

PENGARUH SKEMA CUMULUS YANG BERBEDA PADA POLUTAN DALAM MODEL WRF-CHEM

EFFECT OF DIFFERENT CUMULUS SCHEME ON POLLUTANT WITHIN WRF-CHEM MODEL

Danang Eko Nuryanto* dan Tri Astuti Nuraini

Departemen Geofisika dan Meteorologi, FMIPA IPB, Jl. Meranti Kampus IPB Dramaga Bogor, 16680*
Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Angkasa I No 2 Kemayoran
Jakarta Pusat 10720
Pos-el: danang.eko@bmet.go.id

ABSTRACT

The Weather Research Forecasting – Chemistry (WRF-Chem) model simulation have been done on Great Jakarta domain for time period from 22 – 25 August 2013 with 0.5° resolution input data from Global Forecast System (GFS) and 00 Coordinated Universal Time (UTC) as its initial time. Performed a comparison of the output of WRF-Chem with different settings cumulus scheme, which uses Grell 3D and Grell-Freitas ensemble schemes. The purpose of this simulation is to determine pollutant differences in the model output of two different settings of the cumulus schemes. The simulation results of WRF-Chem for PM10 indicate that Grell 3D ensemble scheme shows more intensity PM10 in Bogor, Curug and Cikarang than the Grell-Freitas ensemble scheme. While pollutants of CO indicate that the Grell-Freitas ensemble scheme shows more intensity CO in Bogor than ensemble 3D Grell scheme.

Keywords: particulate matter, cumulus scheme, WRF-Chem

ABSTRAK

Telah dilakukan simulasi model *Weather Research Forecasting – Chemistry* (WRF-Chem) domain wilayah Jabotabek pada tanggal 22 – 25 Agustus 2013 dengan data input dari *Global Forecast System* (GFS) resolusi 0.5° dan inisial data jam 00 *Coordinated Universal Time* (UTC). Metode yang dilakukan adalah perbandingan hasil keluaran WRF-Chem dengan setting skema *cumulus* yang berbeda, yaitu menggunakan skema *ensemble 3D Grell* dan skema *ensemble Grell-Freitas*. Tujuan simulasi ini adalah untuk mengetahui perbedaan polutan keluaran model dari dua setting skema *cumulus* yang berbeda tersebut. Hasil simulasi WRF-Chem untuk polutan PM10 menunjukkan bahwa skema *ensemble 3D Grell* memberikan efek meningkatnya konsentrasi PM10 pada Bogor, Curug dan Cikarang dibanding skema *ensemble Grell-Freitas*. Sedangkan untuk polutan CO menunjukkan bahwa skema *ensemble Grell-Freitas* memberikan efek meningkatnya konsentrasi CO pada wilayah Bogor dibanding skema *ensemble 3D Grell*.

Kata kunci : *particulate matter, skema cumulus, WRF-Chem*

PENDAHULUAN

Masih minimnya data kualitas udara di Indonesia ditambah masih terbatasnya pengamatan menjadikan model sebagai pilihan alternatif untuk dikembangkan. WRF-Chem adalah model *Weather Research Forecasting* (WRF) yang dilengkapi dengan modul *Chemistry* (kimia). Model tersebut dapat mensimulasikan emisi, transportasi, pencampuran, dan transformasi gas kimia dan aerosol bersamaan dengan proses meteorologi.

Perbedaan WRF-Chem 3.5 dengan WRF adalah terdapat penambahan modul kimiawi (*chemistry*) pada data input yang digunakan oleh WRF-Chem. Data input tambahan ini disediakan

oleh *WRF Preprocessing System* (WPS, bagian *dust erosion*) atau dalam proses *real.exe* (yaitu pembakaran biomassa, emisi biogenik, emisi background dari Goddard yaitu *Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport* (GOCART) dan lain-lain) atau dalam proses eksekusi *wrf.exe* (yaitu emisi antropogenik, syarat batas, emisi vulkanik dan lain-lain).¹

Pada studi sebelumnya, Grell *et al.*,² menemukan bahwa model WRF-Chem mempunyai kemampuan lebih baik dibanding dengan model MM5-Chem. Sedangkan Fast *et al.*,³ melakukan simulasi variasi skala urban hingga regional model WRF-Chem yang dibandingkan dengan data pengukuran kualitas

udara di Texas selama tahun 2000. Kemudian Zhang *et al.*,⁴ melakukan perbandingan simulasi model WRF-Chem dengan data pengukuran kualitas udara kota Meksiko. Pada kota yang sama De Foy *et al.*,⁵ melakukan simulasi dan analisis trayektori partikel menggunakan model *Mesoscale Model version 5* (MM5) dan WRF. Sementara itu untuk wilayah Asia Selatan pertama kali dilakukan oleh Kumar *et al.*,⁶ yaitu melakukan simulasi tahunan ozon troposfer menggunakan WRF-Chem yang kemudian di bandingkan dengan data observasi. Pada studi tersebut menunjukkan bahwa model WRF-Chem menangkap banyak fitur penting dari pengamatan dan menghasilkan simulasi ozon secara akurat.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi model WRF-Chem domain wilayah Jabotabek pada tanggal 22 – 25 Agustus 2013 dengan data input dari *Global Forecast System* (GFS) resolusi 0.5° dan inisial data jam 00 *Coordinated Universal Time* (UTC). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan keluaran dua *setting* skema *cumulus*, yaitu menggunakan skema *ensemble 3D Grell*^{7,8} dan skema *ensemble Grell-Freitas*⁹ wilayah Jabotabek pada tanggal tersebut.

METODOLOGI

Lokasi dan Data

Wilayah studi yang dipilih adalah wilayah Jabotabek karena pada wilayah tersebut merupakan salah satu pusat daerah urban dengan pertumbuhan penduduk dan industri sangat tinggi. Domain model didefinisikan pada proyeksi peta *Mercator* yaitu proyeksi peta silinder yang sumbunya berimpit dengan bola Bumi, yang terpusat pada 6° LU dan 106.9° BT dengan resolusi 10 km. Domain tersebut mempunyai titik grid sebanyak 100 grid arah Barat-Timur dan 100 grid arah Utara-Selatan.

Kimia fase gas yang diterapkan dalam WRF-Chem adalah mekanisme kimia,¹⁰ dari kimia *Regional Acid Deposition Model version 2* (RADM2),¹¹ dan aerosol GOCART tanpa menggunakan *Kinetic Pre-Processor* (KPP) *library*.^{12,13,14} Mekanisme RADM2 adalah kompromi antara detail kimia, prediksi kimia yang akurat dan sumber daya yang tersedia di komputer. Hal ini banyak digunakan dalam model atmosfer untuk memprediksi konsentrasi oksidan dan polusi udara lainnya. Model WRF-Chem pada penelitian ini juga menggunakan skema fotolisis Madronich, dengan emisi RETRO / EDGAR untuk input emisi antropogenik, dan untuk emisi biogenik menggunakan skema Gunther.^{15,16} Pada

percobaan ini menghidupkan fase gas dan kimia aerosol; maka umpan balik dari aerosol ke skema radiasi dan transportasi konvektif subgrid juga diaktifkan (Tabel 1).

Pengolahan Data

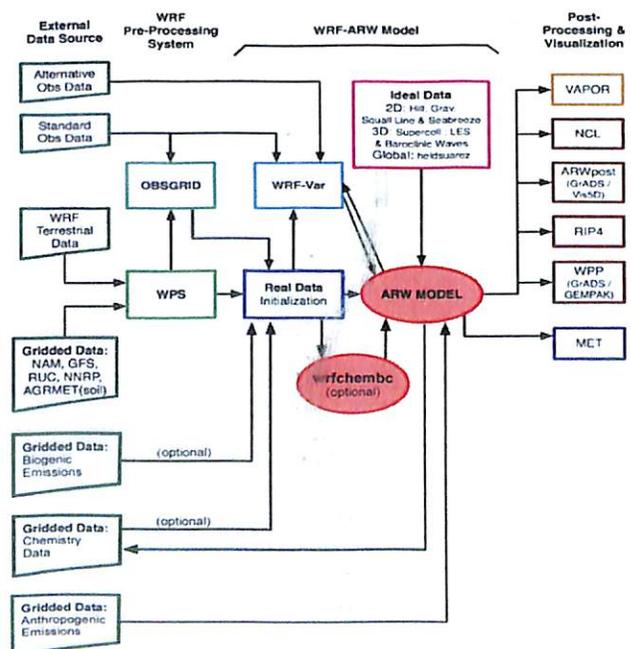
Diagram alur langkah proses *running* model dapat diperhatikan pada Gambar 1. Secara sederhana dapat diilustrasikan bahwa ada 3 modul proses utama yang perlu dilakukan. Pertama adalah modul WPS, untuk mempersiapkan data meteorologi sesuai dengan pilihan domain. Kedua adalah modul *prep_chem_sources*, untuk mempersiapkan data emisi global supaya dapat dibaca WRF-Chem. Ketiga adalah modul WRF, dimana pada modul ini ada sub modul chem untuk proses kimianya.

Pada simulasi ini dilakukan dua kali *running* dengan dua skema *cumulus* yang berbeda yaitu skema *ensemble 3D Grell* (merupakan parameterisasi konversi otomatis dari air awan ke hujan adalah konstan)^{7,8} dan skema *ensemble Grell-Freitas* (menggunakan persamaan untuk konversi dari air awan ke hujan menggunakan persamaan Berry)⁹. Persamaan Berry¹⁷ adalah sebagai berikut:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{m^2}{60 \left(5 + \frac{0.0366Nb}{mD_b} \right)} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan :

- M = kadar air presipitasi
- m = kadar air awan
- Nb = densitas jumlah tetesan awan
- Db = dispersi relatif tetesan awan



Gambar 1. Diagram Alir Proses Simulasi WRF – Chem 3.5. (Sumber: Peckam *et al.*, 2013)

Tabel 1. Pilihan Konfigurasi dalam WRF-Chem

Proses Kimia dan Atmosfer	Pilihan Model
<i>Chemistry</i>	RADM2 <i>Chemistry</i> dan GOCART <i>aerosols</i> tanpa KPP library
<i>Photolysis</i>	Fotolisis Madronich (TUV)
<i>Anthropogenic Emissions</i>	Emisi RETRO/EDGAR
<i>Biogenic Emissions</i>	Skema Gunther
<i>Biomass Burning Emissions</i>	<i>biomass burning emissions</i> dan <i>plume rise calculation</i>
<i>Dust Emissions</i>	Emisi debu GOCART
<i>Sea Salt Emissions</i>	Emisi garam laut GOCART
<i>DMS Emissions</i>	Emisi dms GOCART dari permukaan laut
<i>Aerosol Optical Properties</i>	<i>calculated based upon volume approximation</i>
<i>Gas phase chemistry</i>	Turn on
<i>Aerosol chemistry</i>	Turn on
<i>Feedback from the aerosols</i>	Turn on to the radiation schemes
<i>Subgrid convective transport</i>	Turn on
<i>Cumulus Scheme</i>	<i>Grell 3D ensemble scheme</i>
<i>Microphysics</i>	<i>WSM 6-class scheme</i>
<i>Shortwave radiation</i>	<i>Goddard Short Wave</i>
<i>Longwave radiation</i>	<i>RRTM Scheme</i>
<i>Land surface model</i>	Noah
<i>Surface-layer</i>	<i>MM5 Monin-Obukhov scheme</i>
<i>Boundary-layer</i>	Skema YSU

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Temperatur

Secara umum dari penelitian sebelumnya dapat dilihat bahwa temperatur dan kecepatan angin memiliki fase yang sama, hal ini terlihat dengan pola yang saling bersesuaian, yaitu ketika temperatur naik kecepatan angin juga naik, begitu juga sebaliknya.¹⁸ Angin merupakan udara yang bergerak dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah yang bertekanan rendah. Sementara tekanan pada suatu daerah berbanding terbalik terhadap temperatur, yaitu temperatur tinggi berarti tekanannya rendah sedangkan temperatur rendah maka tekanannya tinggi.

Pada Gambar 2 memperlihatkan perbandingan temperatur hasil keluaran model WRF-Chem memiliki pola diurnal yang mirip dengan observasi pada tiga lokasi pengamatan, yaitu Bogor, Curug dan Cikarang tanggal 22-25 Agustus 2013 (Gambar 2a-c), namun tetap disertai dengan bias yang kecil. Bias terkecil (-0.05) ada di Curug dengan RMSE 1.86 dan korelasi 0.9 (Tabel 2). Sedangkan luaran model

di Kemayoran memiliki anomali untuk dua hari pertama pengamatan dimana maksimum temperatur justru dicapai pada saat malam hari. Bias antara luaran model dan observasi pun terlihat sangat besar (Gambar 2d) dengan nilai bias 1.99 dan RMSE 2.09 serta korelasi 0.66 (Tabel 2).

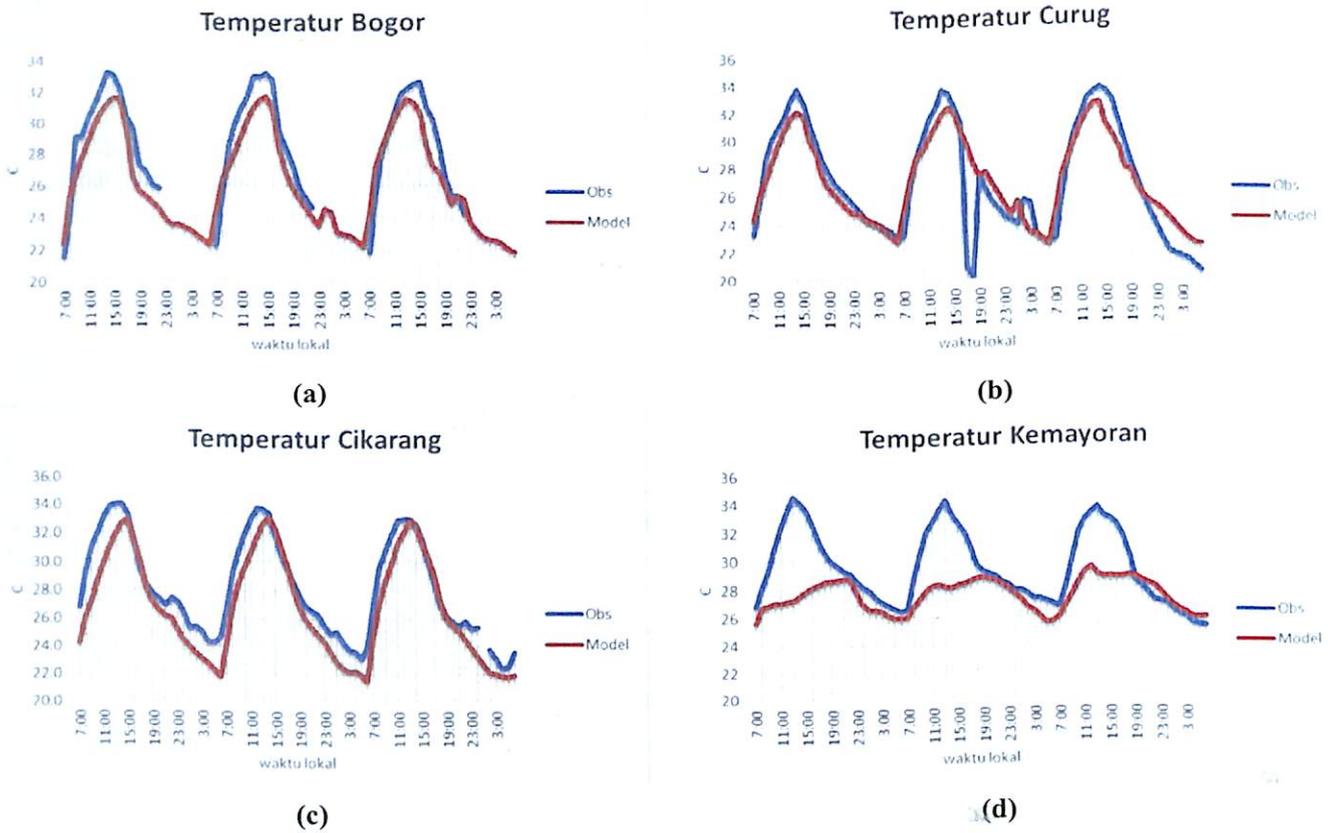
Perbandingan Kecepatan Angin

Gambar 3 menunjukkan kecepatan angin pada hasil keluaran model WRF-Chem memiliki pola diurnal yang belum mengikuti dengan observasi pada tiga lokasi pengamatan, yaitu Bogor, Curug dan Cikarang (Gambar 3a-c), namun tetap disertai dengan bias yang kecil. Korelasi tertinggi (0.62) ada di Cikarang dengan RMSE 1.45 dan bias 0.61 (Tabel 2). Sedangkan luaran model di Kemayoran memiliki anomali untuk dua hari pertama pengamatan dimana maksimum kecepatan angin justru dicapai pada saat malam hari. Bias antara luaran model dan observasi pun terlihat sangat besar (Gambar 2d) dengan nilai bias -3.14 dan RMSE 2.18 serta korelasi 0.09 (Tabel 2).

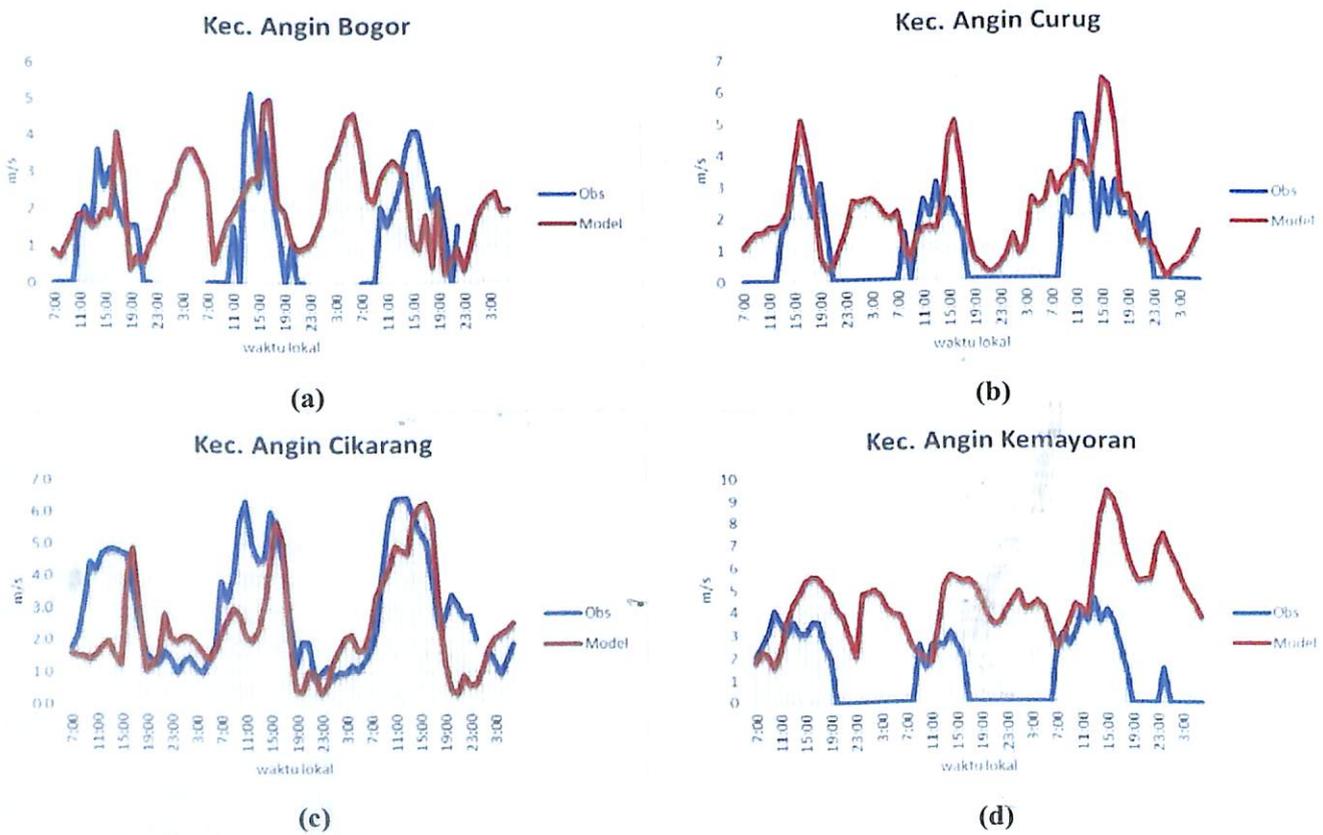
Secara umum menunjukkan bahwa hasil model tidak memperlihatkan pola yang sesuai dengan observasi, meskipun pada waktu tertentu menunjukkan pola yang mirip (jam 13.00 – 16.00) kecuali di Kemayoran. Di Bogor, Curug dan Kemayoran terdapat angin dengan kecepatan sangat rendah, hal ini dimungkinkan karena lokasi pengamatan dikelilingi gedung dan pohon.

Perbandingan Polutan

Gambar 4 merupakan perbandingan distribusi konsentrasi PM10 wilayah Jabotabek antara hasil pengamatan dengan keluaran model WRF-Chem tanggal 22-25 Agustus 2013. Pada Gambar 4a menunjukkan perbandingan distribusi konsentrasi PM10 di wilayah Bogor. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi PM10 terjadi pada malam hari (22:00 – 02:00 WIB). Hal ini juga terlihat pada luaran model WRF-Chem juga menunjukkan konsentrasi tinggi terjadi pada malam hari (22:00 - 02:00 WIB). Namun siklus diurnal pada model WRF-Chem masih belum terlihat dengan jelas dibandingkan dengan pengamatan. Sedangkan nilai konsentrasi model WRF-Chem di wilayah Bogor masih lebih rendah dibandingkan dengan hasil pengamatan.



Gambar 2. Perbandingan Distribusi Temperatur Wilayah Jabotabek Hasil Pengamatan Dengan Keluaran Model WRF-Chem Tanggal 22 – 25 Agustus 2013, yaitu (A) Bogor, (B) Curug, (C) Cikarang Dan (D) Kemayoran.



Gambar 3. Perbandingan Distribusi Kecepatan Angin Wilayah Jabotabek Hasil Pengamatan Dengan Keluaran Model WRF-Chem Tanggal 22 – 25 Agustus 2013, yaitu (A) Bogor, (B) Curug, (C) Cikarang dan (D) Kemayoran.

Tabel 2. Perbandingan Rata-Rata, Korelasi(R), Bias dan RMSE Kecepatan Angin dan Temperatur Pada Empat Lokasi Pengukuran dengan Hasil Keluaran Model WRF-Chem.

	Bogor	Curug	Cikarang	Kemayoran
Temperatur				
Rata	28.75	27.02	28.20	29.48
R	0.94	0.90	0.96	0.66
Bias	0.92	-0.05	1.39	1.99
RMSE	1.19	1.86	3.02	2.09
Kecepatan Angin				
Rata	1.55	1.08	2.99	1.39
R	0.37	0.58	0.62	0.09
Bias	-0.34	-1.01	0.61	-3.14
RMSE	1.49	1.28	1.45	2.18

Pada Gambar 4b menunjukkan perbandingan distribusi konsentrasi PM10 di wilayah Curug. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi PM10 terjadi pada malam hari (22:00 – 02:00 WIB). Namun pada luaran model WRF-Chem menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi terjadi pada siang hari (10:00 – 14:00 WIB) dan malam hari (22:00 - 02:00 WIB). Untuk siklus diurnal pada model WRF-Chem terlihat dengan jelas ada siklus 12 jam-an sedangkan pada pengamatan menunjukkan siklus 24 jam-an. Sedangkan nilai konsentrasi model WRF-Chem di wilayah Curug juga masih lebih rendah dibandingkan dengan hasil pengamatan.

Pada Gambar 4c menunjukkan perbandingan distribusi konsentrasi PM10 di wilayah Cikarang. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi PM10 terjadi pada malam hari (22:00 – 02:00 WIB). Namun pada luaran model WRF-Chem menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi terjadi pada siang hari (10:00 – 14:00 WIB) tanggal 22 dan 24 Agustus 2013 serta malam hari (22:00 - 02:00 WIB) tanggal 23 dan 24 Agustus 2013. Untuk siklus diurnal pada model WRF-Chem tidak terlihat dengan jelas pada awal simulasi, ada siklus 12 jam-an pada tanggal 23 – 24 Agustus 2013. Sedangkan nilai konsentrasi model WRF-Chem di wilayah Cikarang juga masih lebih rendah dibandingkan dengan hasil pengamatan.

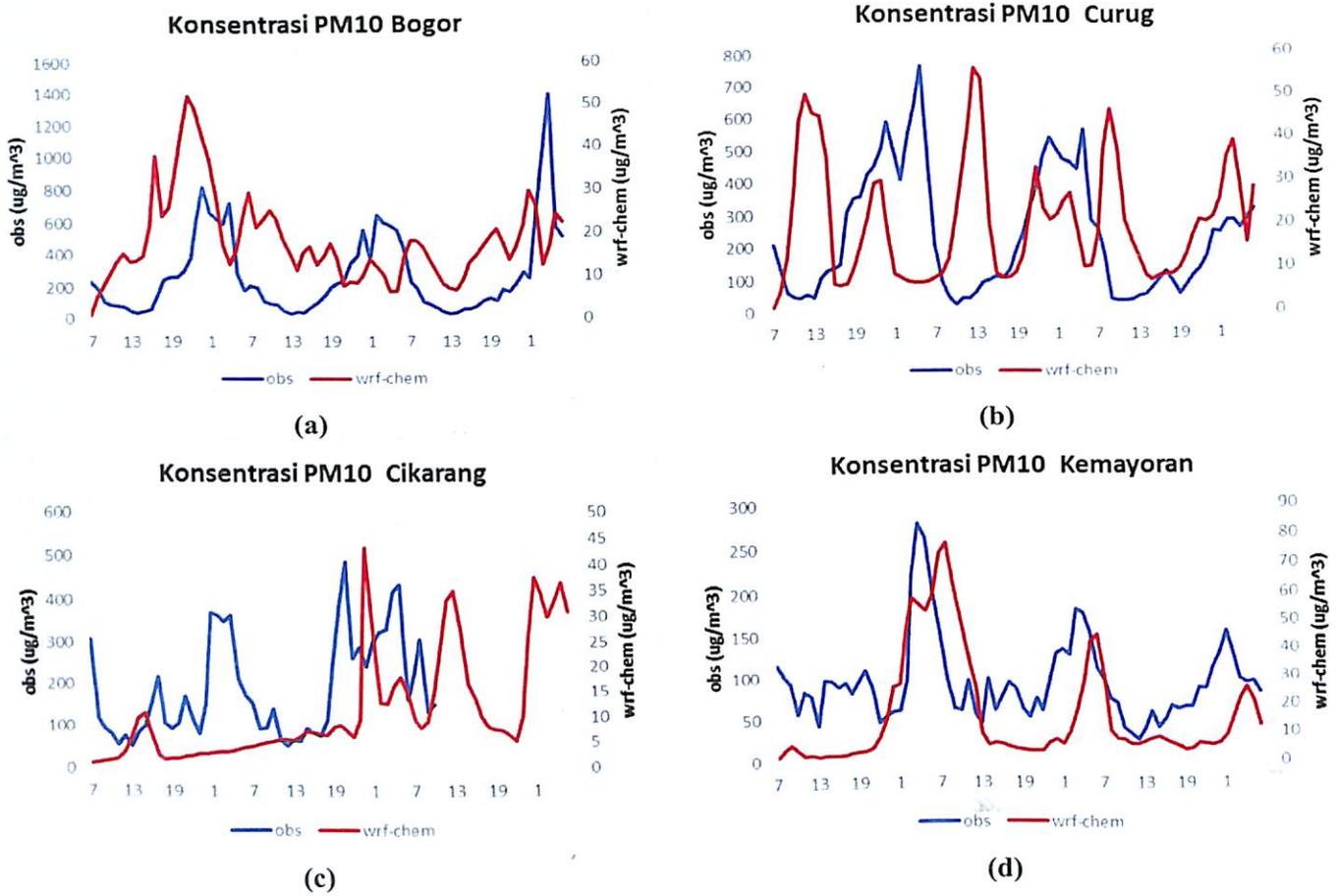
Pada Gambar 4d menunjukkan perbandingan distribusi konsentrasi PM10 di wilayah Kemayoran. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi PM10 juga terjadi pada malam hari (22:00 – 02:00 WIB). Demikian juga pada luaran model WRF-Chem menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi terjadi pada malam hari (22:00 - 02:00 WIB). Untuk siklus diurnal pada

model WRF-Chem terlihat dengan jelas ada siklus 24 jam-an, demikian halnya pada pengamatan juga menunjukkan siklus 24 jam-an. Sedangkan nilai konsentrasi model WRF-Chem di wilayah Kemayoran juga masih lebih rendah dibandingkan dengan hasil pengamatan.

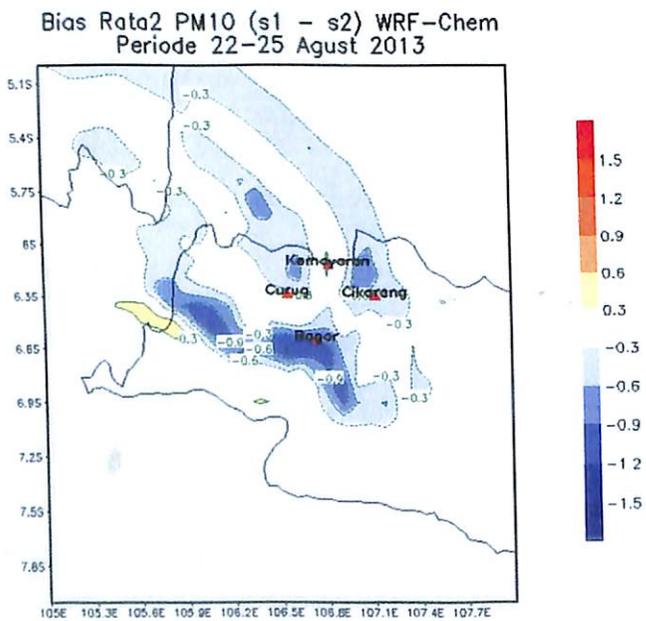
Secara umum untuk wilayah Jabotabek hasil luaran model WRF-Chem mempunyai nilai konsentrasi PM10 yang berbeda di empat lokasi. Sedangkan jika dibandingkan dengan pengamatan masih menunjukkan *underestimates*. Kondisi terlihat dari adanya perbedaan pola yang sangat signifikan termasuk nilainya antara model dengan observasi. Hal ini terjadi karena penggunaan data inisial sebagai input data masih menggunakan data global sehingga kurang bisa menggambarkan model dengan resolusi 10 km. Namun demikian terlihat pada masing-masing lokasi menunjukkan kemiripan pola, terutama di Kemayoran.

Gambar 5 menunjukkan perbandingan rata-rata PM10 antara skema *ensemble Grell-Freitas* (s1) dan skema *ensemble 3D Grell* (s2). Terlihat bahwa variasi bias PM10 cenderung didominasi oleh skema *ensemble 3D Grell*. Dengan kata lain hampir semua wilayah mempunyai konsentrasi PM10 lebih tinggi pada skema *ensemble 3D Grell* dibanding dengan skema *ensemble Grell-Freitas*. Jika diperhatikan untuk wilayah Bogor, Curug dan Cikarang didominasi oleh skema *ensemble 3D Grell*, kecuali Kemayoran didominasi skema *ensemble Grell-Freitas*. Artinya skema *ensemble 3D Grell* memberikan efek meningkatnya konsentrasi PM10 pada tiga wilayah tersebut (Bogor, Curug dan Cikarang) dan skema *ensemble Grell-Freitas* memberikan efek meningkatnya konsentrasi PM10 pada Kemayoran.

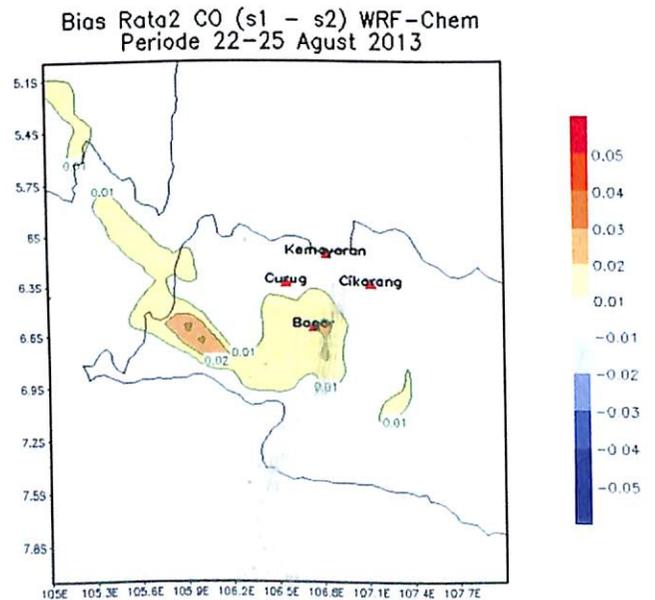
Sedangkan output model dengan parameter polutan CO dapat dilihat pada Gambar 6, yaitu perbandingan rata-rata bias CO antara skema *ensemble Grell-Freitas* (s1) dan skema *ensemble 3D Grell* (s2). Pada Gambar 6 terlihat bahwa variasi bias CO cenderung didominasi oleh skema *ensemble Grell-Freitas*. Wilayah Bogor dibandingkan dengan daerah penelitian lainnya cenderung didominasi oleh skema *ensemble Grell-Freitas*, yaitu konsentrasi CO lebih tinggi dibanding dengan skema *ensemble 3D Grell*. Artinya skema *ensemble Grell-Freitas* memberikan efek meningkatnya konsentrasi CO pada wilayah Bogor dan tidak memberikan efek signifikan konsentrasi CO pada wilayah Curug, Kemayoran dan Cikarang.



Gambar 4. Perbandingan Distribusi Konsentrasi PM10 (Ug/M^2) Wilayah Jabotabek Hasil Pengamatan dengan Keluaran Model WRF-Chem Tanggal 22 – 25 Agustus 2013, yaitu (A) Bogor, (B) Curug, (C) Cikarang dan (D) Kemayoran.



Gambar 5. Perbandingan Output Model WRF-Chem Antara Skema *Ensemble Grell-Freitas* (s1) dan Skema *Ensemble 3D Grell* (s2) untuk Polutan PM10.



Gambar 6. Perbandingan Output Model WRF-Chem Antara Skema *Ensemble Grell-Freitas* (s1) dan Skema *Ensemble 3D Grell* (s2) untuk Polutan CO.

KESIMPULAN

Skema *cumulus* dengan *ensemble 3D Grell* memberikan efek meningkatnya konsentrasi PM10 pada wilayah Bogor, Curug dan Cikarang dibanding skema *cumulus* dengan *ensemble Grell-Freitas*. Sedangkan skema *cumulus* dengan *ensemble Grell-Freitas* memberikan efek meningkatnya konsentrasi CO pada wilayah Bogor dibanding skema *cumulus* dengan *ensemble 3D Grell*.

Secara umum hasil PM10 tidak terlepas dari hasil pendukungnya yaitu parameter angin dan temperatur. Dikarenakan hasil skema *cumulus* belum dapat mengikuti pola observasi dengan baik maka masih perlu dilakukan uji coba untuk mengetahui kelemahan/ ketidaksesuaiannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada staf Puslitbang BMKG khususnya bidang Klimatologi dan Kualitas Udara atas diskusi dan masukannya sehingga tulisan ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Peckam, S. E., Grell, G. A., McKeen, S. A., et al., 2013. *WRF/Chem Version 3.5. User's Guide*.
- ²Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock and B. Eder, 2005. Fully Coupled Online Chemistry Within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39: 6957-6975.
- ³Fast, J. D., Gustafson Jr., W. I., Easter, R. C., Zaveri, R. A., et al., 2006. Evolution of Ozone, Particulates, and Aerosol Direct Radiative Forcing In The Vicinity of Houston Using a Fully Coupled Meteorology-Chemistry Aerosol Model. *Journal of Geophysical Research*, 111, D21305, doi:10.1029/2005JD006721.
- ⁴Zhang, Y., Dubey, M. K., Olsen, S. C., Zheng, J. and Zhang, R., 2009. Comparisons of WRF/Chem Simulations in Mexico City with Ground-Based RAMA Measurements During The 2006-MILAGRO. *Atmos. Chem. and Phys.* (9): 3777 – 3798.
- ⁵De Foy, B., Zavala, M., Bei, N. & Molina, L. T. 2009. Evaluation of WRF mesoscale simulation and particle trajectory analysis for the MILARGO field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics* (9) : 4419 – 4438.
- ⁶Kumar, R., Naja, M., Pfister, G. G., Barth, M. C., Wiedinmyer, C. And Brasseur, G. P., 2012. Simulations Over South Asia Using The Weather Research And Forecasting Model With Chemistry (WRF-Chem): Chemistry Evaluation And Initial Results, *Geoscientific Model Development*, (5): 619–648.
- ⁷Grell, Georg A., 1993. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 764–787.
- ⁸Grell, G. A., D. Devenyi, 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29(14), 1693, 10.1029/2002GL015311.
- ⁹Grell, G. A. and Freitas, S. R., 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5233-5250, doi:10.5194/acp-14-5233-2014.
- ¹¹Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S., and Tang, X., 1990. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *J. Geophys. Res.* (95): 16343-16367.
- ¹¹Chang, J. S., F.S. Binkowski, N.L. Seaman, J.N. McHenry, P.J. Samson, W.R. Stockwell, C.J. Walcek, S. Madronich, P.B. Middleton, J.E. Pleim and H.H. Lansford, 1989. The Regional Acid Deposition Model And Engineering Model. *State-of-Science/Technology, Report 4, National Acid Precipitation Assessment Program*, Washington D.C.
- ¹²Damian, V., A. Sandu, M. Damian, F. Potra, and G.R. Carmichael, 2002. The Kinetic PreProcessor KPP -- A Software Environment for Solving Chemical Kinetics, *Computers and Chemical Engineering* (26):1567-1579.
- ¹³Sandu, A., D. Daescu, and G. R. Carmichael, 2003. Direct and Adjoint Sensitivity Analysis of Chemical Kinetic Systems with KPP: I – Theory and Software Tools (37): 5083–5096.
- ¹⁴Sandu, A., and R. Sander., 2006. *Technical note: Simulating chemical systems in Fortran90 and Matlab with the Kinetic PreProcessor KPP-2.1.* (6): 187–195.
- ¹⁵Guenther, A., Zimmerman, P., Wildermuth, M., 1994. Natural volatile organic compound emission rate estimates for US woodland landscapes. *Atmos. Environ* (28): 1197–1210.
- ¹⁶Simpson, D., A. Guenther, C. N. Hewitt, R. Steinbrecher, 1995. Biogenic emissions in Europe. 1. Estimates and uncertainties. *J. Geophys. Res.* (100D): 22875–22890.
- ¹⁷Berry, E. X., 1968. Modification of the warm rain process, *Proc. First Natl. Conf. Weather modification*, Ed. American Meteorological

Society, State University of New York,
Albany, pp. 81-88.

- ¹⁸Nuryanto, D. E., Linarka, U. A., Heriyanto, E.,
Sari, D. L, dan Rizal, J., 2013. Analisis Hasil
Pengamatan Kualitas Udara Wilayah
JABOTABEK. *Prosiding Seminar Ilmiah
Bulanan MKG*. Jakarta: Puslitbang BMKG.