

# Analisis Risiko Paparan PM<sub>2,5</sub> di Udara Ambien Siang Hari terhadap Masyarakat di Kawasan Industri Semen

## Risk Analysis of PM<sub>2,5</sub> Exposure in Ambient Air at Noon towards Community in Cement Industrial Estate

Randy Novirsa\* Umar Fahmi Achmadi\*\*

\*Research Center for Climate Change Universitas Indonesia, \*\*Departemen Kesehatan Lingkungan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia

### Abstrak

Salah satu dampak negatif industri pabrik semen terhadap kesehatan masyarakat adalah peningkatan risiko penyakit saluran pernapasan. Risiko tersebut banyak disebabkan oleh paparan partikulat di udara, khususnya partikulat berukuran di bawah 2,5 mikron (PM<sub>2,5</sub>). Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko paparan PM<sub>2,5</sub> di udara ambien siang hari pada masyarakat di kawasan industri semen. Risiko dihitung dengan metode Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan berdasarkan metode Louvar yang menghasilkan nilai *Intake* paparan yang diterima individu per hari berdasarkan nilai konsentrasi paparan, pola aktivitas individu, dan nilai antropometri. Konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di lingkungan diukur pada 10 titik dengan radius 500 meter antartitik dari pusat pabrik, sedangkan pola aktivitas dan nilai antropometri diukur dengan menggunakan kuesioner pada 92 responden dewasa di kawasan pabrik. Hasil perhitungan risiko yang diterima seumur hidup (*lifetime*) menunjukkan terdapat tiga area berisiko dengan nilai RQ > 1, yaitu Ring 2 (500 – 1.000 m), Ring 4 (1.500 – 2.000 m), dan Ring 5 (2.000 – 2.500 m). Daerah paling aman yang dapat dihuni oleh masyarakat di kawasan industri semen adalah di atas 2,5 km dari pusat industri dengan konsentrasi paling aman 0,028 mg/m<sup>3</sup>.

**Kata kunci:** Industri semen, infeksi saluran pernapasan, partikulat PM<sub>2,5</sub>

### Abstract

One of the negative impacts of cement industry to public health is an increased risk of respiratory disease. These risks are caused by exposure to particulate matter in air, especially fine particulate matter which is smaller than 2,5 microns (PM<sub>2,5</sub>). This study aimed to analyze the risks of PM<sub>2,5</sub> exposure in ambient air at noon on people around cement industry. Risk was calculated using Environmental Health Risk Analysis Method that generates value of individual exposure intake received per day. This value was generated based on the concentration of exposure, individual activity patterns, and anthropometric values. PM<sub>2,5</sub> concentrations in the environment was measured at 10 points (Ring) from the center of plant with radius of 500 me-

ters each point. The activity patterns and anthropometric values were measured using questionnaire to 92 adult respondents around the factory. The calculation of lifetime risk showed that there are three risked area: Ring 2 (500 – 1.000 m), Ring 4 (1.500 – 2.000 m), and Ring 5 (2.000 – 2.500 m). The safest area was over 2,5 kilometers from the center of the industry with the safest concentration was 0,028 mg/m<sup>3</sup>.

**Keywords:** Cement industry, respiratory disease, particulate PM<sub>2,5</sub>

### Pendahuluan

Kegiatan industri berperan vital dalam pertumbuhan ekonomi, tetapi juga berdampak negatif besar bagi kesehatan dan lingkungan. Salah satu dampak negatif tersebut adalah emisi partikulat di udara dari tungku industri dan industri pengolahan yang menurut penelitian Wiguna,<sup>1</sup> merupakan penyumbang terbesar sekitar 51,27%. Namun, yang menjadi perhatian penting adalah partikulat dengan ukuran di bawah 2,5 mikron (PM<sub>2,5</sub>). Hal tersebut disebabkan oleh PM<sub>2,5</sub> dapat secara leluasa masuk ke dalam saluran pernapasan dan mengendap di alveoli. PM<sub>2,5</sub> yang berasal dari kegiatan industri biasanya mengeluarkan berbagai material logam berat dan sulfur dioksida. *Environmental Protection Agency* dalam World Bank,<sup>2</sup> mengestimasi 90% dari PM<sub>2,5</sub> yang dikeluarkan ke udara mengandung sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>).

Berbagai material tersebut dapat menyebabkan berbagai gangguan saluran pernapasan seperti infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), kanker paru-paru,

Alamat Korespondensi: Randy Novirsa, Research Center for Climate Change Universitas Indonesia Gd. Rektorat Universitas Indonesia Lt. 8,5 Kampus Baru UI Depok 16424, Hp. 085719737981, e-mail: randy.novirsa@gmail.com

penyakit kardiovaskular, kematian dini, dan penyakit paru-paru obstruktif kronis.<sup>3</sup> Gangguan tersebut disebabkan oleh inflamasi dan injuri oleh pajanan PM<sub>2,5</sub> yang masuk ke dalam saluran pernapasan. Suatu studi eksperimen dilakukan pada tikus *Sprague-Dawley* (CD) untuk melihat efek pajanan partikulat pada perubahan fisiologi sel paru-paru. Tikus yang dipajankan dengan partikulat yang telah dilarutkan dalam larutan garam mengalami peningkatan laktat dehidrogenase (LDH) pada cairan *bronchoalveolar lavage* (BAL) hingga mencapai sekitar 153% dari keadaan normal. Peningkatan cairan LDH menunjukkan respons inflamasi atau injuri yang diakibatkan oleh peningkatan sel netrofil. Inflamasi tersebut selanjutnya mendorong terjadi penyakit ISPA.<sup>4</sup>

Masyarakat yang bermukim di kawasan industri merupakan yang paling berisiko terhadap pajanan PM<sub>2,5</sub> di udara, seperti masyarakat di Kecamatan Lubuk Kilangan, Kota Padang. Kecamatan ini dapat menjadi sangat berisiko karena industri semen merupakan salah satu penyumbang terbesar total emisi partikulat global.<sup>5</sup> Selain itu, material yang terkandung di dalam partikulat semen seperti silika dapat dengan mudah mengganggu saluran pernapasan.<sup>6</sup> Penelitian juga menunjukkan bahwa orang yang terpajan debu semen mengalami gangguan pernapasan seperti batuk yang panjang, suara pernapasan berat, asma, bronkitis, sinusitis, dan penyempitan saluran pernapasan.<sup>7</sup> Berdasarkan data Dinas Kesehatan Kota Padang tahun 2011, penyakit saluran pernapasan seperti ISPA masih menempati urutan teratas di Kota Padang. ISPA pada tahun 2011 sebanyak 115.361 kasus mengalami kenaikan dibanding tahun 2010 (84.075 kasus) dan tahun 2009 (42.076 kasus).

Kasus ISPA yang tinggi di daerah industri semen Kecamatan Lubuk Kilangan Kota Padang dapat dicurigai akibat kontribusi pajanan PM<sub>2,5</sub> di udara. Namun, belum banyak dilakukan penelitian tentang estimasi risiko terhadap manusia dengan menggunakan karakteristik pajanan lingkungan, antropometri, dan pola aktivitas. Berdasarkan latar belakang tersebut perlu dilakukan analisis risiko dalam rangka menilai besar risiko pajanan PM<sub>2,5</sub> terhadap masyarakat di kawasan industri semen di Kecamatan Lubuk Kilangan. Hasil penelitian ini tidak hanya bermanfaat dalam pengendalian risiko, tetapi juga dapat digunakan sebagai kerangka ilmiah dalam pengambilan keputusan dan kebijakan dalam mengatasi masalah-masalah kesehatan dan lingkungan.

## Metode

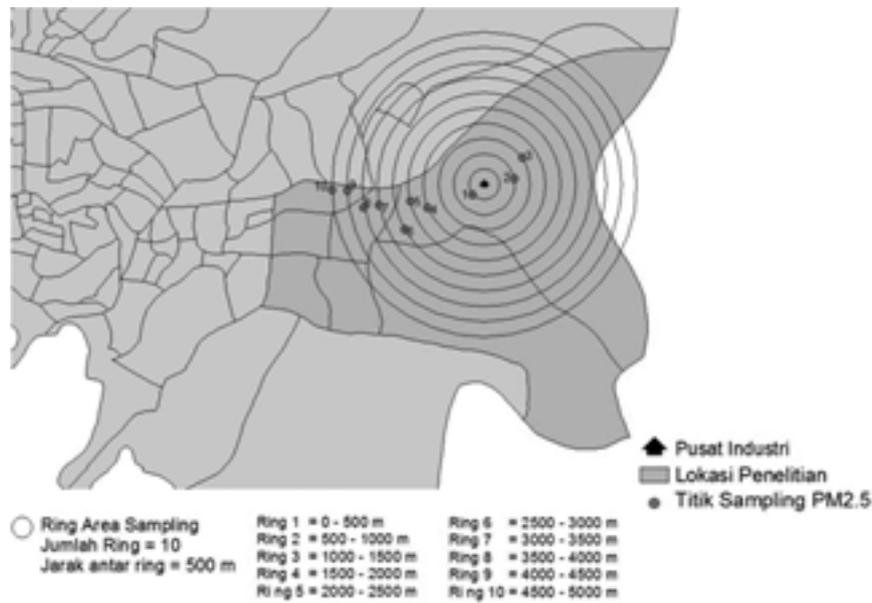
Penelitian dilakukan dengan metode studi analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) yang bertujuan memperkirakan risiko yang diterima suatu masyarakat akibat pajanan agen-agen pencemar di lingkungan. Analisis risiko kesehatan lingkungan bukan studi epidemiologi yang memaparkan efek-efek kesehatan dan

agen sebagai variabel independen dengan tujuan memperoleh hubungan kausalitas antarvariabel yang dipaparkan. *Sampling* dilakukan untuk mengambil udara ambien (*outdoor*) dalam ukuran *particulate matter* < 2,5 µm (PM<sub>2,5</sub>). Pengukuran PM<sub>2,5</sub> dilakukan dengan menggunakan alat sampel digital *direct reading* Haz-Dust EPAM 5.000 USA. Alat ini menggunakan metode *laser analyzer* dalam melakukan pengukuran partikulat. Hasil pengukuran dapat dibaca secara langsung setelah pengukuran dilakukan dengan membaca nilai *Time Weighted Average* (TWA) sebagai nilai rata-rata. Penentuan jumlah titik sampling dilakukan menggunakan kurva aproksimasi.<sup>8</sup> Jumlah titik ditentukan berdasarkan jumlah penduduk di suatu wilayah dan level pencemaran. Penentuan titik sampling kategori PM<sub>2,5</sub> disesuaikan dengan kategori SO<sub>2</sub> karena PM<sub>2,5</sub> juga terdiri dari senyawa SO<sub>2</sub>.<sup>2</sup> Jumlah penduduk di Kecamatan Lubuk Kilangan yang diteliti adalah 48.850 jiwa dan tingkat pencemaran tergolong rendah karena hanya terdapat satu sumber potensial. Berdasarkan kategori tersebut dengan jumlah penduduk di bawah 1 juta jiwa dan tingkat pencemaran rendah maka hanya diperlukan 10 titik pemantauan udara. Radius sampling ditentukan sebesar 500 meter antartitik. Titik sampel yang diambil sesuai dengan lokasi kelompok pemukiman masyarakat di sekitar kawasan industri tersebut (Gambar 1).

Sampel adalah masyarakat dewasa yang bermukim dalam kawasan industri semen Kecamatan Lubuk Kilangan dengan jarak maksimal 5 km dari pusat industri. Besar sampel yang ditetapkan dihitung menggunakan rumus acak sederhana untuk penelitian uji beda rata-rata, sehingga didapatkan jumlah sampel sebanyak 92 orang. Jumlah ini kemudian dibagi dengan proporsi yang sama pada setiap radius (ring). Data antropometri dan pola aktivitas dikumpulkan dari masyarakat dengan metode wawancara dan menggunakan instrumen kuesioner. Data antropometri dan pola aktivitas yang diambil berupa berat badan ( $W$ ), lama pajanan harian ( $t_E$ ), frekuensi pajanan dalam setahun ( $f_E$ ), dan durasi pajanan yang telah diterima oleh individu selama hidupnya di wilayah penelitian ( $D_{real}$ ).

Beberapa prosedur yang dilakukan meliputi identifikasi bahaya dan sumber risiko, analisis dosis respons, analisis pajanan, dan karakterisasi risiko. Tingkat risiko dinyatakan dalam *Risk Quotient* (RQ) yang dinyatakan sebagai perbandingan antara nilai *intake* dengan dosis referensinya ( $RfC$ ). *Intake* merupakan jumlah konsentrasi yang dihirup per kilogram berat badan per harinya, sedangkan  $RfC$  merupakan perkiraan dosis pajanan harian yang tidak menimbulkan efek kesehatan dalam pajanan *lifetime*. Suatu keadaan dinyatakan berisiko dan butuh manajemen pengendalian apabila nilai RQ > 1.

*Intake* (I) adalah jumlah agen risiko yang diterima in-



Gambar 1. Area Penelitian dan Titik Sampling Udara (Sampling Point).

Tabel 1. Konsentrasi *Time Weighted Average* (TWA) PM<sub>2,5</sub> di Udara Ambien di Kawasan Industri Semen X (mg/m<sup>3</sup>)

Ring	Lokasi	Jarak	Waktu Pengukuran	TWA
Ring 1	Perumnas Indrg	0 - 500 m	Siang	0,019
Ring 2	Indrg atas	500 - 1.000 m	Siang	0,041
Ring 3	Indrg atas	1.000 - 1.500 m	Siang	0,027
Ring 4	Indrg	1.500 - 2.000 m	Siang	0,038
Ring 5	Indrg	2.000 - 2.500 m	Siang	0,037
Ring 6	Kompleks Lemdadika	2.500 - 3.000 m	Siang	0,009
Ring 7	Kel. Pdg besi bukit atas	3.000 - 3.500 m	Siang	0,012
Ring 8	Mesjid Pdg Besi	3.500 - 4.000 m	Siang	0,015
Ring 9	Bandar Buat	4.000 - 4.500 m	Siang	0,013
Ring 10	Bandar Buat	4.500 - 5.000 m	Siang	0,024

dividu per berat badan per hari (mg/kg/hari), C = konsentrasi *risk agent* (mg/m<sup>3</sup>), R = laju asupan (*intake rate*), US-EPA default 0,83 m<sup>3</sup>/jam, t<sub>E</sub> = waktu paparan harian (jam/hari), f<sub>E</sub> = frekuensi paparan tahunan (hari/tahun), D<sub>t</sub> = durasi paparan, *real time* atau 30 tahun (*default proyeksi life span*) atau 70 tahun (US-EPA *life expectancy default*), W<sub>b</sub> = berat badan (kg), dan t<sub>avg</sub> = periode waktu rata-rata, 30 tahun x 365 hari/tahun (nonkarsinogen) atau 70 tahun x 365 hari/tahun (karsinogen).

## Hasil

### Konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di Udara Ambien

Konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di udara ambien di kawasan industri Semen X tidak menunjukkan nilai yang melewati nilai baku mutu PP 41/1999. Namun, terdapat beberapa titik yang melewati nilai standar baku mutu yang ditetapkan oleh US-EPA yang melebihi 0,035 mg/m<sup>3</sup> (Tabel

1). Tingkat konsentrasi PM<sub>2,5</sub> terlihat lebih kecil pada Ring 1 (0 – 500 m; 19 µg/m<sup>3</sup>) daripada Ring 2 (500 – 1.000 m; 41 µg/m<sup>3</sup>), kemudian turun pada Ring 3, seterusnya kembali naik pada Ring 5 dan mengalami penurunan drastis pada Ring 7 (Gambar 2).

### Karakteristik Antropometri dan Pola Aktivitas

Survei dilakukan pada 92 responden dewasa untuk mendapatkan gambaran umum karakteristik antropometri dan pola aktivitas masyarakat setempat. Komponen yang disurvei adalah berat badan, lama paparan harian, frekuensi paparan dalam setahun, dan durasi paparan yang telah diterima oleh individu selama hidupnya di wilayah penelitian (Tabel 2). Karakteristik umur responden berkisar antara 30 sampai 50 tahun (54%) dan sisanya di bawah 30 tahun (13%) dan di atas 50 tahun (34%). Pada rentang umur tersebut masyarakat lebih banyak beraktivitas di luar rumah, sehingga poten-

si untuk terpajan juga lebih besar. Potensi ini semakin diperkuat karena pekerjaan responden lebih banyak sebagai pedagang di sekitar rumah dan sebagai ibu rumah tangga, didominasi perempuan, masing-masing 50% dan 44%.

Lama pajanan harian yang diterima masyarakat adalah sekitar 24 jam dengan rata-rata 22,77 jam, sedangkan dalam satu tahun masyarakat lebih banyak terpajan selama 365 hari/tahun atau satu tahun penuh dengan rata-rata 356 hari/tahun. Pada hasil survei ini juga terlihat bahwa paling lama masyarakat yang tinggal dan telah terpajan dengan polutan adalah selama 67 tahun dengan pajanan tersingkat selama 1 tahun dan rata-rata 28,58 tahun atau 29 tahun. Berdasarkan hasil tersebut kemudian diambil nilai yang representatif untuk dijadikan sebagai elemen perhitungan *intake* (Tabel 3). Nilai laju inhalasi diambil berdasarkan nilai *default* rata-rata orang dewasa umur 21 – 61 tahun.

**Analisis Intake**

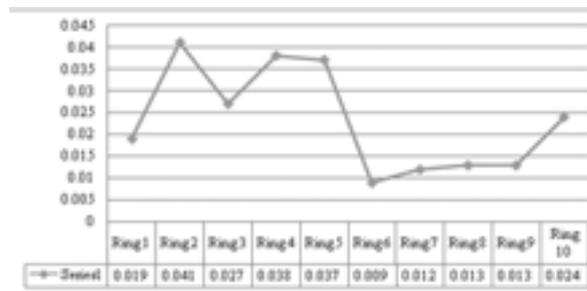
*Intake* dihitung menggunakan persamaan (2) dengan memasukkan nilai-nilai elemen pemajanan yang telah disurvei. Nilai rata-rata pajanan ( $t_{avg}$ ) yang digunakan adalah 30 x 365 karena tidak diidentifikasi secara khusus material yang terkandung di dalamnya PM2,5, sehingga nilai yang digunakan adalah rata-rata pajanan non-karsinogenik. Konsentrasi yang digunakan adalah konsentrasi PM2,5 yang terukur pada setiap ring (Tabel 4).

**Analisis Dosis-Respons**

Penentuan dosis referensi aman ( $RfC$ ) diturunkan dengan menggunakan nilai baku mutu *National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS), yaitu 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk baku mutu PM2,5. Nilai ini ( $RfC$ ) tidak diturunkan dari baku mutu PP 41/1999 karena nilai *default* faktor pemajannya tidak diketahui. Nilai  $RfC$  diturunkan sehingga nilai  $RfC$  yang digunakan dalam penentuan risiko pajanan PM2,5 adalah 0,01 mg/kg/hari.

**Karakterisasi Risiko**

Penentuan risiko dihitung dengan membandingkan nilai *intake* tiap-tiap ring dengan nilai dosis referensinya ( $RfC$ ), yaitu dengan menggunakan persamaan (1). Hasil perhitungan risiko disajikan dalam Tabel 4. Hasil perhitungan risiko *lifetime* yang didapatkan dari perbandingan antara *intake* dan nilai  $RfC$  menghasilkan 3 daerah berisiko ( $RQ > 1$ ) yaitu pada Ring 2, Ring 4, dan Ring 5. Area ini termasuk ke dalam radius 2,5 km dari sumber pencemar (Gambar 3). Jarak 2,5 km juga merupakan jarak jangkauan konsentrasi PM2,5 tertinggi yang terukur dan nilai *intake* tertinggi yang diterima oleh masyarakat. Sedangkan jarak diatas 2,5 km dari sumber pencemar tidak memperlihatkan adanya risiko dan potensi pencemaran PM2,5 tinggi.



Gambar 2. Konsentrasi Time Weighted Average (TWA) PM2,5 di Udara Ambien

Tabel 2. Karakteristik Antropometri dan Pola Aktivitas Responden (n = 92)

Elemen	Rata-rata	Median	Modus	Min	Max	Std. Deviasi
Berat badan (W) (kg)	58,41	58	60	35	90	10,286
Lama pajanan ( $t_E$ ) (Jam/hari)	22,77	24	24	12	24	2,56
Frekuensi pajanan ( $f_E$ ) (hari/tahun)	356,37	363	365	185	365	21,681
Durasi pajanan <i>real time</i> ( $D_{real}$ )	28,58	28	1	1	67	19,154

Tabel 3. Elemen Perhitungan *Intake*

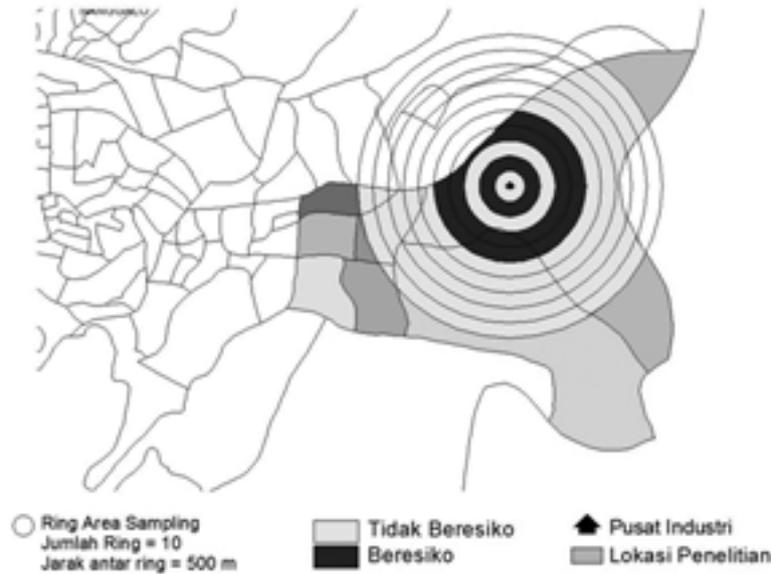
Elemen	Nilai
Berat Badan (W) (Kg)	58,41
Lama Pajanan ( $t_E$ ) (Jam/hari)	24
Frekuensi Pajanan ( $f_E$ ) (hari/tahun)	363
Durasi pajanan seumur hidup ( <i>lifetime</i> ) ( $D_L$ )	30
Laju Inhalasi ( $m^3/\text{jam}$ )	0,88

Tabel 4. Hasil Perhitungan *Intake* dan Risiko pada Setiap Ring

Ring	<i>Intake</i>	RQ	Risiko
Ring 1	0,006764088	0,6764	Tidak berisiko
Ring 2	0,01459619	1,4596	Berisiko
Ring 3	0,009612125	0,9612	Tidak berisiko
Ring 4	0,013528176	1,3528	Berisiko
Ring 5	0,013172172	1,3172	Berisiko
Ring 6	0,003204042	0,3204	Tidak berisiko
Ring 7	0,004272056	0,4272	Tidak berisiko
Ring 8	0,00462806	0,4628	Tidak berisiko
Ring 9	0,00462806	0,4628	Tidak berisiko
Ring 10	0,008544111	0,8544	Tidak berisiko

**Manajemen Risiko**

Pada area yang terindikasi berisiko terkena pajanan PM2,5 perlu manajemen risiko untuk mengurangi dampak pajanan pada manusia dalam waktu yang lama. Manajemen risiko dapat dilakukan dengan memanipulasi faktor-faktor pemajanan kejadian penyakit, yaitu manajemen pada sumber, manajemen pada media pajanan, atau manajemen pada manusia. Manajemen pada sumber dapat dilakukan dengan menurunkan nilai konsentrasi di udara ambien hingga mencapai batas konsentrasi aman dalam pajanan *lifetime*. Penentuan konsen-



Gambar 5. Daerah Tingkat Risiko Lifetime Paparan PM<sub>2,5</sub> di Kawasan Industri Semen Kec. Lubuk Kilangan

trasi aman dapat dilakukan dengan menganggap nilai *intake* =  $RfC$ .

*Intake* yang digunakan adalah 0,01 mg/kg/hari karena nilai *intake* sama dengan  $RfC$ . Laju inhalasi ( $R$ ) yang digunakan adalah laju inhalasi standar orang dewasa pada umur 21 – 61 tahun yaitu 0,88 m<sup>3</sup>/jam. Selanjutnya berat badan ( $W$ ), lama paparan ( $t_E$ ), frekuensi paparan ( $f_E$ ), durasi paparan ( $D_t$ ), dan rata-rata paparan ( $t_{avg}$ ) yang digunakan sama dengan nilai yang digunakan pada perhitungan *intake lifetime*. Berdasarkan perhitungan tersebut nilai konsentrasi PM<sub>2,5</sub> aman yang boleh terpajan pada masyarakat dalam waktu paparan sepanjang hayat (*lifetime*) adalah 0,028 mg/m<sup>3</sup>.

### Pembahasan

Pada pengukuran PM<sub>2,5</sub> terdapat peningkatan konsentrasi pada radius 500 – 1.000 meter, 1.500 – 2.000 meter, dan 2.000 – 2.500 meter. Kondisi ini dapat disebabkan oleh beberapa hal. Pertama, faktor ketinggian cerobong emisi. Kebijakan untuk menambah ketinggian cerobong sebenarnya bukan solusi untuk mengurangi tingkat konsentrasi pencemar di udara, tetapi hanya mengurangi konsentrasi pada daerah sekitar emisi. Partikulat akan terakumulasi dan menjadi tinggi pada jarak-jarak tertentu yang lebih jauh dengan kecepatan angin lebih rendah. Pada hasil penelitian ini konsentrasi PM<sub>2,5</sub> terlihat tinggi pada jarak antara 1 km hingga 2,5 km.

Selain itu, kondisi geografis kawasan industri pada jarak sekitar 2.000 meter dari pusat industri terletak di

daerah perbukitan juga memengaruhi besarnya konsentrasi PM<sub>2,5</sub>. Hal ini menyebabkan konsentrasi polutan menjadi terakumulasi di permukaan dan tidak mampu mencapai permukaan yang lebih tinggi. Jika ini terjadi dalam 2 sampai 3 hari, konsentrasi polutan dapat naik 10 hingga 20 kali lebih besar. Inilah yang memengaruhi besarnya konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di kawasan pabrik pada radius 500 – 2.500 meter.

Selain itu, naik dan turunnya konsentrasi PM<sub>2,5</sub> pada setiap radius juga dapat dipengaruhi oleh waktu *sampling* yang dilakukan pada siang hari. Pada siang hari suhu pada permukaan bumi lebih cepat panas dibandingkan beberapa ratus meter di atasnya. Suhu ini kemudian akan menurun pada setiap ketinggian 100 meter sebesar 1°C. Kondisi ini menyebabkan kumpulan polutan yang keluar dari cerobong akan melayang pada level ketinggian cerobong untuk beberapa ratus meter. Kemudian perbedaan tekanan dan suhu akan membawa polutan turun ke permukaan yang bersuhu lebih tinggi dan tekanan lebih rendah. Siklus ini terus berlanjut hingga beberapa ribu meter sampai polutan terdispersi dengan merata, sehingga terlihat naik turun konsentrasi di sepanjang kawasan sumber pencemar.

Kondisi ini ternyata juga berpengaruh terhadap hasil *intake* dan nilai risiko pada masing-masing radius. Hasil perhitungan *intake* menunjukkan bahwa *intake* semakin besar seiring dengan semakin besarnya konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di area tersebut. Daerah yang terindikasi mendapatkan *intake* besar adalah pada radius 500 – 1.000 meter dan 2.000 – 2.500 meter dengan besar *intake* antara

0,011 sampai 0,014 mg/kg/hari. *Intake* ini belum tentu sama dengan *intake* yang diterima oleh individu sebenarnya. *Intake* yang diterima dapat saja lebih kecil atau lebih besar. Ini dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, pertama, pengukuran konsentrasi PM<sub>2,5</sub> tidak dilakukan secara personal menggunakan *personal dust sampler* (PDS) karena pengukuran dengan PDS lebih dapat merepresentasikan kadar konsentrasi yang dihirup setiap waktunya berdasarkan pola aktivitas individu masing-masing.

Kedua adalah aktivitas individu yang tidak selamanya berada di luar ruangan. Konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di dalam ruangan biasanya lebih besar dibandingkan dengan kadar di luar ruangan karena dapat bersumber dari bahan bakar di dapur, asap rokok, dan juga sumber dari luar ruangan.<sup>9</sup> *Intake* yang diterima dapat saja lebih besar jika masyarakat lebih banyak menghabiskan waktu di dalam ruangan. Namun berbeda dengan studi yang dilakukan oleh Tsai et al.,<sup>10</sup> tentang kualitas udara di dalam ruangan dan di luar ruangan di Bangkok. Fluktuasi harian kualitas udara di dalam ruang berhubungan dengan fluktuasi kualitas udara di luar ruang. Konsentrasi udara ambien diperkirakan sama dengan konsentrasi udara dalam ruang, sehingga nilai *intake* yang diterima setiap harinya sama antara di dalam ruangan dan di luar ruangan. Adanya perbedaan ini dapat disebabkan oleh perbedaan wilayah studi. Perbedaan kualitas udara di dalam ruangan dan di luar ruangan biasanya banyak terdapat di wilayah negara berkembang karena banyaknya penggunaan bahan bakar fosil di dalam ruang. Hal ini berbeda dengan wilayah negara maju yang lebih sedikit menggunakan bahan bakar fosil di dalam ruang.<sup>9</sup>

Daerah berisiko pajanan PM<sub>2,5</sub> muncul pada radius 500 – 1.000 meter, 1.500 – 2.000 meter, dan 2.000 – 2.500 meter, sedangkan pada radius 0 – 500 meter risiko lebih kecil. Munculnya risiko ini berbanding lurus dengan tingkat konsentrasi PM<sub>2,5</sub> dan *intake*. Semakin besar *intake* dan konsentrasi juga meningkatkan besar risiko di wilayah tersebut. Namun, hal berbeda ditemukan pada penelitian Daud,<sup>11</sup> mengenai analisis risiko SO<sub>2</sub> di kawasan industri Makassar. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa risiko semakin tinggi dengan semakin dekatnya jarak ke kawasan industri (OR = 5,83). Kondisi ini tentu berbeda karena penelitian yang dilakukan Daud dilakukan pada lokasi industri dengan berbagai sumber pencemar (*multiple source*) sehingga udara yang terukur adalah akumulasi. Berbeda pada penelitian ini, udara yang diukur berdasarkan satu sumber emisi dan cerobong yang sama (*point source*).

Daerah berisiko dapat saja muncul pada area-area di atas radius 5 km. Hal ini terlihat dari adanya kecenderungan peningkatan konsentrasi PM<sub>2,5</sub> dan nilai *intake* pada daerah dengan radius 5 km dari pusat pabrik. Daerah ini secara geografis juga mengalami penurunan

kontur dibandingkan daerah di dekat pusat pabrik. Pada kondisi ini, kecepatan angin menjadi lebih tenang dan mengakibatkan akumulasi polutan di udara. Selain itu, sumber polutan dari pusat kota juga akan memberikan andil terhadap penambahan konsentrasi polutan. Namun, studi lanjutan perlu dilakukan untuk memastikan peningkatan risiko pada area tersebut.

Pada penelitian ini tidak digunakan faktor meteorologi seperti arah angin, suhu, curah hujan, dan kelembaban dan faktor kontur wilayah. Hasil risiko hanya digambarkan sebagai bidang datar pada suatu wilayah tanpa mempertimbangkan faktor-faktor tersebut. Risiko dapat lebih besar pada wilayah yang tertimpa arah angin lebih besar atau mempunyai kontur di wilayah lembah.<sup>12</sup>

Untuk mengurangi besar konsentrasi partikulat di udara dapat dilakukan pemasangan alat penyaring udara pada cerobong sumber pencemaran yang telah dilakukan dengan memasang *electrostatic precipitator* dan *jet pulse filter* pada cerobong-cerobong *kiln* dan *coal mill*. Namun, hal tersebut tidak efektif mengurangi konsentrasi polutan PM<sub>2,5</sub> secara signifikan karena partikel-partikel yang lebih kecil masih dapat lolos dari sistem saringan, terbukti masih terdapat konsentrasi yang cukup tinggi di sekitar kawasan pabrik.

Pengendalian polutan di udara juga dapat dilakukan dengan melakukan penghijauan dan pengembangan ruang terbuka hijau atau penanaman pohon di kawasan industri dan permukiman masyarakat. Pohon secara alami dapat menyerap polutan yang ada di udara dan lebih efektif pada pohon-pohon berdaun lebar.<sup>13</sup> Selain itu, setiap satu hektar ruang terbuka hijau dapat menghasilkan 0,6 ton oksigen per harinya. Ini dapat mengurangi pekatannya konsentrasi polutan yang terlarut di udara.<sup>13</sup> Peraturan pemerintah juga perlu diperketat untuk menerapkan lokasi pemukiman pada area aman dari pusat pabrik. Berdasarkan studi ini, lokasi pemukiman aman dari pusat pabrik sebaiknya berada di atas 2,5 km. Namun, untuk jenis industri lainnya perlu dilakukan studi lebih lanjut. Hal ini sesuai dengan Peraturan Menteri Perindustrian No. 35 Tahun 2010 tentang Pedoman Teknis Kawasan Industri bahwa jarak permukiman sekurang-kurangnya berada pada batas 2 km dari pusat industri.

## Kesimpulan

Terdapat tiga area yang melebihi nilai standar *National Ambient Air Quality Standards United States-Environment Protection Agency* meliputi Ring 2, Ring 4, dan Ring 5. Kenaikan dan penurunan konsentrasi PM<sub>2,5</sub> dapat disebabkan oleh beberapa faktor meliputi ketinggian cerobong, kecepatan angin dan kontur wilayah, dan siklus udara pada cuaca normal di siang hari. Area berisiko terbesar terdapat pada area yang lebih dekat dengan sumber pencemar, mempunyai *intake* tinggi, dan

pada area dengan tingkat konsentrasi PM<sub>2,5</sub> tinggi. Jarak paling aman bagi pemukiman dari sumber pabrik semen adalah di atas 2,5 km. Manajemen risiko pada masyarakat yang paling memungkinkan dilakukan adalah mengurangi besar konsentrasi PM<sub>2,5</sub> di udara dan memperbanyak ruang terbuka hijau.

### Saran

Penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan faktor-faktor meteorologi dan topografi wilayah dalam penentuan analisis risiko. Faktor-faktor tersebut sangat berpengaruh dalam menentukan wilayah paling berisiko dan menentukan karakteristik konsentrasi partikulat di udara. Penanaman pohon dan perluasan ruang terbuka hijau perlu ditingkatkan di sekitar lokasi industri dan permukiman masyarakat. Pohon-pohon dapat mengurangi konsentrasi partikulat yang terlarut di udara.

### Daftar Pustaka

1. Wiguna O. Polutan industri jangan diabaikan. In: Muhammad, Ari, Nurbianto, editors. Jakarta Kota Polusi Menggugat Hak Atas Udara Bersih. Jakarta: Lembaga Penelitian, Pendidikan, dan Penerangan Ekonomi dan Sosial Indonesia; 2006.
2. World Bank Group. Airborne particulate matter; 1998: 201-7.
3. World Health Organization. Exposure to air pollution: a major public health concern. Geneva: WHO Document Production Services; 2010.
4. Dye JA, Lehmann JR, McGee JK, Winsett DW, Ledbetter AD, Everitt IJ, et al. Acute pulmonary toxicity of particulate matter filter extracts in rats: coherence with epidemiologic studies in Utah Valley residents. *Environmental Health Perspectives*. 2001; 109(3): 395-403.
5. Zeyede KZ, Moen BE, Bratveit M. Cement dust exposure and acute lung function: a cross shift study. *Biological Medical Central Pulmonary Medicine*. 2010; 10(19): 1-10.
6. Mwaiselage J, Bratveit M, Moen B, Yost M. Variability in dust exposure in a cement factory in Tanzania. *Ann. Occupational Hygiene*. Oxford: Oxford University Press. 2005; 6: 511-9.
7. Al-Neaimi YI, Gomes J, Lloyd OL. Respiratory illness and ventilatory function among workers at a cement factory in rapidly development country. *Occupational Medicine*. 2001; 51 (6): 367-73.
8. Soedomo N. Kumpulan karya ilmiah mengenai pencemaran udara. Bandung: Penerbit ITB; 2001.
9. Smith R Kirk, Summet S. Indoor air pollution. In: Murray F, McGranahan G. Air Pollution and Health in Rapidly Developing Countries. London: Earthscan; 2003.
10. Tsai FC, Smith KR, Vichit-Vadakan N, Ostro BD, Chestnut LG, Kungskulniti N. Indoor/outdoor PM<sub>10</sub> and PM<sub>2,5</sub> in Bangkok Thailand. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2000; 10 (1): 15-26.
11. Daud A. Analisis risiko konsentrasi SO<sub>2</sub> dan PM<sub>2,5</sub> terhadap penurunan kapasitas fungsi paru penduduk di sekitar kawasan industri Makassar. *Lingkungan Tropis*. 2010; 4(2): 129-37.
12. Leili M, Naddafi K, Nabizadeh R, Yunesian M, Mesdaghinia A. The study of TSP and PM<sub>10</sub> and their heavy metal content in central area of Tehran Iran. *Air Quality Atmosphere and Health*. 2008; 1 (3): 159-66.
13. Parlupi B. Ruang terbuka hijau sebagai pengendali polusi udara. In: Muhammad A dan Nurbianto, editors. Jakarta Kota Polusi Menggugat Hak Atas Udara Bersih. Jakarta: Lembaga Penelitian, Pendidikan, dan Penerangan Ekonomi dan Sosial Indonesia; 2008.