

MODEL DINAMIKA PENCEMARAN UDARA, PERANANNYA DALAM STUDI IKLIM PERKOTAAN DI INDONESIA

Sri Hartati Soenarmo

Staf Jurusan Geofisika dan Meteorologi Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral
Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Model dinamika pencemaran udara didisain untuk skala daerah mikro sampai meso. Pembahasan daerah perkotaan bersifat lokal sampai regional. Dengan demikian, komponen-komponen pembahasannya identik, terutama dalam estimasi sirkulasi angin dan peningkatan temperatur perkotaan karena peningkatan konsentrasi gas rumah kaca.

Kata kunci:

Dinamika Pencemaran Udara – Model Difusi Turner – Sirkulasi Angin – Peningkatan Temperatur – Gas Rumah Kaca – Iklim Perkotaan.

1. PENDAHULUAN

Iklim perkotaan adalah kondisi rata-rata cuaca di perkotaan pada perioda waktu tertentu. Dengan demikian, iklim mempunyai siklus siang-malam, bulanan, musiman, tahunan, dekade atau periode yang lebih panjang misalnya 11 (sebelas) tahunan, 30 (tiga puluh) tahunan, tergantung pada tujuan studi iklim. Dalam hal studi iklim perkotaan di Indonesia dipengaruhi oleh geometri daerah sehingga dikenal iklim perkotaan pegunungan, iklim perkotaan pantai dan iklim perkotaan datar. Iklim perkotaan pegunungan pada umumnya berada di bagian lembah atau cekungan, seperti Bandung; iklim perkotaan pantai, banyak ditemui di Indonesia seperti Jakarta; iklim perkotaan datar berada pada daerah dengan topografi dataran seperti Yogyakarta.

Sirkulasi angin yang mempengaruhi masing-masing tipe iklim perkotaan adalah unik. Iklim

perkotaan pegunungan dipengaruhi oleh angin lokal lembah dan gunung, sementara iklim perkotaan pantai dipengaruhi oleh angin lokal laut dan darat. Interaksi antara angin-angin lokal dengan angin monsun memungkinkan untuk dapat merubah arah dan kecepatan sirkulasi angin. Pada iklim perkotaan datar, sirkulasi angin cenderung dikendalikan oleh angin monsun. Angin monsun di Indonesia adalah angin yang bertiup sebagai akibat dari perbedaan pemanasan antara benua Asia dan lautan Hindia pada musim panas di Asia dan perbedaan pemanasan antara benua Australia dan lautan china Selatan pada musim panas di Australia. Keberadaan garis khatulistiwa yang membelah Indonesia menjadi bagian BBU dan BBS mengakibatkan adanya dua macam sirkulasi angin monsun di Indonesia, yaitu angin monsun Timur Laut dan Barat Daya pada bagian BBU dan angin monsun Barat Laut dan Tenggara pada bagian BBS. Karena angin monsun dominan di Indonesia, maka iklim

perkotaan di Indonesia secara umum dikendalikan oleh angin monsun, seperti dijelaskan di atas.

Dinamika pencemaran udara adalah proses berpindahnya zat pencemar untuk mencapai jarak maksimum dengan konsentrasi maksimum yang dikenal dengan daerah penerima pencemaran udara. Dinamika pencemaran udara dipengaruhi oleh dua macam proses, yaitu proses pengangkutan atau transportasi sesuai dengan arah dan kecepatan angin dan proses difusi sesuai dengan stabilitas atmosfer. Komponen stabilitas atmosfer adalah radiasi matahari, temperatur dan profil temperatur, penutupan awan, angin dan profil angin serta kelembaban dan hujan. Sedangkan komponen iklim adalah radiasi matahari, temperatur udara, tekanan udara, angin, penguapan, kelembaban dan curah hujan. Dengan demikian komponen-komponen yang diperlukan dalam dinamika pencemaran udara langsung maupun tidak langsung identik dengan komponen-komponen iklim. Oleh karenanya pada bagian selanjutnya akan dijelaskan mengenai hubungan pencemaran udara dan iklim, model dinamika pencemaran udara, konsentrasi pencemaran udara dan iklim perkotaan.

2. PENCEMARAN UDARA DAN IKLIM

Pencemaran adalah masuknya zat pencemar kedalam udara, apabila melampaui ambang batas yang diperkenankan bagi kehidupan manusia, hewan dan tumbuhan. Materi yang pada umumnya termasuk dalam kategori pencemaran udara adalah: karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (N_2O), nitrogen dioksida (NO_2), metan (CH_4), khlorofluorokarbon (CFCs), sulfur dioksida (SO_2), ozon (O_3), aerosol atau partikulat (Tsp). Apabila dilihat dari komposisi atmosfer, maka gas-gas ini berada pada bagian komposisi yang tidak permanen atau variabel, kecuali CH_4 dan N_2O . Karena keberadaannya sangat terbatas,

maka kelebihan konsentrasi dari batas ambang akan mengakibatkan permasalahan pencemar udara.

Peningkatan zat/materi pencemaran akan mempengaruhi temperatur udara, atau dikenal dengan efek rumah kaca. Berbagai kegiatan yang menghasilkan gas-gas pencemar udara dan dapat mempengaruhi iklim (disadur dari Schneider and Londer, 1984) antara lain:

- CO_2 dari pembakaran bahan bakar fosil dapat meningkatkan absorpsi dan emisi radiasi infra merah terestrial (efek rumah kaca), sehingga memungkinkan terjadinya pemanasan di troposfer dan pendinginan di atmosfer. Secara global merupakan pengaruh utama terhadap iklim dan aktifitas biologi.
- (CH_4) (CFC_s), N_2O , karbon tetrachlorid, karbon disulfid mempengaruhi iklim, sama seperti pengaruh gas CO_2 .
- Aerosol (partikulat) dari industri dan agrikultur menghamburkan dan mengabsorpsi cahaya matahari, sehingga dapat:
 - Mengurangi albedo permukaan tanah, meningkatkan albedo di permukaan air (menambah hangat di tanah dan mendinginkan di air).
 - Merubah stabilitas atmosfer bagian bawah akibatnya akan meningkatkan proses konveksi dan memungkinkan untuk meningkatkan hujan konvektif.
- Aerosol (jelaga dan SO_2) juga berperan dalam proses kondensasi dan pembekuan (sebagai inti kondensasi dan inti yang mempercepat pembekuan), sehingga mempengaruhi pertumbuhan tetes awan, mempengaruhi jumlah curah hujan, dan melalui jumlah awan yang ada dapat mengganggu albedo sehingga merubah kesetimbangan panas bumi.

- Pencemaran udara termal secara langsung memanaskan lapisan permukaan. Pencemaran panas ini sifatnya lokal, namun penting dan berpengaruh dalam merubah sirkulasi angin regional dan global.
- Di daerah tropis seperti Indonesia memungkinkan untuk terjadinya pengangkutan (CH_4) (CFCs) dan N_2O ke atmosfer, sehingga terjadi reaksi fotokimia yang mampu mengurangi Ozon (O_3) di stratosfer. Hal ini terjadi karena keberadaan Cumulonimbus raksasa.
- Reaksi fotokimia (misalnya N_2O dan CO) yang meningkatkan Ozon di troposfer akan mengakibatkan pemanasan atmosfer besar-besaran baik langsung dari radiasi matahari maupun oleh efek rumah kaca. Pemanasan ini, walaupun semula lokal dapat berpengaruh pada pemanasan iklim regional dan global (Ozon troposfer secara langsung dapat juga menimbulkan penyakit pada manusia dan tanaman).
- Perubahan-perubahan dalam pola tata guna lahan (misalnya karena urbanisasi, agrikultur, pembabatan hutan) akan merubah albedo permukaan, evapotranspirasi dan run off, juga menghasilkan aerosol, yang kemungkinan mempengaruhi iklim global.
- Bahan radio aktif Krypton-85 dari reaktor nuklir dan pabrik pemroses kembali bahan bakar meningkatkan konduktivitas atmosfer bagian bawah yang kemungkinan dapat mengganggu medan listrik bumi dan curah hujan konvektif.

Dari sederetan hubungan antara keberadaan pencemaran udara dengan iklim, dapat diketahui bahwa antara pencemaran udara dengan iklim ada hubungan sangat erat dan timbal balik. Walaupun dalam makalah ini tidak dilengkapi dengan data statistik, namun pengaruh timbal balik ini dapat dirasakan, dan sudah banyak ahli yang telah mengemukakannya, antara lain

timbulnya "pulau panas" di daerah industri tenaga listrik (Power Plant)

3. MODEL DINAMIKA PENCEMARAN UDARA

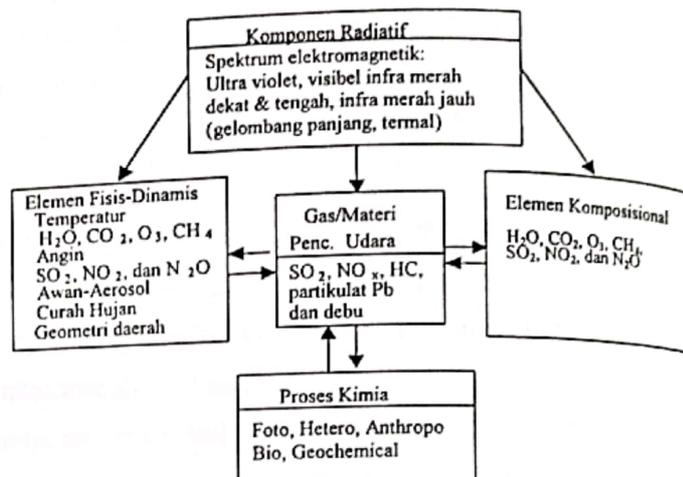
Pada bagian terdahulu telah disampaikan bahwa antara penambahan gas/materi pencemaran dengan kondisi iklim lokal (setempat) sangat erat. Untuk itu perlu dikaji jarak dan lokasi daerah penerima pencemaran udara agar dapat mengidentifikasi dimana letak daerah penerima dan berapa besar konsentrasi "ground level" di daerah penerima. Model penyebaran pencemaran udara diperlukan untuk memudahkan pelacakan di mana lokasi jarak maksimum dan berapa besar konsentrasi maksimum "ground level" pencemaran udara di daerah penerima tersebut.

Dalam pembangunan model penyebaran pencemaran udara banyak dilakukan asumsi-asumsi untuk memudahkan penalaran. Sampai saat ini masih jarang ditemui model yang simultan, yaitu model yang didasarkan pada pendekatan fisis, dinamis dan kimia. Pembangunan model dengan memasukkan proses-proses fisis, dinamis dan kimia secara simultan sangat kompleks, hingga sulit untuk mencapai hasil yang diinginkan. Model-model penyebaran pencemaran udara yang banyak dijumpai baru model fisis, atau yang dikenal dengan model fisis-dinamis. Model dinamis adalah model yang didasarkan pada transportasi dan difusi. Sedangkan model fisis-dinamis adalah model dinamis dengan mempertimbangkan proses-proses fisis yang terjadi. Contoh model fisis dinamis adalah model berdasarkan persamaan difusi Gauss Ganda.

Model dengan pendekatan proses kimia, terutama buat penulis sangat rumit karena tiap detik akan terjadi perubahan sifat kimia atmosfer. Model fisis-kimia mengacu pada proses fisis dan kimia

atmosfer. Sedangkan model fisis-dinamis-kimia dapat dilakukan secara bertahap.

Secara umum pembangunan model penyebaran pencemaran udara dipengaruhi oleh beberapa hal seperti dapat dilihat pada Gambar-1 yang menunjukkan skema diagram interaksi fisis-dinamis-kimia antara gas/materi pencemaran udara dengan atmosfer (interaksi antara komponen radiatif, elemen fisis-dinamis, elemen komposisional dan proses kimia):



Gambar 1. Skema diagram interaksi fisis-dinamis-kimia antara gas/materi pencemaran udara dengan atmosfer.

- Komponen radiatif dari matahari terdiri dari spektrum elektromagnetik terutama cahaya ultraviolet, cahaya tampak/visibel, cahaya infra merah dekat dan tengah serta cahaya infra merah jauh (gelombang panjang, termal), mempengaruhi kemungkinan terjadi proses fisis-dinamis-kimia.
- Elemen fisis-dinamis adalah angin (arah dan kecepatan), temperatur (gradien temperatur dan profil temperatur/lapse rate, awan (proses kondensasi, pembentukan awan dan hujan), mempengaruhi terjadinya perubahan curah hujan dan iklim. Di sini faktor geometri daerah: topografi dan orografi penting, terutama untuk hujan dan iklim lokal.
- Elemen komposisional: H₂O, CO₂, O₃, CH₄, SO₂, NO₂ dan N₂O merupakan gas-gas variabel dari komposisi atmosfer kecuali CH₄ dan N₂O (lihat Tabel 1). Elemen komposisional variabel mempunyai prosentasi sangat kecil hingga dengan perubahan kecil mampu merubah/mengganggu komposisi atmosfer.
- Proses-proses kimia: foto, hetero, anthrope, bio dan geochemical menunjukkan kelas-kelas interaksi yang memungkinkan bermacam-macam proses kimia.

Pada tabel terlihat bahwa komposisi gas pada ketinggian 0-25 km terdiri dari gas permanen dan gas variabel. Gas permanen, jumlahnya relatif tetap, kecuali CH₄ dan N₂O. Unsur-unsur gas permanen tidak dipengaruhi oleh penambahan dari proses-proses non alami kecuali NH₄ dan N₂O, sedangkan unsur-unsur gas variabel jumlahnya tidak tetap karena dipengaruhi oleh penambahan dari proses-proses non alami.

Dalam analisis pembahasan model dinamika pencemaran udara, ada tiga hal utama yang perlu diperhatikan yaitu:

Tabel 1 : Komposisi atmosfer pada ketinggian 0-25 km

GAS PERMANEN	BERAT MOLEKUL	% VOLUME
Nitrogen (N ₂)	28,016	78.110 ± 0,004
Oksigen (O ₂)	31,999	20,953 ± 0,001
Argon (Ar)	39,942	0,934 ± 0,001
Neon (Ne)	20,182	(18,18 ± 0,04) * 10 ⁻⁴
Helium (He)	4,003	(5,24 ± 0,04) * 10 ⁻⁴
Krypton (Kr)	83,80	(1,14 ± 0,01) * 10 ⁻⁴
Xenon (Xe)	131,30	(0,087 ± 0,001) * 10 ⁻⁴
Hydrogen (H ₂)	2,016	0,5 * 10 ⁻⁴
Methane (CH ₄)	16,043	2 * 10 ⁻⁴
Nitrouse Oksida (N ₂ O)	44,015	(0,5 ± 0,1) * 10 ⁻⁴
GAS VARIABEL	BERAT MOLEKUL	% VOLUME
Uap air (H ₂ O)	18,005	0 sampai 0,7
Karbon Dioksida (CO ₂)	44,009	0,032
Ozone (O ₃)	47,998	0 sampai 0,01
Sulfur Dioksida (SO ₂)	64,064	0 sampai 0,0001
Nitrogen Dioksida (NO ₂)	46,007	0 sampai 0,000002

- Daerah sumber (dimana terdapat sumber emisi pencemaran udara), yang perlu diperhatikan adalah kondisi fisik sumber dan iklim lokal. Kondisi fisik sumber seperti laju pancaran, kecepatan pelepasan dan temperatur. Komponen iklim lokal yang penting adalah arah dan kecepatan angin, stabilitas atmosfer, profil angin dan profil temperatur. Kajian daerah sumber adalah: karakteristik sumber dan karakteristik atmosfer. Karakteristik sumber mempertimbangkan faktor-faktor seperti:
 - laju pencemaran, kecepatan keluaran
 - tinggi, bentuk, diameter dan luas lubang keluaran
 - kondisi fisis dan sifat kimia zat/materi pencemaran serta
 - geometri daerah, seperti tinggi dan bentuk bangunan, perbandingan tinggi lubang keluaran dengan bangunan sekelilingnya, pola kawasan, tinggi dan macam tanaman. Sedangkan dalam karakteristik atmosfer, elemen iklim utama yang dipertimbangkan adalah: arah dan kecepatan angin permukaan, suhu udara permukaan, profil suhu udara (pola perubahan suhu terhadap ketinggian), profil angin, radiasi matahari dan penutupan awan, kelembaban, jumlah dan intensitas curah hujan, stabilitas atmosfer dan koefisien difusi serta topografi dan orografi di daerah sumber.
- Daerah proses penyebaran (selama perjalanan proses pencemaran setelah lepas dari sumber), terdiri dari proses fisis-dinamis dan proses kimia. Pada daerah ini penting mengkaji iklim lokal, terutama stabilitas atmosfer, kondensasi, awan dan curah hujan. Apabila materi pencemaran udara berbentuk partikulat yang mempunyai diameter berbeda-beda maka pengaruh gravitasi akan menghasilkan beberapa daerah penerima sesuai dengan ukuran partikel.

Kajian daerah penyebaran, juga mempertimbangkan karakteristik atmosfer seperti pada daerah sumber. Pada daerah penyebaran ini merupakan daerah model, dimana implementasinya sangat dipengaruhi oleh kondisi alami. *Proses dispersi* atau penyebaran zat pencemar dalam atmosfer meliputi proses adveksi atau transportasi dan proses difusi. *Proses adveksi* atau transportasi adalah proses pengangkutan zat pencemar dalam atmosfer ke arah horisontal sesuai dengan arah angin, dengan jangkauan sebagai fungsi dari kecepatan angin. Sedangkan *proses difusi* adalah proses penyebaran zat atau partikel pencemar yang masuk dalam atmosfer karena adanya proses difusi dalam atmosfer. *Proses difusi atmosfer* adalah proses penyerapan dan peresapan zat kedalam atmosfer sesuai dengan kondisi atmosfernya. Ada dua macam proses difusi atmosfer yang disediakan alam, yaitu proses difusi molekuler dan proses difusi turbulensi. Difusi molekuler adalah perjalanan penyerapan zat ke dalam atmosfer melalui proses turbulensi. Proses turbulensi adalah gerakan masa udara berputar, sehingga mempercepat penyerapan dan peresapan zat pencemar ke dalam atmosfer. Dalam proses difusi, peranan stabilitas atmosfer sangat penting. Perbedaan nilai stabilitas atmosfer akan menghasilkan perbedaan pola kepulan (*plume*) yang berbeda sehingga menghasilkan jarak jangkauan dan kemampuan difusi yang berbeda-beda. Stabilitas atmosfer menunjukkan sifat dinamika atmosfer, dimana terdapat tiga keadaan yaitu:

- diam – sangat stabil sampai stabil
- bergerak – agak stabil sampai agak stabil, dan
- olakan atau turbulensi – tidak stabil sampai sangat tidak stabil.

Pola-pola penyebaran sebagai fungsi stabil atmosfer adalah sebagai berikut: *looping* untuk kondisi sangat tidak stabil, *conning* untuk kondisi tidak stabil, *fanning* untuk kondisi stabil, *lofting* untuk kondisi lapisan bawah stabil sementara lapisan atasnya tidak stabil, fumigasi untuk kondisi lapisan bawah sangat tidak stabil sementara lapisan atasnya stabil dan *trapping* untuk kondisi lapisan bawah tidak stabil sementara lapisan di atasnya stabil. Dari memperhatikan bentuk kepulan terlihat bahwa stabilitas atmosfer tidak sama rata untuk semua lapisan atmosfer baik horisontal maupun vertikal.

- Daerah penerima konsentrasi pencemaran udara, merupakan akhir dari pemodelan, setelah mengalami proses penyebaran. Komponen-komponen iklim yang perlu dipertimbangkan adalah awan, curah hujan sirkulasi angin lokal dan geometri (topografi dan orografi) daerah penerima. Kajian daerah penerima (reseptor) meliputi karakteristik: atmosfer lokal, topografi, dan orografi. Karakteristik daerah penerima ada tiga macam kajian yaitu: episod induksi atmosferik, episod sumber tunggal dan episod kecelakaan. Episod induksi atmosferik yaitu terjadinya penumpukan zat pencemar sebagai fungsi waktu, topografi merupakan daerah lembah atau cekungan yang sering merupakan jebakan maut (malam hari terjadi inversi-tenang, siang hari angin lembah tidak mampu mengangkat udara lembah). Episod kecelakaan: terjadinya penumpukan zat pencemar akibat terjadinya kecelakaan. Untuk mengantisipasi dan penyelamatan terhadap ketiga episod ini diperlukan langkah pemantauan yang dilengkapi dengan sistem informasi penanggulangan bencana pencemaran udara.

Iklim-iklim lokal di daerah penerima penting pula untuk analisis episod, apakah episod industri

atmosferik, episod sumber tunggal kontinyu atau episod kecelakaan.

Pembangunan model dinamika pencemaran udara sangat variatif, yang dapat didekati dengan berbagai pengambilan asumsi seperti:

- Pemodelan hanya untuk sumber dari industri tunggal kontinyu.
- Pemodelan untuk kawasan industri.
- Pemodelan hanya untuk sumber bergerak/kendaraan bermotor.
- Pemodelan dengan sumber kompleks atau sumber urban.

Pendekatan pemodelan juga variatif, antara lain:

- Berdasarkan persamaan difusi Gauss ganda bersama turunannya.
- Berdasarkan pendekatan numerik beda hingga dan elemen hingga.
- dan sebagainya.

4. KONSENTRASI PENCEMARAN UDARA DAN IKLIM PERKOTAAN

Hasil pemodelan dinamika pencemaran udara merupakan pola sebaran konsentrasi pencemaran udara. Dengan demikian maka dapat diperkirakan tingkat konsentrasi pada daerah penerima. Perkiraan konsentrasi pencemaran udara pada daerah penerima perkotaan dapat diperoleh dari berbagai pendekatan model maupun penggunaan.

Dalam makalah ini akan dikemukakan model penyebaran pencemaran udara dari kendaraan bermotor dengan pendekatan sumber bidang, menggunakan metoda difusi Turner. Persamaan matematik yang dikemukakan Turner, untuk menghitung konsentrasi relatif tiap-tiap grid adalah:

$$\frac{C}{Q}(r,s) = \frac{\exp - (0,693t/L) \exp - 1/2 \left[\frac{y^2}{(\sigma_y' + 402)^2} + 400/(\sigma_z^2) \right]}{\pi u (\sigma_y' + 402) (\sigma_z)}$$

dan

$$x = 1609,347 (s \sin \theta + r \cos \theta)$$

$$y = 1609,347 (s \sin \theta - r \cos \theta)$$

$$t = x / u$$

Dimana:

- t = waktu tempuh penyebaran polutan dalam detik
- u = kecepatan angin dalam meter / detik
- x = adalah jarak dalam arah downwind, dalam meter
- y = adalah jarak dalam arah crosswind, dalam meter
- θ = adalah arah angin, bernilai 0 untuk arah timur, dan bertambah berlawanan arah jarum jam
- L = Waktu paruh polutan
- σ_y = Koefisien difusi horisontal, karena ada harga awal σ_y , yaitu 402 m, σ_y untuk suatu waktu jalar tertentu adalah $\sigma_y = \sigma_y'(t) + 402$
- σ_z = Koefisien difusi vertikal

Koefisien polutan dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$C(i,j) = 10^8 \sum_r \sum_s \frac{C}{Q}(r,s) Q / \rho$$

Dimana:

- C = Konsentrasi dalam part per million (ppm)
- C / Q = Konsentrasi relatif dalam detik per meter³
- Q = Kekuatan sumber / laju emisi dalam gram per detik
- ρ = kecepatan angin dalam meter / detik

Hasil keluaran model kemudian diverifikasi dengan data pengukuran di lapangan.

Sebaran konsentrasi pencemaran udara yang dicontohkan pada makalah ini adalah dari unsur pencemaran SO₂ pagi, siang dan sore hari. Data emisi diperoleh berdasarkan data dari 7 (tujuh) titik sampling yang dilakukan Bapedalda Kota Bandung bulan Agustus 1997. Hasil simulasi model diperoleh pola sebaran konsentrasi pencemaran SO₂ di Kota Bandung (lihat Gambar 2, 3, 4, dan 5 terlampir). Pada gambar dilihat adanya simpul-simpul daerah dengan konsentrasi SO₂ cenderung tinggi, di beberapa tempat telah melampaui batas ambang.

Daerah penerima pencemaran SO₂ di atas diambang batas diperkirakan terjadi di beberapa kecamatan:

- Pagi hari di kecamatan-kecamatan: Bandung Kulon, Andir, Cibeunying Kaler, Bojongloa Wetan, Sumur Bandung, Bojongloa Kaler Astana Anyar, Bojongloa Kidul, Regol, Lengkong, Batununggal, Cibeunying Kidul dan Kiaracandong.
- Siang hari di kecamatan-kecamatan: Andir, Bandung Wetan, Sumur Bandung, Astana Anyar, Bojongloa Kidul, Regol, Lengkong, Batununggal, Cibeunying Kidul dan Kiaracandong.
- Sore hari: di semua kecamatan di Kota Bandung sudah di atas ambang batas konsentrasi SO₂ yang diperkenankan (0.10 ppm dalam 24 jam).

Diingatkan disini bahwa daerah penerima pencemaran udara yang dikemukakan di atas belum mencerminkan kondisi sebaran pencemaran udara sesungguhnya karena:

- Sumber emisi yang digunakan hanya dari sebagian kendaraan bermotor dan belum mempertimbangkan sumber-sumber yang lain.
- Belum memasukkan proses-proses lain, seperti proses reaksi kimia, proses

penenggelaman/penyerapan oleh tanaman dan sebagainya.

- Penggunaan data iklim masih sebatas data yang ada, belum divalidasi dengan data in-situ yang simultan dengan data sampling udara.
- Penggunaan data emisi hanya beberapa hari pada bulan Agustus serta tidak dilakukan pengukuran secara serentak.
- Masih memerlukan koreksi model berdasarkan hasil verifikasi model dengan data sampling yang signifikan.
- Karena model difusi Turner diturunkan dari model difusi Gauss, yang notabene adalah model semi-empiris, maka untuk memperoleh lokasi daerah penerimaan yang tepat diperlukan pula peta sirkulasi angin.

Namun demikian, sebaran pencemaran SO₂ di Kota Bandung seperti yang terlihat pada Gambar 2, 3, 4, dan 5 dapat dijadikan dasar penelitian selanjutnya. Yang jelas, hadirnya simpul-simpul konsentrasi cenderung tinggi tersebut dapat memberi petunjuk bahwa Kota Bandung perlu perhatian khusus, terutama terhadap peningkatan gas rumah kaca dan "urban dome" atau "pulau panas".

5. KESIMPULAN DAN SARAN

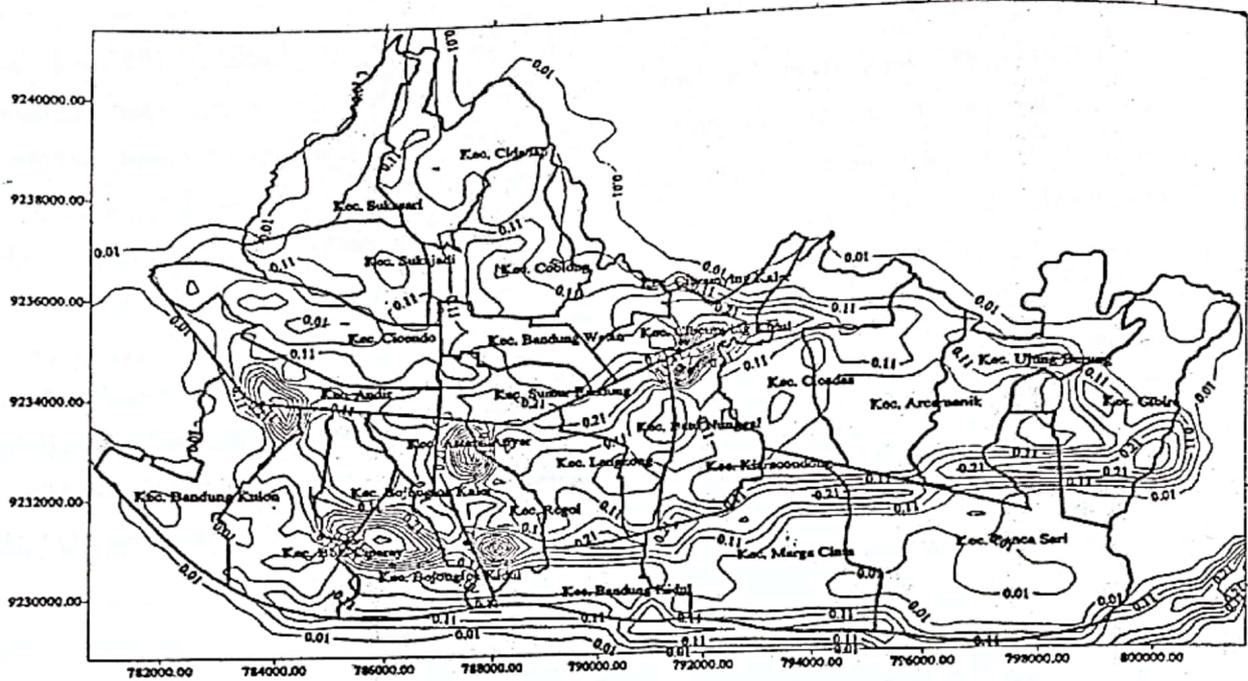
Dari seluruh sajian dalam makalah dengan judul "Model Dinamika Pencemaran Udara, Peranannya Terhadap Iklim Perkotaan" dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- Antara penyebaran pencemaran udara dengan iklim perkotaan terlihat adanya hubungan timbal balik yang sangat erat. Hal ini disebabkan karena media yang digunakan sama-sama atmosfer, hingga memerlukan kajian sifat fisis dan karakteristik atmosfer.

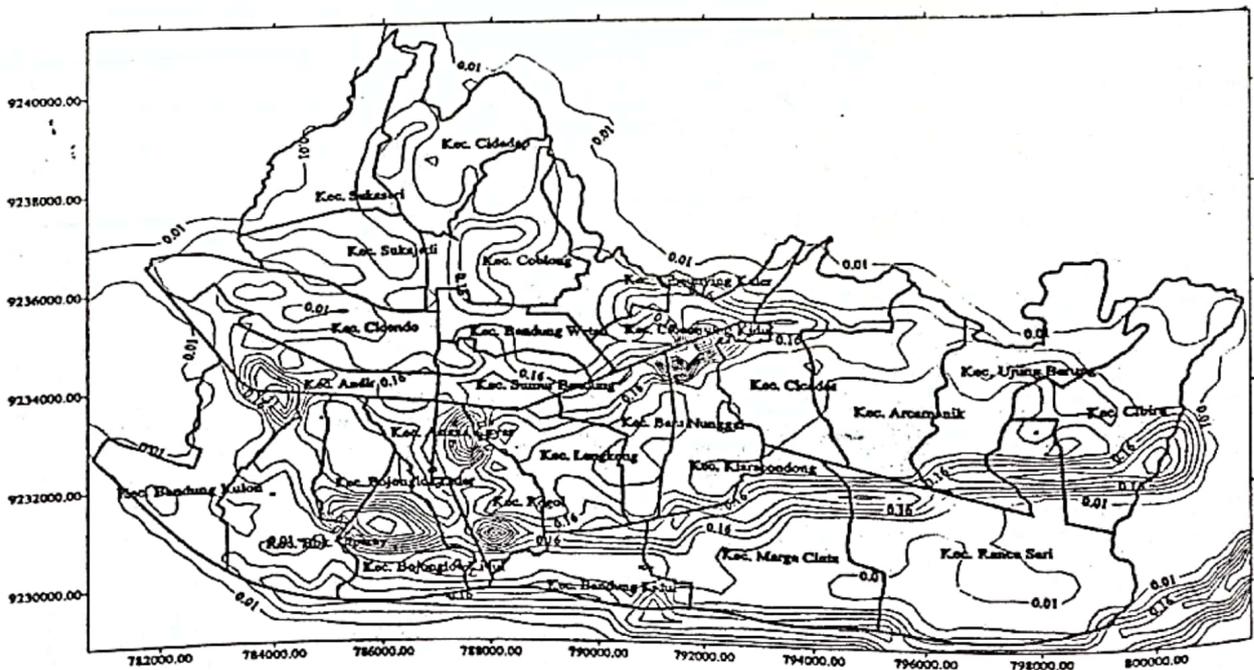
- Simpul-simpul daerah dengan konsentrasi pencemaran udara yang dihasilkan dari model dinamika pencemaran udara dapat digunakan sebagai dasar kajian perubahan iklim perkotaan akibat meningkatnya konsentrasi pencemaran udara.
- Daerah simpul pada umumnya mempunyai temperatur cenderung tinggi, sehingga pola aliran angin akan menyesuaikan dengan pola sebaran simpul. Oleh karenanya, apabila sekiranya simpul-simpul yang terjadi mengakibatkan episod industri atmosferik, maka perlu melakukan pengelolaan dan pengendalian kualitas udara.
- Apabila zat/materi pencemar berbentuk temperatur tinggi atau gas rumah kaca, maka studi selanjutnya adalah melakukan upaya yang sesuai dengan "pola taman kota" agar iklim kembali sejuk. Perlu memperoleh perhatian, gas "rumah kaca" yang sifatnya lokal ini dapat mempengaruhi iklim seluruh perkotaan dan bahkan berpengaruh pada iklim regional dan global.
- Khususnya di Indonesia, analisis iklim lokal di daerah penerima konsentrasi pencemaran udara dapat dikembangkan menjadi studi iklim regional dengan mempertimbangkan sifat monsun pada masing-masing daerah perkotaan.

DAFTAR PUSTAKA

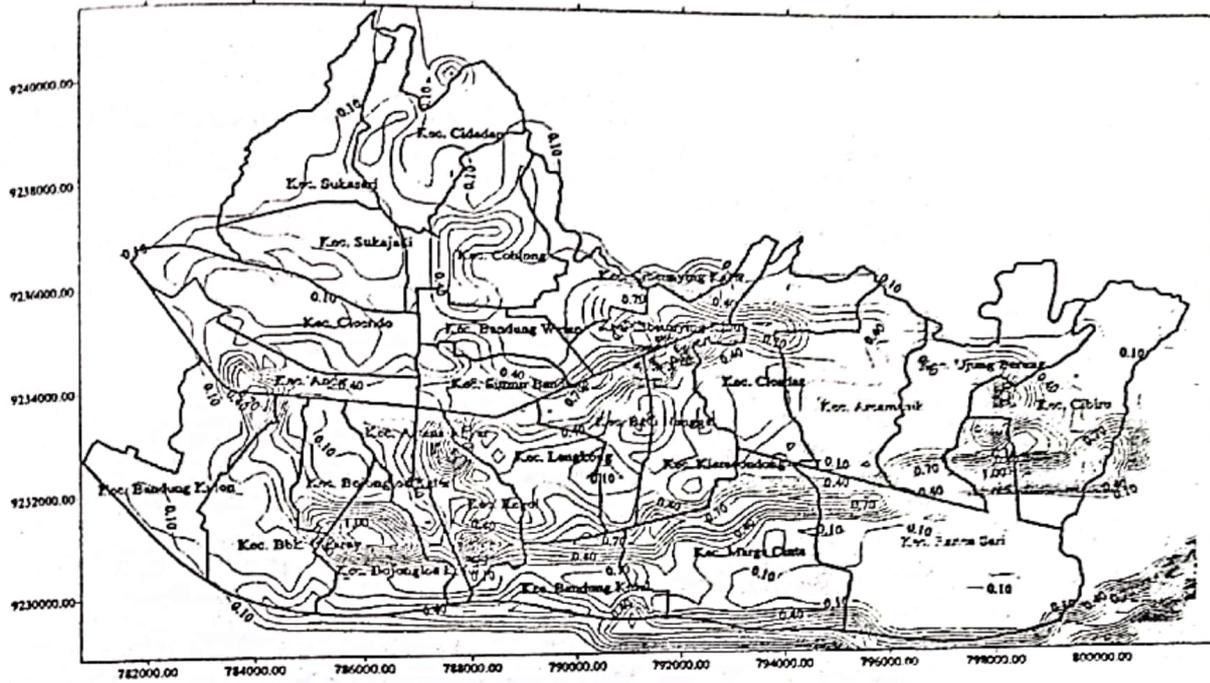
1. Soenarmo, Sri Hartati, Dkk, 2000. *Analisa dan Pengolahan Data Hasil Uji Emisi Kendaraan Bermotor dan Pengukuran Kualitas Udara*. Laporan Akhir BAPEDALDA-LPM ITB.
2. Soenarmo, Sri Hartati, 1999. *Meteorologi Pencemaran Udara*. Catatan Kuliah, Penerbit ITB.
3. Soenarmo, Sri Hartati, 1999. *Pengaruh Iklim dan Topografi Terhadap Pencemaran Udara*. Modul



Gambar 3. Sebaran Konsentrasi Pencemaran Gas SO₂ di Kota Bandung Rata-rata Pagi Hari, Agustus 1997.



Gambar 4. Sebaran Konsentrasi Pencemaran Gas SO₂ di Kota Bandung Rata-rata Siang Hari, Agustus 1997.



Gambar 5. Sebaran Konsentrasi Pencemaran Gas SO2 di Kota Bandung Rata-rata Sore Hari, Agustus 1997.