

ANALISIS DISTRIBUSI PENCEMAR UDARA NO₂, SO₂, CO, DAN O₂ DI JAKARTA DENGAN WRF-CHEM

ANALYSIS OF AIR POLLUTANTS DISTRIBUTION NO₂, SO₂, CO, AND O₃ IN JAKARTA USING WRF-CHEM

*¹Nisrina Setyo Darmanto dan ²Asep Sofyan

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl Ganesha 10
Bandung 40132

e-mail : ¹nisrinasetyo@gmail.com, ²asepsofyan@yahoo.com

Abstrak: Tingginya aktivitas perkotaan di DKI Jakarta meningkatkan emisi pencemar udara sumber antropogenik seperti NO₂, SO₂, CO, dan O₃. Pada penelitian ini dilakukan simulasi numerik mengenai distribusi pencemar udara di atmosfer akibat faktor meteorologi pada musim kemarau (Agustus 2011) dan musim hujan (Januari 2011) dengan simulasi numerik WRF-Chem. Input emisi simulasi berasal dari inventarisasi emisi antropogenik tahun 2011 pada penggunaan energi di sektor industri, transportasi, dan kebutuhan domestik serta pembakaran residu pertanian di Jakarta dan sekitarnya. Inventarisasi emisi yang dilakukan menunjukkan bahwa kontribusi SO₂ tertinggi dihasilkan dari sektor industri sedangkan kontribusi NO₂ dan CO tertinggi dihasilkan dari transportasi. Hasil WRF-Chem menunjukkan bahwa pola meteorologi musim kemarau memiliki perbedaan yang signifikan dengan musim hujan. Pada musim kemarau, terjadi dominasi angin lokal laut/darat yang mendistribusi pencemar udara ke arah utara (Teluk Jakarta) saat terjadi angin darat dan ke arah selatan (Jakarta Selatan dan Bogor) saat terjadi angin laut. Di musim ini, kecepatan angin rendah dan terbentuk *mixing layer* yang signifikan. Pada musim hujan, adanya angin permukaan akibat angin sinoptik dengan kecepatan tinggi dari arah barat dan variasinya mendistribusi pencemar ke arah timur (Jakarta Timur dan Bekasi). Kecepatan angin tinggi dan *mixing layer* yang terbentuk lebih rendah dibanding pada musim kemarau. Verifikasi hasil pemodelan dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil observasi di stasiun pemantauan pencemaran udara DKI 2 di Kelapa Gading, Jakarta.

Kata kunci: distribusi pencemar udara, inventarisasi emisi, Jakarta, pencemar udara, WRF-Chem

Abstract: The increase of urban activities in DKI Jakarta implies in higher air pollutants emission such as NO₂, SO₂, CO, and O₃ which come from anthropogenic sources. In this research, the numerical simulations of meteorological aspects on air pollutants distributions during dry season (August 2011) and wet season (January 2011) are conducted by using WRF-Chem software. The anthropogenic emission input for WRF-Chem is calculated from 2011 emission inventory in Jakarta and its suburban areas from energy-utilization sectors (industrials, transportations, and domestic) and agricultural residual burning. The emission inventory shows that industrial sectors contribute the highest SO₂ emission among all. Therefore, the transportation sectors contribute the highest NO₂ and CO emission among all. The WRF-Chem results show that the meteorological characteristic during dry and wet season has significant differences one another. During the dry season, sea/land breeze local winds has major influences in distributing air pollutants to the north (Jakarta Bay) due to land breeze and south (South Jakarta and Bogor) due to sea breeze. In this season, the wind velocity is relatively low and the mixing layer is formed significantly. Therefore, during the wet season the synoptic westerly wind influences the surfaces wind results in low domination of sea/land breeze local wind and distributes the air pollutants to the east (East Jakarta and Bekasi). The wind velocity is high and the inversion layer is not significantly formed compared to dry season. For the simulation results verification, a comparison between simulated and observed values from air quality monitoring stations DKI 2 in Kelapa Gading is conducted.

Key words: air pollutant distributions, emission inventory, Jakarta, air pollutants, WRF-Chem

PENDAHULUAN

Wilayah DKI Jakarta memiliki populasi penduduk mencapai 9,6 juta jiwa dengan luas area sebesar 740,3 km² dan kepadatan penduduk kurang lebih 12.978,2 jiwa/km² (BPS, 2010). Peningkatan populasi penduduk di DKI Jakarta memiliki korelasi positif dengan pertumbuhan fasilitas sarana dan prasarana kota berakibat pada peningkatan emisi pencemar udara yaitu NO_x, SO₂, Ozon dan CO. Pencemaran udara dari wilayah DKI Jakarta dan Bogor, Depok, Bekasi, dan Tangerang (Bodetabek) yang merupakan daerah suburban DKI Jakarta memiliki pengaruh timbal balik satu sama lain. Topografi wilayah berada di dataran rendah hingga pantai di utara dan perbukitan di selatan berpengaruh pada pola meteorologi angin permukaan dan angin lokal (angin laut/darat).

Hingga saat ini, pemantauan kualitas udara di DKI Jakarta salah satunya dilakukan melalui pengadaan stasiun pemantau pencemaran udara di beberapa lokasi di Jakarta. Untuk lebih dapat mendeskripsikan pola pencemaran udara di seluruh wilayah DKI Jakarta, diperlukan penelitian mengenai pemodelan pencemaran udara dengan tujuan untuk mendapatkan estimasi pola pencemaran udara spesifik dan representatif di DKI Jakarta.

Penelitian mengenai pemodelan transportasi pencemar telah dilakukan sebelumnya menggunakan CAMx (Pirovano dkk, 2011) dan MM5 (Sofyan dkk, 2007). Penelitian ini akan mengevaluasi pemodelan distribusi pencemar udara Jabodetabek dengan menggunakan inventarisasi emisi tahun 2011 dan model WRF-Chem. WRF-Chem telah diaplikasikan pada penelitian mengenai pemodelan transportasi pencemar SO₂, NO₂, CO dan Ozon (Marrapu dan Carmichael, 2009; Takigawa dkk, 2010). Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa hasil WRF-Chem representatif dalam menyimulasikan transportasi pencemar namun masih terdapat ketidakpastian yang tinggi pada simulasi NO_x (Kumar, R., 2012).

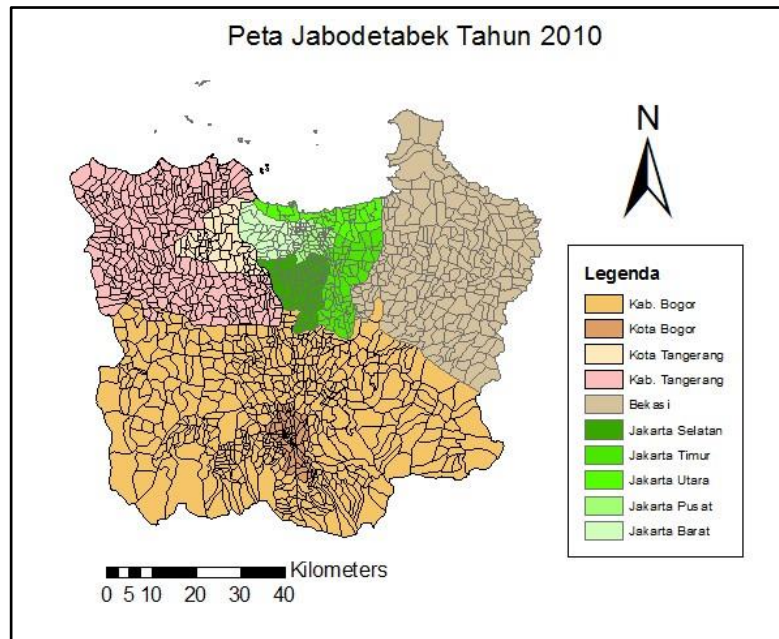
Inventarisasi emisi yang dilakukan mencakup emisi dari sektor penggunaan energi dari bahan bakar fosil karena merupakan sumber pencemar udara yang signifikan (Kato and Akimoto, 1992). Sektor yang diinventarisasi yakni industri, transportasi, dan kegiatan rumah tangga, serta pembakaran residu pertanian dengan pencemar yang diinventarisasi yakni CO, SO₂, dan NO₂. Validasi hasil pemodelan dilakukan dengan perbandingan terhadap hasil observasi di stasiun pencemaran udara DKI 2 (Kelapa Gading).

METODOLOGI

Wilayah Studi

Batas wilayah studi terpilih dalam penelitian ini yakni DKI Jakarta. DKI Jakarta dan sekitarnya (Jabodetabek) merupakan salah satu pusat aktivitas komersial dan industri di Pulau Jawa. Pencemaran udara dari aktivitas urban dapat memengaruhi kualitas udara ambien di Jabodetabek yang padat penduduk, sehingga prediksi pencemaran udara penting pelaksanaannya. Oleh karena itu, penelitian mengenai polusi udara dari aktivitas perkotaan di wilayah Jabodetabek merupakan hal yang penting mengingat populasi penduduk yang bertambah cepat.

Dalam pemodelan pencemaran udara, perlu adanya perhitungan beban emisi dari sekitar wilayah Jakarta yakni wilayah Bodetabek saat tahap inventarisasi emisi, karena pencemaran di Jakarta saling berpengaruh dengan daerah-daerah sekitarnya. Batas wilayah analisis udara ambien berdasarkan stasiun pemantauan pencemaran udara adalah DKI Jakarta. Sedangkan batas wilayah penelitian dalam inventarisasi emisi dan pemodelan pencemaran udara adalah DKI Jakarta dan Bodetabek. **Gambar 1** menunjukkan peta wilayah studi pada penelitian ini.



Gambar 1. Peta wilayah studi

Inventarisasi Emisi

Sumber emisi yang diinventarisasi yaitu sektor energi mencakup konsumsi energi industri, transportasi, dan sektor rumah tangga, serta pembakaran residu dari sektor agrikultur. Metode perhitungan beban emisi dilakukan dengan metode faktor emisi dengan Persamaan (1). **Tabel 1** berisi rangkuman mengenai sumber emisi yang diinventarisasi, sumber data aktivitas, dan faktor emisi yang diajukan.

$$E_i = A_i \times EF_i \quad (1)$$

dimana E_i adalah Emisi dari fasilitas i , A_i adalah Aktivitas dari fasilitas i , dan EF_i adalah Faktor emisi fasilitas i .

Tabel 1. Keterangan sumber emisi yang diinventarisasi dan factor emisi yang digunakan

Sektor/Sumber Emisi	Sumber Data Aktivitas	Sumber Faktor Emisi yang Digunakan
Energi (industri)	<ul style="list-style-type: none"> Konsumsi bahan bakar industri per wilayah distribusi (BPH Migas, 2011) Konsumsi bahan bakar pembangkit listrik (PLN, 2011) Jumlah tenaga kerja (Deperindag, 2011) 	Kato dan Akimoto (1992), USEPA AP-42, IPCC
Energi (transportasi)	<ul style="list-style-type: none"> Hasil simulasi transportasi (traffic count) Jabodetabek (Jasa Marga, 2007) Data komposisi spesies kendaraan i bahan bakar j (Dispenda, 2011) 	Permen LH No 12/2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah
Rumah tangga	Data bahan bakar rumah tangga (BPS, 2011)	Kato dan Akimoto (1992), USEPA AP-42
Agrikultur	Data produksi vegetasi sebagai pembakaran residu hasil agrikultur (BPS, 2011)	Andrea dan Merlett (2001)

Distribusi beban emisi spasial dengan GIS

Data mentah input emisi antropogenik merupakan hasil estimasi beban emisi tiap kecamatan dari tahap inventarisasi emisi. Selanjutnya data ini diekstraksi ke dalam grid beresolusi 1km x 1km sehingga didapatkan beban emisi pencemar tiap satu kilometer persegi atau dalam satuan (satuan berat pencemar)/tahun/km². Ekstraksi data ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Geographic Information System (GIS) Arc-GIS.

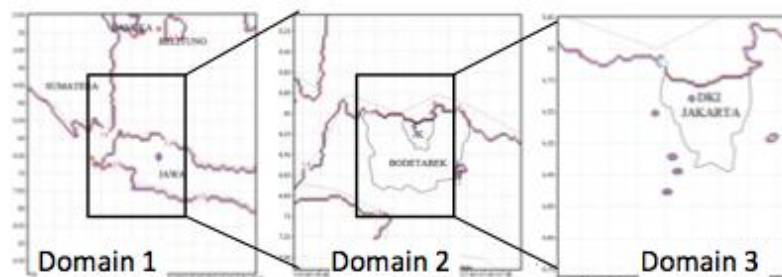
Simulasi meteorologi dan distribusi pencemar dengan WRF dan WRF-Chem

Data yang digunakan sebagai input simulasi meteorologi adalah data hasil analisis global dari *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) Amerika berupa data grid dengan resolusi 1°x1° dengan periode enam jam. Data ini mencakup data analisis meteorologi di domain terpilih yang dideterminasi dari pengaturan *Weather Research and Forecast* (WRF) *Preprocessing System* (WPS). Pada simulasi WRF yang dilakukan, digunakan jenis data GRIB 1.

Domain yang digunakan dalam simulasi merupakan tiga domain bersarang (*three-domain nested run*) yaitu satu domain inti dan dua domain *nest*. Setiap domain memiliki 32 grid vertikal dari ketinggian permukaan dasar tanah (1013,25 hPa) hingga 10.000 m (264,36 hPa) di atas permukaan tanah. Data parameter statis yang digunakan adalah *default* WRF 3.2 dan kategori tata guna lahan menggunakan data *United States Geological Survey* (USGS) tahun 2000 dengan 24 kategori dan resolusi horizontal 30 detik. Ilustrasi sistem domain dapat dilihat pada **Gambar 2**. Pengaturan proses fisika yang digunakan diuraikan pada **Tabel 2**. Simulasi distribusi pencemar menggunakan data input emisi antropogenik yang telah dibuat dengan GIS. Data dari stasiun DKI 2 digunakan sebagai verifikasi data meteorologi dan udara ambien, digunakan karena alasan kelengkapan data pengukuran.

Tabel 2. Parameterisasi fisika WRF

Domain	Grid	Cumulus option	Boundary Layer	Micropysics	Long wave radiation	Surface
1	9 km (91x91)	New Grell	YSU	Kessler	RRTM	NLSM
2	3 km (91x91)	New Grell	YSU	Kessler	RRTM	NLSM
3	1 km (91x91)	None	YSU	Kessler	RRTM	NLSM



Gambar 2. Sistem Domain WRF

HASIL DAN ANALISIS

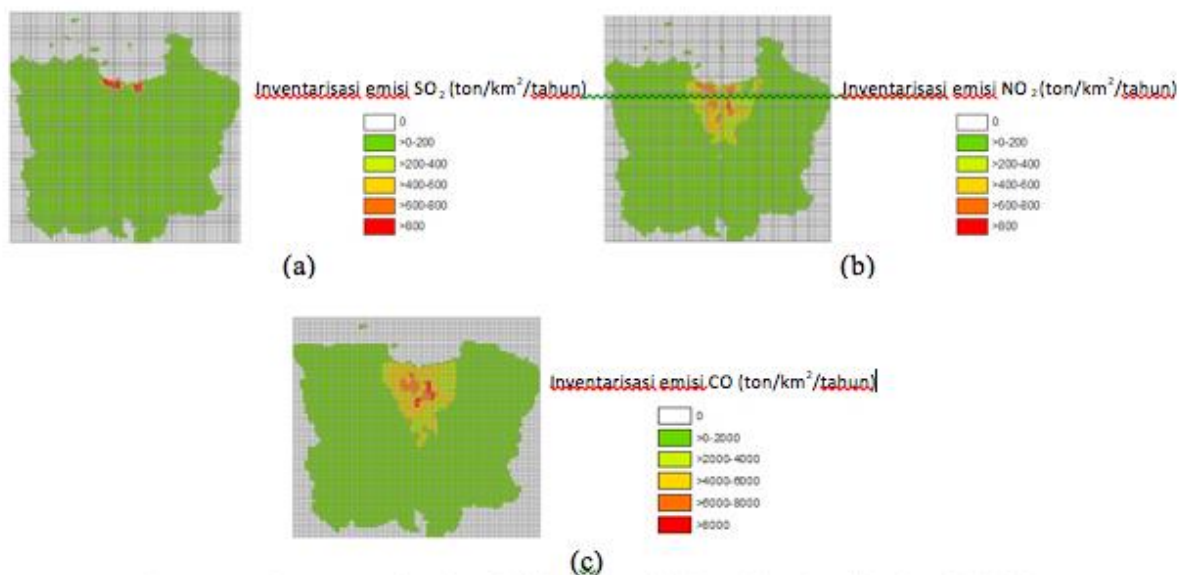
Hasil Inventarisasi Emisi

Hasil inventarisasi emisi di DKI Jakarta dan Bodetabek ditunjukkan pada **Tabel 3**. Tabel tersebut menunjukkan bahwa emisi NO₂ dan CO terutama dihasilkan dari sektor transportasi, sedangkan emisi SO₂ terutama dihasilkan dari industri dan pembangkit listrik. Sedangkan **Gambar 3** menunjukkan peta inventarisasi emisi SO₂, NO₂, dan CO di wilayah

Jakarta dan sekitarnya. Dapat disimpulkan bahwa tingkat emisi SO₂ paling tinggi berada di utara Jakarta dimana terdapat kawasan industri dan pembangkit listrik. Untuk NO₂ dan CO tingkat emisi tinggi berada di Jakarta, terutama daerah-daerah padat transportasi seperti area tol dalam kota Jakarta dan jalan arteri. Kontributor emisi NO₂ tertinggi adalah kendaraan roda empat terutama minibus, sedangkan kontributor CO tertinggi adalah sepeda motor.

Tabel 3. Hasil inventarisasi emisi

Daerah	Sektor	SO ₂ (ton/tahun)		NO ₂ (ton/tahun)		CO (ton/tahun)	
Jakarta	Transportasi	14015,79	21,73%	250172,94	92,27%	2970870,2	99,94%
	Industri	50443,69	78,22%	20692,91	7,63%	308,09	0,01%
	RT	29,53	0,05%	252,14	0,09%	1028,93	0,03%
	Agrikultur	1,13	0,00%	1,77	0,00%	507,62	0,02%
	Total	64490,13	100,00%	271119,77	100,00%	2972714,8	100,00%
Bodetabek	Transportasi	3749,94	46,22%	78159,15	85,79%	1413132	93,12%
	Industri	4068,99	50,15%	12018,65	13,19%	2,12	0,00%
	RT	66,06	0,81%	564,08	0,62%	2301,87	0,15%
	Agrikultur	228,52	2,82%	359,28	0,39%	102155,26	6,73%
	Total	8113,51	100,00%	91101,17	100,00%	1517591,3	100,00%

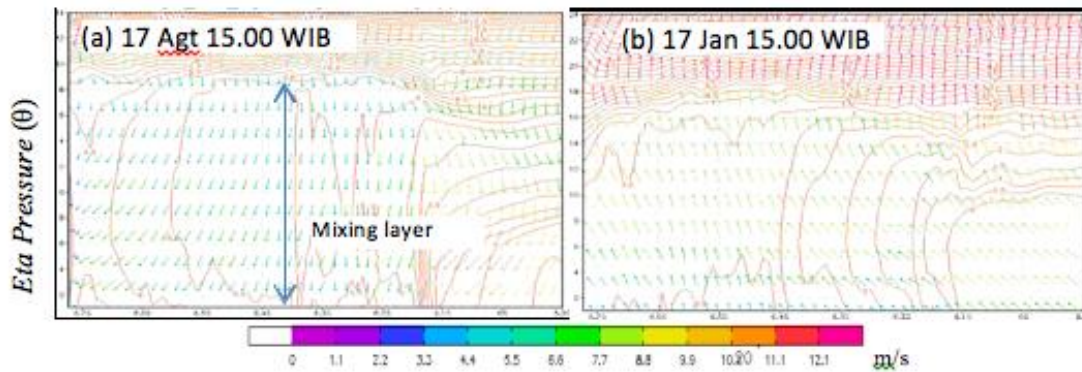


Gambar 3. Inventarisasi emisi dalam grid SO₂ (a), NO₂ (b) dan CO (c)

Hasil Simulasi Meteorologi dengan WRF

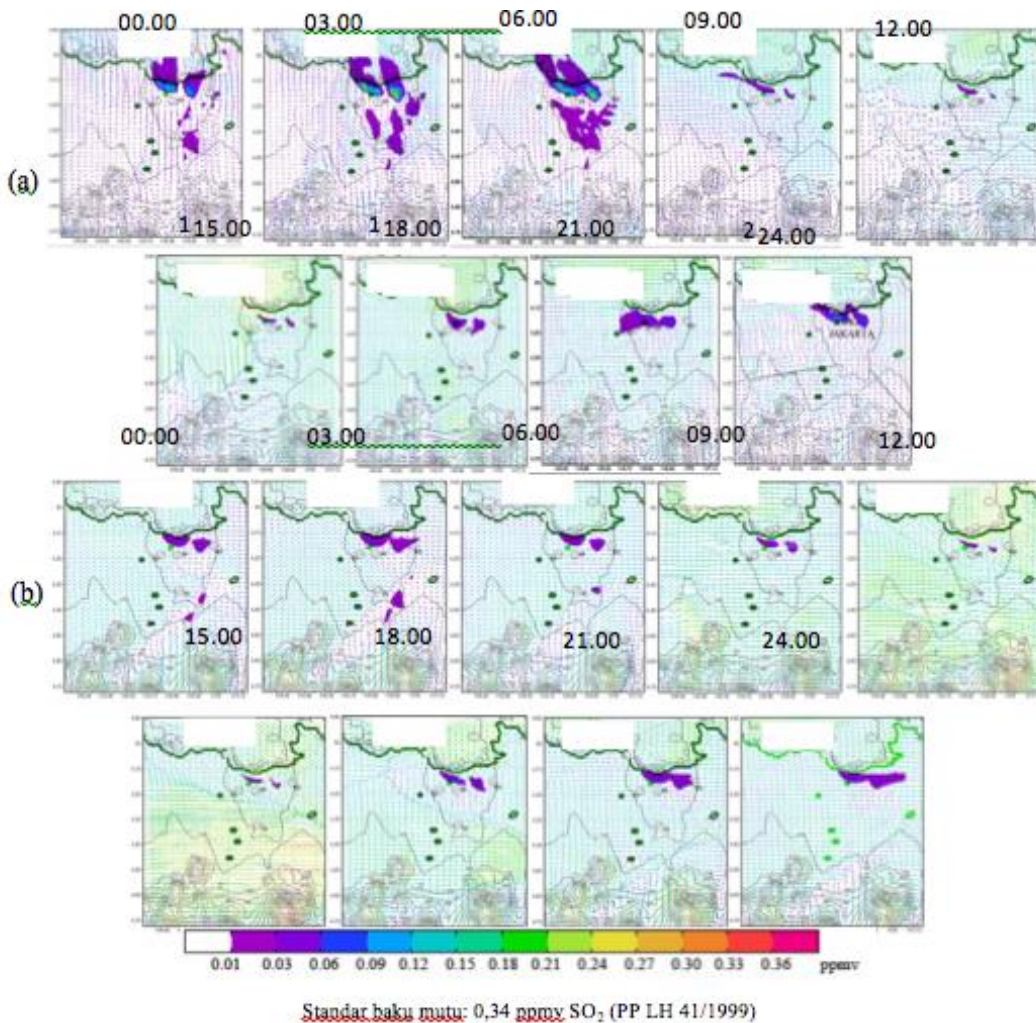
Dari hasil simulasi meteorologi yang dilakukan, diketahui bahwa pola angin di Jakarta pada bulan Agustus dan bulan Januari memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Pada bulan Agustus, angin sinoptik muson timur/Australia bergerak dari arah selatan ke utara P. Jawa. Deretan pegunungan di daerah selatan P. Jawa (3000m dpl) menghalangi hembusan angin sinoptik di permukaan Jakarta, sehingga pada bulan Agustus angin lokal (angin laut/darat) lebih berpengaruh pada distribusi polutan. Struktur vertikal angin pada bulan Agustus menunjukkan terjadinya mixing layer yang intensif pada siang hari (12.00-18.00 WIB) seperti pada **Gambar 4(a)** dengan kecepatan angin yang rendah. Sebaliknya, pada bulan Januari angin sinoptik muson barat/Asia yang bergerak dari barat P. Jawa tidak memiliki penghalang sehingga angin sinoptik memengaruhi vektor angin lokal. Angin sinoptik dari arah barat bertemu dengan angin lokal ke selatan (angin laut) dan utara (angin darat) menyebabkan terjadinya resultan vektor angin barat.

Pada bulan Januari, intensitas pembentukan mixing layer lebih rendah dibanding bulan Agustus dan kecepatan angin tinggi dengan arah menjauhi permukaan tanah (**Gambar 4(b)**).



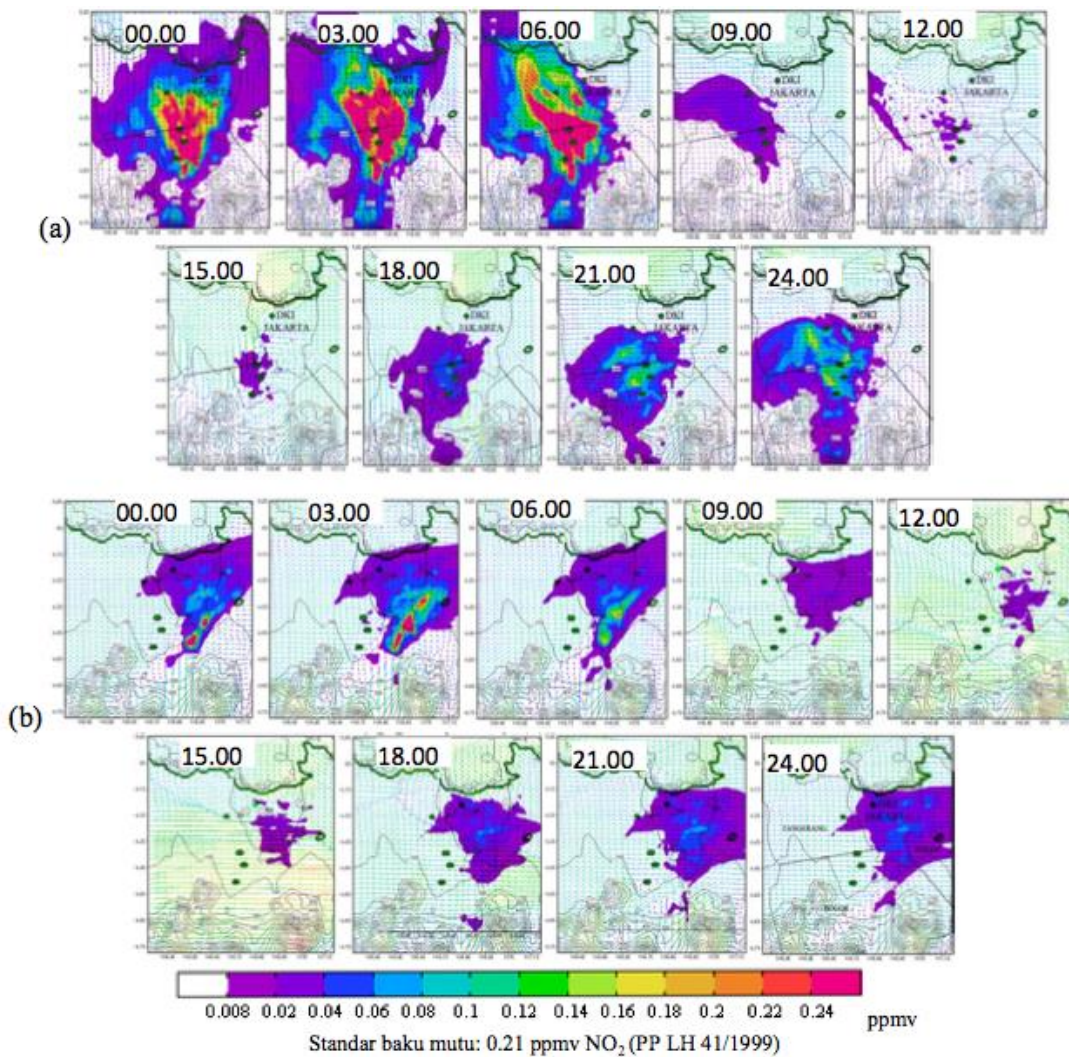
Gambar 4. Profil vertikal angin permukaan 17 Agustus 2011 pukul 00.00 WIB (a) dan 17 Januari 2011 pukul 00.00 WIB (b)

Hasil Simulasi WRF-Chem terhadap distribusi pencemar udara



Gambar 5. Distribusi SO₂ harian pada musim kemarau (15 Agustus 2011, pukul 00.00-24.00 WIB) (a) dan hujan (15 Januari 2011, pukul 00.00-24.00 WIB) (b)

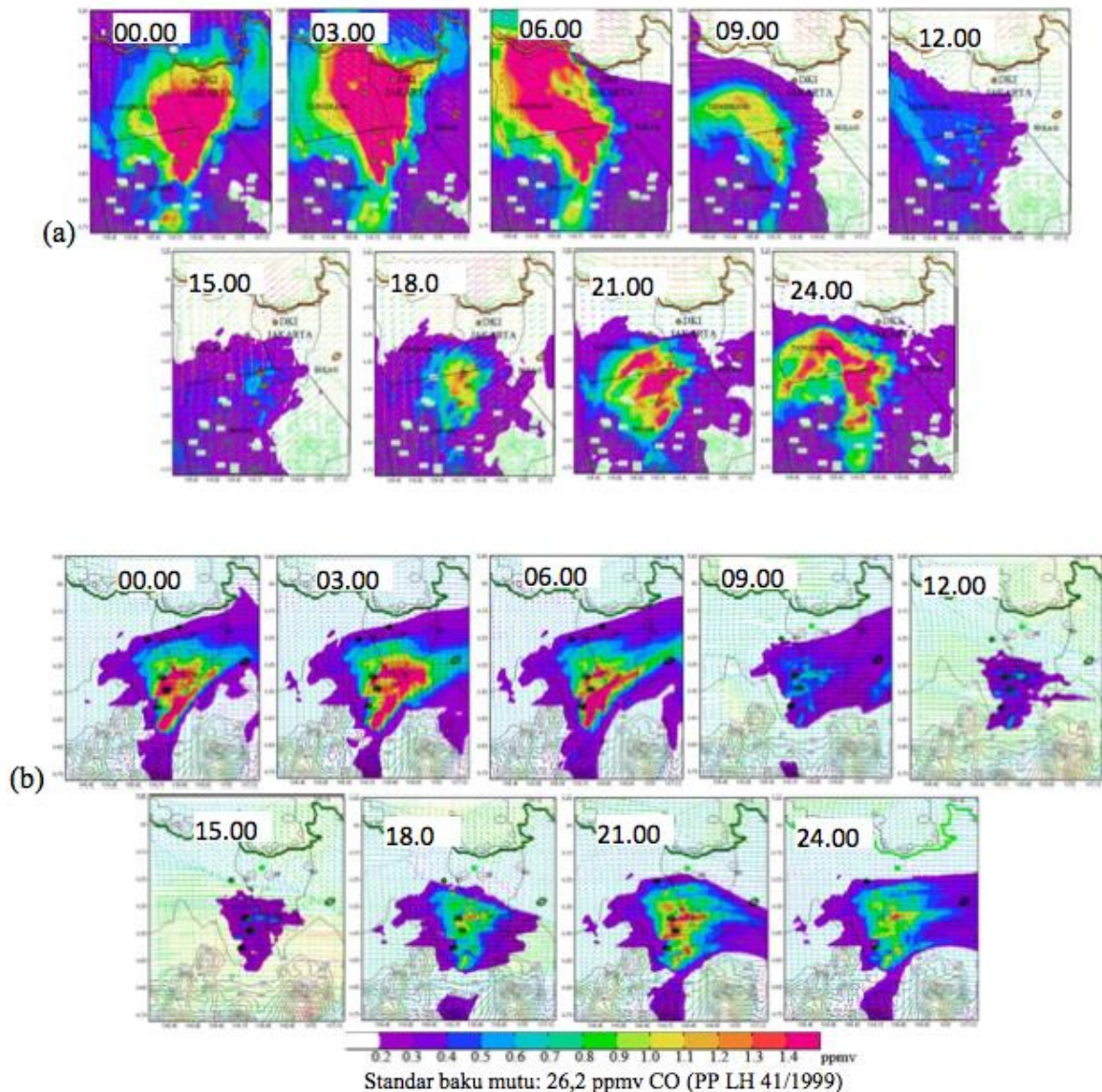
Pada bulan Agustus, dominasi angin laut/darat menyebabkan SO₂ terdistribusi ke daerah utara (Teluk Jakarta) pada malam hari (21.00-06.00) dan selatan (Bogor) pada siang hari (09.00-18.00) seperti pada **Gambar 5(a)**. Pengaruh angin sinoptik dari arah tenggara membuat adanya distribusi pencemar ke arah Tangerang. Pengaruh angin laut ke arah *inland* tertinggi terjadi pada pukul 18.00 yang membuat distribusi SO₂ berkumpul di daerah Jakarta Selatan hingga Bogor. Pada bulan Januari, pengaruh angin sinoptik dari arah barat daya yang lebih besar dari pengaruh angin lokal mendistribusi SO₂ ke arah timur Jakarta hingga Bekasi seperti terlihat pada **Gambar 5(b)**. Dapat dilihat pada pukul 12.00-18.00 terjadi penurunan konsentrasi SO₂, hal ini dapat diakibatkan dari tingginya *mixing layer* pada waktu tersebut. Hasil simulasi menunjukkan terjadinya konsentrasi SO₂ yang melebihi standar baku mutu, terutama di daerah industri.



Gambar 6. Distribusi NO₂ harian pada musim kemarau (15 Agustus 2011, pukul 00.00-24.00 WIB) (a) dan hujan (15 Januari, pukul 00.00-24.00 WIB) (b)

Gambar 6 menunjukkan pola dispersi NO₂ di Jabodetabek. Pada musim kemarau, angin lokal yang lebih dominan mendistribusikan pencemar ke arah utara (Teluk Jakarta) pada malam hari (21.00-06.00) dan selatan (Bogor) pada siang hari (09.00-18.00). Adanya pengaruh angin sinoptik dari arah tenggara juga menyebabkan terdistribusinya pencemar ke barat laut Jabodetabek (Tangerang). Pada pagi hari (06.00) di saat angin gunung dan angin

lembah bertiup bersamaan mengakibatkan NO₂ berkumpul di pusat Jakarta. Sedangkan pada musim hujan, resultansi vektor angin sinoptik dan angin lokal dari arah barat dan variasinya mendistribusi NO₂ ke arah timur (Bekasi) dan sebagian selatan. Baik pada bulan Agustus dan Januari, terjadi penurunan konsentrasi pada pukul 12.00-15.00, hal ini dapat disebabkan oleh tingginya *mixing layer* dan angin lokal (angin lembah) yang dengan cepat mendispersi pencemar arah vertikal. Hasil simulasi menunjukkan konsentrasi terjadinya NO₂ yang melebihi standar baku mutu, hal ini dapat disebabkan ketidakakuratan inventarisasi emisi atau parameterisasi kimia simulasi.

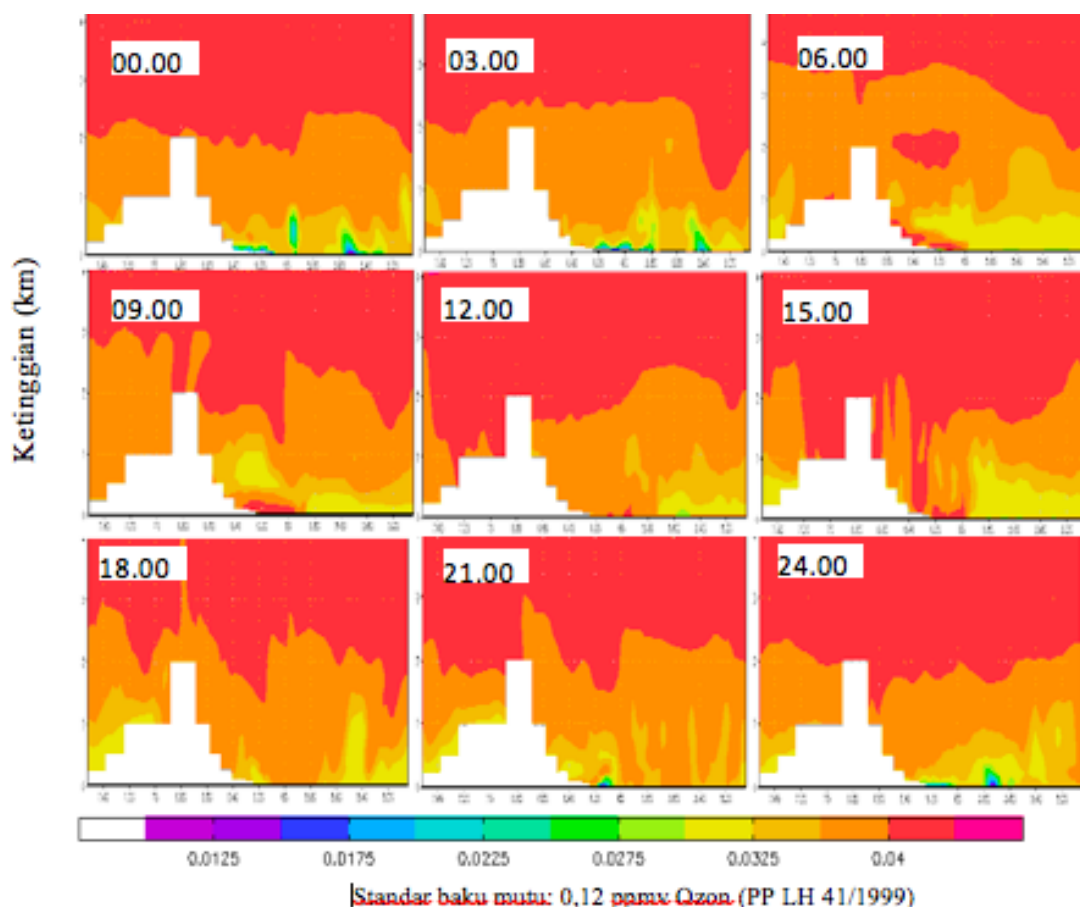


Gambar 7. Distribusi CO harian pada musim kemarau (15 Agustus 2011, jam 00.00-24.00 WIB) (a) dan hujan (15 Januari 2011, jam 00.00-24.00 WIB) (b)

Gambar 7 menunjukkan distribusi CO pada bulan Agustus dan Januari. Berat CO yang ringan berakibat pada distribusi CO yang lebih menyebar dibandingkan SO₂ atau NO₂. Pada bulan Agustus, distribusi CO lebih dipengaruhi oleh angin laut/darat dan sedikit angin permukaan dari arah tenggara menyebabkan CO terdistribusi ke arah utara pada malam hari (21.00-06.00) dan ke arah selatan dan barat pada siang hingga sore hari (09.00-18.00). Pada bulan Januari,

distribusi CO dipengaruhi angin permukaan dari arah barat membuat distribusi CO cenderung ke arah timur. Konsentrasi tinggi spesies CO lebih menyebar pada bulan Januari dibanding bulan Agustus seperti pada **Gambar 7(b)**. Hal ini dapat disebabkan oleh tingginya kecepatan angin yang lebih mudah menyebarkan CO pada bulan Januari. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi CO masih jauh di bawah standar baku mutu.

Untuk parameter pencemar ozon, dilakukan visualisasi distribusi secara vertikal pada bulan Agustus di garis bujur 106,918°BT. Hal ini dilakukan untuk mengetahui profil vertikal ozon akibat pengaruh angin laut/darat yang cenderung memiliki karakteristik terjadinya *mixing layer* dibandingkan angin pada bulan Januari. Dari **Gambar 8** yang menunjukkan pola harian vertikal ozon pada bulan Agustus, dapat dilihat bahwa konsentrasi ozon pada malam hari lebih rendah dibandingkan siang hari dengan konsentrasi ozon permukaan terendah pada pukul 24.00 dan tertinggi pada pukul 09.00-15.00. Hal ini disebabkan tingginya radiasi matahari yang meningkatkan proses fotokimia pembentukan ozon dan terdistribusinya ozon dari laut ke arah darat.



Gambar 8. Distribusi vertical O₃ harian pada musim kemarau (15 Agustus 2011, pukul 00.00-24.00 WIB)

Evaluasi Hasil Simulasi WRF-Chem dan Data Observasi

Evaluasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan data dengan stasiun pemantauan kualitas udara DKI 2 (Kelapa Gading) di koordinat 106,817°BT dan -6,251°LS. Data statistik perbandingan tiap parameter pencemar dapat dilihat pada **Gambar 9**.

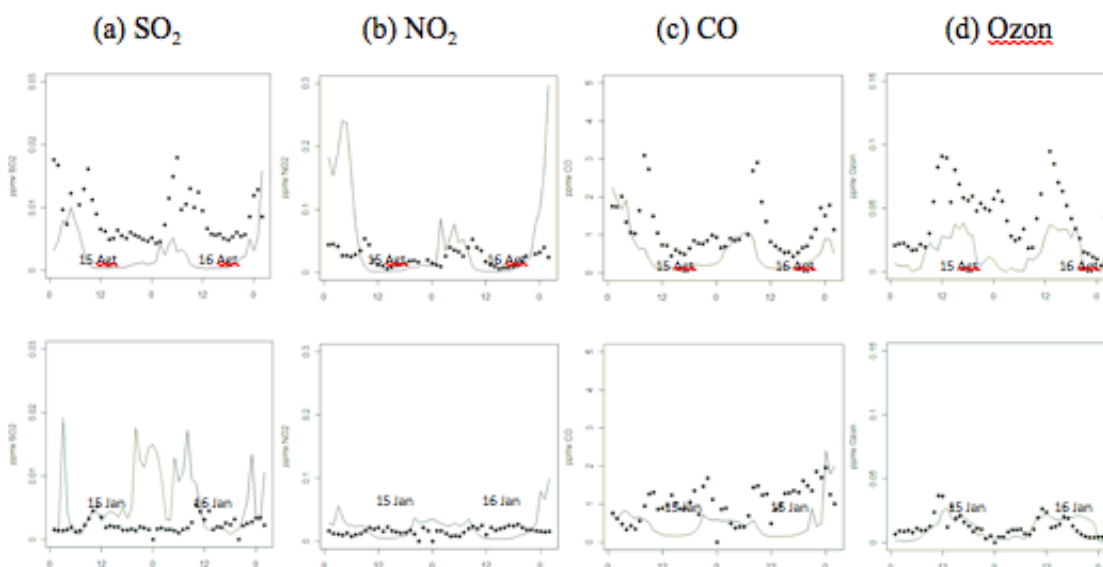
Dari **Gambar 9(a)** dapat dilihat bahwa pada bulan Agustus rata-rata hasil simulasi SO₂ WRF-Chem lebih rendah 0,01 ppmv dari hasil observasi. Terdapat pola fluktuasi harian yang serupa antara simulasi dan observasi. Perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan dan

WRF-Chem mampu mengestimasi distribusi dan dispersi SO₂ pada bulan Agustus cukup baik. Pada bulan Januari, hasil WRF-Chem di beberapa titik lebih tinggi hingga 0,018 ppmv dibanding dengan hasil observasi. Hasil simulasi pada bulan Januari lebih baik dibandingkan pada bulan Agustus. Perbedaan konsentrasi yang didapat dari simulasi ini tidak terlalu berbeda secara signifikan dengan data observasi. Oleh karena itu, dapat dikatakan juga bahwa WRF-Chem mampu mengestimasi pola distribusi dan dispersi SO₂ pada bulan Januari.

Dari **Gambar 9(b)** dapat dilihat bahwa pada bulan Agustus pada 12.00 WIB tanggal 15 Agustus hingga pukul 22.00 WIB tanggal 16 Agustus pola NO₂ simulasi sangat mirip dengan observasi. Namun pada pukul 00.00-11.00 WIB tanggal 15 Agustus dan pukul 22.00-24.00 WIB tanggal 16 Agustus hasil WRF-Chem menunjukkan perbedaan 0,2-0,25 ppmv. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa WRF-Chem mampu mengestimasi distribusi dan dispersi NO₂ pada bulan Agustus cukup baik. Pada bulan Januari, hasil WRF-Chem sangat mendekati hasil simulasi. Perbedaan yang terlihat hanya terdapat pada pukul 22.00-24.00

WIB tanggal 16 Januari 2011 dengan perbedaan sekitar 0,05 ppmv. Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan juga bahwa WRF-Chem mampu mengestimasi pola distribusi dan dispersi NO₂ pada bulan Januari.

Dari **Gambar 9(c)** dapat dilihat bahwa pada bulan Agustus pada 12.00 WIB tanggal 15 Agustus hingga tanggal 16 Agustus pola fluktuasi harian CO simulasi tidak berbeda jauh dengan observasi. Perbedaan yang terjadi menunjukkan bahwa CO dari WRF-Chem memiliki konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan observasi. Perbedaan tertinggi mencapai 2,5 ppmv yang terjadi pada siang hari di tanggal 15 dan 16 Agustus 2011. Dapat dikatakan bahwa WRF-Chem mampu mengestimasi distribusi dan dispersi CO pada bulan Agustus cukup baik. Pada bulan Januari, hasil WRF-Chem juga mendekati hasil simulasi dengan hasil WRF-Chem lebih rendah dibandingkan data observasi. Perbedaan yang terlihat rata-rata sekitar 1-2 ppmv CO. Hasil perbandingan simulasi pada bulan Januari lebih baik dibandingkan dengan hasil perbandingan Agustus. Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan juga bahwa WRF-Chem mampu mengestimasi pola distribusi dan dispersi CO pada bulan Januari.



Gambar 9. Perbandingan hasil simulasi WRF-Chem dengan data observasi DKI 2 parameter pencemar SO₂ (a), NO₂ (b), CO (c), dan ozon (d)

Dari **Gambar 9(d)** dapat dilihat bahwa pada bulan Agustus pada 12.00 WIB tanggal 15 Agustus hingga tanggal 16 Agustus pola fluktuasi harian Ozon simulasi sesuai dengan

observasi yaitu meningkat pada siang hari dan menurun pada malam hari. Perbedaan yang terjadi menunjukkan bahwa Ozon dari WRF-Chem memiliki konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan observasi. Perbedaan tertinggi mencapai 0,05 ppmv yang terjadi pada siang hari di tanggal 15 dan 16 Agustus 2011. Dapat dikatakan bahwa WRF-Chem mampu mengestimasi distribusi dan dispersi Ozon pada bulan Agustus cukup baik. Pada bulan Januari, hasil simulasi WRF-Chem terlihat sangat sesuai dengan data observasi. Perbedaan yang terlihat rata-rata sangat kecil yaitu sekitar 0,025 ppmv. Hasil perbandingan simulasi pada bulan Januari lebih baik dibandingkan dengan hasil perbandingan Agustus. Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan juga bahwa WRF-Chem mampu mengestimasi pola distribusi dan dispersi Ozon pada bulan Januari.

KESIMPULAN

Hasil inventarisasi emisi di DKI Jakarta dan Bodetabek yang menunjukkan bahwa: (1) emisi SO₂ tertinggi dihasilkan oleh sektor industri (Jakarta: 78,22%; Bodetabek: 50,15%), (2) emisi NO₂ tertinggi dihasilkan dari sektor transportasi (Jakarta: 92,27%; Bodetabek: 85,79%), dan (3) emisi CO tertinggi dihasilkan dari sektor transportasi (Jakarta: 99,94%; Bodetabek: 93,12%).

Simulasi data meteorologi menunjukkan terjadinya pembentukan *mixing layer* dengan intensitas tinggi ($\pm 1,8$ km DPT) pada bulan Agustus serta pergerakan arah angin vertikal ke arah permukaan tanah dengan kecepatan rendah. Pada bulan Januari, pembentukan *mixing layer* rendah dan arah angin vertikal menjauh dari permukaan tanah dengan kecepatan tinggi. Simulasi distribusi SO₂, NO₂, dan CO pada bulan Agustus menunjukkan adanya dominasi angin laut/darat yang dipengaruhi angin dari arah tenggara akibat muson timur (Australia) mengakibatkan terakumulasinya pencemar di selatan (Bogor) dan barat (Tangerang). Simulasi pada bulan Januari menunjukkan adanya dominasi angin permukaan dari arah barat akibat angin sinoptik muson barat (Asia) yang mengakibatkan terdistribusinya pencemar ke arah timur Jakarta hingga Bekasi.

Perbandingan hasil simulasi dengan data observasi udara ambien stasiun DKI 2 untuk SO₂, NO₂, dan CO belum menunjukkan kesesuaian yang tinggi namun dengan hasil yang telah mendekati. Untuk parameter Ozon, nilai hasil simulasi telah mendekati nilai DKI 2 ditunjukkan dengan standar deviasi yang rendah. Kemungkinan ketidaksesuaian hasil simulasi dan observasi disebabkan oleh kurang akuratnya parameterisasi fisika-kimia simulasi WRF-Chem dan ketidakpastian inventarisasi emisi.

Daftar Pustaka

- BPLHD DKI Jakarta (2009) Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Provinsi DKI Jakarta. Buku 2: Perkiraan Beban Emisi Pencemar Udara. BPLHD DKI Jakarta.
- Jacobson, Mark (2005) Fundamentals of Atmospheric Modeling: Second Edition. Cambridge University Press.
- Kato and Akimoto (1992). Anthropogenic Emission of SO₂ and NO_x in Asia: Emission Inventories. Journal of Atmospheric Environment Vol. 26A. No. 16, 2997-3017.
- Kumar, R. (2012). Simulations Over South Asia using WRF-Chem: Evaluation and Initial Results. Journal of Geoscientific Model Development Discussion.
- Marrapu, P. and Carmichael, G. R. (2009). Transport of Air Pollutants in California using WRF-Chem. NCAR Workshop Proceedings.
- Pirovano, G., Balzarini A., Bessagnet, B (2012). Investigating Impact of Chemistry and Transport Model Formulation on Model Performance at European Scale. Journal of Atmospheric Environment 2012, pp. 1-17.
- Sofyan, A., Kitada, T., and Kurata, G. (2007). Difference of Sea Breeze in Jakarta Between Dry and Wet Seasons: Implication in NO₂ and SO₂ Distributions in Jakarta. Journal of Global Environment Engineering, Vol. 12, pp. 63-8.