

Simulasi Dispersi SO₂ Saat Letusan Gunung Marapi Menggunakan Model WRF-Chem Studi Kasus Tanggal 3-5 Desember 2023

Fadhil Muhammad Aslam^{1*}, Sayful Amri¹, Fadhli Aslama Afghani¹,
Dan Imawan Mashuri¹

¹Program Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Banten, Indonesia

*E-mail: fadhil.muhammad.aslam4@gmail.com

Received: 11 03 2025 / Accepted: 22 10 2025 / Published online: 21 01 2026

ABSTRAK

Letusan Gunung Marapi di Sumatra Barat pada 3 Desember 2023 menghasilkan emisi SO₂ yang berpotensi merusak lingkungan dan membahayakan kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dispersi SO₂ akibat letusan tersebut menggunakan model WRF-Chem dengan mempertimbangkan faktor meteorologi. Data meteorologi global FNL dengan resolusi 0,25° x 0,25° digunakan sebagai masukan model, sedangkan validasi dilakukan menggunakan data observasi dari Stasiun GAW Bukit Koto Tabang. Proses simulasi menggunakan parameterisasi RADM2 untuk kimia gas dan YSU untuk *planetary boundary layer*. Hasil simulasi menunjukkan pola temporal dan spasial yang cukup baik, meskipun dengan nilai korelasi rendah untuk SO₂ (rata-rata 0,175), serta nilai MAE sebesar 1,296 dan RMSE sebesar 3,416 yang menunjukkan kecenderungan *underestimate* dibandingkan dengan observasi. Sebaliknya, parameter meteorologi khususnya suhu permukaan menunjukkan korelasi yang sangat kuat. Implikasi penelitian ini adalah perlunya validasi hasil model secara lebih komprehensif dengan menambahkan titik observasi untuk evaluasi yang lebih akurat. Selain itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada pemilihan skema parameterisasi optimal untuk meningkatkan akurasi simulasi dispersi SO₂ secara signifikan.

Kata Kunci: Gunung Marapi, WRF-Chem, SO₂, Simulasi

ABSTRACT

The eruption of Mount Marapi in West Sumatra on December 3, 2023, resulted in SO₂ emissions that potentially damage the environment and pose health risks to the community. This study aims to model SO₂ dispersion from the eruption using the WRF-Chem model, taking into account meteorological factors. Global meteorological data (FNL) with a resolution of 0.25° x 0.25° were used as model inputs, while validation was performed using observational data from the GAW Bukit Koto Tabang Station. The simulation employed RADM2 parameterization for gas chemistry and YSU for the planetary boundary layer. The simulation results showed relatively good temporal and spatial patterns but with a low correlation value for SO₂ (average of 0.175), an MAE of 1.296, and an RMSE of 3.416, indicating a tendency to underestimate compared to observations. Conversely, meteorological parameters, especially surface temperature, showed very strong correlation. The implication of this study highlights the necessity of more comprehensive validation by increasing observational points for more accurate evaluation. Additionally, future research should focus on selecting optimal parameterization schemes to significantly enhance the accuracy of SO₂ dispersion simulations.

Keywords: Mount Marapi, WRF-Chem, SO₂, Simulation

PENDAHULUAN

Aktivitas vulkanik dari gunung berapi menghasilkan aerosol berupa abu vulkanik dan gas seperti CO₂, SO₂, dan H₂S, yang terbentuk melalui proses kimia dan pergerakan magma di mantel bumi sebelum dilepaskan ke atmosfer (Laeger et al., 2017a). Gas-gas ini dapat memengaruhi kualitas udara dan mempercepat pembentukan hujan asam yang memberikan dampak besar pada lingkungan dan kesehatan manusia (Karagulian et al., 2015; Oppenheimer et al., 2011; Robock, 2000). SO₂ juga sering digunakan sebagai indikator bahaya vulkanik karena emisinya yang signifikan selama letusan (Diehl et al., 2012).

Faktor meteorologi berperan penting dalam menentukan distribusi SO₂ di atmosfer. Misalnya kecepatan angin dapat menyebarkan SO₂ jauh dari sumbernya, sedangkan curah hujan dapat mencuci polutan dari udara (Carnelos et al., 2024; Tasić et al., 2013). Selain itu, kondisi angin dominan dan tingkat kelembapan juga dapat memengaruhi akumulasi SO₂ di wilayah tertentu. Oleh karena itu, memahami pola pengaruh faktor meteorologi sangat penting dalam memprediksi dampak emisi SO₂ akibat letusan vulkanik.

Gunung Marapi merupakan salah satu gunung berapi paling aktif di Indonesia. Pada letusan 3 Desember 2023, Gunung Marapi menghasilkan kolom abu setinggi 3.000 meter yang menyebar hingga ke wilayah Bukittinggi dan Padang Panjang (PVMBG, 2023a). Emisi gas vulkanik selama letusan ini memberikan ancaman serius bagi lingkungan dan masyarakat di sekitarnya. Oleh karena itu diperlukan informasi yang mudah dipahami masyarakat mengenai wilayah yang terdampak emisi gas vulkanik selama letusan gunung berapi terjadi.

Salah satu informasi yang bisa dimanfaatkan ialah informasi spasial dari luaran model. Pemodelan dispersi SO₂

dapat dilakukan menggunakan *Weather Research and Forecasting with Chemistry* (WRF-Chem), model ini telah terbukti efektif dalam mensimulasikan dispersi spasial dan temporal gas vulkanik dengan tingkat akurasi yang tinggi berdasarkan data observasi (Brega et al., 2020a; Freitas et al., 2011; Hirtl et al., 2019). Namun demikian, studi terkait pemodelan dispersi SO₂ dengan WRF-Chem di Indonesia masih relatif jarang dilakukan.

Penelitian ini bertujuan untuk menyimulasikan dispersi SO₂ akibat letusan Gunung Marapi dengan mempertimbangkan pengaruh parameter meteorologi. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data observasi dari Stasiun Global Atmosphere Watch (GAW) Bukit Koto Tabang yang menyediakan data konsentrasi SO₂ dan beberapa parameter meteorologi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya mitigasi dampak emisi vulkanik di Indonesia, terutama pada aktivitas vulkanik Gunung Marapi di Sumatra Barat.

METODE PENELITIAN

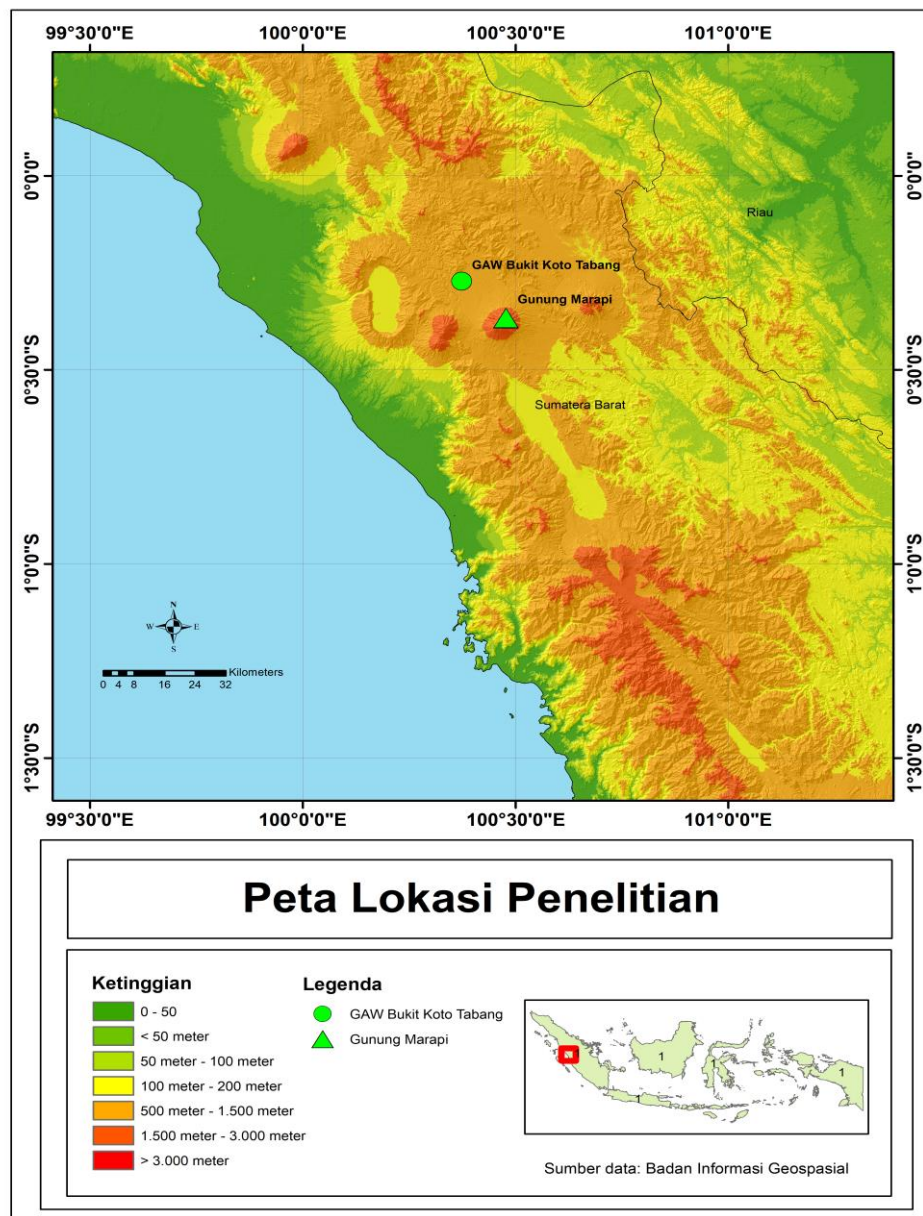
Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama periode letusan Gunung Marapi pada tanggal 3 hingga 5 Desember 2023. Lokasi utama penelitian berfokus pada kawasan Gunung Marapi di Provinsi Sumatra Barat yang secara geografis berada pada koordinat 100,48° Bujur Timur dan 0,36° Lintang Selatan (Gambar 1). Validasi hasil simulasi dilakukan dengan menggunakan data observasi yang bersumber dari Stasiun Global Atmosphere Watch (GAW) Bukit Koto Tabang yang berlokasi pada koordinat 0,20° Lintang Selatan dan 100,32° Bujur Timur.

Wilayah sekitar Gunung Marapi memiliki kondisi topografi berbukit dan bergunung dengan elevasi yang bervariasi. Gunung Marapi sendiri memiliki

ketinggian mencapai 2.891 meter di atas permukaan laut dan merupakan salah satu gunung berapi aktif di Indonesia dengan riwayat letusan yang cukup sering terjadi (Purwaningsih, 2019). Aktivitas vulkanik di daerah ini secara signifikan dapat memengaruhi kualitas udara wilayah sekitarnya melalui pelepasan berbagai gas vulkanik yang berpotensi menimbulkan

ancaman terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan (Laeger et al., 2017b; PVMBG, 2023b). Selain itu, secara sosial ekonomi, masyarakat di lereng Gunung Marapi, khususnya di Kabupaten Agam dan Tanah Datar sangat bergantung pada sektor pertanian hortikultura yang rentan terganggu oleh aktivitas vulkanik (Mahdi et al., 2025).



Gambar 1: Peta Lokasi Penelitian

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan berbagai alat dan data pendukung untuk mensimulasikan sebaran SO₂ dan validasi hasil luaran model. Data utama yang digunakan adalah data meteorologi dari *Final Analysis* (FNL) yang diperoleh dari *Global Data Assimilation System* (GDAS) (<https://rda.ucar.edu/datasets/d083003/>).

Data FNL memiliki resolusi temporal 6 jam dan resolusi spasial 0,25° x 0,25° yang digunakan sebagai input untuk model WRF-Chem. Selain itu, data *Global Emissions* juga digunakan sebagai data masukan model WRF-Chem. Penelitian ini memvalidasi luaran model menggunakan data observasi SO₂ di permukaan berasal dari Stasiun Global Atmospher Watch (GAW) Bukit Koto Tabang yang menyediakan data per-jam selama periode penelitian yaitu tanggal 3-5 Desember 2023. Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu Model WRF-Chem versi 4.5.2 yang diinstal pada Ubuntu. Setelah mendapatkan hasil luaran model, perangkat ARWpost digunakan untuk *post-processing* data dan Python digunakan untuk visualisasi hasil simulasi dalam bentuk peta dan grafik.

Parameterisasi

Skema dan parameterisasi dalam WRF-Chem menyediakan berbagai pilihan yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan domain penelitian. Penelitian ini menggunakan *Second Generation Regional Acid Deposition Model Mechanism* (RADM2) yang memungkinkan prediksi pergerakan dan *trajectory* seperti SO₂ dengan kondisi

atmosfer (Stockwell et al., 1990). Skema ini menghasilkan lebih sedikit *mixing* pada lapisan batas konvektif sehingga lebih sedikit uap air yang ditransfer ke lapisan atmosfer (Hu et al., 2010a; Mellor & Yamada, 1982).

Penggunaan *Goddard Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport* (GOCART) dalam model ini memfasilitasi simulasi emisi debu, deposisi kering, dan pengolahan data meteorologi melalui *GODDARD Earth Observing System* (GEOS DAS) (LeGrand et al., 2019). Skema Noah *Land Surface Model* digunakan untuk memperhitungkan pengaruh awan, radiasi matahari, dan kondisi atmosfer terhadap energi di permukaan (Ek et al., 2003). Selain itu, skema mikrofisis (Hong & Lim, 2006) mampu menyimulasikan fenomena cuaca seperti hujan, dengan memperhitungkan proses dan kaitannya dengan kondisi atmosfer (Hong et al., 2010).

Pada penelitian ini, parameterisasi menjadi bagian penting untuk merepresentasikan proses fisik dan kimia selama simulasi emisi vulkanik. Proses yang tidak dapat dimodelkan secara eksplisit karena keterbatasan resolusi spasial dimasukkan melalui pendekatan parameterisasi (Ridwan & Kudsy, 2011). Skema yang digunakan mencakup parameterisasi untuk emisi vulkanik, transportasi, dan dispersi SO₂.

Berdasarkan skema dan penggunaan data masukan tersebut, maka dilakukan pengaturan parameterisasi WRF-Chem secara garis besar yang ditunjukkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1: Parameterisasi yang digunakan

<i>Physical and Chemical option</i>	<i>Opsi Parameterisasi</i>
<i>Anthropogenic emissions</i>	<i>GOCART</i>
<i>Cumulus scheme</i>	<i>Grell 3-D</i>
<i>Gas phase chemistry</i>	<i>Regional Acid Deposition Model ver.2</i>

<i>Physical and Chemical option</i>	<i>Opsi Parameterisasi</i>
<i>Microphysics</i>	<i>Lin (Lin et al., 1983)</i>
<i>Planetary Boundary Layer</i>	<i>Yonsei University scheme (YSU)</i>
<i>Shortwave Radiation</i>	<i>Rapid Radiative Transfer Model for GCMs (RRTMG)</i>
<i>Longwave Radiation</i>	<i>Rapid Radiative Transfer Model for GCMs (RRTMG)</i>
	<i>Iacono et al. (2008)</i>
<i>Land Surface Model</i>	<i>Noah land surface model</i>
<i>Sea Salt Emission</i>	<i>GOCART</i>

Validasi Model

Validasi hasil simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan *output* model WRF-Chem dengan data observasi yang tersedia dari Stasiun GAW Bukit Koto Tabang. Validasi ini mengevaluasi konsentrasi SO₂ dan beberapa parameter meteorologi yang disimulasikan, yaitu angin permukaan dan suhu permukaan dengan metrik evaluasi seperti *korelasi pearson* (r) (Turney, 2022), *Mean Absolute Error* (MAE) (Xu et al., 2021), *Root Mean Square Error* (RMSE) (Chakraborty & Elzarka, 2018). Seluruh perhitungan matrik evaluasi tersebut berdasarkan Persamaan 1-3.

Korelasi Pearson (r):

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \dots (1)$$

Keterangan :

- r = Nilai korelasi konsentrasi SO₂ dengan unsur lainnya
- x = Konsentrasi SO₂ dari data Observasi
- y = Konsentrasi SO₂ dari hasil luaran pemodelan WRF-Chem
- n = Jumlah data

Mean Absolute Error (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_t - y_t| \dots (2)$$

Keterangan:

MAE = *Mean Absolute Error*

- $\hat{y}$ = Konsentrasi SO₂ dari hasil simulasi model WRF-Chem
- y = Konsentrasi SO₂ dari data observasi
- n = Jumlah data

Root Mean Square Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{n}} \dots (3)$$

Keterangan:

RMSE = *Root Mean Square Error*

- Y = Konsentrasi SO₂ dari hasil simulasi model WRF-Chem
- $\hat{Y}$ = Konsentrasi SO₂ dari data observasi
- n = Jumlah data

Metodologi penelitian yang digunakan pada penelitian ini bisa dilihat pada *flowchart* Gambar 2.

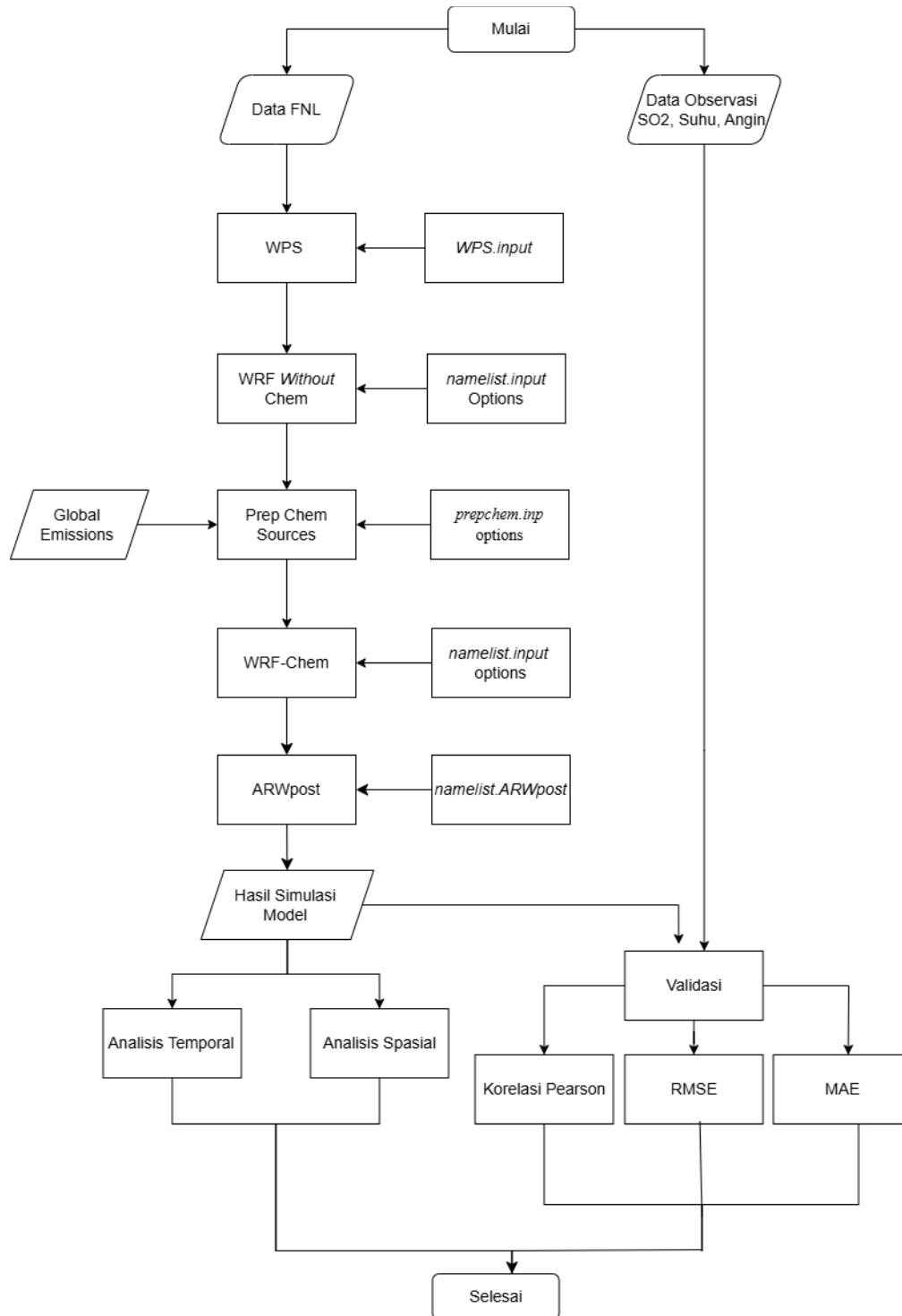
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Suhu Permukaan Hasil Simulasi Model dan Observasi

Pada tanggal 3 Desember 2023, suhu permukaan observasi di Stasiun GAW Koto Tabang berkisar antara 18,5°C hingga 24,6°C, dengan suhu tertinggi terjadi pukul 06.00 UTC (24,6°C) dan suhu terendah pukul 23.00 UTC (18,5°C). Luaran model WRF-Chem juga menunjukkan pola serupa dengan suhu maksimum yang lebih tinggi, yaitu 25°C pada pukul 05.00 UTC. Kemudian suhu

permukaan pada tanggal 4 Desember 2023 menunjukkan peningkatan, sehingga diamati suhu tertinggi pada hari tersebut sebesar 26°C pada pukul 06.00 UTC dan

suhu terendah 19.5°C pada pukul 19.00 UTC. Adapun model mencatat suhu maksimum hingga 27,9°C dengan fluktuasi yang lebih besar.

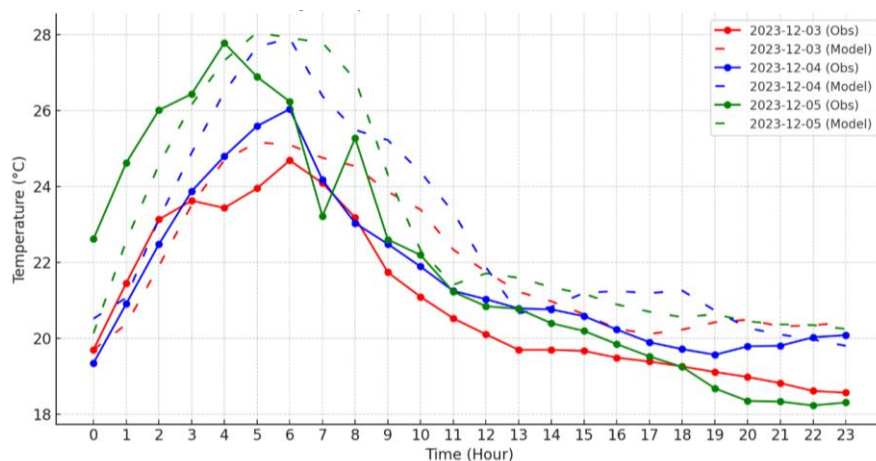


Gambar 2: Diagram Alir Penelitian

Pada tanggal 5 Desember 2023, suhu tertinggi dari data observasi mencapai 27,8°C pada pukul 04.00 UTC dan suhu terendah 18,2°C pada pukul 21.00 UTC, dengan hasil model menunjukkan suhu maksimum 28°C. Secara umum, suhu maksimum model WRF-Chem sedikit lebih tinggi dibandingkan hasil observasi, namun pola harian antara model dan observasi serupa, di mana suhu mencapai puncak pada jam 04.00-06.00 UTC dan menurun pada pagi dini hari (Gambar 3).

Secara umum, luaran WRF-Chem mampu merepresentasikan pola suhu udara hasil observasi dengan cukup baik, khususnya pada puncak suhu yang terjadi pada rentang waktu 04.00–06.00 UTC. Menurut Lakitan (2002), suhu udara maksimum umumnya terjadi ketika

intensitas cahaya matahari berada pada posisi tegak lurus terhadap permukaan bumi, yakni pada siang hari. Namun demikian, Ahmad et al. (2012) menjelaskan bahwa suhu maksimum udara tidak selalu bertepatan dengan puncak radiasi matahari, melainkan terdapat jeda waktu sekitar 1–2 jam setelah permukaan menerima pemanasan maksimum. Fenomena ini dikenal sebagai *thermal lag*, dimana energi panas yang diserap permukaan bumi akan terlebih dahulu terakumulasi sebelum kemudian ditransfer ke udara di atasnya melalui proses konduksi dan konveksi, sehingga puncak suhu udara cenderung terjadi setelah puncak pemanasan permukaan.



Gambar 3: Grafik Suhu Permukaan 3 – 5 Desember 2023

Analisis Angin Permukaan Hasil Simulasi Model dan Observasi

Berdasarkan Gambar 4(a-c), windrose dari data observasi menunjukkan arah dan kecepatan angin pada 3-5 Desember 2023. Pada tanggal 3 Desember, arah angin dominan berasal dari Tenggara dengan kecepatan rata-rata 0,8 m/s. Kecepatan angin maksimum tercatat sebesar 1,2 m/s pada pukul 08.00 UTC, sedangkan kecepatan minimum sebesar 0,2 m/s pada pukul 00.00 UTC. Tanggal 4

Desember menunjukkan pola arah angin dominan yang masih berasal dari Tenggara dengan kecepatan rata-rata 0,95 m/s. Kecepatan maksimum mencapai 1,8 m/s pada pukul 20.00 UTC, sedangkan kecepatan minimum 0,13 m/s tercatat pada pukul 14.00 UTC. Pada tanggal 5 Desember, arah angin dominan tetap berasal dari Tenggara dengan kecepatan rata-rata 0,84 m/s, dengan kecepatan maksimum 1,4 m/s pada pukul 01.00 UTC dan kecepatan minimum 0,3 m/s pada

pukul 11.00 UTC. Variasi kecepatan angin ini sejalan dengan hasil penelitian Ashkenazy (2023) yang menjelaskan bahwa kecepatan angin permukaan di daratan cenderung mencapai nilai maksimum pada sekitar tengah hari akibat pemanasan permukaan yang signifikan. Sebaliknya, pada malam hari, pendinginan permukaan menyebabkan terjadinya *decoupling* antara lapisan atmosfer atas dan permukaan, sehingga kecepatan angin permukaan menurun secara signifikan.

Sementara itu, berdasarkan Gambar 4(d-f), hasil luaran model WRF-Chem menunjukkan pola arah angin yang berbeda dibandingkan dengan data observasi. Arah angin dominan pada luaran model berasal dari Barat Laut, di mana ini berbeda 180° dengan data observasi. Luaran model ini juga menunjukkan kecepatan angin yang *overestimated* jika dibandingkan dengan data observasi. Pada tanggal 3 Desember, kecepatan angin rata-rata pada model ialah 1,7 m/s dengan kecepatan maksimum mencapai 3,2 m/s pada pukul 07.00 UTC. Tanggal 4 Desember model menunjukkan kecepatan rata-rata yang lebih tinggi daripada hari sebelumnya, yaitu 1,2 m/s dengan kecepatan maksimum 3 m/s pada pukul 07.00 UTC. Kemudian, pada tanggal 5 Desember kecepatan angin rata-rata sebesar 1,5 m/s namun dengan kecepatan maksimum yang lebih besar daripada hari sebelumnya yang mencapai 5,2 m/s pada pukul 10.00 UTC. Secara umum, model WRF-Chem dinilai kurang baik dalam menyimulasikan arah dan kecepatan angin saat terjadi letusan gunung Marapi, ini terlihat pada pola arah angin yang berlawanan serta nilai kecepatan angin yang cenderung lebih tinggi dibandingkan data observasi.

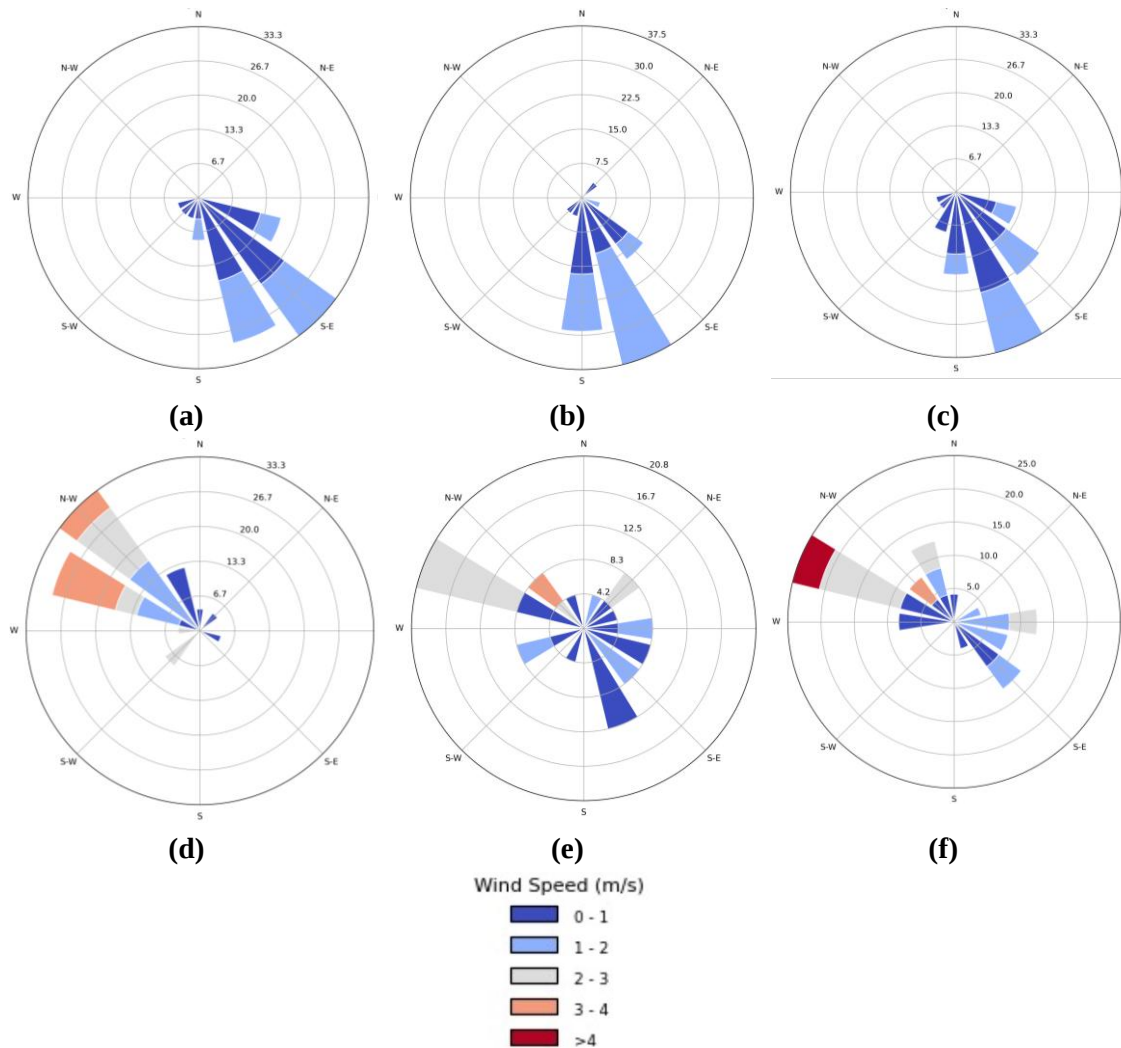
Kecenderungan luaran model WRF-Chem yang *overestimated* terhadap parameter kecepatan angin permukaan dan

kurang akurat dalam merepresentasikan arah angin disebabkan karena keterbatasan model dalam merepresentasikan fitur topografi yang tidak terresolusikan (*unresolved topography*), dimana hal ini berkontribusi terhadap bias positif dalam simulasi kecepatan angin. Gómez-Navarro et al. (2015) menemukan bahwa penggunaan skema lapisan batas atmosfer (PBL) yang tidak mempertimbangkan efek topografi kecil dapat menyebabkan *overestimated* kecepatan angin permukaan, terutama di wilayah dengan topografi yang beragam seperti di kawasan sekitar Gunung Marapi.

Analisis Dispersi Spasial SO₂

Gambar 5(a) menunjukkan dispersi konsentrasi SO₂ pada 3 Desember 2023 pukul 08.00 UTC, enam menit setelah letusan pertama dari Gunung Marapi. Gambar tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ terdispersi ke arah utara mendekati Stasiun GAW Koto Tabang dengan nilai >10 ppm pada pusat letusan dan konsisten menurun hingga 2-4 ppm seiring menjauhi pusat letusan. Pada Gambar 5(b), dispersi SO₂ pukul 12.00 UTC menunjukkan perluasan konsentrasi mencakup wilayah yang lebih luas memasuki sebagian besar wilayah Bukittinggi dan Agam dengan nilai dominan 2-6 ppm.

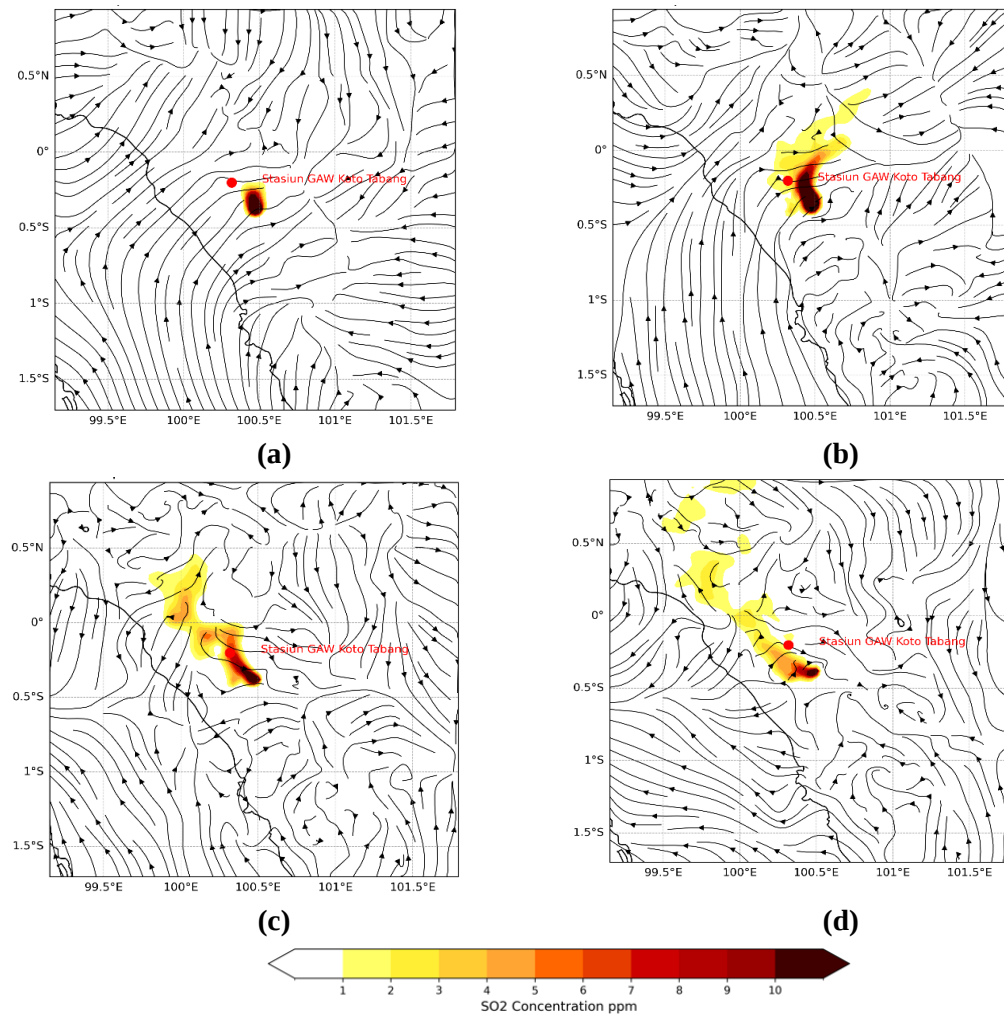
Gambar 5(c) pada pukul 16.00 UTC menunjukkan dispersi SO₂ yang semakin menyebar, namun arah dispersi sedikit bergeser ke arah barat laut dengan konsentrasi dominan 2-4 ppm, sementara konsentrasi maksimum mencapai 8-10 ppm yang berada di dekat letusan hingga area dekat stasiun. Pada pukul 20.00 UTC (Gambar 5(d)), dispersi SO₂ semakin meluas ke arah barat laut dengan nilai konsentrasi dominan tetap di kisaran 2-4 ppm.



Gambar 4: Windrose 3 – 5 Desember 2023 Observasi (a-c) dan Model (d-f)

Gambar 6 (a) menunjukkan dispersi SO₂ pada 4 Desember 2023 pukul 00.00 UTC, dengan konsentrasi SO₂ terpusat di sekitar Gunung Marapi termasuk Stasiun GAW Koto Tabang. Nilai konsentrasi dominan berkisar antara 2-4 ppm dengan area maksimum mencapai 10 ppm di pusat letusan. Pada pukul 04.00 UTC (Gambar 6(b)), dispersi mulai berubah arah ke barat daya dengan konsentrasi dominan 10 ppm, sedangkan luasan sebaran lebih berkurang seiring bergantinya dominasi arah angin.

Pada pukul 08.00 UTC hingga 20.00 UTC (Gambar 6(c), (d), (e), dan (f)), dispersi SO₂ semakin menyebar dengan konsentrasi dominan 2-7 ppm. Secara umum dispersi pada waktu tersebut mengarah ke Barat Daya yang meliputi daerah Agam, Pariaman, dan Padang. Tidak hanya itu, SO₂ ini juga terdispersi sampai ke Samudera Hindia meskipun dengan konsentrasi yang tidak terlalu tinggi. Wilayah yang terdampak konsentrasi maksimum paling luas adalah Agam dan Pariaman yang terlihat pada pukul 16.00 UTC.



Gambar 5: Dispersi Spasial SO₂ (a) 3 Desember 2023 08.00 UTC, (b) 3 Desember 2023 12.00 UTC, (c) 3 Desember 2023 16.00 UTC, (d) 3 Desember 2023 20.00 UTC

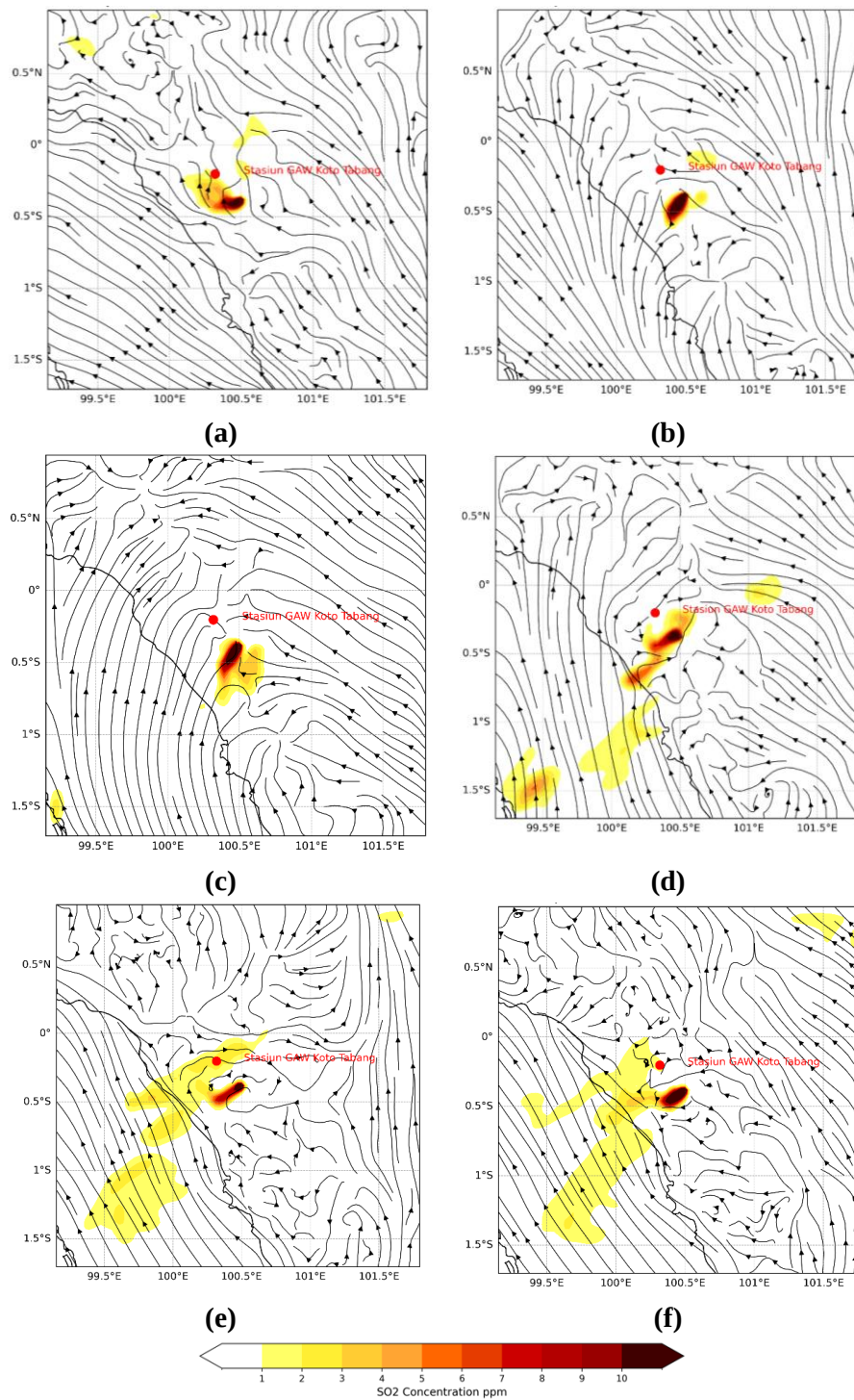
Gambar 7 (a) menunjukkan dispersi konsentrasi SO₂ pada 5 Desember 2023 pukul 00.00 UTC, dimana konsentrasi masih menyebar ke arah Barat Daya nilai konsentrasi 2-4 ppm. Pada pukul 04.00 UTC – 16.00 (Gambar 7(b), (c), (d), dan (e)), dispersi mulai menyebar sedikit ke arah utara dengan konsentrasi 2-4 ppm. Lalu pada pukul 20.00 UTC (Gambar 7(f)), dispersi SO₂ menunjukkan pembalikan arah kembali ke Barat Daya yang menjangkau area yang lebih luas bahkan hingga ke Kota Padang. Variasi dispersi SO₂ ini menjelaskan bahwa faktor meteorologi seperti suhu udara dan angin sangat berpengaruh terhadap konsentrasi

dan arah dispersi polutan (Brega et al., 2020b; Özbay, 2012a).

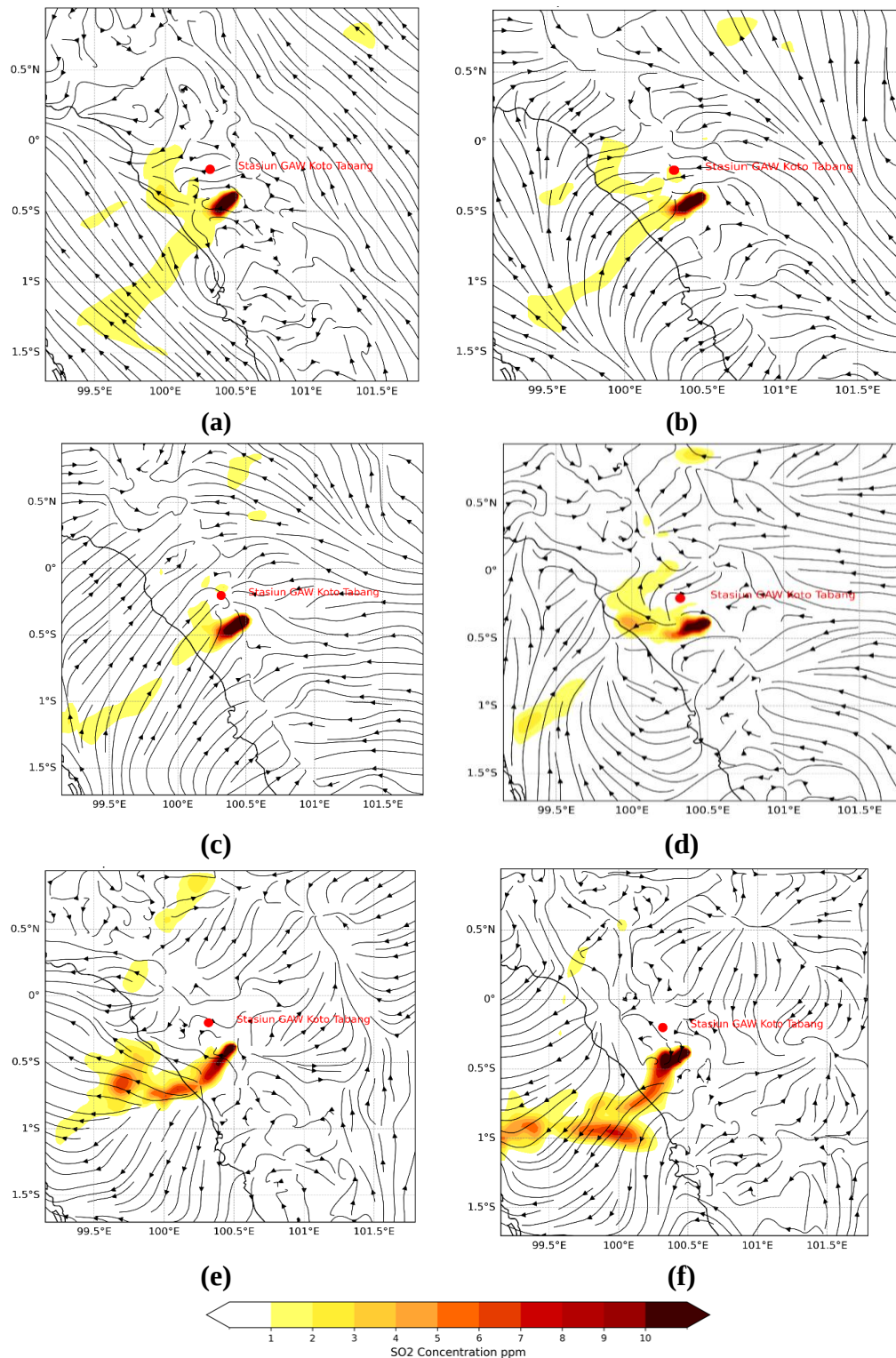
Studi oleh Zulistyawan et al. (2024) juga menggunakan model WRF-Chem untuk mensimulasikan dispersi SO₂ selama letusan Gunung Merapi dan menemukan bahwa suhu tinggi dan kecepatan angin rendah pada siang hari menyebabkan akumulasi konsentrasi SO₂ di sekitar sumber emisi, sedangkan kecepatan angin yang lebih tinggi pada pagi hari memperluas sebaran SO₂ ke wilayah yang lebih luas. Demikian pula penelitian yang dilakukan oleh Stuefer et al. (2013) menjelaskan bahwa pentingnya parameter meteorologi dalam model WRF-Chem untuk secara akurat

mensimulasikan emisi dan dispersi gas vulkanik seperti SO_2 , karena interaksi

antara suhu, angin, dan stabilitas atmosfer menentukan arah dan luas sebaran polutan.



Gambar 6: Dispersi Spasial SO_2 , (a) 4 Desember 2023 00.00 UTC, (b) 4 Desember 2023 04.00 UTC, (c) 4 Desember 2023 08.00 UTC, (d) 4 Desember 2023 12.00 UTC, (e) 4 Desember 2023 16.00 UTC, (f) 4 Desember 2023 20.00 UTC



Gambar 7: Dispersi Spasial SO₂, (a) 5 Desember 2023 00.00 UTC, (b) 5 Desember 2023 04.00 UTC, (c) 5 Desember 2023 08.00 UTC, (d) 5 Desember 2023 12.00 UTC, (e) 5 Desember 2023 16.00 UTC, (f) 5 Desember 2023 20.00 UTC

Analisis Hasil Validasi Model

Hasil validasi menunjukkan bahwa model WRF-Chem mampu menyimulasikan kondisi atmosfer saat letusan Gunung Marapi berdasarkan data observasi di Stasiun GAW Koto Tabang dengan cukup baik, meskipun dengan beberapa keterbatasan. Hal ini terlihat dari nilai korelasi rata-rata sebesar 0,175 untuk SO₂, 0,911 untuk suhu, 0,074 untuk kecepatan angin, dan 0,220 untuk arah angin. Korelasi rendah untuk SO₂ mengindikasikan bahwa model kurang akurat dalam merepresentasikan variabilitas spasial dan temporal SO₂ di lokasi penelitian, dengan kecenderungan hasil simulasi underestimate dibandingkan dengan observasi. Hal ini didukung oleh nilai RMSE rata-rata sebesar 3,416 dan MAE sebesar 1,296 untuk SO₂, yang menunjukkan tingkat kesalahan absolut yang cukup signifikan (Tabel 2).

Ketidakakuratan simulasi ini disebabkan oleh pemilihan parameterisasi model yang tidak sepenuhnya sesuai dengan kondisi spesifik wilayah sekitar Gunung Marapi dan Stasiun GAW Koto

Tabang. Kondisi ini sejalan dengan hasil penelitian Ruiz et al. (2010) yang menyatakan bahwa pemilihan parameterisasi memiliki dampak signifikan terhadap performa simulasi model. Selain itu, keterbatasan titik observasi juga menjadi faktor penting dalam evaluasi performa model karena pola dispersi SO₂ cenderung menyebar ke berbagai arah yang tidak hanya terfokus pada satu titik observasi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu menambahkan jumlah titik observasi yang lebih banyak dan tersebar secara luas, sebagaimana disarankan oleh penelitian sebelumnya (Brega et al., 2020a; Özbay, 2012b). Meskipun demikian, model menunjukkan performa yang sangat baik dalam memprediksi parameter meteorologi seperti suhu permukaan dengan nilai korelasi tinggi sebesar 0,911, yang konsisten dengan temuan penelitian terdahulu yang menekankan bahwa WRF-Chem mampu merepresentasikan parameter meteorologi dengan baik apabila parameterisasi yang digunakan sesuai dengan kondisi lokal (Hirtl et al., 2019; Hu et al., 2010b).

Tabel 2. Parameterisasi yang digunakan

Waktu	SO ₂	Suhu	Kecepatan Angin	Arah Angin
Korelasi				
2023-12-03	-0,042	0,897	0,363	0,289
2023-12-04	0,067	0,958	-0,271	-0,015
2023-12-05	0,499	0,878	0,129	0,387
Rata -rata	0,175	0,911	0,074	0,220
RMSE				
2023-12-03	4,093	4,088	1,267	1,122
2023-12-04	3,753	3,723	1,502	1,247
2023-12-05	2,402	2,194	1,722	1,457
Rata -rata	3,416	3,335	1,497	1,275
MAE				
2023-12-03	1,393	1,215	147,268	137,508
2023-12-04	1,158	0,974	117,731	99,818

Waktu	SO2	Suhu	Kecepatan Angin	Arah Angin
2023-12-05	1,338	0,851	121,525	99,649
Rata -rata	1,296	1,013	128,841	112,325

KESIMPULAN.

Simulasi dispersi SO₂ menggunakan WRF-Chem selama letusan Gunung Marapi pada 3-5 Desember 2023 menunjukkan pola sebaran konsentrasi SO₂ yang meluas ke beberapa wilayah di sekitar Gunung Marapi. Konsentrasi tertinggi (>10 ppm) terfokus di area dekat pusat letusan, sementara konsentrasi yang lebih rendah (2-4 ppm) tersebar lebih luas mencakup wilayah Bukittinggi, Agam, Padang, hingga mencapai Samudera Hindia. Sebaran ini mengikuti arah angin dominan yang mempengaruhi pola dispersi SO₂.

Hasil validasi model menunjukkan korelasi rata-rata yang rendah, yaitu 0,175 untuk konsentrasi SO₂, yang mengindikasikan bahwa model WRF-Chem kurang akurat dalam merepresentasikan pola temporal dan spasial dari SO₂ berdasarkan data di titik observasi. Meskipun demikian, model ini lebih baik dalam mensimulasikan parameter suhu, dengan nilai korelasi yang tinggi, yaitu 0,911, namun kurang tepat dalam mensimulasikan arah dan kecepatan angin. Oleh karena itu, kelemahan utama penelitian ini terletak pada akurasi model dalam memprediksi konsentrasi SO₂, serta representasi arah dan kecepatan angin yang tidak sesuai dengan observasi.

Implikasi dari hasil penelitian ini adalah bahwa meskipun WRF-Chem dapat digunakan untuk memodelkan dispersi SO₂ dari letusan vulkanik, model ini perlu dilakukan penyesuaian parameterisasi yang lebih baik dan validasi lebih lanjut dengan lebih banyak titik observasi. Hal ini akan meningkatkan akurasi hasil simulasi terutama pada sebaran SO₂ dan faktor meteorologinya. Validasi dengan hanya satu titik observasi tidak cukup

untuk memastikan kualitas spasial dan temporal dari hasil simulasi.

Penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan titik observasi yang lebih banyak, baik melalui stasiun pemantau SO₂ maupun stasiun observasi cuaca untuk melihat akurasi sebaran SO₂ dan faktor meteorologi yang memengaruhinya dengan lebih baik. Tidak hanya itu penyesuaian parameterisasi model juga sangat diperlukan, terutama pada opsi *chemistry* yang memengaruhi luaran simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, A., Salim, S., & Rahim, R. A. (2012). Kajian Perubahan Suhu Permukaan Tanah Terhadap Suhu Udara. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(2), 117–123. <http://metgeo.bmkg.go.id/index.php/JMG/article/view/139>

Ashkenazy, Y. (2023). The diurnal cycle and temporal trends of surface winds. *Earth and Planetary Science Letters*, 601, 117907. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117907>

Brega, E., Caccamo, M. T., Castorina, G., Magazù, S., Morichetti, M., Munaò, G., Passerini, G., & Rizza, U. (2020a). WRF-Chem optimization for the estimation of etna volcanic ash fallout. *arXiv, December 2015*, 1–42.

Brega, E., Caccamo, M. T., Castorina, G., Magazù, S., Morichetti, M., Munaò, G., Passerini, G., & Rizza, U. (2020b). WRF-Chem optimization for the estimation of etna volcanic ash fallout. *arXiv, December 2015*, 1–42.

Carnelos, D. A., Jobbagy, E., & Piñeiro, G. (2024). Rainout and Washout Contributions to Wet Atmospheric

- Deposition in Southern South America. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06991-z>
- Chakraborty, D., & Elzarka, H. (2018). Performance testing of energy models: are we using the right statistical metrics? *Journal of Building Performance Simulation*, 11(4), 433–448. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1387607>
- Diehl, T., Heil, A., Chin, M., Pan, X., Streets, D., Schultz, M., & Kinne, S. (2012). Anthropogenic, biomass burning, and volcanic emissions of black carbon, organic carbon, and SO₂ from 1980 to 2010 for hindcast model experiments. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 12, 24895–24954. <https://doi.org/10.5194/acpd-12-24895-2012>
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., & Tarpley, J. D. (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(22), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2002jd003296>
- Freitas, S. R., Longo, K. M., Alonso, M. F., Pirre, M., Marecal, V., Grell, G., Stockler, R., Mello, R. F., & Sánchez Gácita, M. (2011). PREP-CHEM-SRC - 1.0: A preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. *Geoscientific Model Development*, 4(2), 419–433. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-419-2011>
- Gómez-Navarro, J. J., Raible, C. C., & Dierer, S. (2015). Sensitivity of the WRF model to PBL parametrisations and nesting techniques: evaluation of wind storms over complex terrain. *Geoscientific Model Development*, 8(10), 3349–3363. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3349-2015>
- Hirtl, M., Stuefer, M., Arnold, D., Grell, G., Maurer, C., Natali, S., Scherllin-Pirscher, B., & Webley, P. (2019). The effects of simulating volcanic aerosol radiative feedbacks with WRF-Chem during the Eyjafjallajökull eruption, April and May 2010. *Atmospheric Environment*, 198(October 2018), 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.058>
- Hong, S.-Y., & Lim, J.-O. J. (2006). Hongandlim-JKMS-2006. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42(2), 129–151.
- Hong, S.-Y., Lim, K.-S. S., Lee, Y.-H., Ha, J.-C., Kim, H.-W., Ham, S.-J., & Dudhia, J. (2010). Evaluation of the WRF Double-Moment 6-Class Microphysics Scheme for Precipitating Convection. *Advances in Meteorology*, 2010, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2010/707253>
- Hu, X. M., Nielsen-Gammon, J. W., & Zhang, F. (2010a). Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(9), 1831–1844. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2432.1>
- Hu, X. M., Nielsen-Gammon, J. W., & Zhang, F. (2010b). Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(9), 1831–1844. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2432.1>

- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(13), 2–9. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, 120, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>
- Laeger, K., Petrelli, M., Andronico, D., Misiti, V., Scarlato, P., Cimarelli, C., Taddeucci, J., Del Bello, E., & Perugini, D. (2017a). High-resolution geochemistry of volcanic ash highlights complex magma dynamics during the Eyjafjallajökull 2010 eruption. *American Mineralogist*, 102(6), 1173–1186. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5860>
- Laeger, K., Petrelli, M., Andronico, D., Misiti, V., Scarlato, P., Cimarelli, C., Taddeucci, J., Del Bello, E., & Perugini, D. (2017b). High-resolution geochemistry of volcanic ash highlights complex magma dynamics during the Eyjafjallajökull 2010 eruption. *American Mineralogist*, 102(6), 1173–1186. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5860>
- Lakitan, B. (2002). *Dasar-Dasar Klimatologi*. PT Raja Grafindo Persada.
- LeGrand, S. L., Polashenski, C., Letcher, T. W., Creighton, G. A., Peckham, S. E., & Cetola, J. D. (2019). The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3.8.1. *Geoscientific Model Development*, 12(1), 131–166. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-131-2019>
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). *Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model*.
- Mahdi, M., Istijono, B., Yossafr, Y., Ismail, F. A., Hakam, A., Adji, B. M., Saputra, D., Andriani, A., Narny, Y., Giffari, M. Al, Zis, S. F., & Yuliet, R. (2025). Identifikasi dan Pemetaan Masalah di Nagari Pasca Bencana Erupsi Gunung Marapi di Sumatera Barat. *Jurnal Talenta Sipil*, 8(1), 140. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i1.705>
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
- Oppenheimer, C., Scaillet, B., & Martin, R. S. (2011). Sulfur degassing from volcanoes: Source conditions, surveillance, plume chemistry and earth system impacts. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73, 363–421.
- Özbay, B. (2012a). Modeling the Effects of Meteorological Factors on SO₂ and PM₁₀ Concentrations with Statistical Approaches. *Clean - Soil, Air, Water*, 40(6), 571–577. <https://doi.org/10.1002/clen.201100356>
- Özbay, B. (2012b). Modeling the Effects of Meteorological Factors on SO₂ and PM₁₀ Concentrations with Statistical Approaches. *Clean - Soil, Air, Water*, 40(6), 571–577. <https://doi.org/10.1002/clen.201100356>

- Purwaningsih, E. (2019). Volcanic Contingency Plans Based on Geospatial Information Case Study: Mount Marapi West Sumatera. *Seminar Nasional Geomatika*. <https://doi.org/DOI:10.24895/SNG.2018.3-0.1081>
- PVMBG. (2023a). *Press Release Erupsi Gunung Marapi Sumatera BARAT 3 Desember 2023*. vsi.esdm.go.id. <https://vsi.esdm.go.id/press-release/press-release-erupsi-gunung-marapi-sumatera-barat-3-desember-2023>
- PVMBG. (2023b). *Press Release Erupsi Gunung Marapi Sumatera BARAT 3 Desember 2023*. vsi.esdm.go.id. <https://vsi.esdm.go.id/press-release/press-release-erupsi-gunung-marapi-sumatera-barat-3-desember-2023>
- Ridwan, R., & Kudsy, M. (2011). Parameterisasi Model Cuaca Wrf-Arw Untuk Mendukung Kegiatan Teknologi Modifikasi Cuaca (Tmc) Di Sumatera, Sulawesi, Dan Jawa. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v12i1.2184>
- Robock, A. (2000). Ic Eruptions. *Reviews of Geophysics*, 1998, 191–219.
- Ruiz, J. J., Saulo, C., & Nogués-Paegle, J. (2010). WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. *Monthly Weather Review*, 138(8), 3342–3355. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3358.1>
- Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S., & Xiaoyan Tang. (1990). The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10). <https://doi.org/10.1029/jd095id10p16343>
- Stuefer, M., Freitas, S. R., Grell, G., Webley, P., Peckham, S., McKeen, S. A., & Egan, S. D. (2013). Inclusion of ash and SO₂ emissions from volcanic eruptions in WRF-Chem: development and some applications. *Geoscientific Model Development*, 6(2), 457–468. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-457-2013>
- Tasić, V., Kovačević, R., & Milošević, N. (2013). Investigating the impacts of winds on SO₂ concentrations in Bor, Serbia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1(2), 141–151. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2013.01.0010>
- Turney. (2022). *Pearson Correlation Coefficient (r) | Guide & Examples*. Scribbr. <https://www.scribbr.com/statistics/pearson-correlation-coefficient/>
- Xu, M., Jin, J., Wang, G., Segers, A., Deng, T., & Lin, H. X. (2021). Machine learning based bias correction for numerical chemical transport models. *Atmospheric Environment*, 248(January), 118022. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118022>
- Zulistyawan, K. A., Virgianto, R. H., & Wicaksono, N. R. W. (2024). SO₂ Dispersion Simulation During Mount Merapi Eruption Using WRF-Chem Model (Case Study on June 21–23, 2020). Dalam H. and H. M. and T. and N. G. A. and B. A. and E. S. Lestari Sophia and Santoso (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science* (hlm. 1–11). Springer Nature Singapore.