

SIMULASI DISPERSI PERBANDINGAN PM_{2.5} SAAT HARI TANPA HUJAN (HTH) DAN HARI LIBUR TAHUN BARU (HLTB) DI SUMATERA BARAT DENGAN MODEL WEATHER RESEARCH AND FORECASTING CHEMISTRY (WRF-CHEM)

SIMULATION DISPERSION OF COMPARING PM_{2.5} DURING RAINLESS DAYS AND NEW YEARS HOLIDAY IN WEST SUMATERA USING WRF-CHEM MODEL

Kiagus Ardi Zulistyawan^{1*}, Kharir Frestia Deastari², Dhiyaul Qalbi S², Raihan Falah³

^{1,2}Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, Provinsi Sumatera Barat, Indonesia

³Stasiun Klimatologi Klas II Riau, Provinsi Riau, Indonesia

*E-mail: kiagus.ardi@bmkg.go.id

Naskah masuk: 10 Januari 2023 Naskah diperbaiki: 14 Januari 2023 Naskah diterima: 18 Maret 2023

ABSTRAK

Indikator dalam menentukan kualitas udara salah satunya dengan melihat konsentrasi PM_{2.5} di suatu wilayah. Konsentrasi PM_{2.5} dapat disimulasikan dengan menggunakan model WRF-Chem. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melihat dispersi PM_{2.5} saat Hari Tanpa Hujan (HTH) dan Hari Libur Tahun Baru (HLTB) di Sumatera Barat dengan menggunakan WRF-Chem sebagai upaya preventif jika terjadi dampak negatif akibat kualitas udara yang buruk. Data yang digunakan yaitu *Final Data Analysis* (FNL) serta data observasi dari Stasiun Pemantau Atmosfer Bukit Kototabang. Hasil simulasi WRF-Chem pada saat HTH dan HLTB menunjukkan adanya pola sebaran konsentrasi PM_{2.5} yang mirip. Konsentrasi PM_{2.5} di pagi hingga siang hari memiliki konsentrasi yang tinggi pada wilayah yang menjadi sumber PM_{2.5}. Namun, pada sore hingga malam hari menjelang pagi, konsentrasi tersebut menyebar ke wilayah lain. Konsentrasi PM_{2.5} dengan rentang 20 – 30 µg/m³ lebih dominan terjadi ketika HLTB. Simulasi WRF-Chem juga di validasi dengan data observasi yang menghasilkan nilai konsentrasi PM_{2.5} masih berada di bawah BMUN (berarti aman) dan nilai *r*, RMSE, serta MAE berturut-turut sebesar 0,48; 4,09; 1,19 (HTH) dan 0,56; 10,02; 6,40 (HLTB).

Kata kunci: WRF-Chem, PM_{2.5}, HTH, HLTB

ABSTRACT

One of the indicators in determining air quality is looking at the concentration of PM_{2.5} in an area. PM_{2.5} concentration can be simulated using the WRF-Chem model. Therefore, this study aims to look at the dispersion of PM_{2.5} during Rainless Days and New Year's Holidays in West Sumatra by using WRF-Chem as a preventive measure if there is a negative impact due to poor air quality. The data used are *Final Data Analysis* (FNL) and observational data from the Kototabang Hill Atmospheric Monitoring Station. WRF-Chem simulation results on Rainless Days and New Year's Holidays show a similar distribution pattern of PM_{2.5} concentrations. PM_{2.5} concentrations in the morning to noon have high concentrations in areas that are sources of PM_{2.5}. However, the attention spread to other sites from the afternoon until late morning. PM_{2.5} concentrations ranging from 20 – 30 µg/m³ dominate during New Year's Holidays. The WRF-Chem simulation was also validated with observational data, which resulted in a PM_{2.5} concentration value still below the BMUN (meaning it was safe), and the *r*, RMSE, and MAE values were 0.48, 4.09, 1.19 (Rainless Days) and 0.56; 10.02; 6.40 (New Years Holiday).

Keywords: WRF-Chem, PM_{2.5}, Rainless Days, New Years Holiday

1. Pendahuluan

Kualitas udara yang baik dapat menentukan aktivitas di luar ruangan agar terasa nyaman. Salah satu indikator dalam menentukan kualitas udara dengan adanya kandungan *Particulate Matter* (PM_{2.5}) [1]. PM_{2.5} merupakan partikel dengan diameter berukuran kurang dari 2.5, jika terhirup dalam jangka waktu yang panjang dapat menyebabkan gangguan pernapasan seperti inspeksi saluran pernafasan (ISPA), kanker paru-paru, kardiovaskular, hingga kematian dini [1]. Selain dibidang kesehatan, tingginya konsentrasi PM_{2.5} berdampak juga dibidang ekonomi, sosial budaya, dan pendidikan [2].

Sumber PM_{2.5} biasanya dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, residu kendaraan, kebakaran hutan, dan sebagainya [3, 4]. Oleh karena itu, Pemerintah telah menetapkan dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, bahwa batasan baku mutu udara nasional (BMUN) untuk PM_{2.5} selama rata-rata 24 jam sebesar 65 µg/m³.

Sumatera Barat merupakan salah satu provinsi yang dijadikan sebagai tempat tujuan untuk berlibur di tahun baru bagi wilayah yang berada disekitarnya. Seperti Provinsi Riau, Jambi, Palembang, dan Sumatera Utara. Diseminasi informasi kualitas udara di wilayah Sumatra Barat menggunakan data observasi stasiun GAW Bukit Kototabang, data from *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), dan dari hasil pemodelan dengan *Weather Research and Forecasting-Chemistry* (WRF-Chem). Sehingga, wilayah Sumatra Barat menjadi fokus lokasi penelitian dan waktu yang digunakan selama HTH dan HLTB. Oleh karena itu, informasi terkait PM_{2.5} sangat penting untuk mengetahui informasi terkait kualitas udara agar dalam kondisi nyaman dan aman saat berada di luar ruangan.

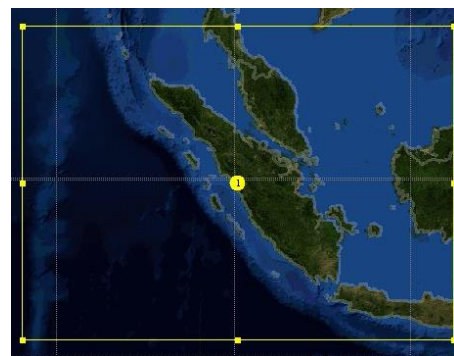
Salah satu cara untuk mengetahui kualitas udara dapat menggunakan model *Weather Research and Forecasting – Chemistry* (WRF-Chem). WRF-Chem dapat digunakan untuk mensimulasikan kondisi atmosfer saat terjadi kebakaran hutan, gunung meletus, tingkat polusi udara yang tinggi, dan dapat dikaitkan dengan faktor-faktor meteorologi [5-7]. Penggunaan WRF-Chem telah dilakukan untuk simulasi dan prediksi terkait parameter kualitas udara seperti PM_{2.5} disuatu wilayah [8]. Simulasi PM_{2.5} menggunakan Model WRF-Chem telah dilakukan di Jakarta saat kondisi polusi udara yang tinggi dan menghasilkan nilai korelasi 0.27 saat divalidasi dengan data observasi. [9].

Pemodelan sebaran PM_{2.5} juga telah dilakukan di Jakarta dengan model WRF-Chem untuk mengkaji hasil keakuratan model saat periode polusi udara tinggi yang hasilnya cukup memuaskan saat divalidasi dengan data observasi [10]. Penelitian tentang simulasi konsentrasi PM_{2.5} dengan WRF-Chem di Sumatera Barat belum pernah dilakukan, Oleh karena itu perlu dilakukan simulasi perbandingan sebaran PM_{2.5} di Sumatera Barat saat Hari Tanpa Hujan (HTH) dan Hari Libur Tahun Baru (HLTB) dengan model WRF-Chem untuk mengetahui kondisi kualitas udara sebagai upaya preventif jika terjadi dampak negatif akibat kualitas udara yang buruk.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini akan menggunakan Final Data Analysis (FNL) dari National Centers for Environmental Prediction (NCEP) sebagai masukan untuk proses model. Resolusi data FNL 0.25° x 0.25°. Kemudian, akan menggunakan data observasi PM_{2.5} dari Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang pada tanggal 13 Juni 2022 (HTH) dan 1 Januari 2023 (HLTB) dengan skala waktu tiap jam sebagai data validasi hasil model luaran WRF-Chem.

Lokasi penelitian yaitu di wilayah Provinsi Sumatra Barat dengan letak geografis 0° 54' LU and 3° 30' LS serta 98° 36' 05" dan 101° 53' Bujur Timur. Titik Lokasi Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang yang digunakan untuk validasi hasil luaran model berada pada koordinat -1° 47' 51.41" LS dan 100° 19' 38.45" BT.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pada penerapannya, model WRF-Chem harus menggunakan masukan konfigurasi parameterisasi untuk menghasilkan model yang akurat saat prediksi maupun simulasi. Berikut ini Konfigurasi Parameterisasi yang digunakan untuk simulasi disperse PM_{2.5} di Sumatera Barat yang ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi Parameterisasi

No	Fase Gas	Konfigurasi Parameterisasi
1	Shortwave Radiation	RRTMG
2	Longwave Radiation	RRTMG
3	Land-Surface	Noah-LSM
4	Microphysics	Morrison
5	Cumulus	New Grell
6	Parameterization	
7	Aerosol Mechanism	MADE/SORGAM
	Gas Phase	GOCART
	Chemistry	
	Planetary Boundary Layer	YSU

Penelitian ini menggunakan model *Weather Research and Forecasting – Chemistry* (WRF-Chem) untuk dilakukan simulasi saat kondisi HTH dan HLTB. Post processing data luaran model menggunakan GrADS. Kemudian, data hasil luaran model akan divalidasi menggunakan metode Korelasi Pearson, *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Mean Absolute Error* (MAE), yang perhitungannya sebagai berikut.

$$r_{xy} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (1)$$

Dimana, r_{xy} = Korelasi Pearson, x = PM_{2.5} luaran WRF-Chem, y = PM_{2.5} data observasi dari GAW Bukit Kototabang Station, n = Jumlah data. Korelasi pearson mampu melihat keeratan hubungan dari dua variabel [11]. Nilai korelasi pearson berkisar antara -1 hingga +1 dengan nilai yang mendekati 1 berarti semakin kuat dan 0 berarti tidak memiliki hubungan [12].

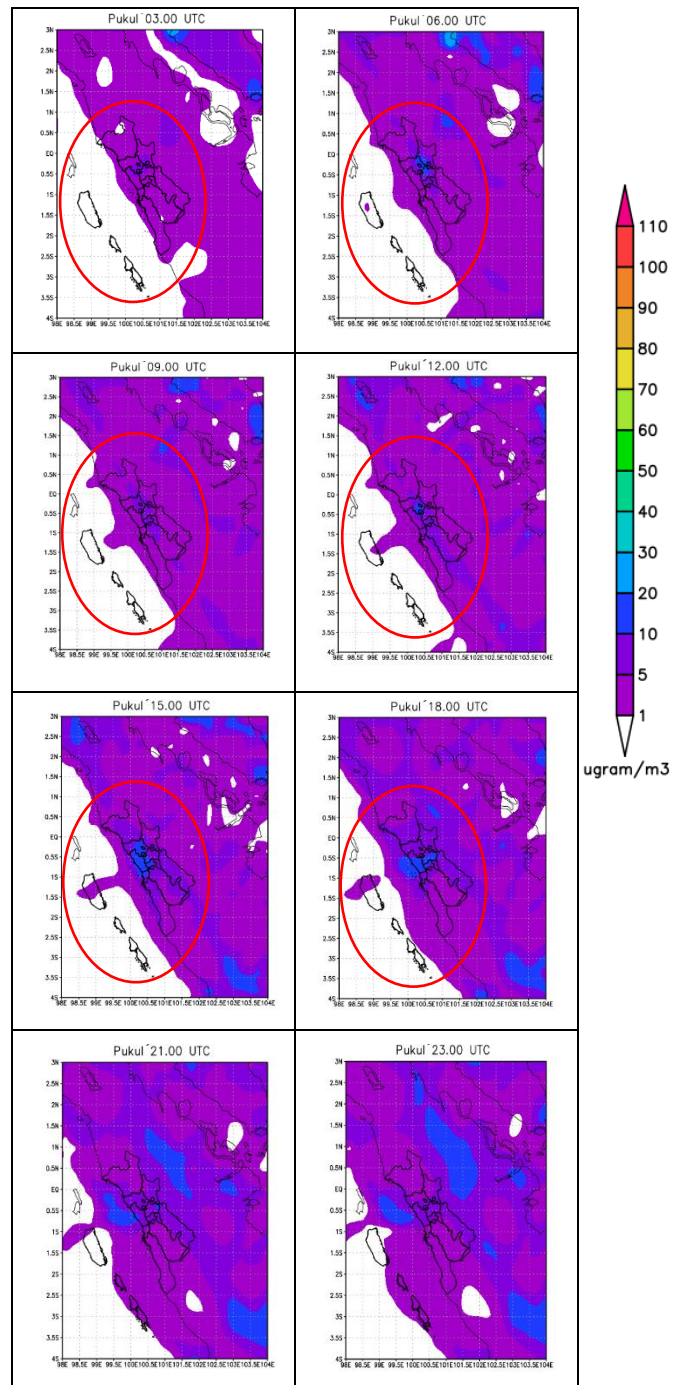
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x - y| \quad (2)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y)^2 \quad (3)$$

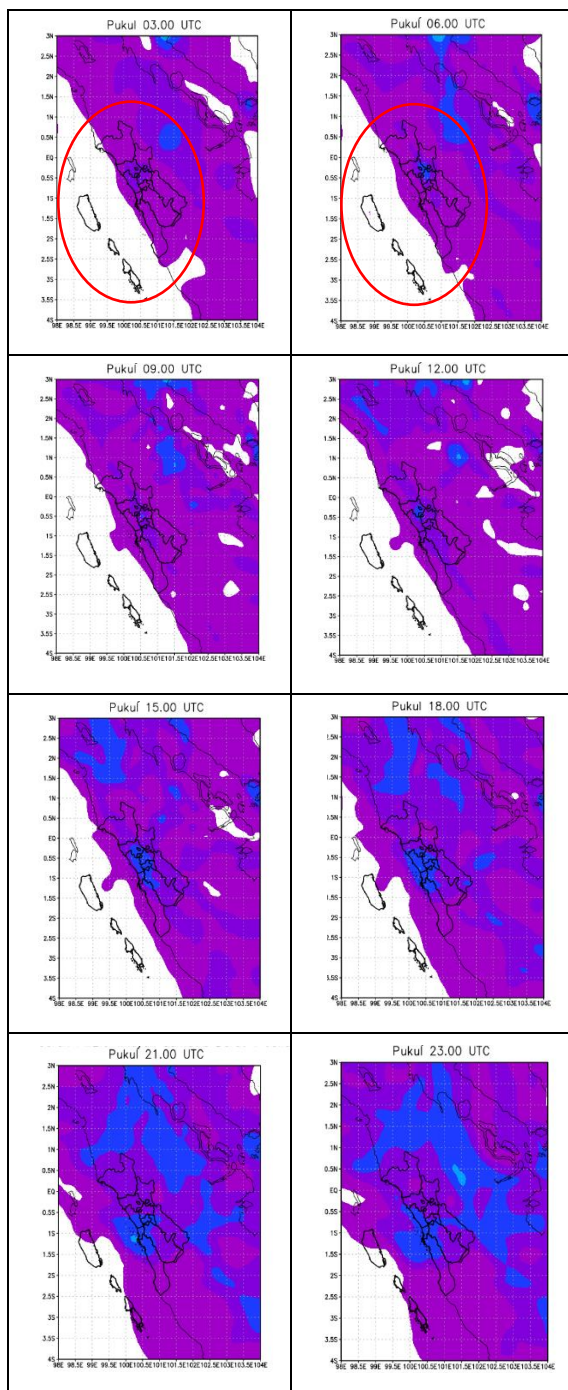
Mean Absolute Error (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) yang keduanya dapat digunakan untuk mengetahui jumlah error yang terjadi pada data model [3]. MAE menghitung seluruh error dengan memberikan bobot yang sama pada semua nilai dan nilainya lebih kecil, sedangkan untuk RMSE memberikan nilai pada error yang lebih besar [13]. Rumus perhitungan untuk MAE dan RMSE sebagai berikut dengan nilai x dan y didefinisikan sama pada keterangan simbol di korelasi pearson.

3. Hasil dan Pembahasan

HTH (13 Juni 2022)



Gambar 2. Simulasi Sebaran PM_{2.5} (Pukul 03.00 UTC – 23.00 UTC) saat HTH hasil luaran model WRF-Chem (sumber : data FNL NCEP)

HLTB (1 Januari 2023)

Gambar 3. Simulasi sebaran $PM_{2.5}$ (Pukul 03.00 UTC – 23.00 UTC) saat HLTB hasil luaran model WRF-Chem (sumber : data FNL NCEP)

Simulasi sebaran $PM_{2.5}$ luaran WRF-Chem pada tanggal 13 Juni 2022 (HTH) direpresentasikan pada Gambar 2. Pada pukul 03.00 UTC, konsentrasi $PM_{2.5}$ di wilayah Sumatera Barat memiliki rentang berkisar antara 1 – 30 $\mu g/m^3$. Rentang konsentrasi $PM_{2.5}$ tertinggi pada 06.00 UTC, berada pada bagian tengah wilayah Sumatera Barat. Setelah 3 jam, rentang konsentrasi di wilayah tersebut

mengalami kenaikan dengan kisaran rentangnya sebesar 20 – 30 $\mu g/m^3$. Pada pukul 12.00 UTC konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan rentang sebesar 20 – 30 $\mu g/m^3$, muncul Kembali di bagian tengah wilayah Sumatera Barat setelah sebelumnya hilang. Rentang konsentrasi tersebut, semakin melebar ke wilayah lainnya dan bergerak ke arah barat daya hingga pukul 23.00 UTC. Konsentrasi $PM_{2.5}$ yang bernilai 20 – 30 $\mu g/m^3$ cenderung terjadi di wilayah pusat Sumatera Barat, seperti Kota Padang, Bukittinggi, Agam, Solok, dan Tanah Datar.

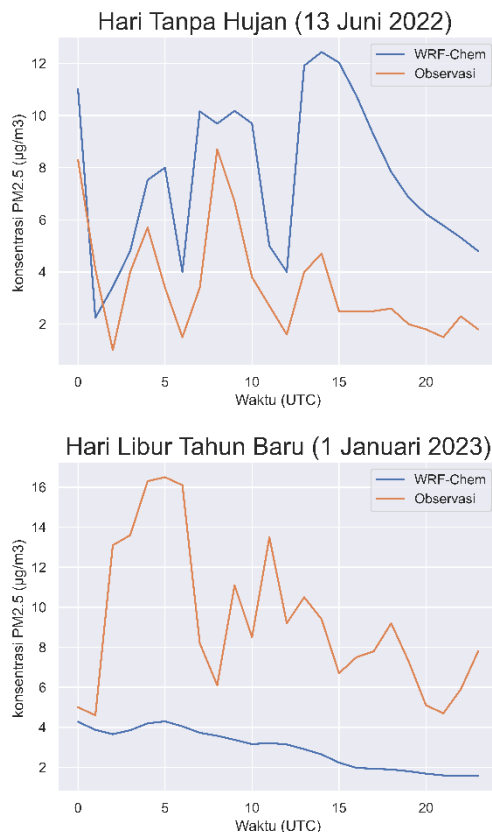
Hasil simulasi $PM_{2.5}$ luaran WRF-Chem pada tanggal 1 Januari 2023 (HLTB) ditunjukkan oleh Gambar 3. Pada pukul 03.00 UTC konsentrasi $PM_{2.5}$ memiliki rentang nilai 1 – 20 $\mu g/m^3$. Sebaran konsentrasi $PM_{2.5}$ yang cukup tinggi (20 – 30 $\mu g/m^3$) di siang hari (06.00 UTC dan turun di sore hari (09.00 UTC – 12.00 UTC). Tidak berbeda jauh dengan kondisi HTH, konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan nilai 20 – 30 $\mu g/m^3$ mulai menyebar dari sore hingga malam hari dan sampai menjelang pagi hari (15.00 UTC – 23.00 UTC). Cakupan wilayah dengan konsentrasi tersebut masih berada di sekitar Kota Padang, Bukittinggi, Agam, Solok, dan Tanah Datar.

Konsentrasi yang cukup tinggi mulai muncul pada siang hari karena volume kendaraan dan aktivitas penduduk yang padat pada waktu tersebut [14, 15]. Selain itu juga, pada saat siang hari matahari cenderung lebih banyak memancarkan sinarnya, sehingga reaksi kimia yang terjadi di atmosfer lebih cepat dalam membantu akumulasi konsentrasi $PM_{2.5}$ [16]. Hal tersebut menyebabkan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang cukup tinggi tidak terlalu menyebar dan hanya berfokus di wilayah sumber $PM_{2.5}$. Namun, pada sore hingga malam hari menjelang pagi hari, polutan $PM_{2.5}$ dengan konsentrasi cukup tinggi cenderung terlihat banyak yang menyebar [17].

Pada pagi hingga siang hari, kondisi atmosfer tidak stabil, sehingga terjadi penghilangan polutan dan massa udara di permukaan. Sedangkan pada malam hari, kondisi atmosfer cenderung stabil dan terjadi penurunan massa udara seiring dengan polutan ke permukaan sehingga polutan $PM_{2.5}$ pada malam hari lebih menyebar di permukaan daripada di pagi dan siang hari [18].

Perbandingan hasil simulasi luaran model WRF-Chem berdasarkan Gambar 2 (HTH) dan Gambar 3 (HLTB) memiliki hasil yang tidak jauh berbeda. Namun, terlihat konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan rentang nilai 20 – 30 $\mu g/m^3$ lebih dominan terjadi di HLTB. Hal ini disebabkan oleh jumlah penduduk yang lebih banyak beraktivitas di luar ruangan dan berada di wilayah Sumatera Barat karena bertepatan dengan hari libur. Sehingga, menghasilkan polutan $PM_{2.5}$ yang lebih banyak dari biasanya.

Perbandingan Konsentrasi PM_{2.5} hasil Luaran Model WRF-Chem dan Observasi dari Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang



Gambar 4. Grafik nilai PM_{2.5} hasil luaran model WRF-Chem dengan data observasi pada tanggal 13 Juni 2022 (Atas) dan Tanggal 1 Januari 2023 (Bawah)

Grafik konsentrasi PM_{2.5} saat HTH (13 Juni 2022) hasil luaran model WRF-Chem dan data observasi memiliki pola yang sama yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Namun, nilai luaran model *overestimated* dari data observasi. Nilai Konsentrasi PM_{2.5} tertinggi dari hasil luaran model WRF-Chem terjadi pada pukul 14.00 UTC sebesar 12,4 µg/m³. Kemudian, untuk nilai konsentrasi PM_{2.5} tertinggi dari data observasi sebesar 8,7 µg/m³ yang terjadi pada pukul 08.00 UTC.

Nilai minimum konsentrasi PM_{2.5} luaran WRF-Chem sebesar 2,2 µg/m³ terjadi dipukul 01.00 UTC, dan untuk data observasi terjadi di pukul 02.00 UTC sebesar 1,0 µg/m³. Rata-rata nilai Konsentrasi PM_{2.5} selama HTH dari data observasi sebesar 3,5 µg/m³ dan dari luaran WRF-Chem sebesar 7,6 µg/m³.

Perbandingan data konsentrasi PM_{2.5} saat HLTB dari luaran WRF-Chem hasilnya *underestimated* dari data observasi. Secara umum, grafik Nilai konsentrasi PM_{2.5} dari luaran WRF-Chem dan data observasi tidak memiliki

pola yang sama. Nilai rata-rata konsentrasi PM_{2.5} dari data observasi 9,3 µg/m³ dan konsentrasi PM_{2.5} dari luaran WRF-Chem 2,9 µg/m³.

Nilai konsentrasi PM_{2.5} tertinggi dari data observasi sebesar 16,2 µg/m³ yang terjadi pada pukul 05.00 UTC dan minimum terjadi pada pukul 01.00 UTC sebesar 4,6 µg/m³. Konsentrasi PM_{2.5} luaran WRF-Chem yang tertinggi terjadi pada pukul 05.00 UTC sebesar 4,3 µg/m³ dan minimumnya 1,6 µg/m³ yang terjadi pada pukul 23.00 UTC.

Hasil Validasi Model WRF-Chem dengan Data Observasi Stasiun

Tabel 2. Hasil Validasi Model dengan data Observasi

No	Indikator	Hari Tanpa Hujan (HTH) 13 Juni 2022	Hari Libur Tahun Baru 1 Januari 2023
1	r	0.48	0.56
2	RMSE	4.09	10.02
3	MAE	1.19	6.40

Hasil validasi model PM_{2.5} luaran WRF-Chem menggunakan data observasi dari Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang ditunjukkan oleh Tabel 2. Hasil korelasi saat HTH dan HLTB memiliki hubungan yang cukup kuat dengan data hasil observasi. Namun, nilai korelasi saat HLTB lebih tinggi dibandingkan dengan HTH.

Nilai RMSE saat HLTB lebih tinggi dibandingkan dengan saat HTH. Begitu juga yang terjadi pada nilai MAE. Nilai eror yang cukup tinggi bisa saja disebabkan oleh penggunaan konfigurasi parameterisasi yang belum sepenuhnya tepat dengan kondisi di wilayah Sumatera Barat saat pengerjaan model. Selain itu, validasi hanya menggunakan satu titik untuk mewakili seluruh wilayah Sumatera Barat.

4. Kesimpulan

Hasil simulasi PM_{2.5} dengan menggunakan WRF-Chem di wilayah Sumatera Barat menunjukkan adanya pola sebaran yang hampir sama, baik pada HTH maupun HLTB. Konsentrasi PM_{2.5} pada siang hari memiliki konsentrasi yang tinggi pada wilayah yang menjadi sumber penghasil PM_{2.5} seperti Padang, Bukittinggi, Agam, Solok, dan Tanah Datar. Sementara itu, pada sore hingga malam hari menjelang pagi, konsentrasi tersebut cenderung menyebar ke wilayah lain. Konsentrasi PM_{2.5} dengan rentang 20 – 30 µg/m³ yang tergolong cukup tinggi lebih dominan terjadi pada HLTB. Hasil luaran model WRF-Chem juga di validasi dengan data observasi

yang dihasilkan oleh Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang pada kedua waktu tersebut masih pada kategori aman berdasarkan BMUN dan menghasilkan nilai r sebesar 0,48 (HTH) dan 0,56 (HLTB) yang menunjukkan jika performa kedua model terhadap data observasi memiliki hubungan yang cukup kuat.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada teman-teman penulis yang telah membantu menyelesaikan tulisan ini. Kemudian, ucapan terimakasih kepada NCEP sebagai penyedia data FNL dan Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang sebagai penyedia data observasi PM_{2.5}.

Daftar Pustaka

- [1] WMO (World Meteorological Organization). (2021a). *Ambient (outdoor) air pollution*. (Diakses dari www.who.int pada tanggal 16 November 2022).
- [2] Xie, Y., Dai, H., Dong, H., Hanaoka, T., & Masui, T. (2016). Economic impacts from PM_{2.5} pollution-related health effects in China: a provincial-level analysis. *Environmental Science Technology*, 50(9), 4836-4843.
- [3] WMO (World Meteorological Organization). (2021b). *Increasing risk of "climate penalty" from pollution and climate change*. (Diakses dari www.public.wmo.int pada tanggal 15 Januari 2023).
- [4] Zheng, M., Salmon, L. G., Schauer, J. J., Zeng, L., Kiang, C., Zhang, Y., & Cass, G. R. (2005). Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 39(22), 3967-3976.
- [5] Nuryanto, D. E. (2015). Simulation of forest fires smoke using WRF-Chem model with FINN fire emissions in Sumatera. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 65-69.
- [6] Hirtl, M., Scherllin-Pirscher, B., Stuefer, M., Arnold, D., Baro, R., Maurer, C., & Mulder, M. D. (2020). Extension of the WRF-Chem volcanic emission preprocessor to integrate complex source terms and evaluation for different emission scenarios of the Grimsvötn 2011 eruption. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 20(11), 3099-3115.
- [7] Fang, Z., Wu, P.-Y., Lin, Y.-N., Chang, T.-H., & Chiu, Y.-h. (2021). Air Pollution's Impact on the Economic, Social, Medical, and Industrial Injury Environments in China. *Paper presented at the Healthcare*.
- [8] Choi, M.-W., Lee, J.-H., Woo, J.-W., Kim, C.-H., & Lee, S.-H. (2019). Comparison of PM_{2.5} chemical components over East Asia simulated by the WRF-Chem and WRF/CMAQ models: on the models' prediction inconsistency. *Atmosphere*, 10(10), 618.
- [9] Virgianto, R. H., Rivaniputra, R., Kinanti, N. P., Saputra, A. H., & Khoir, A. N. J. I. J. A. A. S. (2022). A numerical simulation of PM_{2.5} concentration using the WRF-Chem model during a high air pollution episode in 2019 in Jakarta, Indonesia. *International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)*, 11(4), 335-344.
- [10] Fatma, M. A. (2023). Kajian Dispersi Polutan PM_{2.5} di Jakarta Menggunakan Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem). *Respositori*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [11] Sadik, K., (1995). Analisis Korelasi dan Regresi.
- [12] Nugroho, S., Akbar, S., & Vusvitasari, R. (2008). Kajian Hubungan Koefisien Korelasi Pearson (r), Spearman-rho (ρ), Kendall-Tau (τ), Gamma (G), dan Somers. *Jurnal Ilmiah MIPA*, 4(2), 372-381.
- [13] Chai, T., Carmichael, G. R., Tang, Y., Sandu, A., Heckel, A., Richter, A., & Burrows, J. P. (2009). Regional NO_x emission inversion through a four-dimensional variational approach using SCIAMACHY tropospheric NO₂ column observations. *Atmospheric Environment*, 43(32), 5046-5055.
- [14] Li, C., & Managi, S. (2021). Contribution of on-road transportation to PM_{2.5}. *Scientific reports*, 11(1), 21320.
- [15] McCormack, M. C., Breyse, P. N., Hansel, N. N., Matsui, E. C., Tonorezos, E. S., Curtin-Brosnan, J., Diette, G. B. (2008). Common household activities are associated with elevated particulate matter concentrations in bedrooms of inner-city Baltimore pre-school children. *Environmental research*, 106(2), 148-155.
- [16] Chen, J., Shen, H., Li, T., Peng, X., Cheng, H., & Ma, C. (2019). Temporal and spatial features of the correlation between PM_{2.5} and O₃ concentrations in China. *International Journal of Environmental Research Public Health*, 16(23), 4824.
- [17] Chen, J., Yu, X., Sun, F., Lun, X., Fu, Y., Jia, G., . . . Bi, H. (2015). The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) at shelterbelt site in Beijing. *Atmosphere*, 6(5), 650-676.
- [18] Musthafa, M., Turyanti, A., & Nuryanto, D. (2019). Sensitivity of Planetary Boundary Layer Scheme in WRF-Chem Model for Predicting PM₁₀ Concentration (Case study: Jakarta). *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.