

Kajian Fisika Lingkungan dan Demografi untuk Karakteristik PM_{2,5} di Wilayah Perkotaan

Muchammad Chusnan Aprianto*

*Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132*

Abstrak

Telah dilakukan studi literatur tentang karakteristik PM_{2,5} perkotaan dengan mengambil sumber penelitian dari berbagai kota besar di Amerika, Asia, dan Indonesia. Berdasarkan hasil studi literatur, konsentrasi PM_{2,5} dipengaruhi oleh jumlah penduduk (populasi) dan pengaruh fisika lingkungan yaitu faktor meteorologi serta geografi wilayah kota. Sedangkan untuk spesiasi PM_{2,5} di perkotaan dipengaruhi oleh sumber pencemar antropogenik. Untuk penelitian selanjutnya, karakteristik PM_{2,5} di perkotaan perlu dipertajam dengan menambahkan faktor ruang terbuka hijau kota. Selain itu, penelitian dampak PM_{2,5} terhadap kesehatan perlu dilakukan terutama untuk kota besar di negara berkembang.

© 2017 Penulis. Diterbitkan oleh Pendidikan Fisika UHAMKA

Kata kunci: PM_{2,5}, populasi, fisika lingkungan, meteorologi, spesiasi, perkotaan

*Penulis koresponden. Alamat email: chusnan82@hotmail.com

Pendahuluan

Perkembangan dan pembangunan kota memicu munculnya permasalahan lingkungan. Permasalahan lingkungan muncul dari skala rumah tangga sampai ke perkantoran yang meliputi permasalahan kebutuhan air, sanitasi, pengolahan limbah, dan pencemaran udara [1]. Salah satu penyebab permasalahan ini adalah peningkatan populasi di wilayah perkotaan melalui urbanisasi. Urbanisasi meningkatkan standar kesejahteraan hidup, namun juga mengakibatkan peningkatan emisi kendaraan bermotor yang menjadi penyebab polusi udara [2-3]. Selain itu, pertambahan jumlah wisatawan baik domestik dan luar negeri juga merupakan penyebab pencemaran udara [4-5].

Materi partikulat (PM) ambien merupakan salah satu polutan udara. Materi partikulat tersusun atas campuran sulfat (SO₄²⁻), amoniak (NH₄⁺), nitrat (NO₃⁻), materi organik, debu, garam laut, air, dan unsur atau senyawa lain [6]. Terdapat dua jenis materi partikulat yaitu materi partikulat dengan diameter < 10 μm (PM₁₀) dan materi partikulat dengan diameter < 2,5 μm

(PM_{2,5}) [7]. Bahan penyusun partikulat dapat dihasilkan dari kegiatan yang berbeda. Senyawa sulfur dihasilkan oleh proses pembakaran bahan bakar fosil dan batu bara, sedangkan senyawa karbon dihasilkan oleh pembakaran materi organik [6]. Spesiasi materi partikulat untuk kebutuhan monitoring dilakukan dengan menganalisis senyawa ion, materi organik, dan unsur partikulat [8].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa materi partikulat memiliki dampak bagi kesehatan manusia. Infeksi saluran pernapasan akut (ISPA) muncul akibat materi partikulat yang masuk dan terakumulasi melalui sistem respirasi [9]. Buteau & Goldberg menunjukkan bahwa paparan PM_{2,5} selama 24 jam berpengaruh terhadap variabilitas detak jantung pada responden yang memiliki penyakit jantung [10]. Penelitian ini membuktikan bahwa paparan PM_{2,5} berpengaruh terhadap kesehatan jantung.

Penelitian tentang polutan udara dan dampaknya telah banyak dibahas dalam literatur. Meskipun demikian, pembahasan secara khusus untuk PM_{2,5} (faktor pengaruh, konsentrasi, dan spe-

siasi) di wilayah perkotaan masih jarang dilakukan. Untuk melengkapi pembahasan ini, penelitian literatur ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik PM_{2,5} di wilayah perkotaan. Secara keseluruhan, artikel ini membahas tentang aspek populasi terhadap konsentrasi PM_{2,5}, pengaruh faktor meteorologi terhadap konsentrasi PM_{2,5}, dan spesiasi PM_{2,5} di perkotaan.

Pengaruh Populasi Terhadap Konsentrasi PM_{2,5}

Populasi berpengaruh terhadap konsentrasi PM_{2,5} yang terpapar. Han *et al.* menunjukkan bahwa dinamika urbanisasi tahun 1973 - 2013 di Beijing telah meningkatkan konsentrasi PM_{2,5} [3]. Ia merumuskan keterkaitan antara populasi dengan konsentrasi PM_{2,5} melalui pers. (1).

$$C(\text{PM}_{2,5}) = 0,0218p + 6,0395 \quad (1)$$

Dimana $C(\text{PM}_{2,5})$ adalah konsentrasi PM_{2,5} (μgm^{-3}) dan p adalah populasi (jiwa). Hubungan kedua variabel ini juga diperkuat oleh penelitian lainnya. Lin *et al.* membuktikan bahwa rerata populasi-berbobot (*population-weighted mean*) untuk konsentrasi PM_{2,5} tertinggi pada tingkat kota dan kabupaten dengan resolusi data 1 km [11]. Untuk sebagian besar kota, hasil ini menunjukkan bahwa terdapat korelasi positif antara konsentrasi PM_{2,5} dengan densitas populasi.

Tingkat konsentrasi PM_{2,5} berbeda berdasarkan kondisi sosio-demografi dan tingkat sosial ekonomi [12]. Tabel 1 menunjukkan perbedaan konsentrasi PM_{2,5} berdasarkan sosio-demografi penduduk.

Tabel 1 Distribusi PM_{2,5} pada individu berdasarkan sosio-demografi

Konsentrasi rata-rata (μgm^{-3})	
Jenis kelamin ⁺ [12]	
Laki-laki	17,66
Perempuan	13,18
Usia ⁺⁺ (tahun) [13]	
0 - 4	45,8
5 - 11	46,6
12 - 17	40,8
18 - 24	38,4
25 - 54	36,4
> 65	42,8
Pekerjaan ⁺ [12]	
Bekerja	14,43
Tidak bekerja	22,59
Jumlah orang dewasa di rumah ⁺ [12]	
Satu	15,64
Lebih dari satu	15,07

⁺paparan 48 jam, EXPOLIS Helsinki

⁺⁺paparan 24 jam, Filadelpia

Aktivitas harian penduduk berpengaruh terhadap konsentrasi PM_{2,5} yang terpapar. Kegiatan merokok, berkendara, kegiatan industri, dan aktivitas bekerja menjadi salah satu sumber PM_{2,5}. Kondisi ini menjelaskan perbedaan konsentrasi pada Tabel 1 laki-laki terpapar PM_{2,5} lebih tinggi daripada perempuan, karena jumlah perokok sebagian besar dari laki-laki. Berdasarkan usia, konsentrasi PM_{2,5} yang terpapar pada populasi sekitar 1,1 μgm^{-3} sampai dengan 69,5 μgm^{-3} [14]. Pada Tabel 1 berdasarkan kelompok usia, rata-rata konsentrasi PM_{2,5} tertinggi terukur pada usia 5 sampai dengan 11 tahun. Namun, berdasarkan risiko kesehatan, kelompok usia > 65 tahun memiliki risiko asma, gejala terkait stroke, diabetes dan gejala penyakit jantung [11], [14], [15].

Selain indikator sosio-demografi, konsentrasi PM_{2,5} yang terpapar dapat ditentukan berdasarkan indeks kualitas udara per rerata populasi. Zhang *et al.* telah mengitung konsentrasi tersebut di Beijing, Cina dan merumuskan persamaan populasi yang terpapar *et al.* seperti pada pers. (2) [16].

$$P_{\text{tingkat}_i} = E_{\text{pop}_i} / E_{\text{pop}} \quad (2)$$

Dimana P_{tingkat_i} adalah persentase populasi yang terpapar pada tingkat indeks kualitas udara ke- i . Sedangkan E_{pop} mewakili populasi terpapar yang melampaui indeks kualitas udara dan dirumuskan melalui pers. (3).

$$E_{\text{pop}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{pop}_i} \quad (3)$$

Dengan E_{pop_i} adalah total populasi yang terpapar di bawah tingkat indeks kualitas udara ke- i . Besaran E_{pop_i} dirumuskan dengan pers. (4).

$$E_{\text{pop}_i} = \sum_{j=1}^n E_{\text{pop}_{i,j}} \quad (4)$$

Besaran $E_{\text{pop}_{i,j}}$ adalah sensus penduduk ke- j pada populasi yang terpapar dibawah indeks kualitas udara tingkat- i . Besaran ini sama dengan perkalian antara luasan wilayah dibawah indeks kualitas udara tingkat- i ($A_{\text{tingkat}-i}$) dengan sensus penduduk untuk densitas populasi k (d_k). Nilai d_k dirumuskan melalui pers. (5).

$$d_k = P_k / A_k \quad (5)$$

Nilai P_k adalah sensus penduduk untuk populasi k , sedangkan A_k adalah sensus penduduk pada wilayah k .

Pengaruh Perubahan Musim

Saat ini, kajian kualitas udara dan kondisi iklim perkotaan menjadi isu pokok yang sering dikaji, khususnya yang berkaitan dengan pengaruh terhadap kesehatan penduduk. PM_{2,5} di perkotaan

merupakan hasil dari aktivitas manusia akan terakumulasi di sekitar sumber polutan. Kondisi iklim kota seperti curah hujan, perubahan musim, dan arah angin mempengaruhi distribusi dan densitas polutan udara [17-20]. Kondisi ini menyebabkan perbedaan kualitas udara di beberapa bagian kota.

Beberapa penelitian tentang pengaruh kondisi meteorologi telah dilakukan. Wang *et al.* menganalisis parameter dan kondisi meteorologi yang dapat mempengaruhi konsentrasi PM_{2,5} dan kualitas udara di kota Beijing dan beberapa kota di Cina Utara [17]. Mereka menggunakan parameter fungsi kondensasi f_c dan parameter berat β untuk melihat pengaruh dan perubahan konsentrasi PM_{2,5}. Pada musim kering dan dingin akan memiliki nilai f_c rendah dan parameter β menjadi besar, sehingga menghasilkan kondisi tersuspensi pada partikel-partikel halus. Pada musim panas dan suhu udara lembab, peningkatan suhu dan kelembaban akan menaikkan nilai f_c , tetapi nilai β akan menjadi rendah.

Selain itu, konsentrasi PM_{2,5} dapat ditentukan melalui data dari PM₁₀ dengan menganalisis hubungan antara konsentrasi PM_{2,5} and PM₁₀ serta kondisi meteorologi untuk setiap musim. Yin *et al.* telah mengkaji hubungan ini menggunakan model *multiple nonlinear regression* dengan asumsi bahwa hubungan antara rerata konsentrasi PM_{2,5} dengan variabel bebas x tidak linear (pers. (6)) [19].

$$y = \alpha + \sum_{j=0}^n \beta_j x_j + \sum_{j>i} \beta_{ji} x_j x_i + \sum_{j=0}^n \beta_{jj} x_j^2 \quad (6)$$

Dimana y adalah rerata konsentrasi harian dari PM_{2,5} dan α adalah titik perpotongan. Nilai x_0 adalah rerata konsentrasi harian dari PM₁₀, x_j adalah variabel meteorologi, sedangkan j adalah koefisien regresi.

Liu *et al.* menemukan bahwa konsentrasi PM_{2,5} dipengaruhi oleh musim dan wilayah geografis yang berbeda [20]. Pada musim semi, musim panas, dan musim gugur serupa dengan cuaca pada daerah tropis, sehingga memiliki konsentrasi PM_{2,5} tinggi. Jika dibandingkan dengan suhu udara dan kelembaban atmosfer, konsentrasi PM_{2,5} cenderung halus, menunjukkan bahwa dalam hubungannya dengan suhu sedang, tidak kering maupun udara lembab (kecuali lembab-sedang) secara signifikan berhubungan dengan konsentrasi PM_{2,5}.

Spesiasi PM_{2,5}

Konsentrasi dan komposisi PM_{2,5} dipengaruhi oleh kondisi geografi wilayah. PM_{2,5} mempunyai spesiasi senyawa kimia maupun logam berat yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Oleh karena itu, spesiasi PM_{2,5} perlu dilakukan untuk mengidentifikasi unsur dan senyawa penyusun-

nya. Beberapa negara telah melakukan spesiasi untuk PM_{2,5}. Di Cina, spesiasi telah dilakukan dengan melihat kondisi geografi wilayah. Rerata konsentrasi PM_{2,5} tertinggi ($>100 \mu\text{gm}^{-3}$) ditemukan di wilayah perkotaan bagian utara dan barat Cina, sedangkan rerata konsentrasi PM_{2,5} terendah ($<40 \mu\text{gm}^{-3}$) ditemukan di wilayah hutan [21]. Secara khusus untuk kota Shanghai, komponen SO₄²⁻ memiliki tingkat konsentrasi tertinggi ($10,2 \mu\text{gm}^{-3}$) dalam PM_{2,5} ($47,0 \mu\text{gm}^{-3}$) [22]. Tingkat konsentrasi komponen dalam PM_{2,5} di Cina ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Persentase komponen PM_{2,5} di Cina [21]

Komponen	Persentase (%)
SO ₄ ²⁻	7,1 - 57
NO ₃ ⁻	17,7 - 53
NH ₄ ⁺	7,1 - 43
Materi organik, kerak, karbon	1,3 - 12,8

Di Indonesia, spesiasi PM_{2,5} perkotaan telah dilakukan di Serpong dengan menganalisis data pada tahun 2008 s.d. 2010. Komponen pada PM_{2,5} secara berturut-turut adalah Pb; Al; Na; Fe; K; Cl; Mg; Si; S; Ca; Sc; Ti; V; Cr; Mn; Co; Cu; Ni; Zn; As; Se; Br; Ba; P; dan Hg dengan rata-rata konsentrasi PM_{2,5} masing-masing adalah 228,6; 80,6; 111,9; 46,8; 139,9; 33,0; 45,1; 150,3; 769,9; 37,8; 1,2; 3,3; 1,3; 1,5; 2,9; 0,5; 2,0; 0,8; 40,5; 6,6; 1,2; 3,4; 4,2; 21,5; dan 2,3 ng/m³ [23]. Sebagian besar komponen PM_{2,5} di Serpong adalah logam berat yang berasal dari sumber antropogenik seperti kendaraan bermotor, pembakaran biomassa, pembakaran bahan bakar di sekitar Serpong.

Kesimpulan

Konsentrasi PM_{2,5} dipengaruhi oleh sumber pencemar, perubahan musim, dan faktor meteorologi. Faktor-faktor tersebut akan mempengaruhi distribusi dan spesiasi PM_{2,5} di wilayah perkotaan. Populasi juga menjadi faktor yang mempengaruhi konsentrasi PM_{2,5}. Semakin besar aktivitas manusia, maka semakin besar pula sumber antropogenik yang dapat meningkatkan konsentrasi PM_{2,5}. Komponen PM_{2,5} untuk perkotaan terdiri dari SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, materi organik, materi kerak, dan karbon, serta logam berat. Saran untuk penelitian selanjutnya, karakteristik PM_{2,5} di perkotaan perlu dipertajam dengan menambahkan faktor ruang terbuka hijau kota. Selain itu, penelitian dampak PM_{2,5} terhadap kesehatan perlu dilakukan terutama untuk kota besar di negara berkembang.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Prof. Puji Lestari serta Dr. Benno Rahardian atas kritik dan saran terkait topik PM_{2,5}. Selain itu,

penulis sampaikan terima kasih kepada rekan-rekan pasca sarjana Program Studi Teknik Lingkungan ITB atas bantuannya pada registrasi akun Puskom sehingga penulis dapat mengakses jurnal dan artikel ilmiah.

Referensi

- [1] F. Miraftab dan N. Kudva, *Cities of the Global South Reader*, (Routledge, New York, 2015).
- [2] M. Shekarzifard, A. Faghieh-Imani, dan M. Hatzopoulou, *Environ. Res.* **147**, 435-444 (2016).
- [3] L. Han, W. Zhou, dan W. Li, *Sci. Rep.* **6**, 23604 (2016).
- [4] O. Saenz-de-Miera dan J. Rosselló, *Tour. Manag.* **40**, 273-281 (2014).
- [5] W.Q. Gan *et al.*, *Environ. Res.* **116**, 11-16 (2012).
- [6] B. Sportisse, *Fundamentals in Air Pollution: from Processes to Modelling*, (Springer, London, 2010).
- [7] A. Dabass *et al.*, *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **219** (3), 301-310 (2016).
- [8] W.C. Malm, B.A. Schichtel, and M.L. Pitchford, *J. Air Waste Manage. Assoc.* **61** (11), 1131-1149 (2011).
- [9] F. Matt *et al.*, *Environ. Int.* **97**, 45-55 (2016).
- [10] S. Buteau dan M.S. Goldberg, *Environ. Res.* **148**, 207-247 (2016).
- [11] C. Lin *et al.*, *Remote Sens. Environ.* **179**, 13-22 (2016).
- [12] T. Rotko *et al.*, *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* **10** (4), 385-393 (2000).
- [13] J.M. Burke, M.J. Zufall, dan H. Ozkaynak, *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* **11** (6), 470-489 (2001).
- [14] R. Peled, *Atmos. Environ.* **45** (10), 1781-1785 (2011).
- [15] K. van Ryswyk *et al.*, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* **24** (3), 260-268 (2014).
- [16] A. Zhang *et al.*, *PLoS One.* **8** (5), (2013).
- [17] J. Wang *et al.*, *Atmos. Environ.* **81**, 158-165 (2013).
- [18] Y. Han *et al.*, *Environ. Pollut.* **205**, 307-314 (2015).
- [19] Q. Yin *et al.*, *J. Environ. Sci.* **48**, 161-168 (2016).
- [20] Y. Liu *et al.*, *Atmos. Environ.* **148**, 297-305 (2017).
- [21] F. Yang *et al.*, *Atmos. Chem. Phys.* **11** (11), 5207-5219 (2011).
- [22] H.L. Wang *et al.*, *J. Clean. Prod.* **112**, 1302-1311 (2016).
- [23] R. Mukhtar *et al.*, *Ecolab* **7** (1), 1-7 (2013).