

Analisis Perubahan Konsentrasi SO₂ Akibat Erupsi di Gunung Semeru Menggunakan Citra *Sentinel-5P* Tahun 2021 – 2026

Maysadora Tarabetsi Binti¹, Feny Arafah², Adkha Yulianandha Mabur³

¹NIM 2225040, Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional Malang

²NIP.P.1031500516, Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional Malang

³NIP.P. 1031700526, Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional Malang

Email: maysadora05@gmail.com

ABSTRAK

Gunung Semeru merupakan salah satu gunung api paling aktif di Indonesia yang menghasilkan emisi sulfur dioksida (SO₂) saat erupsi. Perubahan konsentrasi SO₂ berpotensi menjadi salah satu indikator aktivitas vulkanik, namun perlu dievaluasi keterkaitan aktivitas vulkanik pada status aktivitas Level III (Siaga) dan Level IV (Awat) serta pola persebarannya berdasarkan arah angin dominan untuk mendukung pemantauan Gunung. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan konsentrasi SO₂ akibat erupsi Gunung Semeru pada status aktivitas Level III (Siaga) dan Level IV (Awat) selama periode 2021–2026 serta menganalisis arah persebaran spasial SO₂ berdasarkan arah angin dominan menggunakan citra *Sentinel-5P Level-3* (OFFL). Data diolah menggunakan *Google Earth Engine* pada *buffer* 15 km dari kawah Gunung Semeru. Analisis dilakukan terhadap konsentrasi maksimum harian dan bulanan, dilanjutkan dengan regresi linier sederhana dan analisis *windrose*. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum SO₂ pada periode harian mencapai 6,22 µg/m³, sedangkan pada periode bulanan mencapai 5,97 µg/m³. Hasil analisis regresi menunjukkan hubungan yang lemah antara konsentrasi SO₂ dan aktivitas vulkanik, dengan nilai R² sebesar 0,0158 – 0,1809. Selain itu, pola persebaran SO₂ tidak selalu mengikuti arah angin dominan sehingga wilayah yang berpotensi terdampak bervariasi pada setiap periode pengamatan. Secara keseluruhan, *Sentinel-5P* mampu memantau perubahan konsentrasi dan persebaran SO₂, meskipun hubungan dengan aktivitas vulkanik tidak selalu kuat.

Kata kunci: Gunung Semeru, sulfur dioksida (SO₂), *Sentinel-5P*, *Google Earth Engine*, aktivitas vulkanik, arah angin.

ABSTRACT

Mount Semeru is one of the most active volcanoes in Indonesia, emitting sulfur dioxide (SO₂) during eruptions. Changes in SO₂ concentration have the potential to serve as an indicator of volcanic activity; however, it is necessary to evaluate the relationship between volcanic activity at Activity Levels III (Alert) and IV (Danger) and the dispersion patterns of SO₂ based on prevailing wind directions to support the monitoring of the volcano. This study aims to analyze changes in SO₂ concentrations resulting from Mount Semeru's eruptions at Activity Levels III (Alert) and IV (Danger) during the 2021–2026 period, as well as to analyze the spatial distribution of SO₂ based on prevailing wind directions using Sentinel-5P Level-3 (OFFL) imagery. Data were processed using Google Earth Engine within a 15-km buffer zone around the Mount Semeru crater. Analyses were conducted on daily and monthly maximum concentrations, followed by simple linear regression and wind rose analysis. The results showed that the maximum daily SO₂ concentration reached 6.22 µg/m³, while the maximum monthly concentration reached 5.97 µg/m³. The regression analysis results indicate a weak relationship between SO₂ concentrations and volcanic activity, with R² values ranging from 0.0158 to 0.1809. Furthermore, the distribution pattern of SO₂ does not always follow the prevailing wind direction, so the areas potentially affected vary across each observation period. Overall, Sentinel-5P is capable of monitoring changes in SO₂ concentration and distribution, although the relationship with volcanic activity is not always strong.

Keywords: *Mount Semeru, sulfur dioxide (SO₂), Sentinel-5P, Google Earth Engine, volcanic activity, wind direction.*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aktivitas gunung api dapat memengaruhi kondisi lingkungan dan atmosfer, salah satunya melalui pelepasan sulfur dioksida (SO_2) dari proses *degassing* dan erupsi. SO_2 dapat memengaruhi kualitas udara dan lingkungan, sehingga pemantauannya penting dalam mitigasi bencana vulkanik (Putri et al., 2023; Priatna & Primulyana, 2020). Namun, pengukuran langsung emisi gas vulkanik memiliki keterbatasan karena kondisi kawah yang berbahaya dan sulit diakses. Penginderaan jauh menjadi alternatif untuk memantau distribusi SO_2 secara luas dan berkelanjutan (Yusuf, 2017).

Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) dengan sensor *TROPOspheric Monitoring Instrument* (TROPOMI) mampu mendeteksi SO_2 dan telah dimanfaatkan untuk pemantauan gas vulkanik. Sihotang et al. (2022) menunjukkan bahwa data *Sentinel-5P* efektif dalam memantau distribusi SO_2 pada Gunung Sinabung.

Gunung Semeru merupakan gunung api aktif tertinggi di Pulau Jawa dengan aktivitas erupsi yang tinggi dan berulang. Selama 2021–2026, Gunung Semeru beberapa kali mengalami peningkatan status hingga Level III (Siaga) dan Level IV (Awas), sehingga pemantauan SO_2 diperlukan sebagai salah satu parameter pendukung aktivitas vulkanik. Ramadhanni dan Jaelani (2025) telah menganalisis distribusi SO_2 Gunung Semeru menggunakan *Sentinel-5P* melalui *Google Earth Engine* pada periode 2019–2024, tetapi belum secara khusus mengkaji perubahan SO_2 pada periode status Level III dan Level IV.

Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis perubahan konsentrasi SO_2 menggunakan citra *Sentinel-5P* pada Januari 2021–Januari 2026, dengan fokus pada periode Gunung Semeru berstatus Level III (Siaga) dan Level IV (Awas). Penelitian ini diharapkan memberikan informasi mengenai dinamika konsentrasi SO_2 selama peningkatan aktivitas Gunung Semeru serta mendukung pemantauan bencana vulkanik berbasis penginderaan jauh.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perubahan konsentrasi SO₂ Gunung Semeru pada saat status aktivitas Level III (Siaga) dan Level IV (Awat) selama 2021–2026 berdasarkan citra *Sentinel-5P*?
2. Bagaimana arah persebaran spasial SO₂ berdasarkan arah angin dominan serta wilayah yang berpotensi terdampak selama periode tersebut?

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis perubahan konsentrasi SO₂ Gunung Semeru pada saat status aktivitas Level III (Siaga) dan Level IV (Awat) selama 2021–2026 menggunakan citra *Sentinel-5P*.
2. Menganalisis arah persebaran spasial SO₂ berdasarkan arah angin dominan serta mengidentifikasi wilayah yang berpotensi terdampak.

Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai perubahan konsentrasi SO₂ Gunung Semeru selama periode aktivitas Level III dan Level IV serta menjadi referensi pemanfaatan penginderaan jauh untuk pemantauan gas vulkanik.
2. Memberikan informasi mengenai arah persebaran SO₂ berdasarkan arah angin dominan dan wilayah yang berpotensi terdampak sebagai data pendukung pemantauan serta interpretasi persebaran gas vulkanik.

1.2 Kajian Literatur

Gunung Api

Gunung api merupakan bentukan geologi akibat aktivitas vulkanisme yang menjadi karakteristik wilayah Indonesia pada jalur *Pacific Ring of Fire*. Pelepasan gas vulkanik, khususnya SO₂, menjadi salah satu indikator penting aktivitas gunung api karena berkaitan dengan dinamika magma. Peningkatan SO₂ juga dapat berkaitan dengan peningkatan aktivitas vulkanik dan erupsi (Adri et al., 2021; Ramadhanni & Jaelani, 2025).

Tingkat Aktivitas Gunung Api

Tingkat aktivitas gunung api merupakan indikator penting dalam pemantauan aktivitas vulkanik dan mitigasi erupsi. Berdasarkan Permen ESDM Nomor 15 Tahun 2011, tingkat aktivitas gunung api di Indonesia dibagi menjadi empat level, yaitu Level I (Normal), Level II (Waspada), Level III (Siaga), dan Level IV (Awat). Karakteristik masing-masing tingkat aktivitas disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tingkat Aktivitas Gunung Api

Tingkat Aktivitas	Deskripsi
Level I (Normal)	Hasil pengamatan visual dan instrumental fluktuatif, tetapi tidak memperlihatkan peningkatan aktivitas yang signifikan.
Level II (Waspada)	Hasil pengamatan visual dan instrumental mulai memperlihatkan peningkatan aktivitas. Pada beberapa gunung api dapat terjadi erupsi.
Level III (Siaga)	Hasil pengamatan visual dan instrumental memperlihatkan peningkatan aktivitas yang semakin nyata atau gunung api mengalami erupsi (erupsi mengancam sekitar kawah tapi bukan pemukiman).
Level IV (Awat)	Hasil pengamatan visual dan instrumental teramat mengalami peningkatan aktivitas yang semakin nyata atau gunung api mengalami erupsi (erupsi mengancam pemukiman).

Jenis Gempa Vulkanik

Gempa vulkanik merupakan parameter penting dalam pemantauan aktivitas gunung api karena mencerminkan pergerakan magma, gas, dan fluida di dalam sistem vulkanik. Aktivitas Gunung Semeru menghasilkan berbagai jenis gempa, termasuk gempa letusan/erupsi, hembusan, harmonik, dan vulkanik dalam yang digunakan dalam penelitian ini. Aktivitas seismik berkaitan dengan proses degassing dan pelepasan gas vulkanik. Pergerakan fluida atau gas dalam saluran magma dapat menghasilkan sinyal seismik tertentu (Chouet, 1985; Johnson & Lees, 2000; Fee et al., 2010). Hubungan antara aktivitas seismik dan emisi SO₂ juga telah dilaporkan oleh Nadeau et al. (2011) dan Salerno et al. (2018). Oleh karena itu, data kegempaan digunakan sebagai parameter pendukung dalam menginterpretasikan perubahan emisi SO₂ Gunung Semeru.

Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunung Api

Kawasan Rawan Bencana (KRB) merupakan wilayah yang berpotensi terdampak bahaya erupsi gunung api. Berdasarkan peta KRB Gunung Semeru, jangkauan maksimum awan panas diperkirakan sekitar 14 km dari kawah aktif. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan radius 15 km sebagai *Area of Interest* (AOI) untuk mencakup wilayah potensi bahaya dan persebaran emisi SO₂. Pemilihan radius tersebut juga sejalan dengan penelitian Ramadhanni dan Jaelani (2025) yang menggunakan radius 15 km dalam analisis SO₂ Gunung Semeru berbasis Sentinel-5P.

Sulfur Dioksida (SO₂)

Sulfur dioksida (SO₂) merupakan gas yang dilepaskan selama proses *degassing* magma dan menjadi salah satu parameter penting untuk memantau perubahan aktivitas magmatik (Priatna & Primulyana, 2020). Pemantauan menggunakan Sentinel-5P/TROPOMI menghasilkan data *Vertical Column Density* (VCD) dalam satuan mol/m², yang menunjukkan jumlah SO₂ dalam kolom atmosfer dan bukan konsentrasi langsung di permukaan (Theys et al., 2017). Dalam penelitian ini, nilai VCD dikonversi ke satuan µg/m³ menggunakan massa molar SO₂ dan asumsi ketebalan atmosfer 13.000 m. Hasil konversi digunakan untuk menganalisis pola spasial dan temporal emisi SO₂ Gunung Semeru. Namun, karena VCD merepresentasikan total SO₂ dalam kolom atmosfer, nilai µg/m³ hasil konversi merupakan estimasi dan tidak dapat disamakan secara langsung dengan konsentrasi SO₂ di permukaan. Oleh karena itu, perbandingan dengan baku mutu udara ambien berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021 bersifat indikatif.

Pelepasan dan Persebaran SO₂ Akibat Erupsi

Emisi SO₂ gunung api berkaitan dengan proses *degassing* magma dan dapat mencerminkan perubahan aktivitas vulkanik. Setelah dilepaskan, persebaran SO₂ dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin. Arah angin menentukan pola transportasi (*downwind*), sedangkan kecepatan angin memengaruhi pengenceran dan jangkauan gas. Angin lemah cenderung menyebabkan akumulasi SO₂ di sekitar sumber, sedangkan angin kuat dapat memperluas jangkauan penyebarannya (Theys et al., 2017). Pada Gunung Semeru, Ramadhanni dan Jaelani (2025) menunjukkan adanya keterkaitan antara perubahan emisi SO₂ dan aktivitas kegempaan pada periode 2019–2024. Namun, hubungan tersebut tidak selalu konsisten pada setiap periode erupsi sehingga SO₂ perlu dianalisis bersama parameter vulkanik lainnya. Dengan demikian, data *Sentinel-5P* dapat

digunakan untuk mengkaji perubahan spasial-temporal emisi SO₂ dan mendukung interpretasi aktivitas Gunung Semeru.

Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh merupakan teknologi untuk memperoleh informasi mengenai objek atau fenomena di permukaan bumi dan atmosfer melalui sensor tanpa kontak langsung (Lillesand & Kiefer, 2015). Data diperoleh melalui perekaman radiasi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan objek, sehingga memungkinkan pengamatan wilayah secara luas dan berkala (Curran, 1985; Jensen, 2016).

Berdasarkan sumber energinya, penginderaan jauh dibedakan menjadi sistem pasif dan aktif. Penelitian ini menggunakan sistem pasif melalui satelit *Sentinel-5P/TROPOMI* untuk mendeteksi dan menganalisis distribusi SO₂ di atmosfer Gunung Semeru. Penggunaan data satelit memungkinkan analisis spasial dan temporal emisi SO₂ tanpa pengukuran langsung di lapangan.

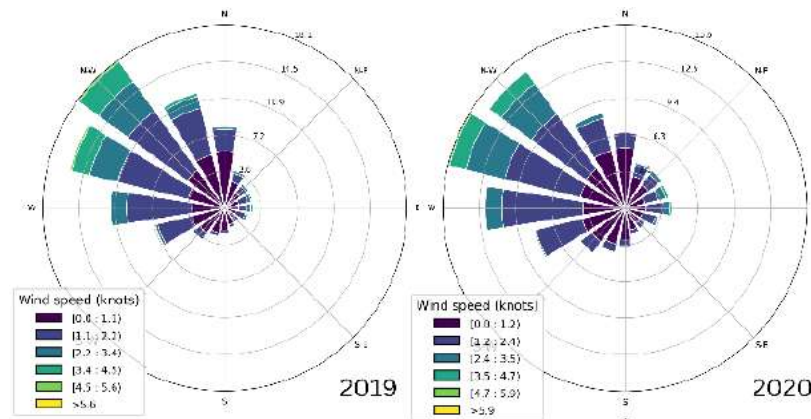
Sentinel-5P TROPOMI

Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) merupakan satelit pengamatan atmosfer yang membawa instrumen TROPOMI untuk mendeteksi berbagai gas atmosfer, termasuk SO₂, dan dimanfaatkan dalam pemantauan aktivitas vulkanik (ESA, 2024; Theys et al., 2017). Deteksi SO₂ menghasilkan *Vertical Column Density* (VCD) dalam satuan mol/m², yang menunjukkan jumlah SO₂ dalam kolom atmosfer dan bukan konsentrasi langsung di permukaan (Platt & Stutz, 2008; Theys et al., 2017). Dalam penelitian ini digunakan data SO₂ Level-2 OFFL dari Sentinel-5P melalui *Google Earth Engine* untuk menganalisis pola spasial dan temporal emisi SO₂ Gunung Semeru. Karena VCD merepresentasikan kolom atmosfer, hasil konversi ke µg/m³ merupakan estimasi dan tidak secara langsung menunjukkan konsentrasi SO₂ di permukaan.

Arah Angin

Angin berperan penting dalam transportasi dan dispersi SO₂ di atmosfer. Arah angin menentukan arah persebaran (*downwind*), sedangkan kecepatan angin memengaruhi pengenceran dan jangkauan gas. Oleh karena itu, kesesuaian arah angin dengan pola *plume* SO₂ dapat digunakan untuk memperkuat interpretasi persebaran emisi vulkanik (Theys et al., 2019). Pola arah dan kecepatan angin dapat dianalisis menggunakan *windrose*, yaitu diagram yang menunjukkan frekuensi arah dan kelas

kecepatan angin. Dalam penelitian ini, data ERA5 digunakan untuk menghasilkan *windrose* dan dibandingkan dengan pola persebaran SO₂ dari *Sentinel-5P* untuk mengidentifikasi pengaruh angin terhadap distribusi SO₂ Gunung Semeru (Hersbach et al., 2020).

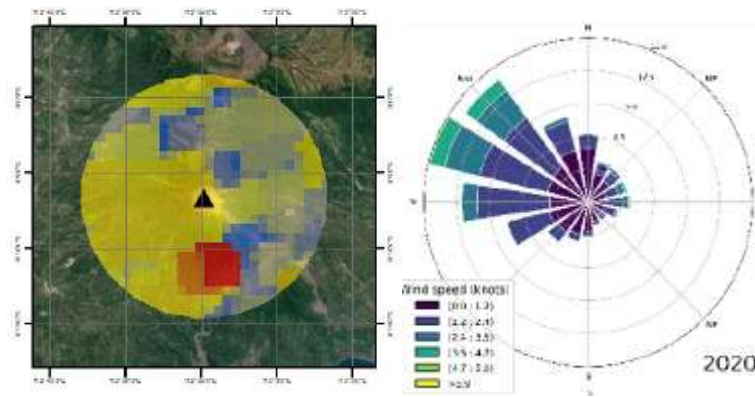


Gambar 1. Diagram *Windrose* (Ramadhanni & Jaelani, 2025)

Kesesuaian Konsentrasi SO₂ dengan Arah Angin

Kesesuaian antara persebaran SO₂ dan arah angin digunakan untuk menginterpretasikan pola transportasi gas vulkanik. Data ERA5 digunakan untuk menentukan arah angin dominan, kemudian dibandingkan dengan pola *plume* SO₂ dari *Sentinel-5P* pada periode yang sama. Secara umum, SO₂ cenderung tertransportasi mengikuti arah angin (*downwind*), meskipun persebarannya juga dipengaruhi oleh kecepatan angin, turbulensi, dan topografi (Hersbach et al., 2020; Theys et al., 2019).

Dalam penelitian ini, arah angin ditentukan berdasarkan komponen angin zonal dan meridional, kemudian dibandingkan dengan arah persebaran SO₂ maksimum. Kesesuaian arah *plume* dengan angin dominan digunakan sebagai indikator pendukung dalam menginterpretasikan pola dispersi SO₂ Gunung Semeru, sebagaimana ditunjukkan oleh Ramadhanni dan Jaelani (2025).

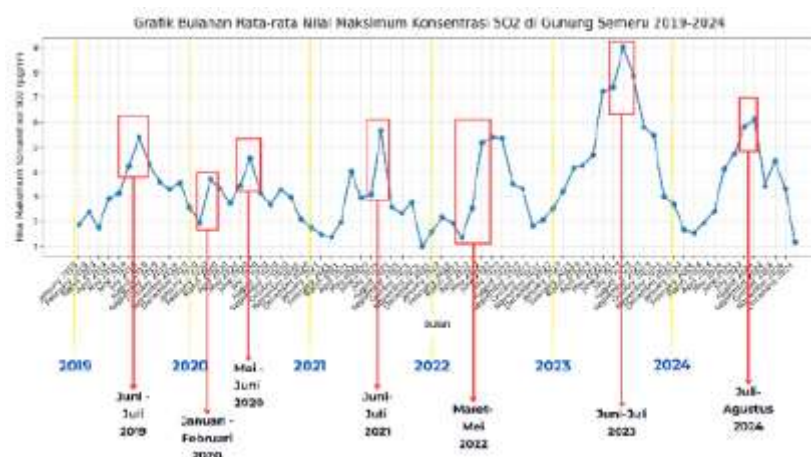


Gambar 2. Analisa Kesesuaian Konsentrasi (Ramadhanni & Jaelani, 2025)

Konsep Anomali dalam Analisis Konsentrasi

Anomali konsentrasi SO_2 merupakan perubahan atau lonjakan nilai yang menyimpang dari pola normal dan dapat menjadi indikator pendukung perubahan aktivitas vulkanik. Pada Gunung Semeru, lonjakan SO_2 dilaporkan berdekatan dengan periode peningkatan aktivitas erupsi (Ramadhanni & Jaelani, 2025).

Dalam penelitian ini, anomali didefinisikan sebagai peningkatan konsentrasi maksimum SO_2 yang menyimpang selama periode Gunung Semeru berstatus Level III (Siaga) dan Level IV (Awas) pada 2021–2026. Periode anomali kemudian dibandingkan dengan data aktivitas harian MAGMA Indonesia/PVMBG, khususnya jumlah gempa erupsi atau letusan dan status aktivitas, untuk mendukung interpretasi hubungan antara emisi SO_2 dan aktivitas vulkanik. Analisis ini bersifat deskriptif dan bukan sebagai prediksi erupsi kuantitatif.



Gambar 3. Grafik Anomali (Ramadhanni & Jaelani, 2025)

Uji Regresi Linear Sederhana

Regresi linier sederhana digunakan untuk menganalisis hubungan linier antara satu variabel independen dan satu variabel dependen (Sugiyono, 2019). Dalam penelitian ini, konsentrasi SO₂ hasil *Sentinel-5P* digunakan sebagai variabel independen (X), sedangkan aktivitas vulkanik Gunung Semeru yang direpresentasikan oleh jumlah kejadian gempa digunakan sebagai variabel dependen (Y), dengan persamaan $Y = a + bX$. Hubungan kedua variabel dianalisis menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan koefisien korelasi (r). R^2 menunjukkan proporsi variasi aktivitas kegempaan yang dapat dijelaskan oleh konsentrasi SO₂, sedangkan r menunjukkan arah dan tingkat keeratan hubungan kedua variabel (Ghozali, 2018; Montgomery et al., 2021). Interpretasi nilai $|r|$ terdiri atas: 0,00–0,199 sangat rendah; 0,20–0,399 rendah; 0,40–0,599 sedang; 0,60–0,799 kuat; dan 0,80–1,000 sangat kuat (Sugiyono, 2019).

Dalam penelitian ini, regresi dilakukan secara terpisah antara konsentrasi SO₂ dan jumlah gempa letusan/erupsi, hembusan, harmonik, serta vulkanik dalam pada periode 2021–2026. Hasil analisis berupa persamaan regresi, R^2 , dan r digunakan untuk menginterpretasikan arah, kekuatan hubungan, serta kemampuan konsentrasi SO₂ dalam menjelaskan variasi aktivitas kegempaan Gunung Semeru.

Google Earth Engine

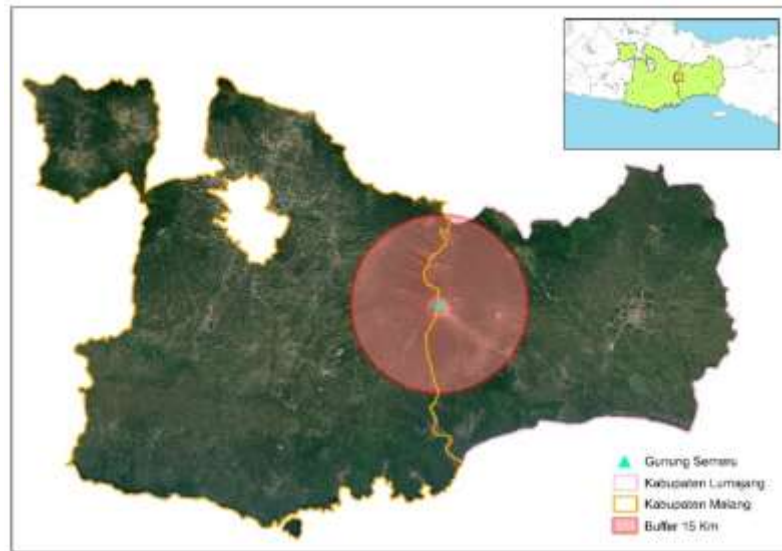
Google Earth Engine (GEE) merupakan platform komputasi berbasis *cloud* untuk pengolahan dan analisis data geospasial berskala besar, termasuk data penginderaan jauh (Gorelick et al., 2017). GEE menyediakan akses terhadap berbagai dataset satelit, termasuk *Sentinel-5P*, sehingga mendukung analisis spasial dan temporal secara efisien. Dalam penelitian ini, GEE digunakan untuk mengolah data *Sentinel-5P* guna memperoleh dan menganalisis konsentrasi SO₂ Gunung Semeru pada periode 2021–2026.

2. METODOLOGI

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini berlokasi di kawasan Gunung Semeru, gunung api aktif tertinggi di Pulau Jawa dengan ketinggian ±3.676 mdpl, yang secara geografis berada pada sekitar 8°06' LS dan 112°55' BT. Secara administratif, Gunung Semeru berada di Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang. Area penelitian mencakup wilayah dalam radius 15

km dari kawah Gunung Semeru, yang ditentukan berdasarkan kawasan rawan bencana (KRB) dan potensi persebaran emisi SO₂.



Gambar 4. Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan Penelitian

A. Alat Penelitian

1. Laptop
2. Google Earth Engine (GEE)
3. ArcMap 10.8
4. Python
5. Microsoft Excel
6. Microsoft Word

B. Data Penelitian

1. Citra Sentinel-5P Level-3 OFFL – data SO₂ periode 2021–2026 pada saat Gunung Semeru berstatus Level III dan IV; sumber: Google Earth Engine.
2. Shapefile batas administrasi Kabupaten Lumajang dan Malang – untuk menentukan batas wilayah penelitian; sumber: Ina-Geoportal.
3. Data arah angin ERA5 – untuk analisis arah dan persebaran SO₂ menggunakan *windrose*; sumber: Copernicus Climate Data Store (CDS).
4. Data kegempaan dan erupsi Gunung Semeru – untuk menganalisis hubungan aktivitas vulkanik dengan konsentrasi SO₂; sumber: PVMBG/MAGMA Indonesia.

5. Citra Google/SAS Planet – sebagai data pendukung visualisasi kondisi wilayah Gunung Semeru.

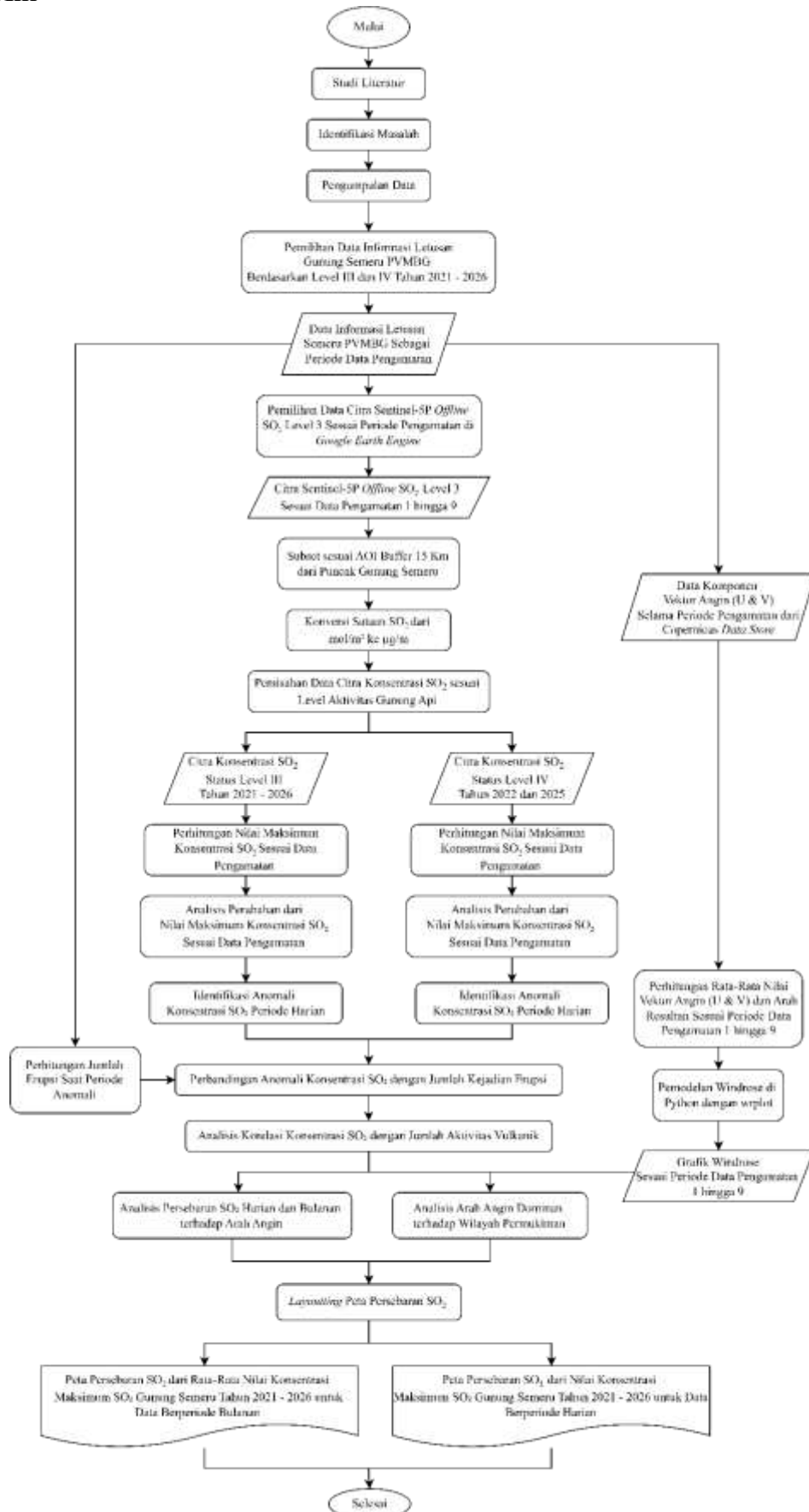
C. Periode Pengamatan

Pemilihan data penelitian didasarkan pada periode aktivitas vulkanik Gunung Semeru yang berada pada Level III (siaga) dan Level IV (awas) selama tahun 2021 hingga 2026 yang bersumber dari sumber resmi MAGMA. Daftar periode dan tanggal status aktivitas tersebut disajikan pada tabel di bawah ini, yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dan data pengamatan dalam analisis data.

Tabel 2. Daftar Periode Data Level III dan IV Gunung Semeru 2021 - 2026

<u>Pengamatan</u>	<u>Tahun</u>	<u>Periode</u>	<u>Skala Periode</u>	<u>Status Aktivitas</u>
1	2021	17 Desember - 31 Desember	Harian	Level III (Siaga)
2	2022	1 Januari - 4 Desember	Bulanan	Level III (Siaga)
3	2022	5 Desember - 9 Desember	Harian	Level IV (Awat)
4	2022	10 Desember - 31 Desember	Harian	Level III (Siaga)
5	2023	1 Januari - 31 Desember	Bulanan	Level III (Siaga)
6	2024	1 Januari - 15 Juli	Bulanan	Level III (Siaga)
7	2025	19 November - 29 November	Harian	Level IV (Awat)
8	2025	30 November - 31 Desember	Harian	Level III (Siaga)
9	2026	1 Januari - 30 April	Bulanan	Level III (Siaga)

2.3 Diagram Alir



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

2.4 Pengolahan Data

Pengolahan data meliputi citra *Sentinel-5P*, data arah angin ERA5, dan data aktivitas vulkanik Gunung Semeru.

2.4.1 Pengolahan Citra Sentinel-5P untuk Konsentrasi SO₂

Data *Sentinel-5P* OFFL Level-3 SO₂ diolah menggunakan *Google Earth Engine* (GEE) pada AOI berupa buffer 15 km dari kawah Gunung Semeru. Data harian diolah menggunakan *maximum composite* untuk memperoleh nilai SO₂ maksimum setiap piksel, kemudian dikonversi dari mol/m² menjadi µg/m³ dan diekspor dalam format GeoTIFF. Data bulanan digunakan untuk memperoleh nilai maksimum harian, maksimum bulanan, dan rata-rata maksimum bulanan. Selanjutnya, data di-*clip* di ArcGIS dan direklasifikasi menjadi tujuh kelas konsentrasi 0–7 µg/m³ untuk menganalisis pola persebaran dan anomali SO₂.

2.4.2 Pengolahan Data Arah Angin

Data ERA5 berupa komponen angin zonal (u10) dan meridional (v10) diolah menggunakan Python. Data NetCDF dihitung untuk memperoleh arah dan kecepatan angin, kemudian divisualisasikan dalam bentuk *windrose* untuk menentukan arah angin dominan. Hasilnya dibandingkan dengan pola persebaran SO₂ *Sentinel-5P* pada periode yang sama.

2.4.3 Pengolahan Data Aktivitas Vulkanik

Data aktivitas vulkanik dari MAGMA Indonesia/PVMBG periode 2021–2026 direkap berdasarkan tanggal, meliputi gempa letusan/erupsi, hembusan, harmonik, dan vulkanik dalam. Data tersebut disesuaikan dengan data SO₂ dan digunakan untuk membandingkan periode anomali serta menganalisis hubungan antara konsentrasi SO₂ dan aktivitas kegempaan melalui regresi linier sederhana.

2.5 Analisis dan Penyajian Data

Analisis data dilakukan untuk menginterpretasikan perubahan konsentrasi SO₂, hubungan dengan aktivitas vulkanik, serta pola persebarannya berdasarkan kondisi arah angin di wilayah Gunung Semeru selama periode penelitian.

2.5.1 Perbandingan Anomali Konsentrasi SO₂ dengan Aktivitas Vulkanik

Anomali diidentifikasi berdasarkan statistik konsentrasi SO₂ dan grafik tren harian serta bulanan. Periode anomali kemudian dibandingkan dengan data

aktivitas vulkanik MAGMA Indonesia/PVMBG. Hubungan konsentrasi SO_2 (X) dengan jumlah kejadian gempa (Y) dianalisis menggunakan regresi linier sederhana melalui persamaan regresi, koefisien korelasi (r), dan koefisien determinasi (R^2).

2.5.2 Analisis Persebaran Spasial Konsentrasi SO_2 dengan Arah Angin

Peta konsentrasi SO_2 *Sentinel-5P* dibandingkan dengan *windrose* ERA5 pada periode yang sama untuk mengidentifikasi arah *plume* dan pengaruh angin terhadap persebaran SO_2 . Wilayah administratif dan permukiman dalam AOI 15 km yang berada pada jalur persebaran SO_2 diidentifikasi sebagai wilayah yang berpotensi terdampak.

2.5.3 Analisis Arah Angin Dominan terhadap Wilayah Permukiman

Arah angin dominan dikelompokkan menjadi delapan sektor, yaitu N, NE, E, SE, S, SW, W, dan NW. Selanjutnya, sektor arah angin dibandingkan dengan posisi permukiman dalam AOI 15 km untuk mengidentifikasi wilayah yang berpotensi berada pada jalur transportasi SO_2 .

2.5.4 Visualisasi dan Penyajian Hasil

Hasil penelitian disajikan dalam bentuk peta persebaran SO_2 , grafik tren dan regresi, *windrose*, serta tabel statistik untuk menginterpretasikan perubahan emisi, aktivitas vulkanik, dan pola persebaran SO_2 .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan untuk mengetahui perubahan konsentrasi SO_2 , hubungannya dengan aktivitas vulkanik, serta pola persebarannya berdasarkan arah angin di Gunung Semeru.

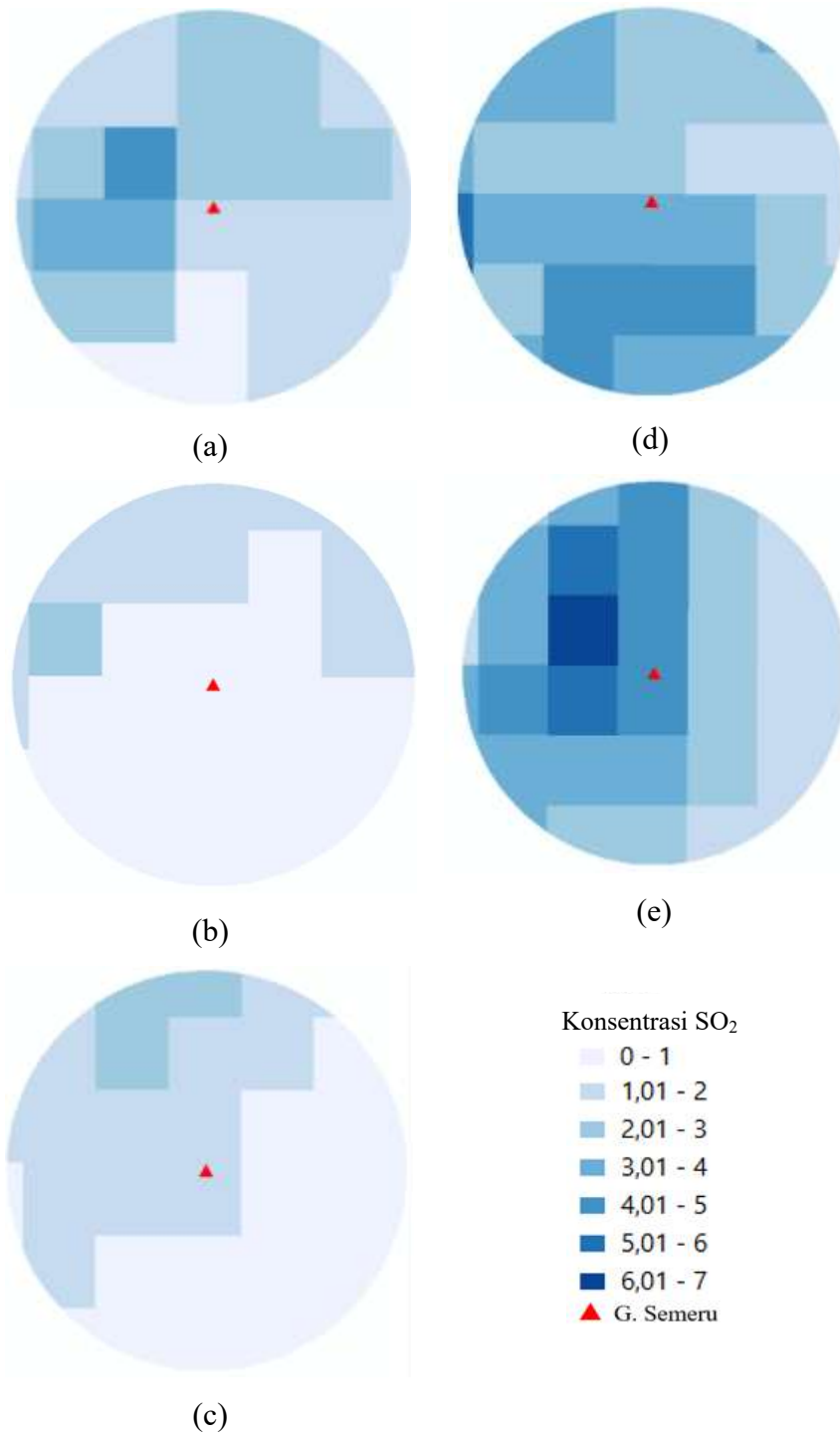
3.1 Perubahan Konsentrasi SO_2

Hasil pengolahan citra Sentinel-5P menunjukkan adanya variasi konsentrasi SO_2 pada sembilan periode pengamatan Gunung Semeru selama 2021–2026, baik secara harian maupun bulanan. Nilai konsentrasi maksimum digunakan untuk mengidentifikasi perubahan dan anomali SO_2 selama periode aktivitas Level III dan Level IV. Nilai maksimum sebesar $6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ masih berada di bawah baku mutu udara ambien berdasarkan PP Nomor 22 Tahun 2021, yaitu $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata tahunan dan $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata 24 jam. Namun, perbandingan tersebut bersifat indikatif karena

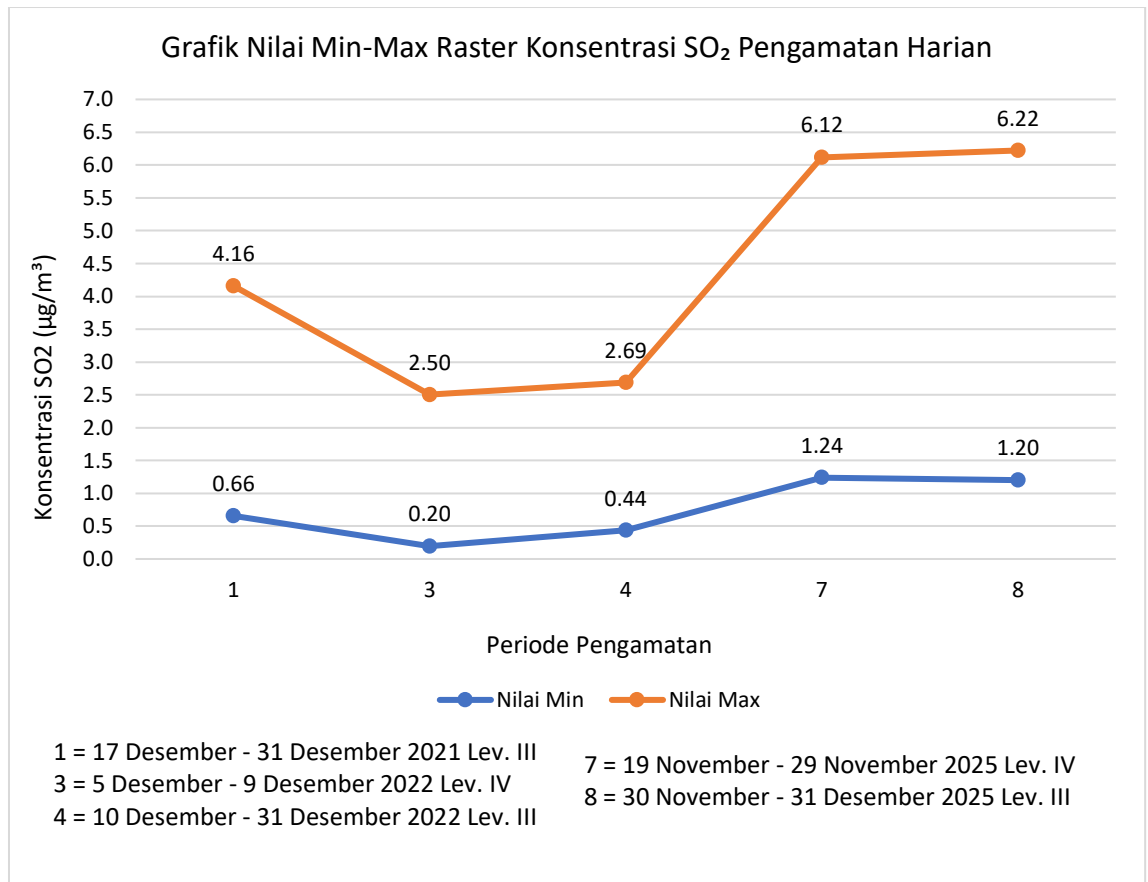
data Sentinel-5P merepresentasikan kolom atmosfer, bukan konsentrasi SO₂ hasil pengukuran langsung di permukaan.

3.1.1 Konsentrasi SO₂ Periode Harian

Distribusi konsentrasi maksimum SO₂ periode harian menunjukkan peningkatan yang paling menonjol pada Pengamatan 7 dan 8 (Gambar 6). Kedua periode tersebut memiliki nilai maksimum masing-masing 6,12 µg/m³ dan 6,22 µg/m³, dengan perluasan area konsentrasi >3 µg/m³ (Gambar 7 dan Tabel 3). Sebaliknya, Pengamatan 3 pada status Level IV (Awat) hanya mencapai 2,50 µg/m³. Pola tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ tidak memiliki kecenderungan yang konsisten berdasarkan status aktivitas Gunung Semeru.



Gambar 6. Hasil Konsentrasi Maksimal SO₂ Periode Pengamatan Harian
 (a) pengamatan 1, (b) pengamatan 3, (c) pengamatan 4, (d) pengamatan 7, (e) pengamatan 8



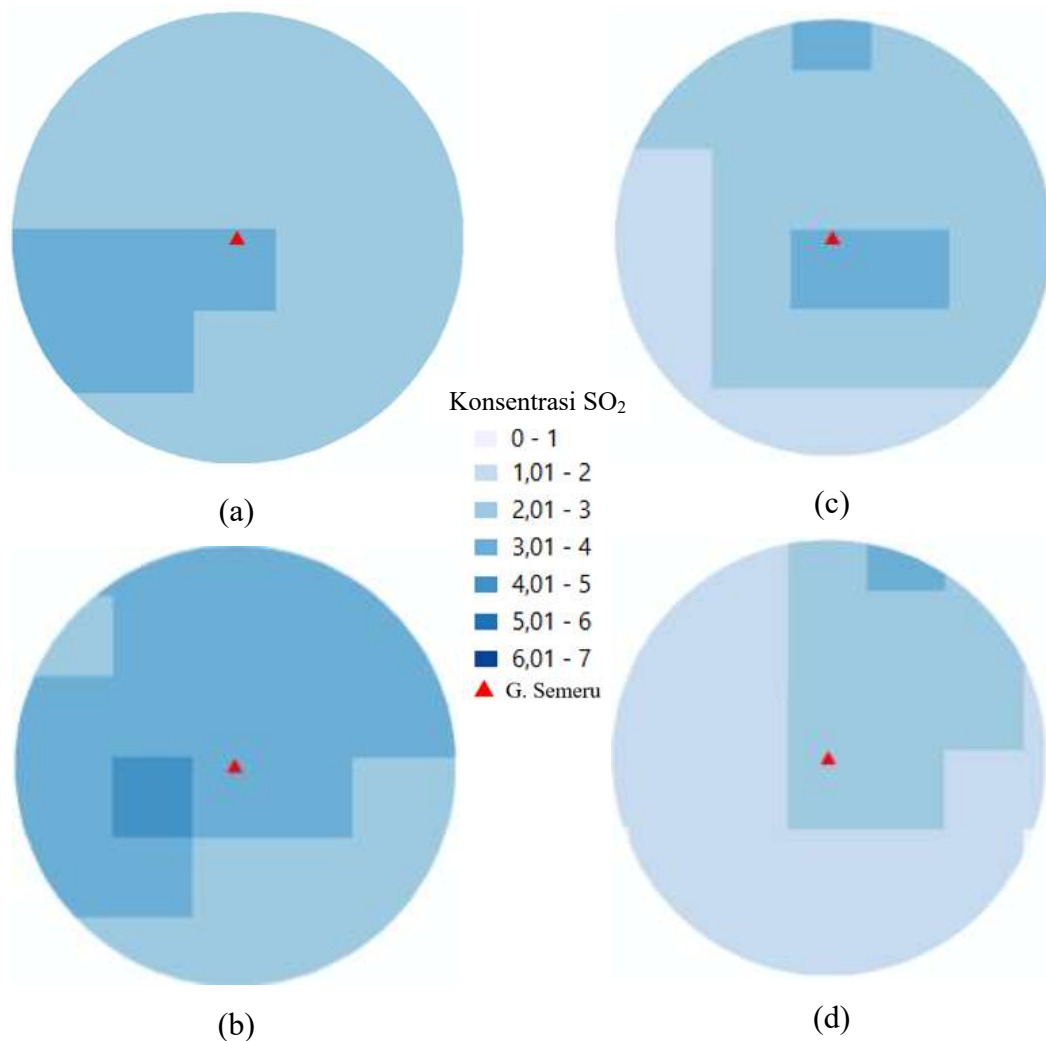
Gambar 7. Grafik Min-Max Raster SO₂ Harian

Tabel 3. Tabel Luas Konsentrasi SO₂ Periode Harian

Pengamatan	Status Aktivitas	Luas (Ha)						
		0 - 1 µg/m³	1,01 - 2 µg/m³	2,01 - 3 µg/m³	3,01 - 4 µg/m³	4,01 - 5 µg/m³	5,01 - 6 µg/m³	6,01 - 7 µg/m³
1	Level III (Siaga)	7689,8	27096,2	26961,9	5952,2	2976,5	-	
3	Level IV (Awas)	48434,2	19266,5	2975,9	-			
4	Level III (Siaga)	34460,4	30129,1	6087,1	-			
7	Level IV (Awas)	-	7274,7	28248,2	23795,3	10805,1	532,1	21,1
8	Level III (Siaga)	-	14894,6	17656,1	15433	13763,4	5952,9	2976,5

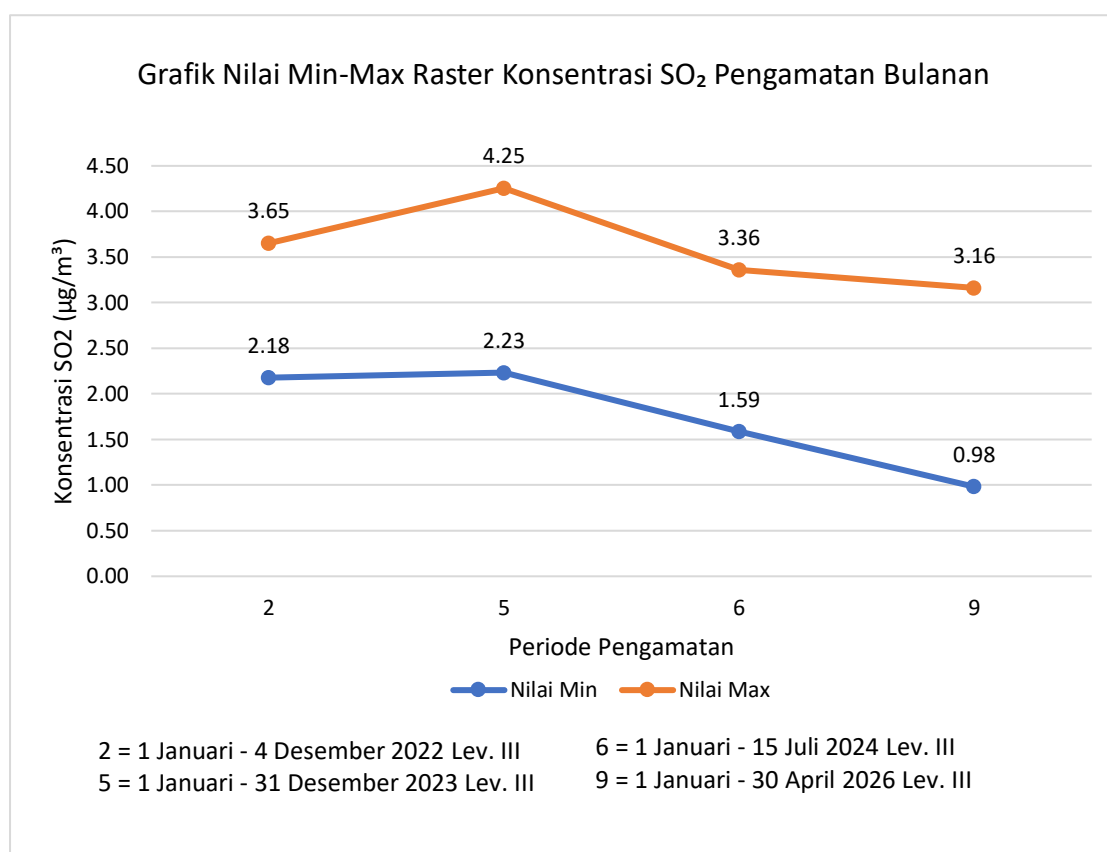
3.1.2 Konsentrasi SO₂ Periode Bulanan

Distribusi rata-rata maksimum SO₂ periode bulanan menunjukkan variasi yang lebih kecil dibandingkan periode harian (Gambar 8). Konsentrasi didominasi kelas 2,01–3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan peningkatan kelas 3,01–4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ terutama pada Pengamatan 5 dan 6 (Gambar 9 dan Tabel 4). Nilai maksimum tertinggi terdapat pada Pengamatan 5 sebesar 4,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang juga menjadi satu-satunya periode dengan kemunculan kelas 4,01–5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Setelah Pengamatan 5, konsentrasi maksimum dan luasan kelas konsentrasi tinggi cenderung menurun pada Pengamatan 6 dan 9, sementara konsentrasi >5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tidak ditemukan selama seluruh periode bulanan. Pola tersebut menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi SO₂ pada skala bulanan berlangsung relatif lebih stabil dibandingkan fluktuasi harian.



Gambar 8. Hasil Rata-Rata Maksimal SO₂ Periode Bulanan

(a) pengamatan 2, (b) pengamatan 5, (c) pengamatan 6, (d) pengamatan 9



Gambar 9. Grafik Min-Max Raster SO₂ Bulanan

Tabel 4. Tabel Luas Konsentrasi SO₂ Periode Bulanan

Pengamatan	Status Aktivitas	Luas (Ha)						
		0 - 1 µg/m³	1,01 - 2 µg/m³	2,01 - 3 µg/m³	3,01 - 4 µg/m³	4,01 - 5 µg/m³	5,01 - 6 µg/m³	6,01 - 7 µg/m³
2	Level III (Siaga)	-		55810,5	14866,1	-		
5	Level III (Siaga)	-		21220,4	46480,1	2976,1	-	
6	Level III (Siaga)	-	16283,5	46582,5	7810,6	-		
9	Level III (Siaga)	89,2	44277,4	24984,5	1325,4	-		

3.2 Analisis Anomali Konsentrasi SO₂

Analisis anomali menunjukkan adanya beberapa peningkatan konsentrasi SO₂ pada periode harian maupun bulanan. Tabel 5 menunjukkan bahwa anomali harian tertinggi terjadi pada Pengamatan 8 sebesar 6,22 µg/m³ pada 7 Desember 2025, sedangkan anomali terendah terdapat pada Pengamatan 3 sebesar 2,50 µg/m³ pada 6 Desember 2022. Pada periode bulanan, anomali tertinggi terjadi pada Pengamatan 5 sebesar 5,97 µg/m³ pada Juni 2023, sedangkan terendah pada Pengamatan 9 sebesar 2,18 µg/m³ pada Maret 2026 (Tabel 6).

Tabel 5. Tabel Nilai Anomali dan Tanggalnya (Harian)

Pengamatan	Skala Periode	Status Aktivitas	Tahun	Nilai Anomali (µg/m ³) dan Tanggal
1	Harian	Level III (Siaga)	2021	3,66 (18 Des); 4,16 (23 Des); 2,89 (28 Des)
3	Harian	Level IV (Awat)	2022	2,50 (6 Des)
4	Harian	Level III (Siaga)	2022	2,69 (10 Des); 2,43 (12 Des); 1,8 (17 Des)
7	Harian	Level IV (Awat)	2025	4,68 (21 Nov); 6,12 (28 Nov)
8	Harian	Level III (Siaga)	2025	3,34 (1 Des); 6,22 (7 Des); 3,22 (20 Des)

Tabel 6. Tabel Nilai Anomali dan Tanggalnya (Bulanan)

Pengamatan	Skala Periode	Status Aktivitas	Tahun	Nilai Max (µg/m ³) dan Tanggal
2	Bulanan	Level III (Siaga)	2022	3,45 (Januari); 4,07 (Agustus); 4,35 (Oktober)
5	Bulanan	Level III (Siaga)	2023	5,97 (Juni)
6	Bulanan	Level III (Siaga)	2024	5,17 (Juni)
9	Bulanan	Level III (Siaga)	2026	2,18 (Maret)

Perbandingan anomali SO₂ dengan aktivitas vulkanik menunjukkan pola yang berbeda antarperiode. Pada Pengamatan 3, konsentrasi SO₂ mencapai 2,50 µg/m³ pada 6 Desember 2022, sedangkan Pengamatan 8 mencapai 6,22 µg/m³ pada 7 Desember 2025. Anomali pada Pengamatan 8 bertepatan dengan 43 kejadian gempa letusan/erupsi, serta aktivitas gempa hambusan dan harmonik, menunjukkan aktivitas vulkanik yang lebih

intens dibandingkan Pengamatan 3. Pada periode bulanan, Pengamatan 5 menunjukkan peningkatan konsentrasi SO_2 dari 3,77 menjadi 5,97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tetapi tidak diikuti peningkatan seluruh parameter aktivitas vulkanik. Sebaliknya, pada Pengamatan 6, peningkatan SO_2 dari 3,06 menjadi 5,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ diikuti peningkatan aktivitas letusan/erupsi, hembusan, harmonik, dan vulkanik dalam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keterkaitan SO_2 dengan aktivitas vulkanik tidak konsisten pada setiap periode, sehingga hubungan keduanya selanjutnya dievaluasi menggunakan analisis regresi.

3.3 Analisis Hubungan Konsentrasi SO_2 dengan Aktivitas Vulkanik

Berdasarkan Tabel 7, hubungan konsentrasi SO_2 dengan aktivitas vulkanik secara umum tergolong lemah, dengan nilai R^2 sebesar 0,0158–0,1809. Hubungan terkuat terdapat pada gempa harmonik periode bulanan, sedangkan hubungan terlemah terdapat pada gempa letusan/erupsi periode bulanan. Sebagian besar parameter menunjukkan hubungan positif, kecuali gempa vulkanik dalam periode harian yang menunjukkan hubungan negatif. Secara keseluruhan, rendahnya nilai R^2 menunjukkan bahwa variasi konsentrasi SO_2 hanya menjelaskan sebagian kecil variasi aktivitas vulkanik.

Tabel 7. Tabel Hasil Regresi Linier Konsentrasi SO_2 dengan Aktivitas Vulkanik

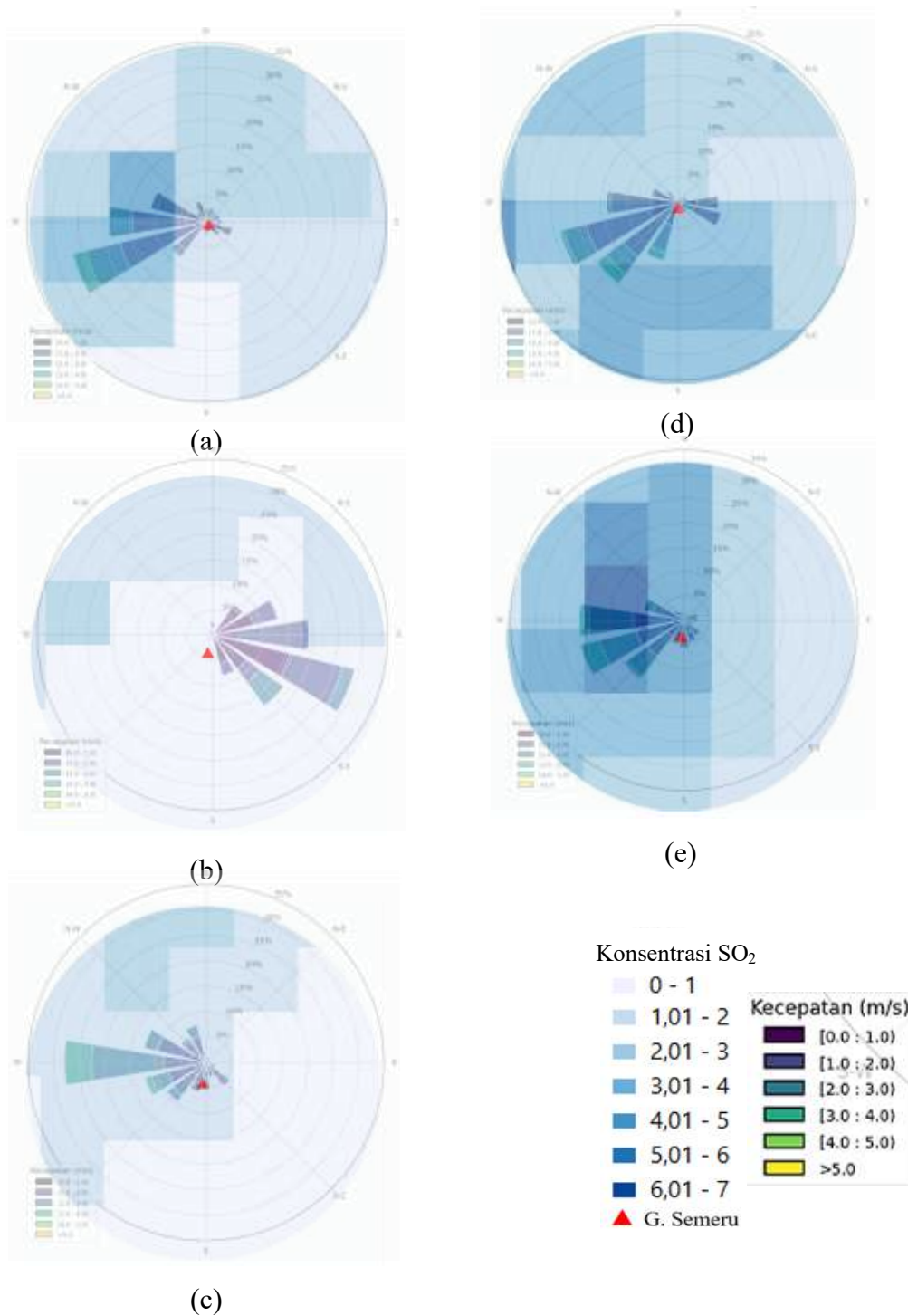
Variabel	Persamaan Regresi	R^2	r	Interpretasi
<u>Letusan/Erupsi</u> (Harian)	$y = 2,9787x + 25,423$	0,1144	0,338	<u>Rendah</u>
<u>Letusan/Erupsi</u> (Bulanan)	$y = 18,474x + 529,39$	0,0158	0,126	Sangat <u>Rendah</u>
<u>Hembusan</u> (Harian)	$y = 0,541x + 1,9906$	0,1042	0,323	<u>Rendah</u>
<u>Hembusan</u> (Bulanan)	$y = -0,1832x + 2,3172$	0,0815	0,286	<u>Rendah</u>
<u>Vulkanik Dalam</u> (Harian)	$y = -0,1832x + 2,3172$	0,0371	-0,193	Sangat <u>Rendah</u>
<u>Vulkanik Dalam</u> (Bulanan)	$y = 1,0011x + 7,8192$	0,0302	0,174	Sangat <u>Rendah</u>
<u>Harmonik</u> (Harian)	$y = 0,0596x + 1,9978$	0,0176	0,1327	Sangat <u>Rendah</u>

3.4 Persebaran Spasial SO₂ dan Arah Angin

Persebaran SO₂ dianalisis berdasarkan keterkaitan antara pola distribusi konsentrasi dengan arah angin dominan pada setiap periode pengamatan. Analisis ini digunakan untuk melihat kesesuaian arah pergerakan massa udara dengan lokasi konsentrasi SO₂ tertinggi serta mengidentifikasi wilayah yang berpotensi terdampak.

3.4.1 Pola Persebaran SO₂ Periode Harian dengan Arah Angin

Analisis persebaran SO₂ menunjukkan bahwa pola konsentrasi tidak selalu mengikuti arah angin dominan (Gambar 10). Berdasarkan Tabel 8, kesesuaian arah hanya terlihat pada Pengamatan 3, ketika massa udara bergerak menuju sektor barat–barat laut dan konsentrasi SO₂ tertinggi juga berada pada sektor tersebut. Pada Pengamatan 1, 4, 7, dan 8, konsentrasi tertinggi justru berada di sektor barat–barat laut, sedangkan angin dominan bergerak menuju timur–timur laut. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa arah angin dominan belum sepenuhnya menjelaskan lokasi konsentrasi SO₂ tertinggi.



Gambar 10. Analisa Persebaran & Arah Angin Pengamatan Periode Harian

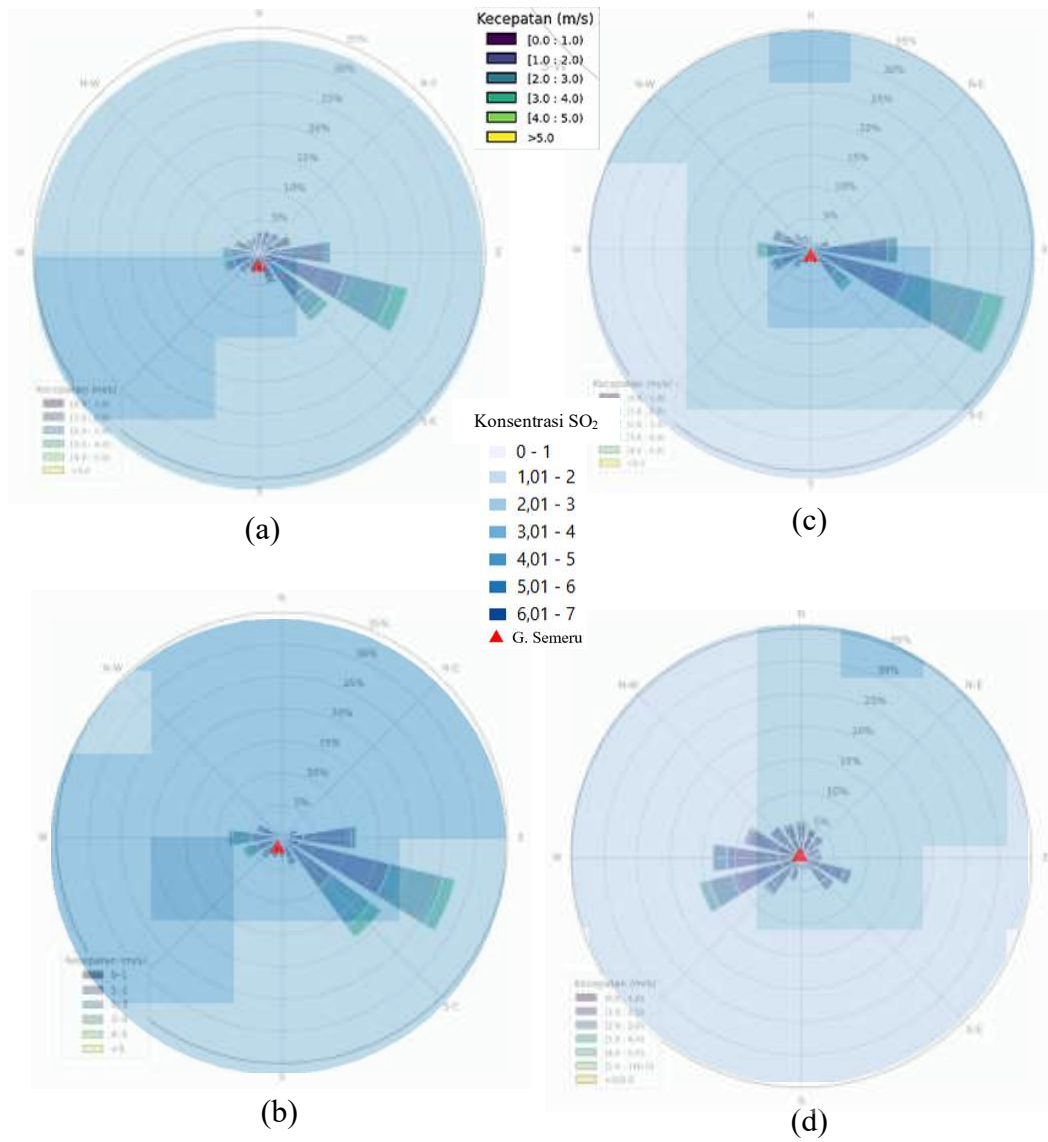
(a) pengamatan 1, (b) pengamatan 3, (c) pengamatan 4, (d) pengamatan 7, (e) pengamatan 8

Tabel 8. Tabel Arah Angin Dominan dan Lokasi Konsentrasi SO₂ (Harian)

Pengamatan	Arah Angin Dominan	Lokasi Konsentrasi SO₂ Tertinggi
1	Dari Barat Daya-Barat ke Timur-Timur Laut	Barat-Barat Laut
3	Dari Timur-Tenggara ke Barat-Barat Laut	Barat-Barat Laut
4	Dari Barat Daya-Barat ke Timur Laut-Timur	Barat Laut-Utara
7	Dari Barat Daya-Barat ke Timur Laut-Timur	Barat Daya-Barat
8	Dari Barat Daya-Barat ke Timur Laut-Timur	Barat-Barat Laut

3.4.2 Pola Persebaran SO₂ Periode Bulanan dengan Arah Angin

Pada periode bulanan, kesesuaian antara arah angin dominan dan lokasi konsentrasi SO₂ tertinggi terlihat pada Pengamatan 2, 5, dan 9 (Gambar 11 dan Tabel 9). Sebaliknya, Pengamatan 6 menunjukkan ketidaksesuaian, dengan konsentrasi tertinggi berada pada sektor timur-tenggara dan utara, sementara massa udara dominan bergerak dari timur-tenggara menuju barat-barat laut. Hasil ini menunjukkan bahwa arah angin berperan dalam transportasi SO₂, tetapi tidak selalu menjadi satu-satunya faktor yang menentukan pola persebarannya.



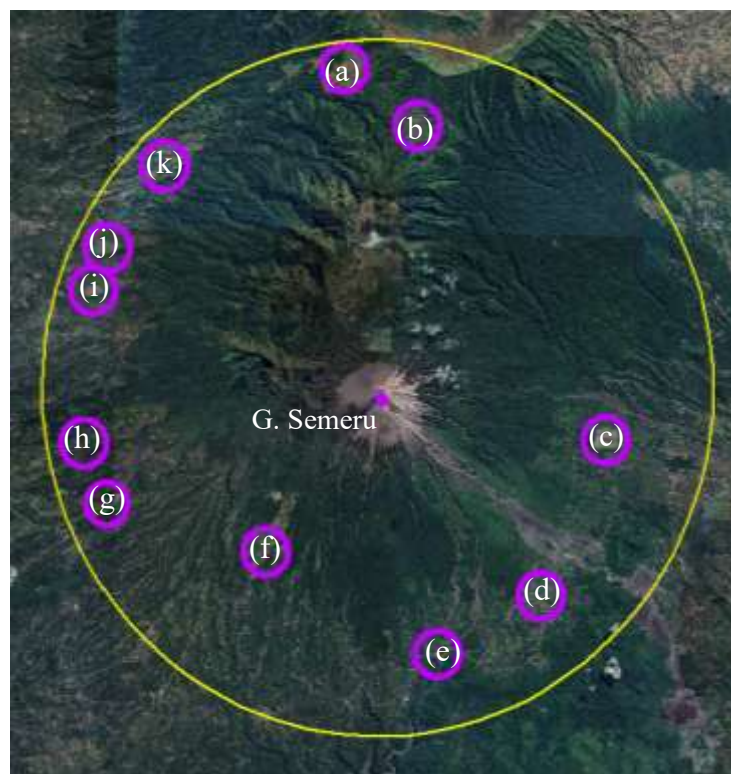
Gambar 11. Analisa Persebaran & Arah Angin Pengamatan Periode Harian
a) pengamatan 2, (b) pengamatan 5, (c) pengamatan 6, (d) pengamatan 9

Tabel 9. Tabel Arah Angin Dominan dan Lokasi Konsentrasi SO₂ (Bulanan)

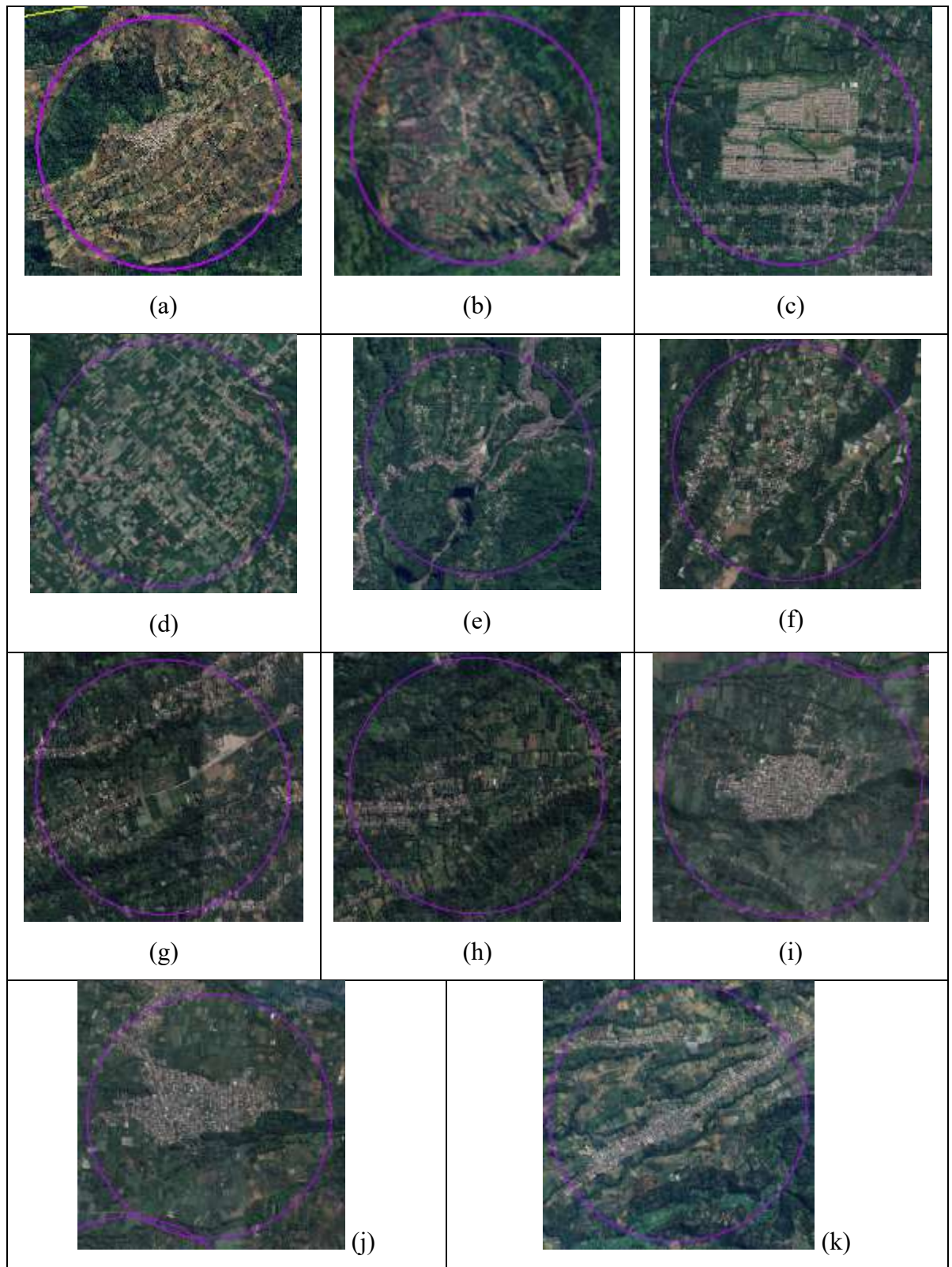
Pengamatan	Arah Angin Dominan	Lokasi Konsentrasi SO ₂ Tertinggi
2	Dari Timur-Tenggara ke Barat-Barat Laut	Barat Daya-Barat
5	Dari Timur-Tenggara ke Barat-Barat Laut	Barat Daya-Barat
6	Dari Timur-Tenggara ke Barat-Barat Laut	Timur-Tenggara, Utara
9	Dari Barat Daya-Barat ke Timur Laut-Timur	Utara-Timur Laut

3.4.3 Pola Persebaran SO₂ Periode Bulanan dengan Arah Angin

Sebanyak 11 area permukiman dalam AOI 15 km diidentifikasi sebagai objek analisis. Posisi masing-masing permukiman ditentukan berdasarkan azimuth dari kawah Gunung Semeru dan diklasifikasikan ke dalam delapan sektor mata angin sebagai dasar penentuan kesesuaian dengan arah pergerakan massa udara (Gambar 12, Gambar 13, dan Tabel 10).



Gambar 12. Visual Area Permukiman Dalam AOI 15 Km

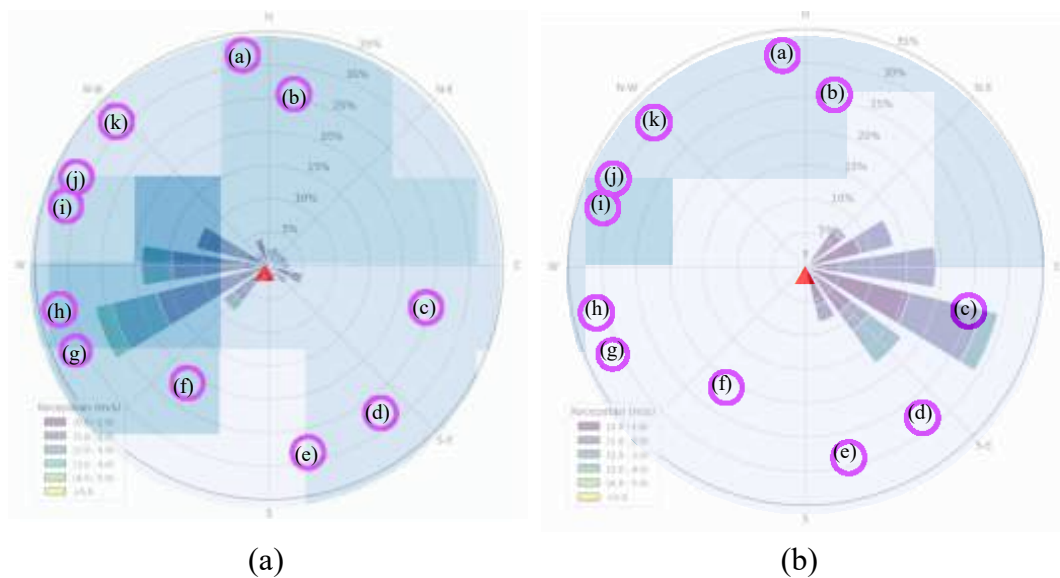


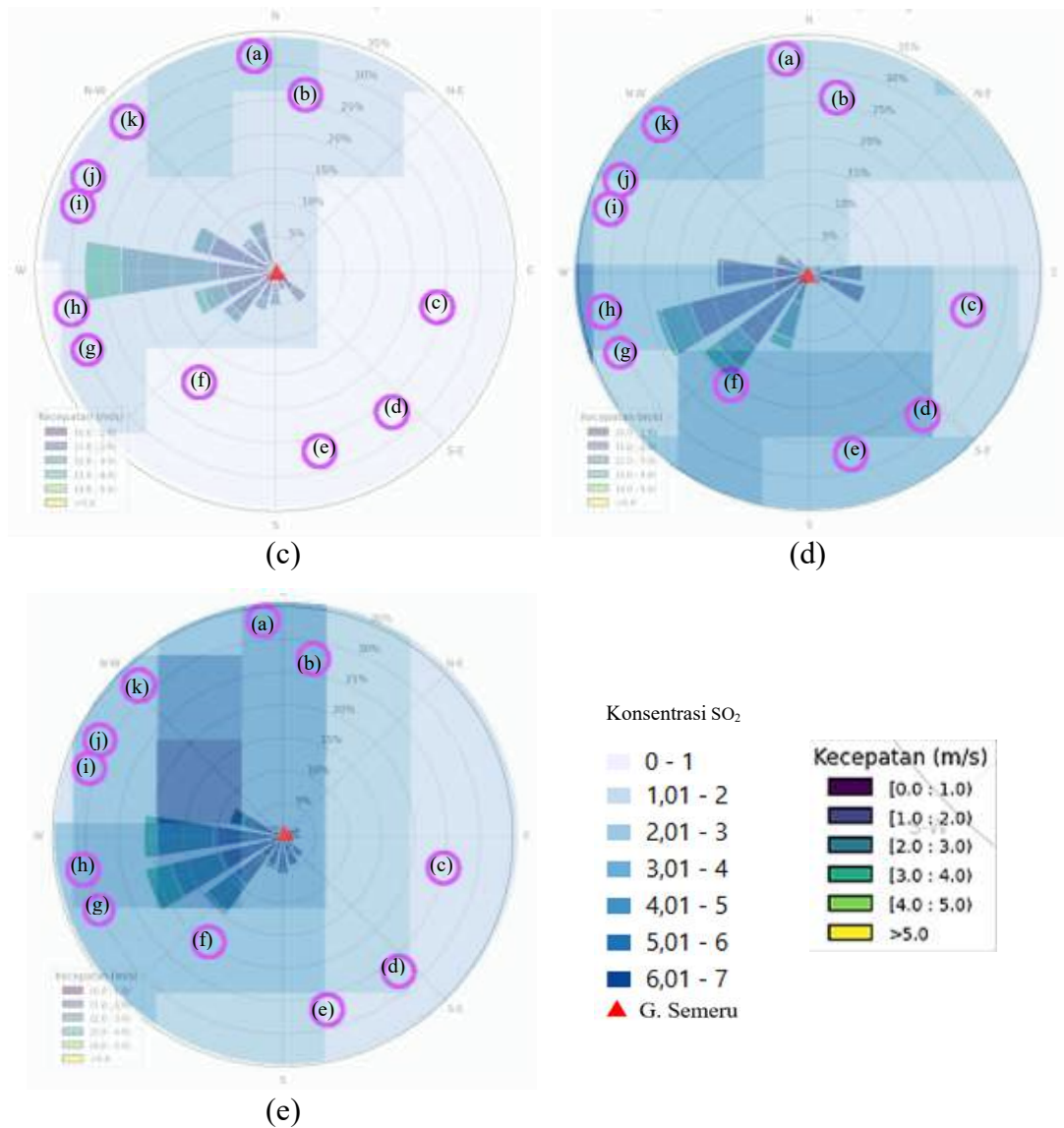
Gambar 13. Visual Area Permukiman Dalam AOI 15 Km

Tabel 10. Hasil Perhitungan Azimuth dan Klasifikasi Sektor Mata Angin Permukiman

Permukiman	Azimuth (°)	Mata Angin
a	353,87	Utara (337,5° – 360° dan 0° – 22,5°)
b	8,94	Utara (337,5° – 360° dan 0° – 22,5°)
c	102,46	Timur (67,5° – 112,5°)
d	140,84	Tenggara (112,5° – 157,5°)
e	166,85	Selatan (157,5° – 202,5°)
f	215,34	Barat Daya (202,5° – 247,5°)
g	247,67	Barat (247,5° – 292,5°)
h	259,79	Barat (247,5° – 292,5°)
i	288,31	Barat (247,5° – 292,5°)
j	296,59	Barat Laut (292,5° – 337,5°)
k	315,15	Barat Laut (292,5° – 337,5°)

Hasil identifikasi pada periode harian menunjukkan bahwa permukiman c paling sering berada pada sektor arah pergerakan massa udara, yaitu pada Pengamatan 1, 4, dan 8. Permukiman g, h, dan i teridentifikasi pada Pengamatan 3, sedangkan Pengamatan 7 tidak mencakup permukiman pada sektor tersebut (Gambar 14 dan Tabel 11).





Gambar 14. Analisa Wilayah Terdampak Pengamatan Periode Harian

(a) pengamatan 1, (b) pengamatan 3, (c) pengamatan 4, (d) pengamatan 7, (e) pengamatan 8

Tabel 11. Identifikasi Wilayah Permukiman yang Berada pada Sektor Arah Pergerakan Massa Udara (Harian)

Pengamatan	Arah Angin Dominan (°)	Arah Pergerakan Massa Udara (°)	Sektor	Permukiman pada Sektor yang Sama
1	259,12	79,12	Timur	c
3	102,54	282,54	Barat	g, h, i
4	261,69	81,69	Timur	c
7	246,80	66,80	Timur Laut	-
8	257,18	77,18	Timur	c

The figure consists of four wind rose plots labeled (a), (b), (c), and (d). Each plot shows the frequency of wind blowing from different directions (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) and the associated SO₂ concentration levels. The radial distance from the center indicates the percentage of time the wind blows from that direction at a specific speed range.

- (a)** Wind rose plot for station G. Semeru. Legend: Kecepatan (m/s) ranges from [0.0 : 1.0] to >5.0. Konsentrasi SO₂ ranges from 0 - 1 to 6,01 - 7.
- (b)** Wind rose plot for station G. Semeru. Legend: Kecepatan (m/s) ranges from [0.0 : 1.0] to >5.0. Konsentrasi SO₂ ranges from 0 - 1 to 6,01 - 7.
- (c)** Wind rose plot for station G. Semeru. Legend: Kecepatan (m/s) ranges from [0.0 : 1.0] to >5.0. Konsentrasi SO₂ ranges from 0 - 1 to 6,01 - 7.
- (d)** Wind rose plot for station G. Semeru. Legend: Kecepatan (m/s) ranges from [0.0 : 1.0] to >5.0. Konsentrasi SO₂ ranges from 0 - 1 to 6,01 - 7.

Tabel 12. Identifikasi Wilayah Permukiman yang Berada pada Sektor Arah Pergerakan Massa Udara (Bulanan)

Pengamatan	Arah Angin Dominan (°)	Arah Pergerakan Massa Udara (°)	Sektor	Permukiman pada Sektor yang Sama
2	123,72	303,72	Barat Laut	j, k
5	123,78	303,78	Barat Laut	j, k
6	101,23	281,23	Barat	g, h, i
9	258,58	78,58	Timur	c

Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa permukiman yang berpotensi berada pada jalur pergerakan massa udara bervariasi antarperiode seiring perubahan arah angin dominan. Identifikasi ini menunjukkan potensi wilayah yang berada pada jalur transport massa udara dan tidak merepresentasikan paparan SO₂ secara langsung.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan citra *Sentinel-5P*, analisis aktivitas vulkanik, dan arah angin terhadap persebaran SO₂ di Gunung Semeru, diperoleh kesimpulan sebagai berikut

1. Konsentrasi SO₂ selama 2021–2026 menunjukkan variasi pada setiap periode pengamatan. Nilai maksimum harian tertinggi terjadi pada Pengamatan 8 sebesar 6,22 µg/m³, sedangkan maksimum bulanan pada Pengamatan 5 sebesar 5,97 µg/m³. Peningkatan SO₂ tidak selalu konsisten dengan status aktivitas maupun peningkatan aktivitas vulkanik. Hasil regresi menunjukkan hubungan yang secara umum lemah, dengan nilai R² sebesar 0,0158–0,1809, sehingga SO₂ hanya menjelaskan sebagian kecil variasi aktivitas vulkanik.
2. Persebaran SO₂ tidak selalu mengikuti arah pergerakan massa udara dominan. Kesesuaian pada skala harian ditemukan pada Pengamatan 3, sedangkan pada skala bulanan ditemukan pada Pengamatan 2, 5, dan 9. Permukiman C pada

skala harian serta permukiman J dan K pada skala bulanan merupakan wilayah yang paling sering berada pada sektor arah pergerakan massa udara dan berpotensi menjadi jalur transport SO₂.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode pengamatan yang lebih panjang untuk menganalisis variasi SO₂ secara musiman dan tahunan serta memperoleh hubungan dengan aktivitas vulkanik yang lebih representatif.
2. Analisis meteorologi dapat dikembangkan dengan menambahkan parameter kecepatan angin, suhu, kelembapan, dan curah hujan untuk menjelaskan transport dan dispersi SO₂ secara lebih komprehensif.
3. Validasi data *Sentinel-5P* disarankan menggunakan pengukuran *in situ* atau instrumen pemantauan gas vulkanik dengan waktu pengamatan yang sesuai dengan lintasan satelit.
4. Analisis aktivitas vulkanik dapat dikembangkan menggunakan data seismik yang lebih rinci, seperti amplitudo, durasi, dan energi gempa, untuk mengevaluasi hubungan SO₂ dengan aktivitas vulkanik secara lebih mendalam.
5. Penelitian selanjutnya dapat membandingkan estimasi *Sentinel-5P* dengan data satelit lain atau data pemantauan kualitas udara untuk mengevaluasi konsistensi estimasi konsentrasi SO₂.

5. REFERENSI

- Adri, W., Sabri, L. M., & Wahyuddin, Y. (2021). Pembuatan peta jalur evakuasi bencana gunung api dan persebaran lokasi shelter menggunakan metode Network Analyst (Studi kasus: Gunung Merapi, Boyolali-Magelang). *Jurnal Geodesi UNDIP*, 10(1), 189–196.
- Anisa, R., & Afgatiani, P. M. (2020). Pemanfaatan data Sentinel-5 untuk pemantauan perubahan kualitas udara NO₂ akibat pandemi COVID-19 di Jakarta. *Inderaja*, 11(13), 18–22.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Guilford Press.

- Carn, S. A., Clarisse, L., & Prata, A. J. (2016). Satellite detection of volcanic emissions using the OMI and IASI instruments. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1771–1786. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.007>
- Chouet, B. (1985). Excitation of a buried magmatic pipe: A seismic source model for volcanic tremor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B2), 1881–1893. <https://doi.org/10.1029/JB090iB02p01881>
- Copernicus Climate Change Service. (2024). *Climate Data Store (CDS) documentation*. <https://cds.climate.copernicus.eu>
- Copernicus. (2024). *Sentinel-5P atmospheric products*. <https://www.copernicus.eu/en/missions/sentinel-5p>
- Curran, P. J. (1985). *Principles of remote sensing*. Longman Group Limited.
- ECMWF. (2023). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses*. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- European Space Agency. (2020). *Copernicus Sentinel-5P TROPOMI Level-2 sulphur dioxide total column* (Version 02). Copernicus Sentinel Online. <https://doi.org/10.5270/S5P-74eidii>
- European Space Agency. (2020). *Sentinel-5P TROPOMI user guide*. ESA Publications. <https://sentinels.copernicus.eu>
- European Space Agency. (2024). *Introducing Sentinel-5P*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Introducing_Sentinel-5P
- Fee, D., Garces, M., & Steffke, A. (2010). Infrasonic harmonic tremor and degassing bursts from Halema'uma'u Crater, Kilauea Volcano, Hawaii. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B11316. <https://doi.org/10.1029/2010JB007642>
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Krotkov, N. A., Carn, S. A., Boggar, K., Datta, A., & Li, C. (2023). Version 2 of the global catalogue of large anthropogenic and

- volcanic SO₂ sources and emissions derived from satellite measurements. *Earth System Science Data*, 15(1), 75–93. <https://doi.org/10.5194/essd-15-75-2023>
- Ghozali, I. (2018). *Aplikasi analisis multivariate dengan program IBM SPSS* (9th ed.). Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- Google Earth Engine Data Catalog. (2024). *Sentinel-5P OFFL SO₂: Offline sulfur dioxide (COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2)*.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Harris, P. G. (2012). *Volcanic and atmospheric processes: A data-driven perspective*. Elsevier.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Jacob, D. J. (1999). *Introduction to atmospheric chemistry*. Princeton University Press.
- Jacobson, M. Z. (2005). *Fundamentals of atmospheric modeling* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Jensen, J. R. (2016). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson Education.
- Johnson, J. B., & Lees, J. M. (2000). Plugs and chugs—seismic and acoustic observations of degassing explosions at Karymsky, Russia and Sangay, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101(1–2), 67–82. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00164-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00164-5)
- Julian, H. D. (2021). Analisis parameter segmentasi pada perangkat lunak eCognition menggunakan data citra foto udara. *Jurnal Swarnabhumi*, 6(1), 46–53.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2011). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 15 Tahun 2011 tentang*

Pedoman Mitigasi Bencana Gunungapi, Gerakan Tanah, Gempabumi, dan Tsunami.

- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Lindgren, D. T. (1985). *Land use planning and remote sensing*. Martinus Nijhoff Publishers.
- Martono, D. N. (2008). Aplikasi teknologi penginderaan jauh dan uji validasinya untuk deteksi penyebaran lahan sawah. *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI)*.
- Mujiono. (2019). *Pengindraan jauh (Buku ajar)*. Universitas Dehasen Bengkulu.
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine applications. *Remote Sensing*, 11(5), 591. <https://doi.org/10.3390/rs11050591>
- Nadeau, P. A., Palma, J. L., & Waite, G. P. (2011). Linking volcanic tremor, degassing, and eruption dynamics via SO₂ imaging. *Geophysical Research Letters*, 38(1), L01304. <https://doi.org/10.1029/2010GL045820>
- Pratomo, I. (2006). Klasifikasi gunung api aktif Indonesia: Studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah. *Indonesian Journal on Geoscience*, 1(4), 209–227. <https://doi.org/10.17014/ijog.1.4.209-227>
- Priatna, S. P. (2020). *Memahami gas gunung api*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. (2026). *Informasi letusan Semeru*. MAGMA Indonesia.
- Putri, F. A., Nugroho, U. C., Tjahjaningsih, A., & Brahmantara, R. P. (2023). Pemanfaatan data satelit Sentinel-5P untuk pemantauan SO₂ pasca erupsi Gunung Anak Krakatau. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 14(1). <https://doi.org/10.34126/jlbg.v14i1.351>

- Ramadhanni, R. F., & Jaelani, L. M. (2025). Analisis multitemporal konsentrasi SO₂ di atas Semeru berbasis data citra satelit Sentinel-5P dengan platform Google Earth Engine. *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 4(2), 57–66.
<https://doi.org/10.12962/jpji.v4i2.6286>
- Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Safitri, E. D. N., Hayati, N., & Bioresita, F. (2021). Analisis deformasi akibat aktivitas vulkanik menggunakan data citra Sentinel-1A dan metode DInSAR three-pass interferometry (Studi kasus: Gunung Semeru, Jawa Timur). *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), A399–A405.
- Sahid, N. A. (2023). *Konsentrasi nitrogen dioksida (NO₂) berdasarkan citra satelit di Kelurahan Barombong Kota Makassar*. Universitas Hasanuddin.
<https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/47972/>
- Salerno, G. G., Burton, M., Di Grazia, G., Caltabiano, T., & Oppenheimer, C. (2018). Coupling between magmatic degassing and volcanic tremor in basaltic volcanism. *Frontiers in Earth Science*, 6, 157.
<https://doi.org/10.3389/feart.2018.00157>
- Septiana, B., Wijaya, A. P., & Suprayogi, A. (2017). Analisis perbandingan hasil orthorektifikasi metode Range Doppler Terrain Correction dan metode SAR Simulation Terrain Correction menggunakan data SAR Sentinel-1. *Jurnal Geodesi UNDIP*, 6(1), 148–157.
- Sihotanga, E., Artaningha, F., Anggrainia, T. S., Dimara, A., & Saktia, A. (2020). Pemantauan konsentrasi gas SO₂ di sekitar Gunung Sinabung menggunakan citra satelit Sentinel-5 Precursor.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- Stull, R. B. (2017). *Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science* (Version 1.02b). University of British Columbia.

- Sugiyono. (2019). *Statistika untuk penelitian*. Alfabeta.
- Theys, N., De Smedt, I., Yu, H., Danckaert, T., van Gent, J., Hörmann, C., Wagner, T., Hedelt, P., Bauer, H., Romahn, F., Pedernana, M., Loyola, D., & Van Roozendaal, M. (2017). Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: Algorithm theoretical basis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(1), 119–153. <https://doi.org/10.5194/amt-10-119-2017>
- Theys, N., et al. (2019). Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific Reports*, 9, 2643.
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., & Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70–83.
- Wafid, M. (2025). PVMBG tingkatkan aktivitas Gunung Api Semeru ke level IV (Awat). *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed.). Academic Press.
- World Meteorological Organization. (2018). *Guide to meteorological instruments and methods of observation* (WMO-No. 8).
- Yusuf, D. (2017). *Penginderaan jauh*. UNG Press.