

# Validasi Data Model WRF-CHEM dan Data Observasi AQMS Kualitas Udara Kota Manado

Eka Wardhani<sup>1,2</sup>, Firman Apriana Prawira<sup>1\*</sup>, Yulianti Pratama<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Kolaborasi Riset Daya Dukung Lingkungan Berkelanjutan (PKR-DDLB)

BRIN-Institut Teknologi Nasional, Bandung

\*Koresponden email: firmanfirman155@gmail.com

Diterima: 6 Juli 2026

Disetujui: 31 Juli 2026

## Abstract

Air pollution is a complex environmental issue influenced by anthropogenic activities and meteorological conditions. This study aims to evaluate the reliability and accuracy of the Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem) integrated weather-chemistry model in simulating ozone ( $O_3$ ) and particulate matter ( $PM_{2.5}$ ) pollutants in the city of Manado. The evaluation was conducted by validating the simulation outputs against automatic and continuous observational data from the Air Quality Monitoring System (AQMS) on May 2-3, 2022. Based on standard statistical guidelines,  $O_3$  parameters were assessed using Unpaired Peak Accuracy (UPA), Mean Normalized Bias Error (MNBE), and Mean Normalized Gross Error (MNGE), while  $PM_{2.5}$  was assessed using Mean Fractional Bias (MFB) and Mean Fractional Error (MFE). The analysis results showed that the diurnal peak concentration of  $O_3$  reached  $74 \mu g/m^3$  and  $PM_{2.5}$  surged to  $92 \mu g/m^3$  during the afternoon rush hour. Statistically, the WRF-Chem model was deemed valid for projecting the  $O_3$  parameter (UPA 1.52%; MNBE -0.16%; MNGE 17.34%). Conversely, the model was deemed invalid for  $PM_{2.5}$  (MFB -111.96%; MFE 111.96%) due to severe underestimation resulting from its reliance on global emission inventories. This study provides important information regarding the model's performance for the formulation of air pollution control policies in the city of Manado.

**Keywords:** AQMS, manado,  $PM_{2.5}$ , statistical validation, WRF-Chem

## Abstrak

Pencemaran udara merupakan permasalahan lingkungan kompleks yang dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik dan kondisi meteorologi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan serta akurasi model cuaca-kimia terintegrasi *Weather Research and Forecasting with Chemistry* (WRF-Chem) dalam mensimulasikan polutan Ozon ( $O_3$ ) dan *Particulate Matter* ( $PM_{2.5}$ ) di Kota Manado. Evaluasi dilakukan dengan memvalidasi luaran simulasi terhadap data observasi otomatis dan kontinyu dari *Air Quality Monitoring System* (AQMS) pada 2-3 Mei 2022. Berdasarkan panduan standar statistik, parameter  $O_3$  diuji menggunakan *Unpaired Peak Accuracy* (UPA), *Mean Normalized Bias Error* (MNBE), dan *Mean Normalized Gross Error* (MNGE), sedangkan  $PM_{2.5}$  diuji melalui *Mean Fractional Bias* (MFB) dan *Mean Fractional Error* (MFE). Hasil analisis menunjukkan konsentrasi puncak diurnal  $O_3$  mencapai  $74 \mu g/m^3$  dan  $PM_{2.5}$  melonjak hingga  $92 \mu g/m^3$  pada jam sibuk sore hari. Secara statistik, model WRF-Chem dinyatakan valid untuk memproyeksikan parameter  $O_3$  (UPA 1,52%; MNBE -0,16%; MNGE 17,34%). Sebaliknya, model dinyatakan tidak valid untuk  $PM_{2.5}$  (MFB-111,96%; MFE 111,96%) karena mengalami gejala *underestimate* parah akibat ketergantungan pada inventarisasi emisi global. Penelitian ini memberikan informasi penting mengenai performa model guna penyusunan kebijakan pengendalian pencemaran udara di Kota Manado.

**Kata Kunci:** AQMS, manado,  $PM_{2.5}$ , validasi statistik, WRF-Chem

## 1. Pendahuluan

Pencemaran udara menjadi masalah lingkungan yang dapat menurunkan kesehatan manusia dan kualitas lingkungan. Kadar polutan di atmosfer dipengaruhi oleh aktivitas manusia, kondisi meteorologi, serta karakteristik topografi wilayah. Pemantauan kualitas udara menjadi aspek penting dalam mendukung pengelolaan lingkungan serta penyusunan kebijakan pengendalian pencemaran udara [1].

Pemodelan kualitas udara menerapkan *Weather Research and Forecasting with Chemistry* (WRF-Chem) telah banyak dimanfaatkan untuk mensimulasikan distribusi konsentrasi polutan secara spasial dan temporal. Model ini mengintegrasikan proses meteorologi dan kimia atmosfer sehingga mampu menggambarkan transportasi, pencampuran, serta transformasi polutan di atmosfer. Meskipun demikian,

hasil simulasi model perlu divalidasi menggunakan data observasi agar tingkat akurasi dan keandalannya dapat diketahui sebelum digunakan sebagai dasar analisis kualitas udara [2].

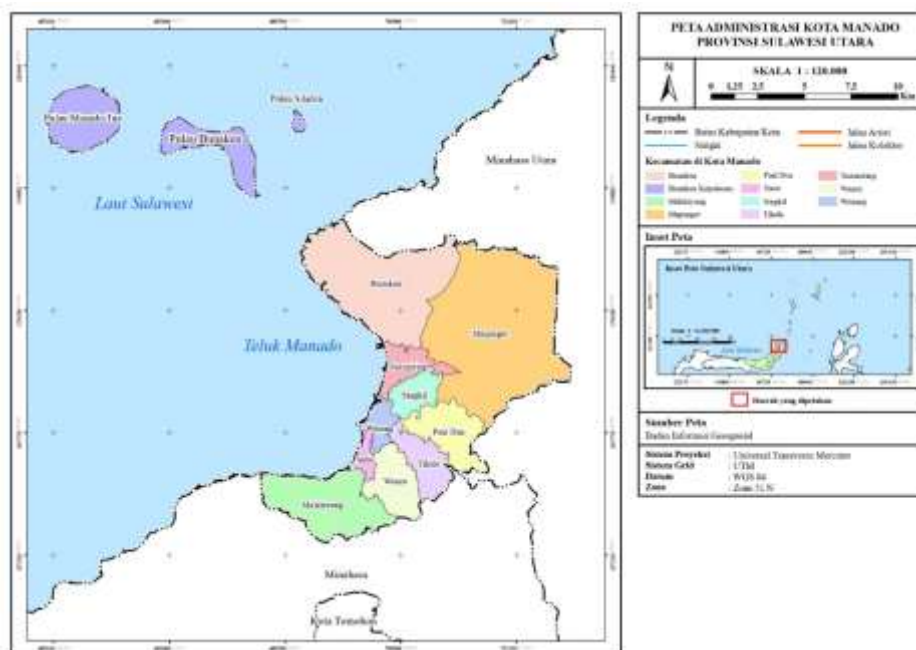
Validasi model kualitas udara umumnya dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data observasi yang diperoleh melalui *Air Quality Monitoring System* (AQMS). AQMS menyediakan data kualitas udara secara otomatis, berkelanjutan, dan *real-time* sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi performa model dalam merepresentasikan kondisi atmosfer yang sebenarnya [3]. Pada penelitian ini, validasi dilakukan terhadap parameter  $O_3$  dan *Particulate Matter* ( $PM_{2.5}$ ) menggunakan data observasi AQMS di Kota Manado.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kesesuaian hasil simulasi WRF-Chem terhadap data observasi AQMS menggunakan parameter statistik *Unpaired Peak Accuracy* (UPA), *Mean Normalized Gross Error* (MNGE), dan *Mean Normalized Bias Error* (MNBE) untuk  $O_3$ , serta *Mean Fractional Bias* (MFB) dan *Mean Fractional Error* (MFE) untuk  $PM_{2.5}$  [4]. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai performa model WRF-Chem untuk menggambarkan kualitas udara di Kota Manado.

## 2. Metode Penelitian

### Geografi Kota Manado

Kota Manado atau dikenal juga sebagai Manado merupakan ibu kota Provinsi Sulawesi Utara sekaligus kota terbesar di wilayah tersebut. Luasnya mencapai 15.726 Ha yang mencakup kawasan daratan dan kepulauan, termasuk Pulau Bunaken, Manado Tua, dan Siladen. Secara geografis, wilayah ini berada di ujung utara Pulau Sulawesi pada koordinat 10 25' 88"-10 39' 50" LU dan 124 04' 00"-124 06' 00" BT. Secara administratif, Manado terbagi menjadi 11 kecamatan dan 87 kelurahan berdasarkan pemekaran yang diatur melalui Peraturan Daerah Nomor 4 Tanggal 27 September Tahun 2000 tentang Perubahan Status Desa menjadi Kelurahan di Kota Manado dan Peraturan Daerah Nomor 5 tanggal 27 September Tahun 2000 tentang Pemekaran Kecamatan dan Kelurahan. Kecamatan Mapanget memiliki wilayah terluas sebesar 6.168,3 Ha, sedangkan Kecamatan Sario menjadi yang terkecil dengan luas 183,70 Ha [5].



**Gambar 1.** Peta Administrasi Kecamatan Pangalengan  
Sumber: Geospasial, 2026 dan Hasil Analisis, 2026

### Data AQMS & WRF-CHEM

Data sekunder penelitian meliputi data kualitas udara dari AQMS, yaitu sistem yang mengukur konsentrasi senyawa tertentu di udara dengan parameter  $O_3$  dan  $PM_{2.5}$ . Data WRF-CHEM diperoleh dari hasil simulasi pemodelan selama dua hari, yaitu 02–03 Mei 2022.

### Metode Statistik Evaluasi Model $O_3$

MNGE diterapkan untuk menilai kinerja model  $O_3$  dengan memperhitungkan nilai *cutoff* (minimum) pada ambang pengamatan, misalnya 60 ppb [2]. MNGE ditunjukkan pada Persamaan 1:

$$MNGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|Mi - Oi|}{Oi} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan:

N = Jumlah Data

M = Data Peramalan/WRF-Chem

O = Data Observasi

MNBE digunakan untuk mengukur kecenderungan bias pada hasil model O<sub>3</sub> dan memperhatikan nilai *cutoff (minimum)* dari ambang pengamatan, misalnya 60 ppb [2]. Rumus MNBE disajikan pada Persamaan 2:

$$NMBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{Mi - Oi}{Oi} \quad (2)$$

Keterangan:

N = Jumlah Data

M = Data Peramalan/WRF-Chem

O = Data Observasi

UPA mengukur ketepatan prediksi puncak tidak berpasangan untuk mengkaji episode O<sub>3</sub> historis melalui model kisi fotokimia [4]. Perhitungan UPA menggunakan Persamaan 3:

$$UPA = \frac{Mmax - Omax}{Omax} \times 100 \quad (3)$$

Keterangan:

Mmax = Data max Peramalan/WRF-Chem

Omax = Data max Observasi

### Metode Statistik Evaluasi Model PM<sub>2.5</sub>

MFB pada Persamaan 4 dan MFE pada Persamaan 5 menilai bias serta error setiap pasangan model dan observasi berdasarkan nilai rata-ratanya sebelum dihitung secara keseluruhan. MFB memiliki rentang -200% hingga +200%, sedangkan MFE berada pada 0% hingga +200%. Batas tersebut mencegah beberapa data memberi pengaruh terlalu besar terhadap hasil evaluasi. Kedua metrik juga tidak menempatkan observasi sebagai kebenaran mutlak dan bersifat simetris, sehingga hasil simulasi yang lebih tinggi maupun lebih rendah dari pengamatan memperoleh bobot relatif yang setara. [6].

$$MFB = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(Mi - Oi)}{(Mi + Oi)} \right) \quad (4)$$

$$MFE = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Mi - Oi)}{(Mi + Oi)} \right| \quad (5)$$

Keterangan:

N = Jumlah Data

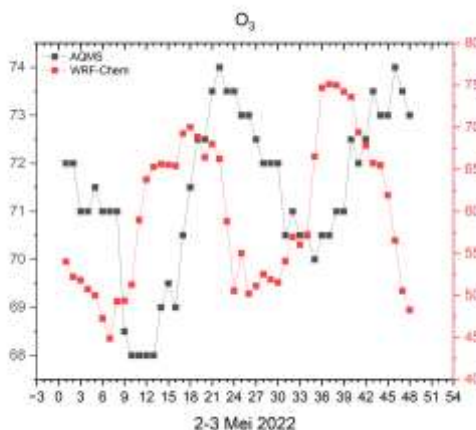
M = Data Peramalan/WRF-Chem

O = Data Observasi

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Karakteristik Pola Diurnal Parameter O<sub>3</sub>

Analisis mengenai variasi konsentrasi O<sub>3</sub> per jam menjadi penting untuk memahami interaksi antara senyawa prekursor dan dinamika atmosfer permukaan [7]. Dinamika naik-turunnya konsentrasi O<sub>3</sub> ini dipantau secara kontinu selama 48 jam untuk melihat konsistensi kurva antara prediksi model dan kondisi di lapangan [8]. Fluktuasi rata-rata harian dari hasil simulasi model WRF-Chem dan rekaman data stasiun AQMS diperbandingkan secara visual melalui kurva diurnal pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Grafik Pola Diurnal Perbandingan O<sub>3</sub> Keluaran Model WRF-Chem dan Observasi AQMS  
Sumber: Hasil Analisis 2026

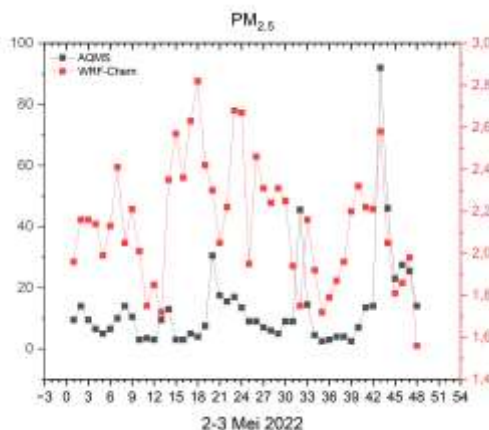
Berdasarkan Kurva diurnal pada **Gambar 2** memperlihatkan bahwa pola fluktuasi O<sub>3</sub> hasil simulasi model WRF-Chem memiliki keselarasan tren yang baik dengan data aktual AQMS, meskipun secara kuantitatif nilai observasi di lapangan tercatat 1 kali lebih besar dibandingkan luaran model. Berdasarkan data temporal, konsentrasi puncak O<sub>3</sub> permukaan tertinggi menyentuh angka 74 µg/m<sup>3</sup> yang terjadi pada pukul 21.00 WITA pada kedua hari pengamatan. Fenomena kemunculan nilai maksimum di malam hari ini dipengaruhi oleh tingginya intensitas radiasi matahari dan pengaruh perubahan sudut datang matahari (*zenith angle*) pada siang hari selama masa peralihan musim (*pancaroba*). Paparan radiasi matahari yang kuat di siang hari memperpanjang waktu paruh gas NO<sub>2</sub> untuk mengalami fotolisis menjadi NO dan atom oksigen radikal, yang kemudian berikatan dengan O<sub>2</sub> membentuk O<sub>3</sub> sekunder. Karena minimnya emisi gas pereduksi (NO<sub>x</sub>) pada sore hari di sekitar lokasi stasiun, konsentrasi O<sub>3</sub> terakumulasi secara maksimal dan baru mencapai puncaknya di permukaan menjelang malam hari [9]. Sementara itu, konsentrasi O<sub>3</sub> terendah yaitu 68 µg/m<sup>3</sup> yang terjadi pada pukul 09.00 WITA akibat minimnya intensitas matahari pagi dikombinasikan dengan proses *scavenging* (titrasi O<sub>3</sub>) oleh emisi kendaraan pagi hari [10].

### Karakteristik Pola Diurnal Parameter PM<sub>2.5</sub>

Pemantauan terhadap parameter partikulat halus (PM<sub>2.5</sub>) difokuskan untuk mengidentifikasi korelasi antara dinamika meteorologi lokal Kota Manado dengan puncak aktivitas antropogenik penghasil emisi partikel tunggal. Berbeda dengan polutan gas, sebaran partikulat sangat sensitif terhadap sirkulasi mekanis udara permukaan. Perbandingan visual yang memperlihatkan kesenjangan (*gap*) fluktuasi konsentrasi partikulat per jam antara hasil pemodelan WRF-Chem dan stasiun AQMS disajikan melalui grafik diurnal pada **Gambar 3**.

Berdasarkan **Gambar 3** menunjukkan deviasi kuantitatif yang sangat lebar, di mana profil data observasi dari stasiun AQMS bernilai hingga 6 kali lebih besar daripada tren garis model WRF-Chem yang cenderung datar (*flat*). Berdasarkan rata-rata pengamatan 1 jam, lonjakan polusi partikulat yang ekstrem terdeteksi pada malam hari, di mana konsentrasi tertinggi pada tanggal 2 Mei pukul 19.00 WITA mencapai 30.5 µg/m<sup>3</sup> dan melonjak tajam pada tanggal 3 Mei pukul 18.00 WITA hingga mencapai 92 µg/m<sup>3</sup>. Pemicu utama dari pola grafik ini adalah tingginya densitas emisi transportasi dari kendaraan bermotor pada jam sibuk (*rush hour*) masyarakat saat pulang kerja, didukung suplai partikulat dari proses pembakaran domestik. Faktor antropogenik ini diperparah oleh kondisi meteorologi lokal Kota Manado pada sore menjelang malam hari, terjadi penurunan kecepatan angin permukaan (di mana rata-rata angin berkisar rendah antara 1,40-1,94 knots) yang diikuti oleh penyusutan lapisan batas atmosfer.

Akibatnya, dispersi polutan secara horizontal terhambat dan massa partikulat PM<sub>2.5</sub> terjebak menumpuk di dekat permukaan tanah [11]. Sebaliknya, konsentrasi minimum stabil berada pada pukul 10.00 WITA karena meningkatnya efek turbulensi termal siang hari yang membantu mengencerkan konsentrasi partikulat ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi [12].



**Gambar 3.** Grafik Pola Diurnal Perbandingan  $PM_{2.5}$  Keluaran Model WRF-Chem dan Observasi AQMS  
Sumber: Hasil Analisis 2026

### Analisis Validasi Statistik Model WRF-Chem

Evaluasi performa akurasi model dilakukan secara kuantitatif melalui uji statistik matematis. Pengujian ini berfungsi sebagai pembuktian ilmiah untuk mengukur sejauh mana model WRF-Chem mampu mendekati data observasi di lapangan. Parameter gas  $O_3$  diuji menggunakan metode UPA, MNBE, dan MNGE, sementara parameter partikulat halus ( $PM_{2.5}$ ) dievaluasi melalui pendekatan fraksional MFB dan MFE. Rekapitulasi metode evaluasi statistik tersaji pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Rekapitulasi Model Evaluasi Statistik

| No | Parameter  | Metode Statistik | Kriteria                                       | Hasil    | Keterangan              |
|----|------------|------------------|------------------------------------------------|----------|-------------------------|
| 1  | $O_3$      | UPA              | $\leq 25\%$                                    | 1,52%    | Memenuhi Kriteria       |
|    |            | MNBE             | $\leq 15\%$                                    | -0,16%   | Memenuhi Kriteria       |
|    |            | MNGE             | $\leq 35\%$                                    | 17,34%   | Memenuhi Kriteria       |
| 2  | $PM_{2.5}$ | MFB              | Goal = $\leq +30\%$<br>Kriteria = $\leq +60\%$ | -111,96% | Tidak Memenuhi Kriteria |
|    |            | MFE              | Goal = $\leq +50\%$<br>Kriteria = $\leq +75\%$ | 111,96%  | Tidak Memenuhi Kriteria |

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan hasil pengujian statistik pada **Tabel 1**, model WRF-Chem menunjukkan performa yang sangat andal dan dikategorikan Valid untuk parameter  $O_3$ . Nilai *Unpaired Peak Accuracy* (UPA) yang didapatkan hanya sebesar 1,52%, berada jauh di bawah ambang batas ketat standar EPA ( $\leq 25\%$ ). Nilai UPA yang sangat rendah ini membuktikan secara kuantitatif bahwa model memiliki akurasi tinggi dalam memproyeksikan magnitudo konsentrasi puncak (*peak concentration*)  $O_3$  permukaan di Kota Manado yang umumnya dipicu oleh intensitas radiasi matahari maksimum. Keandalan ini didukung oleh nilai *Mean Normalized Bias Error* (MNBE) yang sangat minimal, yaitu -0,16% (dari standar EPA  $\leq 15\%$ ), serta *Mean Normalized Gross Error* (MNGE) sebesar 17,34% (dari standar EPA  $\leq 35\%$ ).

Rendahnya nilai MNBE dan MNGE ini menegaskan bahwa modul fotokimia terintegrasi di dalam WRF-Chem mampu merekonstruksi variabilitas diurnal  $O_3$  secara konsisten jam demi jam. Deviasi MNGE yang sedikit lebih tinggi daripada MNBE merupakan hal yang wajar secara statistik, karena MNGE menghitung kesalahan absolut tanpa memperhatikan arah bias. Namun, faktanya bahwa kedua nilai error ini tetap berada jauh di bawah batas maksimum EPA yang menunjukkan bahwa model tidak hanya akurat dalam menangkap nilai puncak, tetapi juga berhasil mensimulasikan mekanisme penurunan konsentrasi  $O_3$  di malam hari akibat proses titrasi NO (*NO titration*) serta sirkulasi angin lokal pesisir Manado dengan deviasi yang sangat minimal.

Keberhasilan model WRF-Chem dalam mensimulasikan polutan sekunder gas  $O_3$  dengan akurasi tinggi ini mengindikasikan bahwa modul meteorologi terintegrasi (*online coupling*) telah berhasil merekonstruksi parameter radiasi gelombang pendek matahari dan temperatur permukaan di wilayah maritim Kota Manado secara representatif. Keandalan ini krusial karena laju fotolisis gas  $NO_2$  di atmosfer sangat sensitif terhadap fluktuasi fluks aktinik matahari [13]. Nilai bias negatif yang sangat kecil (MNBE -0,16%) juga menunjukkan bahwa mekanisme transport adveksi udara bersih dari laut (*sea breeze*) yang

mengencerkan konsentrasi  $O_3$  di wilayah pesisir Manado telah didekati dengan baik oleh skema parameterisasi lapisan batas atmosfer (*planetary boundary layer*) di dalam model [9].

Sebaliknya, di mana model WRF-Chem untuk parameter  $PM_{2.5}$  dikategorikan tidak valid karena nilai kesalahan fraksionalnya melampaui kriteria kelayakan ilmiah. Tanda negatif ekstrem pada nilai MFB (-111,96%) membuktikan secara matematis gejala *underestimate* parah yang terlihat pada kurva datar model sebelumnya. Ketidakvalidan ini bersumber dari kesalahan input (*input error*), di mana pemodelan masih bergantung pada data inventarisasi emisi berskala global yang gagal menangkap dinamika volume kendaraan di koridor jalan raya Manado serta emisi lokal sektoral secara spesifik, sehingga memicu forecasting error yang masif pada nilai MFE (111,96%).

Ketidakmampuan model dalam memproyeksikan  $PM_{2.5}$  memperlihatkan kelemahan mendasar dari penggunaan database emisi global (seperti EDGAR) ketika diaplikasikan pada grid spasial resolusi tinggi di tingkat lokal perkotaan. Emisi global cenderung melakukan perataan (*smoothing*) spasial, sehingga mereduksi lonjakan emisi sesaat (*peak emission*) yang berasal dari aktivitas knalpot kendaraan pada jam sibuk koridor urban Kota Manado [11]. Selain itu, deviasi fraksional yang masif ini (MFE 111,96%) dipengaruhi oleh absennya parameterisasi emisi non-kendaraan di atmosfer lokal, seperti pembakaran sampah domestik terbuka (*open burning*) dan emisi aerosol organik sekunder dari sektor kuliner malam perkotaan yang tidak terakomodasi dalam inventori global, padahal partikel-partikel tersebut mendominasi fraksi massa partikulat halus di permukaan [14].

Secara keseluruhan, performa yang tajam antara validitas parameter  $O_3$  dan ketidakvalidan parameter  $PM_{2.5}$  menunjukkan adanya asimetri keandalan di dalam struktur modul kimia model WRF-Chem saat mengestimasi polutan gas dan partikulat halus di wilayah perkotaan tropis [15]. Keberhasilan pemodelan  $O_3$  membuktikan bahwa skema meteorologi penggerak (*driving meteorological fields*) seperti suhu, radiasi harian, dan sirkulasi angin lokal yang disediakan oleh komponen WRF sudah bekerja secara sinkron dan akurat dengan persamaan fotokimia atmosfer di dalam model. Namun, kegagalan pemodelan  $PM_{2.5}$  menegaskan bahwa keandalan fisis meteorologi tersebut menjadi tidak efektif apabila data masukan emisi primer (*primary emission input*) yang diinjeksikan ke dalam model tidak memiliki representasi spasial-temporal yang kuat terhadap dinamika aktivitas antropogenik di lapangan [16].

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil simulasi dan pengujian statistik terhadap WRF-Chem menggunakan data observasi AQMS di Kota Manado pada 2-3 Mei 2022, dapat disimpulkan bahwa model ini memiliki keandalan yang asimetris di mana ia terbukti sangat Valid dalam memproyeksikan parameter gas  $O_3$  permukaan dengan nilai UPA (1,52%), MNBE (-0,16%), dan MNGE (17,34%) yang berada dalam batas aman kriteria EPA, namun dinyatakan Tidak Valid untuk parameter partikulat halus ( $PM_{2.5}$ ) karena mengalami gejala *underestimate* parah dengan nilai MFB mencapai -111,96% dan MFE sebesar 111,96%. Pola diurnal menunjukkan konsentrasi tertinggi harian gas  $O_3$  menyentuh  $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada pukul 21.00 WITA akibat akumulasi proses fotokimia radiasi matahari siang hari, sedangkan konsentrasi  $PM_{2.5}$  melonjak ekstrem hingga  $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pada jam sibuk sore hari (18.00-19.00 WITA) akibat tingginya densitas transportasi urban yang diperparah oleh penurunan kecepatan angin permukaan serta penyusutan lapisan batas atmosfer. Secara kuantitatif, perbedaan rona kurva ini menunjukkan data aktual lapangan tercatat 1 kali lebih besar untuk parameter  $O_3$  dan hingga 6 kali lebih besar untuk parameter  $PM_{2.5}$  dibandingkan estimasi model, yang menegaskan adanya kesenjangan (*gap*) masif akibat ketergantungan model pada inventarisasi emisi berskala global yang gagal merepresentasikan rona emisi lokal sektoral di Kota Manado.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] H. J. Mukono, *Aspek Kesehatan Pencemaran Udara*. Surabaya: Airlangga University Press, 2011.
- [2] J. W. Boylan and A. G. Russell, "PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models," *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 26, pp. 4946–4959, 2006.
- [3] I. Fabiola, "Analisis Hasil Pemantauan Kualitas Udara Ambien Menggunakan Metode AQMS (Air Quality Monitoring System) Pada Periode 2020 Di Kota Surabaya Dan Kota Malang Serta Dampaknya Terhadap Kesehatan (Parameter  $PM_{10}$ )," Doctoral dissertation, Universitas Airlangga, Surabaya, 2022.
- [4] USEPA, "National Air Quality and Emission Trends Report," U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, Rep. EPA-450/4-91-003, 1991.
- [5] BPS Kota Manado, *Manado Dalam Angka 2022*. Manado: Badan Pusat Statistik Kota Manado, 2022.

- [6] N. T. K. Oanh, Ed., *Integrated Air Quality Management: Asian Case Studies*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.
- [7] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- [8] D. K. Sari, A. Ihwan, and R. Ardianto, "Analisis Sebaran Polusi Udara di Kota Pontianak menggunakan Model WRF-Chem (Studi Kasus Kebakaran Hutan 21-25 Agustus 2018)," *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*, vol. 8, no. 2, pp. 99–107, 2025.
- [9] D. Pujiastuti and A. F. Ilahi, "Analisis Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari, Temperatur, Dan Kelembaban Udara, Terhadap Fluktuasi Konsentrasi Ozon Permukaan Di Bukit Kototabang Tahun 2005-2010," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 3, no. 3, pp. 177–183, 2014.
- [10] K. Warmiński and A. Bęś, "Atmospheric factors affecting a decrease in the night-time concentrations of tropospheric ozone in a low-polluted urban area," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 229, no. 11, p. 350, Nov. 2018.
- [11] X. Zhao, X. Zhang, X. Xu, J. Xu, W. Meng, and W. Pu, "Seasonal and diurnal variations of ambient PM<sub>2.5</sub> concentration in urban and rural environments in Beijing," *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 18, pp. 2893–2900, 2009.
- [12] Y. Zhang, D. J. Seidel, and S. Zhang, "Trends in planetary boundary layer height over Europe," *Journal of Climate*, vol. 26, no. 24, pp. 10071–10076, 2013.
- [13] L. M. David and P. R. Nair, "Diurnal and seasonal variability of surface ozone and NO<sub>x</sub> at a tropical coastal site: Association with mesoscale and synoptic meteorological conditions," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116, no. D10, 2011, doi: 10.1029/2010JD015076.
- [14] C. Wang and S. Jin, "Error features and their possible causes in simulated low-level winds by WRF at a wind farm," *Wind Energy*, vol. 17, no. 9, pp. 1315–1325, 2014.
- [15] L. Wang, Y. Zhang, K. Wang, B. Zheng, Zhang, and W. Wei, "Application of Weather Research and Forecasting Model with Chemistry (WRF/Chem) over northern China: Sensitivity study, comparative evaluation, and policy implications," *Atmospheric Environment*, vol. 124, pp. 337–350, 2016.
- [16] D. A. Permadi, N. T. Kim Oanh, and R. Vautard, "Integrated emission inventory and modeling to assess distribution of particulate matter mass and black carbon composition in Southeast Asia," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, no. 4, pp. 2725–2747, 2018.