sub> Ambient Level and Toll Collectors Officer'S Health Complaints. *JURNAL KESEHATAN LINGKUNGAN*, 10(1), 116. <https://doi.org/10.20473/jkl.v10i1.2018.116-126>
- DeCarlo, P. F., Avery, A. M., & Waring, M. S. (2018). Thirdhand smoke uptake to aerosol particles in the indoor environment. *Science Advances*, 4(5). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap8368>
- Edwards, L., Rutter, G., Iverson, L., Wilson, L., Chadha, T. S., Wilkinson, P., & Milojevic, A. (2021). Personal exposure monitoring of PM<sub>2,5</sub> among US diplomats in Kathmandu during the COVID-19 lockdown, March to June 2020. *Science of The Total Environment*, 772, 144836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144836>
- Fang, Y., Naik, V., Horowitz, L. W., & Mauzerall, D. L. (2013). Air pollution and associated human mortality: The role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1377–1394. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1377-2013>
- Garcia, C. A., Yap, P.-S., Park, H.-Y., & Weller, B. L. (2016). Association of long-term PM<sub>2,5</sub> exposure with mortality using different air pollution exposure models: impacts in rural and urban California. *International Journal of Environmental Health Research*, 26(2), 145–157. <https://doi.org/10.1080/09603123.2015.1061113>
- Huboyo, H. S., Lestari, P., & Tohno, S. (2018). Modeling Indoor PM<sub>2,5</sub> Air Pollution, Estimating Exposure, and Problems Associated with Rural Indonesian Households Using Wood Fuel. In *Sustainable Future for Human Security* (pp. 287–300). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5433-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5433-4_20)
- Liu, B., He, M. M., Wu, C., Li, J., Li, Y., Lau, N. T., Yu, J. Z., Lau, A. K. H., Fung, J. C. H., Hoi, K. I., Mok, K. M., Chan, C. K., & Li, Y. J. (2019). Potential exposure to fine particulate matter (PM<sub>2,5</sub>) and black carbon on jogging trails in Macau. *Atmospheric Environment*, 198, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.024>
- Mestl, H. E. S., & Edwards, R. (2011). Global burden of disease as a result of indoor air pollution in Shaanxi, Hubei and Zhejiang, China. *Science of The Total Environment*, 409(8), 1391–1398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.020>
- Pope III, C. A. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*, 287(9), 1132. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Poursafa, P., & Kelishadi, R. (2011). What health professionals should know about the health effects of air pollution.pdf. *Iranian Journal of Nursing and Midwifery Research*, 16,3, 257–264.
- Rizkia, A. (2021). SPATIAL MODELING OF INDOOR AIR POLLUTION DISTRIBUTION AT HOME. Telkom University.
- Tahsiin, F., Anggraeni, L., Chandra, I., Salam, R. A., & Bethaningtyas, H. (2020). Analysis of Indoor Air QualityBased on Low-Cost Sensors. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(6), 2627–2633. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.6.12989>



- US EPA. (2020). *Indoor Air Quality (IAQ)*. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-particulate-matter>
- Vaicdan, F., Chandra, I., & Suhendi, A. (2019). *Pengamatan Konsentrasi Massa PM<sub>2,5</sub> di Cekungan Udara Bandung Raya (Observation of PM<sub>2,5</sub> mass concentrations in the Greater Bandung air basin)*.
- Wallace, L., Wang, F., Howard-Reed, C., & Persily, A. (2008). Contribution of Gas and Electric Stoves to Residential Ultrafine Particle Concentrations between 2 and 64 nm: Size Distributions and Emission and Coagulation Rates. *Environmental Science & Technology*, 42(23), 8641–8647. <https://doi.org/10.1021/es801402v>
- WDHS. (2021). *Carbon Dioxide*. <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>
- WHO. (2021a). *Cardiovascular diseases (CVDs)*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
- WHO. (2021b). *Household air pollution and health*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- WHO. (2021c). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*.
- Wu, T., Yang, X., Chu, A., Xie, X., Bai, M., Peng, Y., & Zhang, Z. (2022). Acute effects of fine particulate matter (PM<sub>2,5</sub>) on hospital admissions for cardiovascular diseases in Lanzhou, China: a time-series study. *Environmental Sciences Europe*, 34(1), 55. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00634-y>