

Fluktuasi Cemaran Udara Partikulat dan Tingkat Risikonya terhadap Kesehatan Masyarakat Kota Bogor

Fluctuation of Particulate Air Pollutant and Its Risk Level to the Public Health of Bogor City

IIF MIFTAHUL IHSAN^{1*}, MOH. YANI², RAHMAT HIDAYAT³, TETTY PERMATASARI⁴

¹Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, IPB University

²Departemen Teknologi Industri Pertanian, IPB University

³Departemen Geofisika dan Meteorologi, IPB University

⁴Dinas Lingkungan Hidup Kota Bogor

Email: iifmiftahulihsan@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

Health risk characteristics expressed as a Risk Quotient (RQ) can be carried out through an environmental health risk analysis (ARKL) approach. This approach can estimate the public health risk caused by the concentration of risk agents of particulates consisting of PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP. The research on the fluctuation of ambient air particulate pollutant and its risk to public health was conducted in each sub-district of Bogor City. Author identified a total of 360 respondents to determine the community anthropometric variable of exposures for time, frequency, and duration. There are several steps that need to be carried out to obtain the RQ value, namely identification of hazards from particulate risk agents, analysis of the dose-response in the form of Reference Concentration (RFC), analysis of the exposure obtained based on anthropometric variables, and the concentration of risk agents as well as characteristics of risk levels. The risk level characteristic shows that the RQ value of TSP is always the highest one, followed by PM₁₀ and PM_{2.5}. The respective RQ values of TSP for male and female residents are 1.85 and 1.53. Cumulatively, the male and female population in Tanah Sareal produced the highest RQ values. Those are 4.44 and 3.36, respectively. At the same time, the lowest cumulative RQ was obtained for male and female residents in East Bogor with RQ values of 2.96 and 2.54. The RQ value of each risk agent or the cumulative RQ that is more than 1 (RQ > 1) is stated to have or has a health risk, so it needs to be controlled, while the RQ value which is less than one (1) is displayed not to need to be controlled but needs to be maintained.

Keywords: *particulate, risk level, exposure assessment, anthropometric characteristic, environmental health risk assessment*

ABSTRAK

Karakteristik risiko kesehatan yang dinyatakan sebagai *Risk Quotient* (RQ) dapat dilakukan melalui pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Pendekatan ini dapat mengestimasi risiko kesehatan masyarakat yang disebabkan oleh konsentrasi agen risiko yaitu PM_{2.5}, PM₁₀, dan TSP di tiap-tiap kecamatan di Kota Bogor. Penulis mengidentifikasi sebanyak 360 responden yang terdiri dari laki-laki dan perempuan untuk menentukan variabel antropometri masyarakat di Kota Bogor, waktu paparan, frekuensi paparan, serta durasi paparan. Ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan untuk memperoleh nilai RQ, yaitu identifikasi bahaya dari agen risiko partikulat, analisis dosis-respon berupa *Reference Concentration* (RfC), analisis pajanan yang diperoleh berdasarkan variabel antropometri dan konsentrasi agen risiko serta karakteristik tingkat risiko. Karakteristik tingkat risiko menunjukkan nilai RQ TSP selalu paling tinggi diikuti PM₁₀, dan terendah adalah RQ PM_{2.5} dengan nilai tertinggi TSP untuk penduduk laki-laki dan perempuan masing-masing sebesar 1,85 dan 1,53. Secara kumulatif, penduduk laki-laki dan perempuan di Tanah Sareal menghasilkan nilai RQ tertinggi masing-masing sebesar 4,44 dan 3,36. Sedangkan RQ kumulatif terendah diperoleh untuk penduduk laki-laki dan perempuan di Bogor Timur dengan nilai RQ 2,96 dan 2,54. Nilai RQ tiap agen risiko ataupun RQ kumulatif yang lebih dari 1 (RQ > 1) dinyatakan memiliki atau terdapat risiko kesehatan sehingga perlu dikendalikan, sementara nilai RQ yang masing kurang dari satu dinyatakan tidak perlu dikendalikan tetapi perlu dipertahankan.

Kata kunci: partikulat, tingkat risiko, analisis pajanan, karakteristik antropometri, analisis risiko kesehatan lingkungan

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kota Bogor menjadi salah satu kota di Jawa Barat yang setiap tahunnya mengalami pertumbuhan penduduk. Pada tahun 2018 jumlah penduduk Kota Bogor mencapai 1.096.828 jiwa, meningkat dari tahun 2017 sebesar 15.819 jiwa (1,46%)⁽¹⁾. Dengan meningkatnya jumlah penduduk tersebut, aktifitas transportasi di Kota Bogor juga berpotensi mengalami peningkatan, dimana tercatat jumlah kendaraan bermotor di Kota Bogor sebanyak 22.293 kendaraan⁽²⁾. Selain itu, Kota Bogor menjadi kota wisata sehingga menyebabkan aktifitas transportasi di perkotaan meningkat. Tercatat jumlah wisatawan lokal pada tahun 2014 sebesar 4,3 juta meningkat sebesar 3 juta pada tahun 2008⁽³⁾.

Partikulat menjadi salah satu pencemar udara di wilayah perkotaan dimana zat ini merupakan campuran dari partikel padatan dan cairan yang tersebar luas di udara. Pada umumnya bahan utama penyusun partikulat terdiri dari sulfat, nitrat, amonium, dan ion organik seperti kalsium, sodium, nikel, tembaga, vanadium, dan zink. Partikulat atau yang biasa disebut dengan debu adalah sebagian besar dari komposisi emisi polutan yang berasal dari berbagai macam sumber seperti aktifitas kendaraan, industri atau pabrik semen serta pembuangan sampah terbuka⁽⁴⁾. Partikulat terdiri dari beberapa ukuran yang ditentukan berdasarkan sumbernya, yaitu *Total Suspended Particulate* (TSP) dengan ukuran diameter <30 μm , PM_{10} dengan ukuran diameter <10 μm , $\text{PM}_{2,5}$ (*Fine Particulate*) berukuran 2,5 μm yang akan masuk ke saluran pernafasan hingga aveoli dan paru, serta *ultra-fine* partikulat berukuran 0,1 μm ⁽⁵⁾.

Partikulat dikenal sebagai kontributor utama zat pencemar yang berdampak terhadap kesehatan. Kondisi tersebut mendapat banyak perhatian, terutama di negara-negara berkembang yang mengalami proses urbanisasi karena aktifitas industri dan transportasi yang meningkat⁽⁶⁾. Partikulat yang telah terhirup oleh manusia erat kaitannya dengan tingkat morbiditas (tingkat yang sehat dan sakit) serta mortalitas (tingkat kematian)⁽⁷⁾, dan sekitar 28% dari penyakit dan kematian disebabkan oleh partikulat yang disebabkan oleh pencemar udara di negara berkembang⁽⁸⁾. Dampak akut dari paparan jangka pendek dari pencemaran partikulat ($\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10}) telah meningkatkan jumlah kematian pasien rawat inap di rumah sakit karena terganggunya sistem pernafasan dan menyebabkan kardiovaskular. Sedangkan dampak tidak akutnya dari paparan partikel dalam jangka pendek telah memburuknya gejala

asma dan badan terasa tidak nyaman yang mengarah pada menurunnya tingkat produktivitas^(9,10).

Dampak jangka panjang dari pencemaran partikulat adalah meningkatkan risiko penyakit jantung serta penyakit pernafasan yang lebih fatal yang salah satunya adalah kanker paru-paru⁽¹⁰⁾, serta dapat meningkatkan risiko kematian⁽¹¹⁾. COMEAP⁽⁹⁾ menyatakan bahwa kenaikan konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ tiap 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dapat meningkatkan risiko kematian sebanyak 6%. $\text{PM}_{2,5}$ juga dapat memberikan dampak negatif dalam menghambat pertumbuhan tinggi badan, dimana paparan partikulat telah menurunkan status gizi tinggi badan menurut umur sebesar 0,41 (ekuivalen dengan 3,4 cm)⁽¹²⁾. Dalam penelitian lainnya dijelaskan bahwa konsentrasi partikulat yang meningkat dapat menurunkan tingkat visibilitas⁽¹³⁻¹⁶⁾, menurunkan kemampuan kognitif, meningkatkan kecemasan dan berdampak negatif pada psikologis^(17,18). Secara global, dampak dari pencemaran udara jangka panjang akan menyebabkan setidaknya 3% kematian akibat kardiovaskular dan 5% kematian akibat kanker paru-paru.

Konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10} di Kota Bogor dapat mencapai 104,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 251 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽¹⁹⁾, serta konsentrasi TSP sebesar 510,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tingginya konsentrasi partikulat tentunya menjadi permasalahan karena dapat meningkatkan tingkat risiko pencemaran udara yang selanjutnya berdampak pada kesehatan masyarakat di Kota Bogor. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengestimasi tingkat risiko pencemaran partikulat terhadap kesehatan masyarakat di Kota Bogor.

2. BAHAN DAN METODE

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif melalui cara mengumpulkan data konsentrasi partikulat ($\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , dan TSP), mengolah data serta mengestimasi dan menganalisis variabel yang diukur diantaranya konsentrasi partikulat serta tingkat risiko partikulat terhadap kesehatan masyarakat di tiap kecamatan di Kota Bogor yaitu Kecamatan Bogor Barat, Bogor Timur, Bogor Tengah, Bogor Utara, Bogor Selatan, dan Tanah Sareal.

2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan untuk mengukur konsentrasi $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , dan TSP adalah *High Volume Air Sampler* (HVAS) dengan metode gravimetri dengan pengambilan sampel dilakukan selama 24 jam. Data konsentrasi partikulat diukur dari periode pengukuran 20 Februari - 04 Maret 2020⁽²⁰⁾. Peralatan lainnya yang digunakan di antaranya timbangan analitik

dengan ketelitian 0,1 mg, barometer, manometer diferensial, termometer, dan desikator.

2.2 Metode Pengambilan Sampel dan Penentuan Konsentrasi PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP

Pengambilan sampel udara untuk penentuan konsentrasi PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP masing-masing merujuk pada SNI 7119.14:2016, SNI 7119.15:2016, dan SNI 7119.3:2017 dimana sampel udara tersebut ditangkap dengan menggunakan peralatan HVAS dengan menggunakan media penyaring atau filter serat kaca yang berat awalnya telah ditimbang. Jumlah partikulat yang terkumpul pada filter tersebut akan dianalisis secara gravimetri. Setelah filter ditempatkan dalam desikator selama 24 jam dengan kelembaban kurang dari 50% dengan suhu 15-35 °C, filter akan ditimbang sehingga akan diketahui berat akhirnya. Hasilnya ditampilkan dalam bentuk satuan massa partikulat yang terkumpul per satuan volume uji udara yang diambil sebagai µg/Nm³.

Untuk menghitung konsentrasi partikulat, terlebih dahulu perlu dilakukan perhitungan koreksi laju alir pada kondisi standar serta menghitung volume udara yang diambil. Setelah itu, dapat dilakukan perhitungan konsentrasi partikulat dengan peubah berat filter awal dan akhir serta volume contoh uji udara dalam keadaan standar.

2.3 Analisis Tingkat Risiko Partikulat

Untuk mengestimasi risiko zat pencemar udara partikulat terhadap kesehatan masyarakat di Kota Bogor dapat menggunakan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan merupakan suatu proses atau metode untuk menghitung atau memprakirakan risiko kesehatan pada manusia, termasuk identifikasi adanya faktor ketidakpastian, penelusuran pada pajanan tertentu, memperhitungkan karakteristik yang melekat pada agen yang menjadi perhatian dan karakteristik dari sasaran yang spesifik⁽²¹⁾. Ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan dalam analisis ARKL tersebut, yaitu identifikasi bahaya atau identifikasi sumber, analisis dosis-respon, analisis pemajanan dan karakteristik risiko yang dinyatakan dengan tingkat risiko.

Tingkat risiko dari pajanan PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP dinyatakan dengan nilai *Risk Quotient* (RQ), dimana apabila nilai RQ>1 menunjukkan bahwa risiko kesehatan ada dan perlu dikendalikan, dan apabila RQ<1 menunjukkan bahwa risiko tersebut tidak perlu dikendalikan tetapi perlu

dipertahankan. Nilai RQ dapat dihitung melalui persamaan 1.

$$RQ = \frac{I}{RfC} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- RQ : *Risk Quotient*;
- RfC : *Reference Concentration*, dan
- I : Asupan (mg/kg hari), yang dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2

$$I = \frac{C \times R \times t_e \times f_e \times D_t}{Wb \times t_{avg}} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- C : Konsentrasi PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP (mg/m³)
- R : Laju inhalasi (m³/jam)
- t_e : Waktu paparan (jam/hari), 24 jam/hari untuk kriteria pemukiman
- f_e : Frekuensi paparan (hari/tahun), 350 hari/tahun untuk kriteria pemukiman
- D_t : Durasi paparan (tahun), 30 tahun untuk dewasa
- Wb : Berat badan (kg)
- t_{avg} : Periode waktu rata-rata (hari), (30 tahun x 365 hari = 10.950 hari) untuk efek non-karsinogen

Dalam penelitian ini, besar laju inhalasi ditentukan berdasarkan rata-rata umur responden setiap kecamatan di Kota Bogor. Tidak hanya umur, berat badan yang digunakan sebagai dividen merupakan rata-rata berat badan responden setiap kecamatan di Kota Bogor. Untuk memperoleh data umur dan berat badan tiap responden, dilakukan wawancara kepada responden masyarakat Kota Bogor sebanyak 30 responden laki-laki dan 30 responden perempuan setiap kecamatan.

RfC merupakan *Reference Concentration*, dimana nilai RfC untuk PM₁₀, dan TSP masing-masing sebesar 0,014 dan 0,02 mg/kg hari⁽²²⁾. Untuk mendapatkan nilai RfC PM_{2,5} menggunakan Persamaan 3.

$$RfC = \frac{C \times R \times t_e \times f_e}{Wb \times t_{avg}} \dots\dots\dots(3)$$

Baku mutu PM₁₀ yang ditetapkan sebesar 50 µg/m³⁽²³⁾, dan sebanyak 75% konsentrasi PM₁₀ adalah PM_{2,5}. Oleh karena itu, baku mutu untuk PM_{2,5} adalah 37,5 µg/m³⁽²⁴⁾.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Identifikasi Bahaya

Identifikasi bahaya merupakan langkah awal untuk mengetahui atau mengestimasi tingkat risiko atau bahaya dalam proses analisis risiko kesehatan lingkungan. Dalam proses Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) dari pencemaran udara, identifikasi bahaya bertujuan untuk mengetahui dan mengestimasi bahan-bahan kimia atau jenis-jenis polutan yang

menjadi agen risiko (*risk agent*) yang berbahaya terhadap kesehatan manusia serta penyakit-penyakit yang akan timbul akibat pajanannya.

Partikulat merupakan jenis polutan yang memiliki risiko kesehatan non karsinogenik dan karsinogenik yang berbahaya terhadap kesehatan manusia. Tidak hanya berdampak terhadap kesehatan manusia, pencemaran partikulat juga dapat mempengaruhi penglihatan atau tingkat visibilitas, merusak kehidupan tumbuhan serta mempengaruhi iklim regional maupun global. Adapun dampak pencemaran partikulat terhadap kesehatan manusia diantaranya iritasi pada mata, gangguan

pernafasan, alergi, serta gangguan kesehatan lainnya.

Konsentrasi partikulat menjadi dasar atau basis data untuk perhitungan tingkat risiko di tiap-tiap kecamatan di Kota Bogor. Pengukuran konsentrasi partikulat PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP masing-masing merujuk pada SNI 7119.14:2016 (SNI 2016a), SNI 7119.15:2016 (SNI 2016b), dan SNI 7119.3:2017 (SNI 2017a) dengan menggunakan peralatan *High Volume Air Sampler* dan metode gravimetri. Hasil pengukuran konsentrasi partikulat tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengukuran konsentrasi PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP di Kota Bogor tahun 2020

Kecamatan	PM _{2,5} (µg/m ³)**	PM ₁₀ (µg/m ³)**	TSP (µg/m ³)**
Bogor Barat	36	57	128
Bogor Timur	26	36	88
Bogor Tengah	32	50	120
Bogor Utara	40	50	101
Bogor Selatan	30	45	93
Tanah Sareal*	45	52	115

*Tahun 2018 **rata-rata selama 24 jam pengukuran

3.2 Analisis Dosis-Respon

Analisis dosis-respon merupakan salah satu tahap dalam analisis risiko kesehatan lingkungan yang bertujuan untuk menentukan hubungan antara besarnya dosis pajanan bahan kimia dengan terjadinya efek yang merugikan kesehatan manusia. Dalam terminologi umum, dosis merupakan kadar dari sesuatu dalam hal ini adalah agen risiko (partikulat) yang dapat mempengaruhi suatu organisme secara biologis. Sedangkan respon merupakan efek yang terlihat atau dirasakan setelah terpapar oleh agen risiko yang bersifat merugikan. Respon dari paparan agen risiko tersebut berupa tanggapan awal hingga tanggapan yang lebih rumit seperti timbulnya kanker paru-paru pada manusia.

Analisis dosis-risiko atau *toxicity assessment* perlu dilakukan untuk menetapkan nilai-nilai kuantitatif toksisitas dari agen risiko untuk setiap bentuk spesi kimianya⁽²⁵⁾. Dalam studi analisis risiko kesehatan lingkungan, tingkat toksisitas agen risiko dapat dinyatakan dalam dosis referensi (RfD) untuk dampak kesehatan bersifat nonkarsinogenik serta *Cancer Slope Factor* (CSF) atau *Cancer Unit Risk* (CCR) untuk dampak kesehatan yang bersifat karsinogenik.

Untuk toksisitas dari agen risiko PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP yang menyebabkan efek

nonkarsinogenik melalui jalur inhalasi dapat dinyatakan dengan *Reference Concentration* (RfC), dengan nilai RfC untuk PM₁₀, dan TSP diperoleh dari penelitiannya sebelumnya yaitu masing-masing sebesar 0,014 (mg/kg hari) dan 0,02 (mg/kg hari)⁽²²⁾, sedangkan untuk PM_{2,5} sebesar 0,0102 (mg/kg hari) yang diperoleh dari perhitungan menggunakan Persamaan 3.

Nilai RfC 0,0102 (mg/kg hari) diperoleh dari perbandingan antara konsentrasi PM_{2,5} sebesar 0,0375 mg/m³, nilai *default* laju inhalasi sebesar 0,83 m³/jam, lama pajanan 24 jam/hari, frekuensi pajanan 350 hari/tahun, dan berat badan rata-rata serta periode waktu rata-rata masing-masing sebesar 70 kg dan 365 hari/tahun. Konsentrasi PM_{2,5} diturunkan dari baku mutu PM₁₀ yang ditetapkan sebesar 50 µg/m³, dimana sebanyak 75% konsentrasi PM₁₀ merupakan PM_{2,5} yaitu sebesar 37,5 µg/m³ atau 0,0375 mg/m³. Nilai RfC yang diperoleh bukan merupakan dosis mutlak dari suatu agen risiko, melainkan hanya dosis referensi. Apabila nilai dosis yang diterima oleh suatu individu atau populasi lebih besar dari nilai RfC, maka yang timbul adalah peluang terjadinya risiko kesehatan akan semakin besar⁽²⁶⁾.

3.3 Analisis Paparan

Pajanan atau pemajanan adalah suatu proses yang menyebabkan organisme kontak dengan bahaya lingkungan, dalam hal ini adalah PM_{2.5}, PM₁₀, dan TSP yang bisa terjadi melalui inhalasi, tertelan bersama makanan serta terserap melalui kulit atau kontak langsung melalui tubuh seperti kebisingan atau getaran⁽²⁷⁾. Analisis pajanan merupakan langkah evaluasi kuantitatif dan kualitatif dari suatu kontak yang menggambarkan intensitas, frekuensi dan durasi kontak, dimana bahan kimia atau agen risiko melintasi batas (kulit, mulut, atau pernafasan), dan menjadi langkah kunci dan penting dalam analisis risiko kesehatan lingkungan⁽²⁸⁾.

Untuk menghitung nilai pajanan atau paparan (*intake*) yang diterima oleh individu dalam suatu populasi yang berisiko, yang perlu diperhatikan adalah rute pajanannya yang bisa ditentukan melalui *critical pathway* (jalur pajanan dominan). Jalur tersebut menyangkut media lingkungan dan dengan cara apa agen risiko tersebut masuk ke dalam tubuh, dimana rute pajanan partikulat dominan melalui proses inhalasi. Nilai pajanan tersebut diperoleh dengan menghitung nilai konsentrasi agen risiko yang masuk ke dalam tubuh melalui proses inhalasi.

Tabel 2. Faktor pemajanan antropometri masyarakat Kota Bogor

Faktor Pemajanan	Nilai Numerik					
	Bogor Barat	Bogor Timur	Bogor Tengah	Bogor Utara	Bogor Selatan	Tanah Sareal
Rata-rata Umur Laki-Laki	36	42	45	40	42	41
Rata-rata Umur Perempuan	30	39	45	33	44	38
Rata-rata Berat Badan Laki-Laki (kg)*	68	65	65	63	61	61
Rata-rata Berat Badan Perempuan (kg)*	62	54	61	56	60	59
Laju Inhalasi Laki-Laki (m ³ /jam)**	0,85	0,87	0,87	0,85	0,87	0,85
Laju Inhalasi Perempuan (m ³ /jam)**	0,61	0,62	0,68	0,62	0,68	0,62
Waktu Paparan Harian (jam/hari)	24					
Frekuensi Paparan (hari/tahun)	350					
Durasi Paparan Dewasa (tahun)	30					
Periode Waktu Rata-rata untuk Non Karsinogenik (Hari)	10.950					
Periode Waktu Rata-rata untuk Karsinogenik (Tahun)	25.550					

* hasil survey **⁽²⁹⁾

Perhitungan nilai pajanan membutuhkan data atau variabel antropometri yang akan mempengaruhi besar dosis agen risiko yang diterima suatu individu. Variabel antropometri ini meliputi berat badan dan laju inhalasi suatu individu, dimana berdasarkan Persamaan 2 semakin besar berat badan akan memperkecil dosis yang diterima. Berat badan suatu individu dapat mempengaruhi laju inhalasi individu tersebut, karena laju inhalasi merupakan fungsi dari berat badan. Laju inhalasi individu akan berhubungan dengan laju metabolisme serta berkaitan dengan kebutuhan energi tubuh yang pada akhirnya akan mempengaruhi kebutuhan energi tubuh⁽³⁰⁾.

Berdasarkan hasil survei yang dilampirkan pada Tabel 2, terlihat bahwa Kecamatan Bogor Barat memiliki rata-rata berat badan tertinggi sebesar 68 kg untuk laki-laki dan 62 kg untuk perempuan. Sementara itu, rata-rata berat badan

paling rendah untuk laki-laki terjadi di Kecamatan Bogor Selatan dan perempuan di Bogor Timur dengan masing-masing berat badan sebesar 61 kg dan 54 kg. Berat badan pada individu ataupun populasi menjadi faktor penentu nilai pajanan, karena berat badan tersebut menjadi *dividen* atau pembagi dalam rasio perhitungan nilai pajanan. Selain itu, berat badan juga dapat mempengaruhi nilai laju inhalasi dari suatu individu ataupun populasi. Setiap individu atau populasi akan mengalami penurunan laju inhalasi ketika berat badan berada pada kisaran 70,9 kg untuk laki-laki dan perempuan berada pada kisaran 58,8 kg⁽³¹⁾.

Tidak hanya berat badan, umur tiap individu atau populasi juga akan mempengaruhi laju inhalasi individu atau populasi tersebut. Fungsi paru-paru dalam hal ini adalah laju inhalasi akan mengalami penurunan dengan semakin bertambahnya usia. Kondisi ini tentunya dapat

dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya kondisi lingkungan ataupun riwayat penyakit yang berhubungan dengan pernafasan. Tabel 2 tersebut menunjukkan bahwa rata-rata umur laki-laki dan perempuan tertinggi terjadi di Kecamatan Bogor Tengah sebesar 45 tahun. Sementara itu, rata-rata umur populasi laki-laki dan perempuan terkecil terjadi di Kecamatan Bogor Barat masing-masing sebesar 36 dan 30 tahun.

Kementerian Kesehatan menetapkan waktu pajanan harian, frekuensi pajanan serta durasi pajanan sebagai nilai-nilai *default* untuk perhitungan paparan dengan kriteria pemukiman⁽²¹⁾. Sementara itu, Kementerian

Kesehatan juga menetapkan nilai-nilai *default* untuk pajanan di lokasi kerja dengan nilai waktu pajanan harian dan frekuensi pajanan masing-masing bernilai 8 jam/hari dan 250 hari/tahun. Karakteristik aktifitas seperti waktu dan frekuensi pajanan dapat disesuaikan dengan kondisi aktual responden apabila kriteria responden spesifik, seperti diperoleh dari survei dengan responden pekerja pertambangan kapur dan pekerja sol sepatu^(22,32). Waktu pajanan ditentukan berdasarkan berapa lama para pekerja berada di lokasi pajanan setiap harinya, sedangkan frekuensi pajanan dihitung berdasarkan berapa hari dalam setahun para pekerja berada di area studi atau lokasi pajanan.

Tabel 3. Nilai pajanan PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP (x10⁻²) terhadap kesehatan masyarakat Kota Bogor

Kecamatan	Jenis Kelamin	PM _{2,5} (mg/kg hari)	PM ₁₀ (mg/kg hari)	TSP (mg/kg hari)
Bogor Barat	Laki-Laki	1,03	1,63	3,66
	Perempuan	0,81	1,29	2,89
Bogor Timur	Laki-Laki	0,80	1,12	2,73
	Perempuan	0,69	0,96	2,35
Bogor Tengah	Laki-Laki	0,98	1,55	3,71
	Perempuan	0,81	1,27	3,06
Bogor Utara	Laki-Laki	1,24	1,55	3,14
	Perempuan	1,02	1,28	2,58
Bogor Selatan	Laki-Laki	0,99	1,49	3,08
	Perempuan	0,77	1,16	2,39
Tanah Sareal	Laki-Laki	1,44	1,67	3,69
	Perempuan	1,09	1,26	2,78

Berdasarkan Tabel 3, populasi laki-laki di Kecamatan Tanah Sareal menjadi populasi yang memiliki nilai pajanan tertinggi dari polutan PM_{2,5} dan PM₁₀ masing-masing sebesar 1,44 mg/kg hari dan 1,67 mg/kg hari. Sementara itu, paparan polutan TSP tertinggi untuk populasi laki-laki terjadi di Bogor Tengah sebesar 3,71 mg/kg hari. Terkait populasi perempuan, paparan tertinggi terjadi di kecamatan Bogor (1,09 mg/kg hari PM_{2,5}), Bogor Barat (1,29 mg/kg hari PM₁₀) dan Bogor Tengah (3,06 mg/kg hari TSP).

Untuk interpretasi, sebagai contoh nilai pajanan PM_{2,5} sebesar 0,0144 (mg/kg hari) di Kecamatan Tanah Sareal untuk jenis kelamin laki-laki dapat diartikan bawah polutan berupa PM_{2,5} yang terhirup menunjukkan massa sebesar 0,0144 mg untuk rata-rata tiap kilogram berat badan individu setiap harinya. Nilai pajanan yang diterima oleh setiap individu/populasi yang bersifat pemukiman belum tentu sama dengan

nilai pajanan yang diterima oleh individu/populasi sebenarnya. Hal ini dikarenakan setiap individu tersebut tidak selalu berada di lokasi pemukiman atau area studi secara terus menerus.

3.4 Karakteristik Risiko

Karakteristik risiko menjadi langkah terakhir dalam proses analisis risiko kesehatan lingkungan yang bertujuan untuk mengetahui tingkat risiko dari pajanan polutan yang masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi. Karakteristik risiko dinyatakan sebagai tingkat risiko atau *Risk Quotient* (RQ) untuk agen risiko yang berpotensi mengakibatkan efek nonkarsinogenik seperti agen risiko PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP. Tingkat risiko (Persamaan 3) dari suatu agen risiko merupakan rasio atau pembagian antara nilai pajanan dari suatu individu/ populasi dan dosis respon dari agen risiko tersebut.

Tabel 4. Tingkat risiko (RQ) PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP di Kota Bogor

Kecamatan	Jenis Kelamin	PM _{2,5}	PM ₁₀	TSP	Kumulatif
Bogor Barat	Laki-Laki	1,01	1,16	1,83	4,00
	Perempuan	0,80	0,92	1,44	3,16
Bogor Timur	Laki-Laki	0,79	0,80	1,37	2,96
	Perempuan	0,68	0,69	1,17	2,54
Bogor Tengah	Laki-Laki	0,97	1,10	1,85	3,92
	Perempuan	0,80	0,91	1,53	3,24
Bogor Utara	Laki-Laki	1,22	1,11	1,57	3,90
	Perempuan	1,00	0,91	1,29	3,20
Bogor Selatan	Laki-Laki	0,97	1,06	1,54	3,57
	Perempuan	0,76	0,83	1,20	2,79
Tanah Sareal	Laki-Laki	1,41	1,19	1,84	4,44
	Perempuan	1,07	0,90	1,39	3,36

Tabel 4 menunjukkan perbedaan nilai RQ menurut konsentrasi PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP untuk kriteria penduduk pemukiman (residensial). Penduduk laki-laki di tiap-tiap kecamatan di Kota Bogor memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi dibandingkan perempuan. Terkait dengan agen risiko PM_{2,5}, penduduk laki-laki di Kecamatan Bogor Barat, Bogor Utara dan Tanah Sareal memiliki tingkat risiko kesehatan lebih dari 1 (RQ>1). Sedangkan tingkat risiko PM_{2,5} terhadap penduduk perempuan hanya ada di Bogor Utara dan Tanah Sareal. Untuk polutan PM₁₀, hanya penduduk laki-laki di Kecamatan Bogor Barat, Bogor Tengah, Bogor Utara, Bogor Selatan dan Tanah Sareal yang memiliki tingkat risiko lebih dari 1 (RQ>1). Untuk agen risiko TSP, penduduk laki-laki dan perempuan di setiap kecamatan memiliki tingkat risiko lebih dari satu. Tingkat risiko lebih dari 1 menunjukkan bahwa risiko kesehatan di wilayah tersebut ada sehingga perlu dikendalikan atau perlu adanya manajemen risiko.

Nilai numerik RQ yang lebih tinggi pada penduduk laki-laki dikarenakan laju inhalasi yang lebih tinggi dibandingkan perempuan. Dengan kelompok umur yang sama seperti kelompok umur 31-41, laju inhalasi laki-laki lebih tinggi sebesar 20,29 m³/hari dan perempuan sebesar 14,98 m³/hari⁽²⁹⁾. Laki-laki memiliki volume absolut paru-paru yang lebih besar dibandingkan perempuan⁽³³⁻³⁶⁾. Selain itu, laki-laki juga memiliki nilai rata-rata yang lebih besar untuk semua variabel seperti volume dan laju pernafasannya^(37,38), rongga hidung⁽³⁹⁾, serta koana⁽⁴⁰⁾. Rata-rata berat badan antara laki-laki dan perempuan juga akan mempengaruhi nilai

asupan yang akhirnya akan menentukan nilai numerik RQ tiap kecamatan. Berdasarkan hasil survei, rata-rata berat badan laki-laki lebih tinggi daripada rata-rata berat badan perempuan di tiap kecamatan (Tabel 3). Faktor antropometri berat badan dan umur dari responden yang disurvei juga menentukan frekuensi tingkat risiko (RQ>1) di tiap kecamatan di Kota Bogor, dimana berdasarkan jumlah responden yang disurvei (n=360) penduduk laki-laki yang disurvei mempunyai frekuensi tingkat risiko (RQ>1) yang lebih banyak daripada penduduk perempuan.

Perbandingan nilai RQ PM_{2,5} penduduk laki-laki berdasarkan wilayah adalah Tanah Sareal > Bogor Utara > Bogor Barat > Bogor Selatan dan Bogor Tengah > Bogor Timur dengan nilai berkisar dari 0,79 sampai 1,41. Tingkat risiko PM₁₀ penduduk laki-laki berkisar dari 0,80 sampai 1,19 dengan perbandingan berdasarkan wilayah adalah Tanah Sareal > Bogor Barat > Bogor Utara > Bogor Tengah > Bogor Selatan > Bogor Timur. Terkait dengan tingkat risiko TSP penduduk laki-laki, hasil analisis menunjukkan bahwa Bogor Tengah > Tanah Sareal > Bogor Barat > Bogor Utara > Bogor Selatan > Bogor Timur, dengan nilai RQ setiap kecamatan melebihi satu (RQ>1) dengan kisaran sebesar 1,37 sampai 1,85.

Nilai numerik RQ agen risiko PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP untuk penduduk perempuan berkisar dari 0,68 sampai 1,07; 0,69 sampai 0,92; 1,17 sampai 1,53. Perbandingan nilai tingkat risiko PM_{2,5} penduduk perempuan berdasarkan wilayah adalah Tanah Sareal > Bogor Utara > Bogor Barat dan Bogor Tengah > Bogor Selatan > Bogor Timur. Untuk RQ PM₁₀ penduduk

perempuan, perbandingannya adalah Bogor Barat > Bogor Utara dan Bogor Tengah > Tanah Sareal > Bogor Selatan > Bogor Timur. Sementara itu, perbandingan nilai RQ TSP Penduduk perempuan berdasarkan wilayah adalah Bogor Tengah > Bogor Barat > Tanah Sareal > Bogor Utara > Bogor Selatan > Bogor Timur.

4. KESIMPULAN

Variabel antropometri yang terdiri berat badan dan laju inhalasi dapat menentukan tingkat risiko pencemaran PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP terhadap kesehatan masyarakat di Kota Bogor. Tingkat risiko penduduk laki-laki di Kota Bogor lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat risiko pada penduduk perempuan. Secara wilayah, penduduk laki-laki dan perempuan di Kecamatan Tanah Sareal memiliki tingkat risiko pencemaran partikulat yang lebih tinggi dibandingkan kecamatan lainnya. Secara kumulatif, tingkat risiko di tiap kecamatan telah melebihi 1 (RQ>1) yang artinya terdapat risiko kesehatan dari pencemaran partikulat tersebut dan perlu dikendalikan.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi sebagai pemberi beasiswa, Dinas Lingkungan Hidup kota Bogor, serta kepada Saudara Ayub yang turut serta melakukan survei kepada masyarakat Kota Bogor. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada masyarakat Kota Bogor yang telah bersedia menjadi responden dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [BPS] Badan Pusat Statistik Kota Bogor. (2019). Statistik Daerah Kota Bogor 2019. Bogor (ID): Badan Pusat Statistik.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Barat. (2016). Provinsi Jawa Barat Dalam Angka 2016. Bandung (ID): Badan Pusat Statistik.
- [BPS] Badan Pusat Statistik Kota Bogor. (2018). Kota Bogor Dalam Angka 2018. Bogor (ID): Badan Pusat Statistik.
- Sarudji, D. (2010). Kesehatan Lingkungan. Bandung (ID): CV Karya Putra.
- Johnson, T.M., Guttikunda, S., Wells, G.J., Artaxo, P., Bond, T.C., Russell, A.G., Watson, J.C., & West J. (2011). Tools for Improving Air Quality Management : A review of Top-down Source Apportionment Techniques and Their Application in Developing Countries.

Washington (US): Energy Sector Management Assistance Program

- Abiye, O.E., Obioh, I.B., & Ezech, G.C. (2013). Elemental characterization of urban particulates at receptor locations in Abuja, North Central Nigeria. *ATM. Env.* 81, 695-701.
- 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), 69-74
- Onabowale, M.K., & Owoade O.K. (2015). Assessment residential indoor outdoor airborne particulate matter in Ibadan, Southwestern Nigeria. *Donnish J. Physical. Sci.* 1(1), 001 – 007.
- [COMEAP] Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. (2009). Long-Term Exposure to Air Pollution: Effect on mortality. A report by the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. England (UK): Health Protection Agency
- [AQEG] Air Quality Expert Group. (2012). Fine Particulate Matter (PM_{2,5}) in the United Kingdom. London (UK): Defra.
- [DEFRA] Department for Environment Food and Rural Affairs. (2012). Air Quality: Public Health Impacts and Local Actions. London (UK): Defra.
- Tan-Soo, J., & Pattanayak, S.K. (2019). Seeking Natural Capital Projects: Forest Fires, Haze, and Early-Life Exposure in Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 116(12), 5239-5245
- Field, R.D., van der Werf, G.R., & Shen, S.S.P. (2009). Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. *Nat. Geosci.* 2,185–188..
- Han, S., Bian, H., Zhang, Y., Wu, J., Wang, Y., Tie, X., Li, Y., Li, X., & Yao, Q. (2012). Effect of aerosols on visibility and radiation in spring 2009 in Tianjin, China. *Aerosol Air Qual. Res.* 12, 211–217.
- Langridge, J.M., Lack, D., Brock, C.A., Bahreini, R., Middlebrook, A.M., Neuman, J.A., Nowak, J.B., Perring, A.E., Schwarz, J.P., Spackman, J.R., & Holloway, J.S. (2012). Evolution of aerosol properties impacting visibility and direct climate forcing in an ammonia-rich urban environment. *J. Geophys. Res.* 117, 1-17.
- Kusumaningtyas, S.D.A., & Aldrian, E. (2016). Impact of the June 2013 Riau province Sumatera smoke haze event on regional air pollution. *Environ. Res. Lett.* 11(7), 1-11.

17. Lavy, V., Ebenstein, A., & Roth, S. (2014). The impact of short term exposure to ambient air pollution on cognitive performance and human capital formation. NBER Working Paper.
18. Pun, V.C., Manjouride, J., & Suh H. (2017). Association of ambient air pollution with depressive and anxiety symptoms in older adults: results from the NSHAP study. *Environmental Health Perspectives* 125, 342-348.
19. Nurhasanah I. (2019). Pengaruh Faktor Meteorologi Dan Jumlah Kendaraan Bermotor Terhadap Konsentrasi Partikulat (Studi Kasus : Kampus IPB Baranangsiang) [skripsi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
20. PT Sky Pacific Indonesia. (2020). Laporan Pengujian dan Analisa Kualitas Udara Ambien Musim Penghujan Kota Bogor Provinsi Jawa Barat Semester 1 Tahun 2020. Bogor (ID): PT Sky Pacific Indonesia
21. Kementrian Kesehatan. (2012). Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan. Jakarta (ID): Kementrian Kesehatan Republik Indonesia
22. Rahman, A., Nukman, A., Setyadi., Akib, C.R., Sofwan, & Jarot. (2008). Analisis risiko kesehatan lingkungan pertambangan kapur di Sukabumi, Cirebon, Tegal dan Tulung Agung. *Jurnal Ekologi Kesehatan* 7(1), 665-677.
23. [EPA] Environmental Protection Agency. (1990). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Washington (US): U.S. Environmental Protection Agency
24. Petters, A., Skorkovsky, J., Kotesovec, F., Brynda, J., Spix, C., Wichman, H.E., & Heinrich J. (2000). Association between mortality and air pollution in Central Europe. *Environmental Health Perspective* 108(4), 283-287.
25. Basri, S., Bujawati, E., Amansyah, M., Habibi, & Samsiana. (2014). Analisis risiko kesehatan lingkungan (model pengukuran risiko pencemaran udara terhadap kesehatan). *Jurnal Kesehatan* 7(2), 427-442
26. Siswati, & Diyanah, K.C. (2017). Analisis risiko pajanan debu (Total Suspended Particulate) di Unit Packer PT.X. *Jurnal Kesehatan Lingkungan* 9(1), 100-110.
27. Djafri, D. (2014). Prinsip dan metode analisis risiko kesehatan lingkungan. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Andalas*. 8(2), 100-104
28. [USEPA] U.S Environmental Protection Agency. (1992). Guidline for Exposure Assessment. Washington (US): Risk Assessment Forum U.S. Environmental Protection Agency
29. [USEPA] U.S Environmental Protection Agency. (2009). Metabolically derived human ventilation rates: a revised approach based upon oxygen consumption rates (final report). Washington (WA): US Environmental Protection Agency.
30. Nukman, A., Rahman, A., Warouw, S., Setiadi, M.I., & Akib, C.R. (2005). Analisis dan manajemen risiko kesehatan pencemaran udara: studi kasus di sembilan kota besar padat transportasi. *Jurnal Ekologi Kesehatan* 4(2), 270-289.
31. Brochu, P., Ducre-Robitaille, J.F., & Brodeur, J. (2006). Physiological daily inhalation rates for free-living individuals aged 1 month to 96 years, using data from doubly labeled water measurements: A proposal for air quality criteria, standard calculations and health risk assessment. *Hum Ecol Risk Assess* 12, 675-701.
32. Rahmadani, & Tualeka, A.R. (2016). Karakteristik risiko kesehatan akibat paparan polutan udara pada pekerja sol sepatu (di sekitar jalan raya bubutan kota Surabaya). *Jurnal Kesehatan Lingkungan* 8(2), 164-171
33. Dominelli, P.B., Molgat-Seon, Y., Bingham, D., Swartz, P.M., Road, J.D., Foster, G.E., & Sheel, A.W. (2015). Dysanapsis and the resistive work of breathing during exercise in healthy men and women. *J Appl Physiol*. 119, 1105-1113
34. Quanjer, P.H., Brazzale, D.J., Boros, P.W., & Pretto, J.J. (2012). Implications of adopting the Global Lungs Initiative 2012 all-age reference equations for spirometry. *Eur Respir J*. 42, 1046-1054.
35. Quanjer, P.H., Hall, G.L., Stanojevic, S., Cole, T.J., & Stocks, J. (2012). Age-and height-based prediction bias in spirometry reference equations. *Eur Respir J*. 40, 190-197
36. Schwartz, J., Katz, S.A., Fegley, R.W., & Tockman, M.S. (1988). Sex and race differences in the development of lung function. *Am Rev Respir Dis*. 138, 1415-1421.
37. Brooks, L.J., Byard, P.J., Helms, R.C., Fouke, J.M., & Strohl, K.P. (1988). Relationship between lung volume and tracheal area as assessed by acoustic reflection. *J Appl Physiol*. 64, 1050-1054
38. Brooks, L.J., Strohl, K.P. (1992). Size and mechanical properties of the pharynx in healthy men and women. *Am Rev Respir Dis*. 146, 1394-1397

39. García-Martínez, D., Torres-Tamayo, N., Torres-Sanchez, I., Garcia-Rio, F., & Bastir, M. (2016). Morphological and functional implications of sexual dimorphism in the human skeletal thorax. *Am J Phys Anthropol.* 161, 467–477
40. Bastir, M., Godoy, P., & Rosas, A. (2011). Common features of sexual dimorphism in the cranial airways of different human populations. *Am J Phys Anthropol.* 146, 414–422