Jurnal Teknik Lingkungan Volume 26 Nomor 1, April 2020 (Hal 19 - 36)

JURNAL
TEKNIK LINGKUNGAN

ANALISIS DISPERSI PENCEMAR UDARA PM_{10} DI KOTA BANDUNG MENGGUNAKAN WRFCHEM DATA ASIMILASI

PM_{10} AIR POLLUTION DISPERSION ANALYSIS IN BANDUNG CITY USING WRFCHEM DATA ASSIMILATION

Alvin Pratama[1]dan Asep Sofyan[2]
Program Magister Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
Email: [1]alvinprtama@gmail.com dan [2]asepsofyan@gmail.

Abstrak: Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan utama di kota-kota besar di Indonesia, salah satunya Kota Bandung. Permasalahan ini muncul akibat semakin tingginya kebutuhan dan tingkat aktivitas yang dilakukan oleh manusia. Hal ini menjadi salah satu pemicu semakin tingginya konsentrasi polutan di atmosfer yang dapat memengaruhi kehidupan manusia ataupun ekosistem. Di atmosfer, tingkat konsentrasi dan pergerakan polutan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi meteorologi, karakteristik topografi, dan sumber emisi. Untuk mengetahui pesebaran dan tingkat konsentrasi polutan tersebut, dilakukan simulasi menggunakan model WRFCHEM. Simulasi ini memanfaatkan data *Automatic Weather Station* dan data inventarisasi emisi Kota Bandung menggunakan metode asimilasi. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa emisi terbesar kota Bandung bersumber dari kendaraan bermotor yang didominasi di bagian selatan yaitu tol Padaleunyi dan Jalan Soekarno Hatta. Sedangkan pemanfaatan data asimilasi dalam model WRFDA, mampu meningkatkan akurasi parameter meteorologi dari hingga 7%. Pesebaran polutan di kota Bandung sangat dipengaruhi oleh faktor lokal dan fenomena monsun. Pada bulan kering, polutan cenderung tersebar ke arah utara dan barat, sedangkan pada bulan basah cenderung tersebar ke arah selatan dan timur. Selain itu, tingginya kecepatan angin pada bulan kering (dari arah selatan dan tenggara) dan karakter topografi yang datar (di selatan) menyebabkan PM10 tersebar hingga keluar Kota Bandung. Sedangkan pada bulan basah, pelemahan kecepatan angin akibat topografi yang komplek di utara Kota Bandung meyebabkan PM10 cenderung tidak terdispersi dengan baik. Dari hasil simulasi tersebut, juga terdapat beberapa daerah yang perlu menjadi prioritas pengelolaan kualitas udara jika dibandingkan dengan baku mutu berdasarkan PP 41 Tahun 1999. Daerah-daerah yang perlu mendapatkan perhatian khusus diantaranya Rancabolang, Mekarjaya dan Pasirluyu.

Kata kunci: Pencemaran Udara, WRFCHEM, Asimilasi data, PM_{10}, Kota Bandung

Abstract: Air pollution is one of the main problems in big cities in Indonesia, one of which is the city of Bandung. This problem arises due to the increasing needs and level of activity carried out by humans. This has become one of the triggers of higher concentrations of pollutants in the atmosphere that can affect human life or ecosystems. In the atmosphere, the level of concentration and movement of pollutants is influenced by various factors, such as meteorological conditions, topographic characteristics, and emission sources. To find out the distribution and concentration level of these pollutants, simulations were carried out using the WRFCHEM model. This simulation utilizes Automatic Weather Station data and Bandung City emissions inventory data using the assimilation method. From the simulation results it was found that the biggest emissions of the city of Bandung were sourced from motor vehicles dominated in the southern part of the Padaleunyi toll road and Jalan Soekarno Hatta. While the use of assimilation data in the WRFDA model, can improve the accuracy of meteorological parameters from up to 7%. The spread of pollutants in the city of Bandung is strongly influenced by local factors and the phenomenon of the monsoon. In the dry month, pollutants tend to spread to the north and west, while in the wet months tend to spread to the south and east. In addition, the high wind speed in the dry months (from the south and southeast) and the flat topographic character (in the south) causes PM10 to spread out of the city of Bandung. Whereas in the wet month, the weakening of the wind speed due to the complex topography in the north of Bandung city causes PM10 to not be well dispersed. From the results of the simulation, there are also some areas that need to be prioritized in air quality management when compared with the quality standards based on PP 41 of 1999. Areas that need special attention include Rancabolang, Mekarjaya and Pasirluyu.

Keywords: Air Pollution, WRFCHEM, Data assimilation, PM10, Bandung City

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang memiliki pengaruh penting terhadap kehidupan manusia dan ekosistem. Pencemaran udara berasal dari berbagai sumber seperti pembakaran batu bara, pembakaran BBM pada sarana transportasi (darat, laut dan udara), pembakaran pada proses industri dan pengolahan limbah domestik, serta zat kimia yang langsung diemisikan ke udara oleh kegiatan manusia. Saat ini, lebih dari 70% sumber pencemar di Indonesia berasal dari kendaraan bermotor, terutama di kota-kota besar di Indonesia (Ismiyati et al, 1014). Kandungan emisi gas buang yang dihasilkan berupa NO_2, SO_2, PM_{10}, $PM_{2,5}$, Pb dan O_3. Apabila jumlah polutan yang dihasilkan melebihi ambang batas (*threshold*) yang telah ditetapkan, maka dapat mempengaruhi kesehatan manusia, kesuburan daerah pertanian dan perkebunan, bahkan dapat mempengaruhi kerusakan infrastruktur untuk jangka waktu yang lebih lama.

Menurut CAI-Asia (2009) menyatakan bahwa berdasarkan hasil pemantauan kualitas udara yang dilakukan di 10 kota besar di Indonesia pada tahun 2008, menunjukan bahwa beberapa kota besar di Indonesia memiliki kualitas udara pada kondisi atau kategori tidak sehat dengan masing-masing selama 18 hari, 9 hari, 1 hari dan 6 hari berturut-turut untuk Jakarta, Medan, Surabaya, Bandung dan Pontianak. Sedangkan pengamatan yang dilakukan oleh Lestari selama 10 tahun di kota Bandung menunjukan bahwa partikulat halus di kota Bandung mempunyai porsi yang cukup besar terhadap polutan partikulat yang berukuran 10 mikrom (PM_{10}). Dari hasil studi tersebut juga menyatakan bahwa konsentrasi partikulat halus di kota Bandung sudah termasuk kategori membahayakan (Lestari, P. 2016). Hal ini disebabkan karena konsentrasi rata-rata tahunan di beberapa lokasi pengamatan di kota Bandung memiliki nilai diatas baku mutu rata-rata tahunan yang ditetapkan oleh WHO yaitu 20 $\mu g/m^3$.

Faktor meteorologi merupakan salah satu faktor utama dalam proses dinamika polutan di atmosfer (J. Holton, 2014). Beberapa parameter meteorologi seperti temperatur, kecepatan dan arah angin, stabilitas atmosfer dan tinggi pencampuran (*mixing height*) yang berubah-ubah setiap waktu menjadi faktor penting bagi proses distribusi polutan. Disisi lain, kondisi meteorologi di suatu wilayah dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya karakteristik topografi. Kota Bandung merupakan salah satu kota di Indonesia yang memiliki karakteristik topografi yang unik. Hal ini disebabkan karena

kota Bandung dikelilingi oleh dataran yang lebih tinggi dan pegunungan sehingga membentuk suatu cekungan (*basin*). Kondisi topografi seperti ini mempengaruhi sirkulasi atmosfer dan polutan di ota Bandung. Penelitian yang mengkaji tentang sirkulasi atmosfer di kota Bandung telah dilakukan oleh Megatroika (2013) pada musim kering tahun 2012 dan Kombara (2016) pada musim basah tahun 2015. Hasil dari kedua penelitian tersebut membuktikan bahwa topografi cekungan Bandung yang kompleks memberikan dampak terhadap sirkulasi angin lembah dan angin gunung pada musim kering maupun basah (Kombara, Y.p. et al, 2016; Megatronika, 2013; Ramadhan, M, 2014). Penelitian yang dilakukan oleh Megatroika (2013) dilakukan menggunakan SODAR (*Sound Detection Ranging*) sedangkan Kombara (2016) berdasarkan data observasi AWS (*Automatic Weather Station*) yang dipasang di beberapa lokasi di kota Bandung.

Salah satu model yang biasa digunakan untuk memodelkan kondisi udara ambien adalah Weather Research and Forecasting with Chemical (WRF-CHEM) (Faisal, I dan Sofyan, A. 2019). WRF-CHEM adalah model cuaca skala regional yang memodelkan kondisi meteorologi dan interaksinya dengan senyawa-senyawa kimia yang ada di atmosfer secara spasial dan temporal. Simulasi WRF-CHEM menggunakan inventori emisi regional dapat memperbaiki hasil simulasi serta menunjukan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan inventori emisi skala global (Faisal, I dan Sofyan, A. 2019)..

Pemanfaatan model cuaca numerik seperti WRF dalam menghasilkan parameter meteorologi selalu memiliki permasalahan pada keadaan awal (*initial condition*) dan syarat batas (*boundary condition*) yaitu dengan memberikan estimasi keadaan atmosfer saat ini (*initial condition*) serta syarat batas permukaan dan lateral (Junnaedi, 2008). Menurut Junnaedi (2008), semakin akurat estimasi keadaan awal, maka semakin baik pula kualitas parameter meteorologi yang dihasilkan, salah satunya dengan memanfaatkan data stasiun seperti AWS (*Automatic Weather Station*) (Junnaedi, 2008). Oleh karena itu, untuk memperbaiki kondisi tersebut, maka pada penelitian ini dilakukan asimilasi data AWS dengan data GFS (*Global Forecast System*) menggunakan model WRF 3DVAR, sehingga memperbaiki kondisi awal model WRF di wilayah kajian. Asimilasi dengan data AWS mampu memperbaiki fase diurnal dari temperatur, kelembaban, dan angin, meskipun belum mampu dalam memperbaiki kemampuan dalam memprediksi hujan secara signifikan (Junnaedi, 2008). Selanjutnya, penelitian tentang kemampuan WRF data asimilasi dilakukan oleh Zhupanov, dkk (2012). Dari hasil penelitian tersebut

didapatkan bahwa tingkat akurasi prediksi parameter meteorologi mengalami peningkatan sebesar 10% (Faisal, I dan Sofyan, A. 2019). Sedangkan berdasarkan penelitian oleh Rakesh & Goswarni (2015), menghasilkan bahwa data asimilasi mampu meningkatkan kemampuan model dalam memprediksi curah hujan dan mampu meningkatkan kemampuan keadaan awal (*initial condition*) dari model (Kumar, A. et al, 2016; Rakesh, V. et al, 2013).

METODOLOGI

Penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur yang berkaitan dengan kondisi kota Bandung yang meliputi kondisi geografis, meteorologi dan aktivitas masyarakat; inventarisasi emisi; pencemaran partikulat; model meteorologi serta penggunaan data asimilasi; dan pemanfaatan model WRF-CHEM dalam mensimulasikan pesebaran polutan.

Gambar 1. Diagram alir penelitian

Selanjutnya dilakukan pengumpulan data-data yang terdiri dari data observasi meteorologi, data inventarisasi emisi, dan data satelite yaitu GFS (*Global Forecasting System*). Data-data observasi tersebut (meteorologi dan emisi) digunakan sebagai inputan model untuk memperbaiki kondisi awal dan kondisi batas model. Berikut diagram alir penelitian (Gambar 1).

Simulasi model WRF-CHEM dilakukan selama 4 hari pada musim basah dan musim kering tahun 2017 dengan resolusi spasial 1 km x 1 km dan resolusi temporal 1 jam di Kota Bandung dengan parameter polutan adalah PM_{10}. Daerah kajian yang akan dianalisis merupakan kota Bandung yang berada di dalam domain 3 pada gambar 2.

Gambar 2. Domain wilayah kajian dan pesebaran stasiun meteorologi

Untuk pengolahan data terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

1) Pengolahan sumber titik dan area

   Untuk menghitung beban emisi sumber titik dan area dilakukan menggunakan metode faktor emisi. Oleh karena itu, diperlukan 3 jenis data masukan; yaitu informasi aktivitas, faktor emisi, dan informasi tentang efisiensi peralatan pengendalian emisi

(apabila menggunakan faktor emisi yang tidak mempertimbangkan efisiensi peralatan). Persamaan dasar perhitungan emisi adalah:

$$E = R\ x\ FE\ (tanpa\ pengendalian)\ x \frac{100 - C}{100} \qquad (1)$$

Keterangan:

E = Beban emisi;

R = Tingkat aktivitas (misalnya, jumlah materi yang diproses)

FE = Faktor emisi, dengan asumsi tanpa pengendalian

C = Efisiensi peralatan pengendali (%)

2) Pengolahan sumber bergerak

Perhitungan emisi sumber bergerak, umumnya menggunakan metode faktor emisi. Untuk jaringan jalan utama, emisi diperlakukan sebagai sumber garis. Faktor emisi dipengaruhi oleh berbagai parameter, diantaranya karakteristik mesin, teknologi kendaraan, karakteristik bahan bakar, usia dan perawatan kendaraan, dan penggunaan teknologi. Dalam perhitungan emisi setiap kategori kendaraan pada suatu ruas jalan diasumsikan memiliki karakteristik lalu lintas tetap sehingga perhitungannya dapat dilakukan sebagai berikut.

$$VKT_{j,line} = \sum_{i=1}^{n} Q_{ji}\ x\ l_i\ ;\ E_{cji} = VKT_{ji}\ x\ EF_{cj} \frac{100-C}{100} \quad (2)$$

$$E_{cji} = VKT_{j,i}\ \ x\ EF_{cj} \frac{100 - C}{100} \qquad (3)$$

Keterangan:

$VKT_{j,\ line}$ = VKT (*Vehicle kilometer traveled*) kategori kendaraan j pada ruas jalan I yang dihitung sebagai sumber garis (km/tahun)

$Q_{j,\ I}$ = volume kendaraan dalam kategori j pada ruas jalan I (kendaraan/tahun)

l_i = panjang ruas jalan I (km)

E_{cji} = emisi pencemar c untuk kendaraan kategori jalan j pada ruas jalan i

C = efisiensi peralatan pengendalian emisi (%)

3) Proses model WRF-CHEM

Pada dasarnya terdapat 3 proses utama dalam menjalankan model WRF-CHEM, yaitu:

- WPS (*WRF Pre-processing* System). WPS terdiri dari 3 set program yaitu *geogrid, ungrib dan metgrid*. Pada dasarnya, sistem ini berfungsi untuk mempersiapkan data inputan model. *Geogrid* berfungsi dalam mendefinisikan model domain dan melakukan interpolasi statis untuk setiap grid; *Ungrib* berfungsi untuk melakukan ekstraksi data dari from *GRIB*; dan *Metgrid* berfungsi untuk melakukan interpolasi secara horizontal terhadap data meteorologi yang dihasilkan dari proses ekstraksi *ungrib* (Wu, L. et al, 2017).
- WRF model, terdiri dari program awal (real.exe) dan program integrasi numerik (wrf.exe). Pada tahap ini dilakukan pemilihan parameterisasi yang digunakan untuk melakukan simulasi kondisi atmosfer dan pesebaran polutan. Konfigurasi parameterisasi WRF mengikuti skema yang telah diterapkan oleh sistem prediksi cuaca di Laboratorium Analisis Meteorologi ITB. Skema parameterisasi tersebut telah diujicoba untuk daerah Kota Bandung. Berikut parameterisasi model WRF yang digunakan (Tabel 1).

Tabel 1. Konfigurasi parameterisasi WRF

Proses	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Microphysics	Lin et al. *scheme*	Lin et al. *scheme*	Lin et al. *scheme*
Long wave radiation	RRTM	RRTM	RRTM
Short wave radation	Goddard shortwave scheme	Goddard shortwave scheme	Goddard shortwave scheme
Boundary layer scheme	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE *scheme*	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE *scheme*	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE *scheme*
Cumulus parameterization	Grell Devenyi Ensemble	Grell Devenyi Ensemble	Grell Devenyi Ensemble
Chemical parameterization	RADM2 Chemistry and GOCART aerosols	RADM2 Chemistry and GOCART aerosols	RADM2 Chemistry and GOCART aerosols
Emission input	EDGAR-HTAP	EDGAR-HTAP	Emisi Lokal

4) Asimilasi Data

Pada prinsipnya, asimilasi data merupakan proses mengkombinasikan semua informasi yang tersedia dari keadaan atmosfer pada suatu jendela waktu tertentu untuk menghasilkan estimasi kondisi atmosfer yang valid pada waktu analisis yang telah ditentukan. Sumber-sumber informasi yang digunakan untuk menghasilkan analisis antara lain pengamatan, prediksi sebelumnya (*background* atau *first-guess*), *error* dari prediksi jangka panjang dan hukum-hukum fisika (Karlicky, J. et al, 2017). Berikut persamaan dalam proses asimilasi data:

$$x_j = x_j^b + \frac{\sum_{i=1}^{n} w(i,j)(y_i - x_i^b)}{\sum_{i=1}^{n} w(i,j)} \quad (4)$$

Keterangan:

j : koreksi pada *grid point* j

y_i : observasi di *grid point i*

w(i,j) : bobot dari y_i di titik j

$$w(i,j) = \frac{R^2 - r_{i,j}^2}{R^2 - r_{i,j}^2} \quad (5)$$

Jika $r_{i,j} \leq w(i,j)$; dan $w(i,j) = 0$ jika $r_{i,j} > R$;

$r_{i,j}$: jarak antara titik I dan j; R: pengaruh radius

5) Verifikasi Data

Verifikasi hasil model dilakukan untuk mengetahui tingkat keakuratan dari hasil model dalam mensimulasikan faktor meteorologi dan konsentrasi polutan dalam udara ambien. Metode verifikasi dilakukan dengan menghitung galat yang dihasilkan oleh model dan kesesuaian model dalam merepresentasikan kondisi sebenarnya.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - Y_i)^2\right)^{1/2} \quad (6)$$

Koefisien korelasi pearson digunakan untuk melihat kesesuaian hubungan antara hasil model dan hasil observasi sebenarnya.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{(n\sum x^2 - (\sum x)^2)(n\sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (7)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Inventarisasi Emisi

Inventarisasi emisi dilakukan untuk mengetahui emisi yang dikeluarkan dari setiap sumber (Jenned, M.L dan Dewi, K, 2017). Inventarisasi emisi kota Bandung berasal dari beberapa sumber seperti sumber titik, area dan garis. Total sumber yang diinventarisir adalah 365 sumber. Data tersebut didigitasi dan dicek ulang dan kemudian dikonversi dari data ascii ke raster dengan resolusi 1 km. Berikut total emisi di kota Bandung dari berbagai sumber (Gambar 3).

Gambar 3. Total emisi PM10 (ton/tahun) dari berbagai sumber di Kota Bandung

Emisi PM_{10} dari sumber titik, area dan garis dijumlahkan hingga mendapatkan total emisi PM_{10} di kota Bandung. Dari gambar 3 diperoleh bahwa sumber garis memiliki kontribusi paling besar dalam menyumbangkan emisi PM_{10} dibandingkan dengan sumber lain. Sumber terbesar berada di bagian selatan, yaitu tol Padaleunyi dan jalan Soekarno-Hatta. Jumlah emisi dari kedua sumber tersebut memiliki nilai antara 180 – 430 ton/tahun. Selain itu, daerah lain seperti jalan Setiabudhi, jalan Ahmad Yani dan Tol Pasteur menyumbangkan emisi PM_{10} yang cukup besar yaitu berkisar antara 55 – 180 ton/tahun.

Verifikasi Parameter Meteorologi (WRFARW vs WRFDA)

Verifikasi data dilakukan dengan membandingkan data dari stasiun meteorologi terhadap hasil model yang dikeluarkan oleh model WRFARW dengan konfigurasi terhadap parameterisasi; dan hasil model WRFDA dengan konfigurasi parameterisasi dan kondisi awal dan batas dari data lapangan. Verifikasi dilakukan untuk parameter temperatur, kecepatan angin dan kelembaban. Secara umum, pemanfaatan data asimilasi mampu meningkatkan korelasi parameter cuaca dan menurunkan *error* seperti pada tabel 2, terutama untuk parameter kecepatan angin. Berikut pengaruh penggunaan data asimilasi terhadap akurasi dan RMSE dari hasil model WRF.

Tabel 2. Tabel pengaruh penggunaan data asimilasi terhadap akurasi dan RMSE model

Stasiun	Parameter	Bulan Basah			Bulan Kering		
		T	Ws	Hum	T	Ws	Hum
Sukamandi	Korelasi	-0.8%	+7.9%	-2.5%	+0.6%	+2.5%	-1.1%
	RMSE	0.00	0.00	0.00	-0.013	-0.116	-0.001
Stageof Cemara	Korelasi	-1.6%	+2.1%	+1.4%	+0.4%	+2.1%	+3.6%
	RMSE	+0.016	-0.073	-0.292	-0.112	-0.083	-0.508
Cikancung	Korelasi	+1.6%	+1.2%	+2.5%	-	-	-
	RMSE	-0.04	+0.02	-0.59	-	-	-

Secara umum model WRFDA dengan intervensi data lapangan mampu meningkatkan akurasi parameter meteorologi hingga 1 - 7% dan menurunkan error sebesar 0 - 1%.

Karakteristik Meteorologi di Kota Bandung

Bandung merupakan salah satu wilayah yang memiliki topografi kompleks yang dibentuk oleh gunung-gunung di sekelilingnya. Adanya gunung-gunung membuat wilayah Bandung menyerupai sebuah cekungan sehingga sering disebut sebagai cekungan Bandung (Ismiyati. et al, 1014). Karakteristik berupa cekungan seperti itu menyebabkan terbentuknya sirkulasi lokal berupa angin anabatik dan angin katabatik (angin lembah dan angin gunung). Berikut hasil simulasi arah dan kecepatan angin di Kota Bandung (Gambar 4).

(a) At 13.00 P.M

(b) At 02.00 A.M

Gambar 4. Hasil simulasi kecepatan dan arah angin di bulan basah (kanan) dan bulan kering (kiri).

Sirkulasi angin di Kota Bandung sangat dipengaruhi oleh faktor lokal, konvektif dan gradien temperatur. Pada bulan basah, interaksi antara angin lokal dengan angin konvektif sangat berpengaruh pada sirkulasi angin. Pola konvektif di darat yang umum terjadi adalah aktivitas konvektif maksimum pada siang hari dan disusul dengan kejadian hujan pada sore atau malam harinya [1]. Pengaruh aktivitas konvektif terhadap sirkulasi angin lokal bisa memperkuat atau mengubah pola yang sudah ada. Menurut Ramadhan (2014), aktivitas konvektif di cekungan Bandung mempengaruhi pergerakkan pola angin

lokal pada musim hujan, sehingga pola angin lokal di musim hujan berbeda dengan pola di musim kemarau (Ramadhan, M, 2014).

Pengaruh proses konvektif dan hujan yang dominan di Kota Bandung saat bulan basah dibandingkan saat bulan kering (Gambar 5) menyebabkan perubahan arah pergerakkan angin. Peristiwa tersebut menyebabkan arah angin pada saat bulan basah mengalami pembelokkan ke arah selatan. Hal ini didukung dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ramadhan (2014). Dalam penelitian tersebut disebutkan bahwa terjadi pembelokkan arah angin ke arah pegunungan selatan pada pukul 09.00 – 18.00 WIB disebabkan karena adanya aktivitas konvektif di musim hujan. Hal berbeda terjadi saat musim kering, perbedaan temperatur yang cukup signifikan antara daerah gunung dan lembah; kurangnya aktivitas konvektif; dan diperkuat dengan angin monsun yang berasal dari australia menyebabkan peristiwa angin lembah dapat terlihat dengan jelas (Ramadhan, M, 2014).

Gambar 5 Aktivitas hujan konvektif di Kota Bandung tahun 2017 (Sumber: BMKG)

Pada saat temperatur udara di gunung lebih dingin dibandingkan temperatur di lembah, terlihat bahwa pergerakkan angin ke arah selatan dari dataran tinggi di lembang ke kota Bandung memiliki suatu perbedaan. Angin gunung yang bertiup pada saat musim kering memiliki kecepatan yang lebih cepat dibandingkan pada saat musim basah. Hal ini disebabkan karena gradien temperatur yang terjadi pada musim basah yang tidak terlalu besar akibat pengaruh curah hujan dan proses konveksi, sehingga perpindahan kolom udara dingin dari puncak gunung ke bagian lembah berlangsung tidak terlalu lama. Hal

ini menyebabkan temperatur antara puncak gunung dengan bagian lembah menjadi tidak berbeda jauh. Gradien temperatur yang tidak terlalu besar menyebabkan kecepatan angin pada musim basah menjadi lebih lambat.

Karakteristik Pesebaran Polutan

Pesebaran polutan secara horizontal menjadi sangat penting dalam menentukan daerah yang terdampak paling besar terhadap risiko pencemaran udara serta sejauh mana polutan tersebut tersebar. Pada dasarnya, arah pesebaran dan tingkat konsentrasi polutan di atmosfer sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi seperti arah dan kecepatan angin, curah hujan, temperatur, dsb. Berikut hasil simulasi pesebaran PM_{10} di Kota Bandung pada bulan basah dan bulan kering (Gambar 6).

Gambar 6. Pesebaran PM_{10} secara horizontal pada siang hari dan di-*overlay* dengan arah angin di Kota Bandung saat bulan kering (kiri) dan bulan basah (kanan)

Pada siang hari, terlihat bahwa pada musim kering, angin dominan bergerak dari tenggara yang menyebabkan pesebaran polutan cenderung ke arah barat laut (angin lembah). Menurut Aldrian (2003), Kota Bandung merupakan daerah yang dipengaruhi oleh fenomena monsun. Pada musim kering, angin dominan bertiup dari arah tenggara (benua australia) yang membawa masa udara kering. Sedangkan pada musim basah, arah angin dominan berasal dari barat laut (asia) dan membawa massa udara yang mengandung banyak uap air, sehingga menyebabkan curah hujan di Kota Bandung menjadi meningkat. Pengaruh angin monsun ini juga memperkuat kecepatan angin yang berasal dari tenggara.

Sedangkan pada bulan basah, pergerakan angin cenderung mengalami pembelokkan yang disebabkan karena aktivitas konvektif, sehingga polutan cenderung tersebar ke arah tenggara. Hal ini didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Ramadhan (2014) dan Kombara (2016) terkait pembelokkan arah angin di Kota Bandung.

Pengaruh tingkat konveksi pada siang hari serta radiasi matahari yang menyebabakan terjadinya turbulensi pada siang hari, menyebabkan tingkat konsentrasi PM_{10} pada siang hari menjadi lebih kecil (Gambar 6). Salah satu dampak dari proses konveksi maksimum adalah terjadinya curah hujan pada siang dan sore hari. Curah hujan akan melarutkan polutan – polutan yang terdapat di atmosfer atau disebut dengan *wet deposition*. Hal ini akan menurunkan tingkat konsentrasi polutan secara signifikan. Faktor lain yang mempengaruhi tingkat konsentrasi polutan di siang hari adalah faktor turbulensi. Turbulensi dapat digambarkan sebagai perubahan kecepatan yang sering terjadi dalam waktu singkat berskala kecil dan terjadi secara acak. Turbulensi sering dikenal sebagai *eddies* dan menjadi bagian penting dalam proses transport polutan secara vertikal. Salah satu faktor penting dalam menentukan besaran turbulensi adalah tingkat radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi. Semakin tinggi tingkat radiasi, maka semakin besar *eddies* yang terbentuk dan udara permukaan menjadi lebih hangat yang kemudian naik ke atmosfer karena densitas yang dimiliki lebih kecil dibandingkan udara *ambient* (Stull, 1998). Dalam pergerakannya secara vertikal, transport *eddies* membawa panas (*heat*), kelembaban (*moisture*), *momentum*, dan polutan dari permukaan. Sehingga intensitas dan konsentrasi polutan di permukaan menjadi berkurang.

Konsentrasi PM_{10} di beberapa titik reseptor

Pada bagian ini dibandingkan konsentrasi polutan di beberapa titik reseptor di Kota Bandung, sehingga dapat diketahui daerah dengan konsentrasi tertinggi dan perlu mendapatkan perhatian khusus. Pemilihan reseptor ini didasarkan pada jumlah kecamatan yang terdapat di Kota Bandung. Konsentrasi di setiap reseptor akan dibandingkan dengan ambang batas PM_{10} yang dikeluarkan oleh pemerintah Indonesia melalui PP No 41 Tahun 1999. Berikut hasil *plot* konsentrasi di beberapa titik reseptor di Kota Bandung (Gambar 7).

(a)

(b)

Gambar 7. Perbandingan konsentrasi PM_{10} di setiap reseptor (a) bulan kering, dan (b) bulan basah terhadap baku mutu udara di Indonesia

Perbandingan secara musiman antara bulan basah dan bulan kering, terlihat bahwa konsentrasi PM_{10} pada bulan basah memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bulan kering. Hal ini disebabkan karena pengaruh arah angin monsun. Pada bulan kering, angin dominan berasal dari tenggara (benua australia) dengan kecepatan angin yang tinggi. Hal ini menyebabkan konsentrasi PM_{10}, terutama bagian selatan Kota Bandung (emisi terbesar), tersebar merata ke bagian timur bahkan ke luar Kota Bandung, sehingga tingkat konsentrasi pada bulan kering menjadi lebih rendah. Hal ini juga didukung dengan topografi di bagian selatan Kota Bandung yang cenderung datar (bagian selatan), sehingga tidak terdapat halangan yang menyebabkan turbulensi mekanik. Hal

berbeda terjadi pada saat bulan basah, dimana pengaruh angin monsun barat tidak sekuat yang terjadi pada angin monsun timur dan topografi yang kompleks di bagian utara Bandung membuat kecepatan angin menjadi berkurang. Hal ini menyebabkan konsentrasi polutan di bagian selatan cenderung tidak tersebar merata (proses adveksi rendah) yang menyebabkan konsentrasi tinggi di beberapa titik reseptor di Kota Bandung. Selain itu, tingkat curah hujan dan proses *wet deposition* pada akhir bulan Maret tidak terlalu mempengaruhi konsentrasi PM10 di Kota Bandung.

Berdasarkan PP 41 Tahun 1999 disebutkan bahwa ambang batas PM_{10} memiliki nilai 150 $\mu g/m^3$. Dari gambar 7 terlihat bahwa terdapat beberapa daerah yang memiliki tingkat konsentrasi PM_{10} yang melewati ambang batas dan perlu perhatian khusus, diantaranya Rancabolang, Mekarjaya dan Pasirluyu.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, untuk memodelkan kualitas udara di kota Bandung serta parameter meteorologi, digunakan model WRFCHEM Data Asimilasi. Model tersebut memanfaatkan data observasi meteorologi dari BMKG dan inventarisasi emisi dari KLHK. Tujuan pemanfaatan data tersebut adalah untuk memperbaiki *initial condition* dan *boundary condition* dari model. Dari hasil *plot* inventarisasi emisi yang berjumalah 365 sumber yang terdiri dari sumber titik, area dan garis, diperoleh bahwa sumber garis dari kendaraan bermotor memiliki tingkat emisi yang sangat dominan di kota Bandung. Emisi terbesar berasal dari tol Padaleunyi dan jalan Soekarno Hatta di bagian selatan kota Bandung.

Untuk mendapatkan simulasi parameter meteorologi yang baik, maka dilakukan perbandingan simulasi menggunakan WRFARW dan WRFDA dengan pengaturan parameterisasi yang sama, namun terdapat perbaikan kondisi awal dari data observasi meteorologi untuk model WRFDA. Dari hasil perbandingan diperoleh bahwa terjadi peningkatan akurasi parameter meteorologi 1-7% dan penurunan RMSE 0-1% untuk parameter temperatur, kecepatan angin dan kelembaban.

Pesebaran polutan di Kota Bandung dipengaruhi oleh pergerakan angin, tinggi *boundary layer*, tingkat turbulensi, proses konvektif dan curah hujan. Pada musim kering, angin dominan berasal dari timur dan tenggara (monsun australia) dengan intensitas yang tinggi serta melewati topografi yang cenderung datar. Hal ini menyebabkan polutan di

Kota Bandung tersebar ke arah barat dan barat daya hingga ke luar Kota Bandung. Sedangkan pada bulan basah, angin dominan berasal dari arah barat laut (monsun asia) dan melewati topografi yang komplek serta didominasi oleh perbukitan. Hal ini menyebabkan tingkat dispersi polutan ke arah timur pada bulan basah tidak tersebar dengan baik.

Berdasarkan PP 41 Tahun 1999 disebutkan bahwa ambang batas PM_{10} memiliki nilai 150 $\mu g/m^3$. Dari hasil *plot* konsentrasi terlihat bahwa terdapat beberapa daerah yang memiliki tingkat konsentrasi PM_{10} yang melewati ambang batas, diantaranya Rancabolang, Mekarjaya dan Pasirluyu.

DAFTAR PUSTAKA

Faisal, I., & Sofyan, A. (2019). Analisis Pengaruh Variasi Musiman Terhadap Dispersi No2 Di Kota Tangerang Dengan Menggunakan Model Wrf-Chem. *Jurnal Teknik Lingkungan*, *25*(1), 1-14.

Holton, J., *An Introduction to Dynamic Meteorology (4th ed)*, California: Elsevier Academic Press (2014)

Ismiyati, Marlita, D., & Saidah, D, J. Manajemen Transportasi & Logistik (JMTTransLog), **01**, 241-247 (2014)

Jenned, M. L., & Dewi, K. (2017). Analisis Dispersi Polutan Dari Multiple Sources Operasional Pltu Batubara X Sebagai Media Perhitungan Valuasi Ekonomi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, *23*(2), 53-63.

Junnaedi, I. (2008), Thesis Program Magister, 20-25 (2008)

Karlicky, J., Huszar, P., & Halenka, T, J. Adv in Sci & Research, **14**, 181-186 (2017).

Kombara, Y. P., Junnaedhi, I. D., & Riawan, E, Bandung: Program Studi Meteorologi (2016)

Kumar, A., Jimenez, R., & Rojas, N. Y,. J. Aerosol and Air Quality Research, **16**, 1206-1221 (2016)

Lestari, P, Bandung: Forum Guru Besar ITB (2016)

Megatronika, A, Bandung: Program Studi Meteorologi 2013)

Rakesh, V., & Goswami, P, J. Geophysical Research: Atmosphere, **120**, 359-377 (2013).

Ramadhan, M, Bandung: Program Studi Meteorologi ITB (2014).

Stull, B, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology.* Boston: Kluwer Academic Publishers (1998).

Wu, L., H, Kalashnikova., Jiang, J. H., Zhao, C., Garay, M. J., Yu, N. J. Atmospheric Chem & Phy, **17**, 7291 – 7309 (2017)