Analisis Multtemporal Konsentrasi SO_2 di Atas Semeru Berbasis Data Citra Satelit Sentinel-5P dengan Platform Google Earth Engine

Rizky Fitria Ramadhanni[a,*], Lalu Muhamad Jaelani[a]
[a]Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 60111

***** Korespondensi Penulis: rizkyfitriar@gmail.com

Dikirim: 7 Juli 2025;
Diterima: 22 Juli 2025;
Diterbitkan: 22 Juli 2025.

Abstrak. Gunung Semeru merupakan salah satu gunung api aktif di Indonesia yang secara periodik mengalami erupsi dan melepaskan gas berbahaya seperti Sulfur Dioksida (SO_2) ke atmosfer. Gas ini berpengaruh besar terhadap kualitas udara, kesehatan, dan lingkungan, sehingga perlu dipantau secara berkala. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren dan sebaran konsentrasi SO_2 di atas Gunung Semeru secara multitemporal dari tahun 2019 hingga 2024 menggunakan citra satelit Sentinel-5P dengan platform *Google Earth Engine* (GEE). Metode yang digunakan meliputi pemrosesan data citra *level*-3 (OFFL), konversi satuan ke µg/m³, visualisasi spasial dalam bentuk peta dan grafik, serta validasi dengan data sekunder seperti erupsi PVMBG, *Google Trends*, dan data arah angin. Hasil menunjukkan pola peningkatan konsentrasi SO_2 yang konsisten dengan aktivitas erupsi besar pada tahun 2020, 2021, dan 2023, serta persebaran spasial yang dipengaruhi oleh arah angin dominan. Selain itu, dibangun pula aplikasi interaktif berbasis GEE yang dapat digunakan untuk monitoring publik dan instansi. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa pemanfaatan citra Sentinel-5P melalui GEE terbukti efektif dalam mendeteksi dan memvisualisasikan konsentrasi SO_2 secara spasial-temporal, serta memiliki potensi besar sebagai alat mitigasi bencana berbasis teknologi penginderaan jauh.

Kata kunci: Aktivitas Vulkanik; Google Earth Engine; Gunung Semeru; Sulfur Dioksida (SO_2), Sentinel-5P.

Multitemporal Analysis of SO_2 Concentration Over Mount Semeru Using Sentinel-5P Satellite Image Data with Google Earth Engine Platform

Abstract. Mount Semeru is one of the active volcanoes in Indonesia that periodically erupts and releases hazardous gases such as Sulfur Dioxide (SO_2) into the atmosphere. This gas significantly affects air quality, health, and the environment, thus requiring regular monitoring. This study aims to analyze the trends and spatial distribution of SO_2 concentrations over Mount Semeru from 2019 to 2024 using Sentinel-5P satellite imagery and the Google Earth Engine (GEE) platform. The methodology involves processing level-3 (OFFL) satellite data, converting concentration units to µg/m³, generating spatial visualizations in the form of maps and graphs, and validating the results using secondary data such as eruption records from PVMBG, *Google Trends*, and wind direction data. The results show a pattern of increased SO_2 concentration aligned with major eruptions in 2020, 2021, and 2023, with spatial distribution influenced by dominant wind directions. Additionally, an interactive application was developed using GEE, which can be utilized by both the public and relevant agencies for monitoring purposes. The study concludes that the use of Sentinel-5P imagery through GEE is effective in detecting and visualizing SO_2 concentrations spatio-temporally and holds significant potential as a disaster mitigation tool based on remote sensing

Keywords: Disaster mitigation, Google Earth Engine, Mounth Semeru, multitemporal analysis, remote sensing, Sentinel-5P, spatial visualization, sulfur dioxide (SO_2).

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara vulkanik dengan sekitar 30% gunung api dunia, terletak di jalur Sirkum Pasifik dan Mediterania [1]. Sepanjang 2023, delapan gunung api aktif di Indonesia mengalami 66.197 erupsi [2]. Letusan gunung berapi melepaskan material vulkanik, termasuk Sulfur Dioksida (SO_2), yang menjadi salah satu parameter kunci pemantauan aktivitas vulkanik karena kemampuannya dideteksi melalui satelit seperti sensor TROPOMI pada satelit Sentinel-5P dan danpaknya terhadap lingkungan [3]

SO_2 berdampak signifikan pada kualitas udara, iklim (melalui pembentukan aerosol sulfat), dan keselamatan penerbangan [4]. Di atmosfer, SO_2 dapat membentuk hujan asam yang merusak ekosistem dan material, bahkan di lokasi jauh dari sumber letusan [5]. Pemantauan konvensional SO_2 bersifat manual dan kurang efisien [6], sehingga teknologi penginderaan jauh seperti Sentinel-5P TROPOMI (resolusi 7 km × 3,5 km) menjadi solusi optimal untuk analisis multitemporal [7] [8].

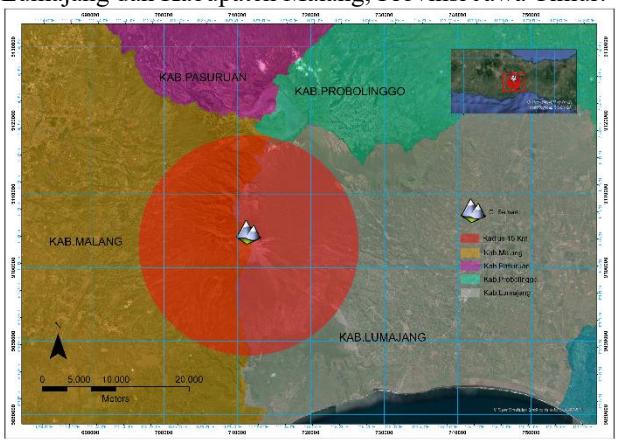
Gunung Semeru, gunung api aktif di Jawa Timur (3.676 mdpl), dipilih sebagai studi kasus karena aktivitas erupsinya yang tinggi (29.131 letusan pada 2023) [2]. Perkembangan teknologi dan kemajuan era digital telah memicu munculnya inisiatif baru untuk melakukan penelitian. Penggunaan platform GEE dalam penelitian ini memungkinkan pemanfaatan sistem informasi geografis dengan citra beresolusi menengah serta metode penginderaan jauh yang efektif dan efisien untuk menganalisis fenomena alam, termasuk letusan gunung berapi [9]. Teknologi penginderaan jauh dalam penelitian memiliki kemampuan yang efisien terutama mengukur parameter lingkungan terutama kualitas udara [10]

Pada studi kasus ini, dilakukan analisis multitemporal terhadap konsentrasi SO_2 akibat letusan Gunung Semeru pada tahun 2019 hingga 2024 menggunakan data satelit Sentinel-5P yang diolah melalui platform *cloud* berbasis GEE. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan konsentrasi SO_2 secara tahunan di atas Gunung Semeru tahun 2019 hingga 2024. Analisis dilakukan secara multitemporal untuk mengamati konsentrasi SO_2 setiap tahunnya. Dengan menggunakan bahasa pemrograman *JavaScript* pada GEE akan menghasilkan visualisasi peta konsentrasi SO_2 dan grafik nilai konsentrasi SO_2 yang akan ditampilkan sederhana dan antarmuka yang mudah dipahami melalui Google Earth Engine Apps. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan kebijakan mitigasi bencana vulkanik serta memberikan kontribusi bagi penelitian lanjutan terkait dampak aktivitas gunung api di Indonesia.

II. METODOLOGI

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada pada Gunung Semeru terletak di sekitar 8º 6,5’ LS dan 112º 55’ BT. Secara administrasi Gunung Semeru terletak di Kabupaten Lumajang dan Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Gamb. 1 menunjukan lokasi penelitian dari tugas akhir ini berfokus pada sekitar Gunung Semeru dengan radius buffer 15 kilometer dari titik pusat Gunung Semeru.

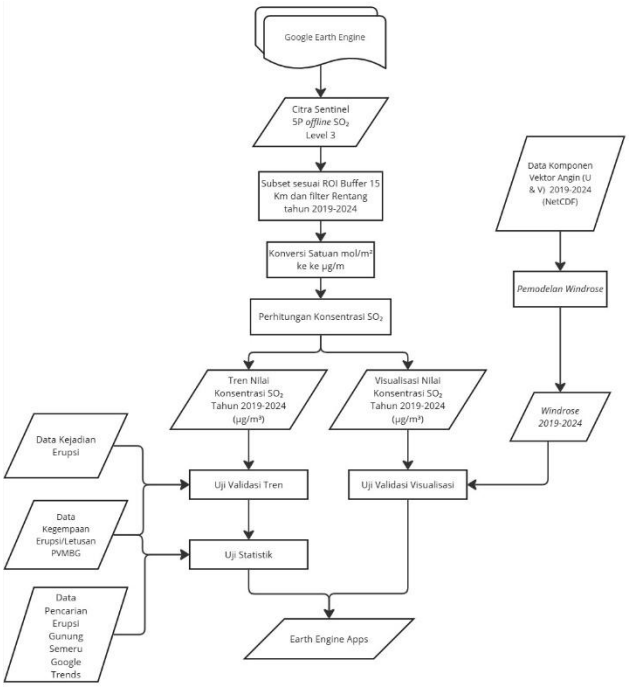
2.2 Peralatan dan Bahan

Perangkat lunak dan perangkat keras yang digunakan, yaitu laptop digunakan untuk melakukan pengolahan data, analisis hasil hingga penyusunan laporan, GEE untuk mengunduh dan mengolah, data citra untuk memperoleh informasi kuantitatif dan visualisasi persebaran SO_2, perangkat lunak sistem informasi geografis digunakan untuk pembuatan visualisasi dalam hal ini *layoutting* peta, dan Microsoft office 365 untuk sarana analisis data kuantitatif, uji validasi hasil pengolahan, dan penyusunan laporan.

Bahan – bahan yang digunakan untuk pengolahan dalam penelitian ini, yaitu data *offline* citra SO_2 Sentinel-5P (TROPOMI) diakuisisi tahun 2019-2024, data kejadian gempa ketika erupsi/letusan Gunung Semeru dari PVMBG, data pencarian erupsi Gunung Semeru dari *Google Trends*, data kejadian erupsi Gunung Semeru dari Magma ESDM, dan data angin yang didapat dari https://cds.climate.copernicus.eu dengan format data *Common Data File Net* (NetCDF).

2.3 Tahapan Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dalam penelitian ini melibatkan beberapa proses utama seperti yang ditunjukkan pada berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Tahap Pengolahan Data

Gamb. 2 Platform GEE digunakan sebagai tempat pemanggilan data, pengolahan data, dan menghasilkan hasil pengolahan data. Kemudian, memanggil data *offline* citra satelit sentinel-5P level 3 digunakan sebagai informasi kandungan di udara yang terkontaminasi oleh SO_2 akibat erupsi dari Gunung Semeru. Untuk membatasi area analisis, dilakukan subset area ROI menggunakan buffer 15 km dari pusat kawah untuk fokusan analisis wilayah studi sesuai dengan area pada peta Kawasan Rawan Bencana (KRB). Filter rentang 2019 hingga 2024 digunakan untuk membatasi rentang waktu sesuai dengan tahun analisis.

Konversi SO_2 dari mol/m² ke µg/m³ dilakukan untuk memperoleh nilai konsentrasi SO_2 sesuai dengan satuan standar Indonesia, yaitu µg/m³ dengan menggunaakan persamaan dari Savanets (2021). Berikut ini merupakan persamaan konversi SO_2 dari mol/m² ke µg/m³:

$$C = \frac{C_s}{H}\ x\ M\ x\ A \tag{1}$$

Dimana C_s merupakan kandungan polutan SO_2 (mol/m²), M adalah massa molar SO_2 (g/mol) sebesar 64,066 g/mol yang didapat dari penjumlahan massa satu atom sulfur (32,066 g/mol) dan dua atom oksigen (satu atom oksigen bernilai 15,999 g/mol) [11], A adalah angka konversi g/m³ ke µg/m³ = 10^6, H adalah tebal lapisan atmosfer pulutan SO_2 tersebar pada penelitian ini menggunakan ketebalan 13000 [11]. Konsentrasi SO_2 dalam satuan µg/m³, menjadi:

$$C\ \left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = \frac{C_{s\left(\frac{mol}{m^2}\right)}}{13000(m)}\ x\ 64{,}066\ x\ 10^6 \tag{2}$$

Maka, C dengan satuan µg/m³ menjadi lebih sederhana

$$C\ \left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = 4928{,}15\ x\ C_s \tag{3}$$

Untuk menentukan nilai maksimum dari C dengan satuan µg/m³ dengan cara berikut:

$$C_{maksimum}\left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = 4928{,}15\ x\ C_{s\ (maksimum)} \tag{4}$$

Nilai $C_{s\ (maksimum)}$ dapat dilihat pada data OFFL sentinel-5P pada platform GEE adalah 0,2079 mol/m², sehingga nilai C maksimum dalam satuan µg/m³ sebagai berikut:

$$C_{maksimum}\left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = \ 4928{,}15\ x\ 0{,}2079 \tag{5}$$

$$C_{maksimum}\left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = \ 1024{,}863 == 1025\ \mu g/m^3 \tag{6}$$

Setelah dikonversi dan menentukan nilai maksimum maka akan menghasilkan nilai konsentrasi dan nilai maksimum dalam satuan µg/m³. Hasil dari nilai konsentrasi SO_2 dapat menjadi bentuk visualisasi pesebaran konsentrasi SO_2 untuk memberikan gambaran yang komprehensif mengenai distribusi spasial dan pola temporal konsentrasi SO_2 di wilayah penelitian.

Selanjutnya, dilakukan uji validasi tren dengan melihat sampel anomali pada tren rata-rata bulanan nilai maksimum konsentrasi SO_2 setiap tahunnya kemudian dibandingkan apakah ada hubungan ketika terjadi anomali itu dengan data kegempaan erupsi/letusan PVMBG dan kumpulan berita erupsi Gunung Semeru pada rentang anomali. Perbandingan dilihat dari anomali rata-rata nilai maksimum konsentrasi SO_2 setiap tahunnya, dimana jika terjadi nilai SO_2 yang tinggi apakah berpengaruh dengan kejadian kegempaan erupsi/letusan dan terjadinya erupsi pada pada Gunung Semeru pada rentang anomali tersebut.

Pada visualisasi dilakukan uji validasi juga dari hasil pengolahan *windrose* dari data angin di *climate copernicus* yang diolah menggunakan python dengan wrplot untuk menghasilan grafik *windrose*. Hasil tersebut akan dibandingkan dari arah angin dominan dengan visual pesebaran nilai tinggi maksimum konsentrasi SO_2.

Dilakukan uji statistik tren menggunakan korelasi *pearson* (r) dan uji *t-statistic* pada nilai maksimum konsentrasi SO_2 dengan data kegempaan erupsi/letusan PVMBG dan data pencarian berita erupsi gunung semeru pada *google trends*. Berikut rumus dari korelasi *pearson* dan uji *t-statistic*:

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

Berikut merupakan rumus t-statistik:

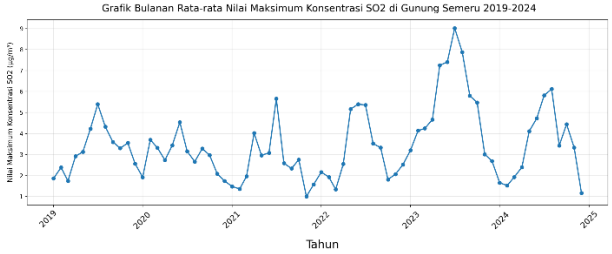
$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (8)$$

Tahap terakhir membentuk hasil model aplikasi sederhana menggunakan Google Earth Engine App sebagai bentuk penyajian tren dan visualisasi peta konsentrasi SO_2 dalam memonitor kandungan SO_2 di kawasan Gunung Semeru (buffer 15 km) tahun 2019 – 2024.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

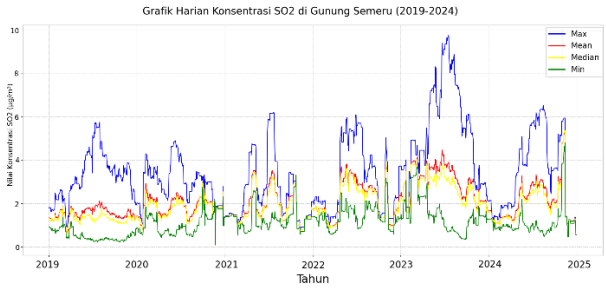
A. Hasil Tren Nilai Konsentrasi SO_2 Tahun 2019-2024

Hasil tren nilai konsentrasi SO_2 pengolahan dari GEE didapatkan hasil grafik bulanan rata-rata nilai maksimum konsentrasi SO_2 2019 hingga 2024 untuk membantu melihat anomali yang terjadi pada rentang tahun tersebut.



Gambar 3. Grafik Bulanan Rata-rata Maksimum Konsentrasi SO_2 di Gunung Semeru 2019-2024

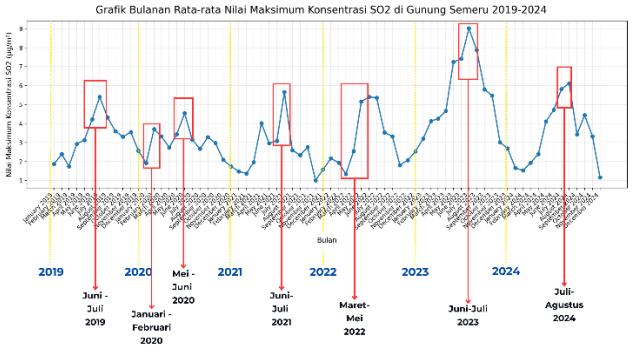
Berdasarkan **Gamb. 3**, terlihat bahwa konsentrasi maksimum SO_2 mengalami fluktuasi tiap tahun, dengan beberapa bulan menunjukkan lonjakan tajam. Tahun 2024 menunjukkan puncak tertinggi rata-rata konsentrasi, yaitu mencapai nilai rata-rata maksimum konsentrasi SO_2 9,01 µg/m³. Pola ini mengindikasikan peningkatan aktivitas vulkanik pada periode tersebut



Gambar 4. Grafik Harian Nilai Min, Max, Mean, Median Konsentrasi SO_2 di Gunung Semeru 2019-2024

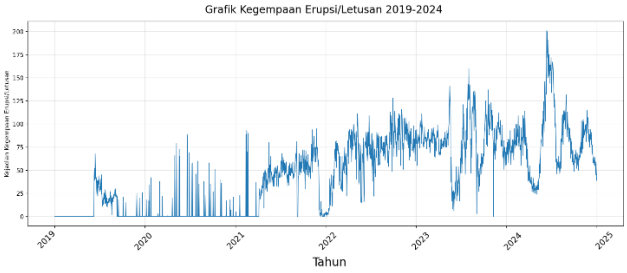
Gamb. 4 menujukan nilai konsentrasi maksimum harian dengan puncak tertinggi berada pada tahun 2023 mencapai nilai 9,72 µg/m³. Hal ini dapat mempermudah analisis melihat lonjakan tren yang signifikan

Uji validasi dilakukan dengan identifikasi anomali mengamati lonjakan konsentrasi SO_2 yang signifikan dan disertai dengan aktivitas kegempaan atau laporan erupsi dari PVMBG dan ESDM. Anomali dianggap terjadi ketika konsentrasi meningkat secara tajam dalam waktu singkat.



Gambar 5. Grafik Anomali Bulanan Rata-rata Maksimum Konsentrasi SO_2 di Gunung Semeru 2019-2024

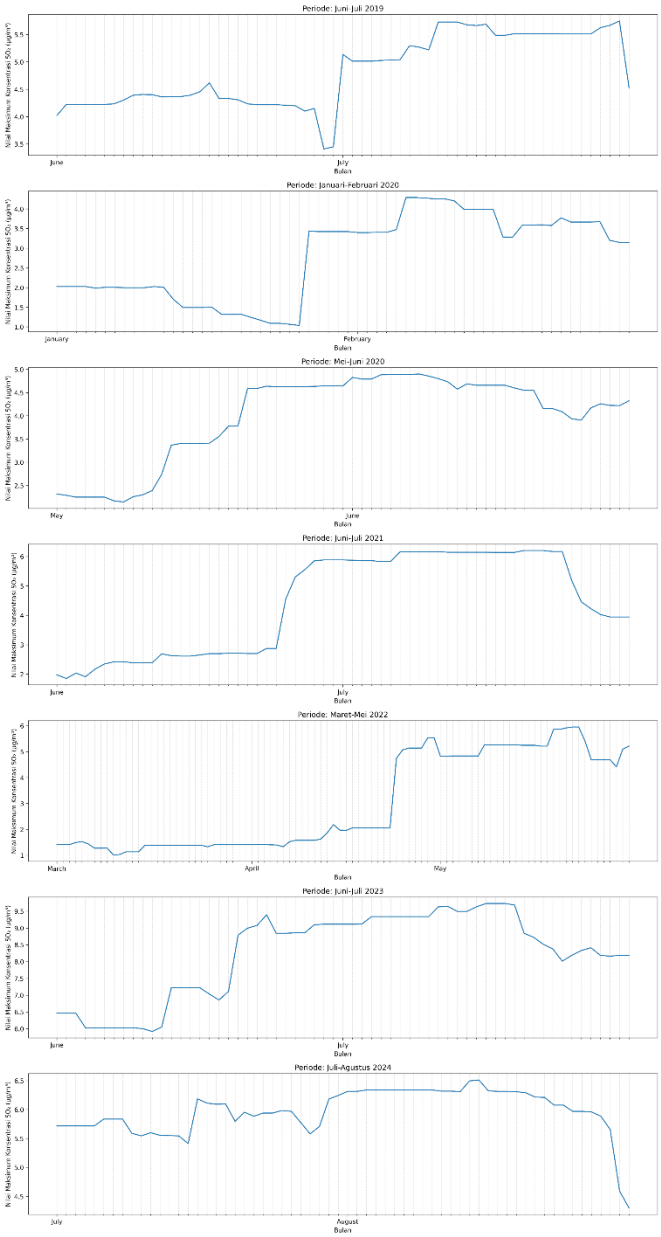
Berdasarkan **Gamb. 5**, teridentifikasi sejumlah puncak anomali konsentrasi SO_2 yang menonjol. Beberapa puncak tersebut terjadi pada periode Juni-Juli 2019, Januari-Februari 2020, Mei-Juni 2020, Juni-Juli 2021, Maret-mei 2022, Juni-Juli 2023, dan Juni-Agustus 2024.



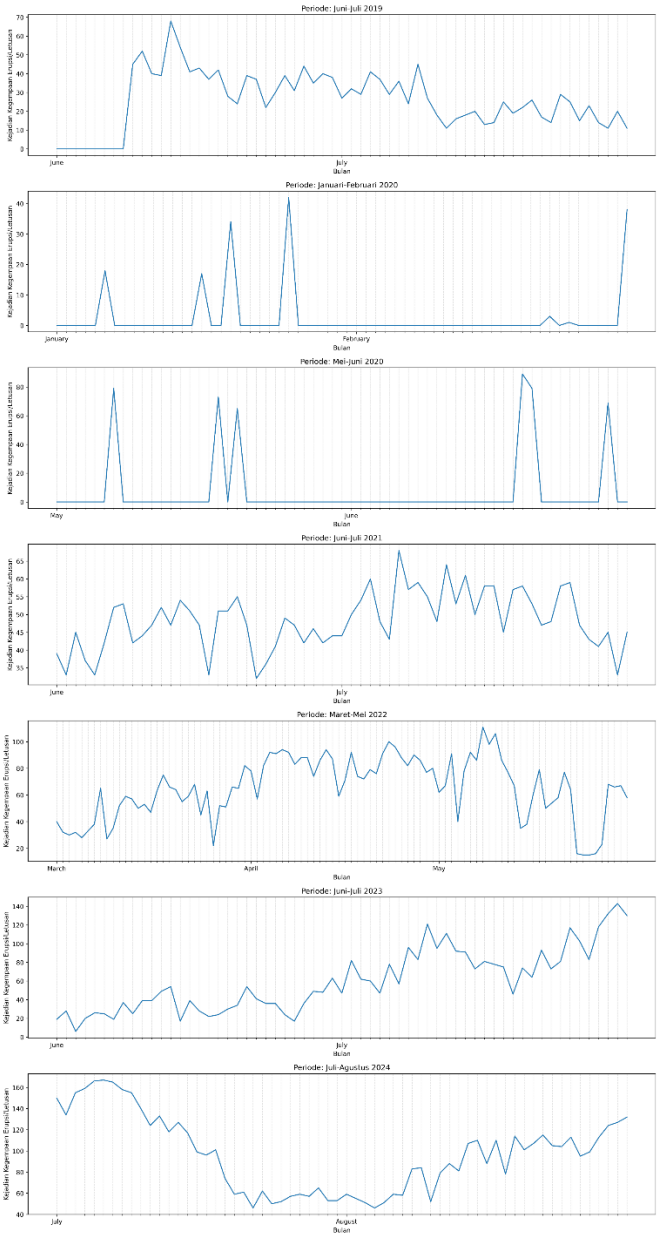
Gambar 6. Grafik Kegempaan Erupsi/Letusan 2019-2024

Gamb. 6 terlihat peningkatan tajam yang mengindikasikan adanya pelepasan gas vulkanik yang signifikan, yang sering kali berkorelasi dengan fase awal atau puncak erupsi. Korelasi ini didukung oleh data kegempaan erupsi/letusan dalam periode yang sama. Terlihat bahwa lonjakan kegempaan juga terjadi berdekatan dengan periode peningkatan konsentrasi SO_2.

Berikut ini pembahasan **Gamb. 7** dan **Gamb. 8** untuk mengamati beberapa anomali yang teridentifikasi selama periode pengamatan antara lain. Periode Juni–Juli 2019 menunjukkan pola awal yang signifikan, dengan konsentrasi SO_2 stabil di atas 3,5 µg/m³, bersamaan dengan peningkatan kegempaan erupsi. Hal ini diperkuat oleh data erupsi aktual pada akhir Juni, yang memperlihatkan keterkaitan awal antara aktivitas kegempaan dan pelepasan gas vulkanik. Pada Januari–Februari 2020, lonjakan tajam dari 1,03 menjadi 4,29 µg/m³ terjadi setelah puncak kegempaan pada 25 Januari (42 kejadian). Erupsi aktif terdeteksi sepanjang 18 Januari hingga 7 Februari. Pola ini mengindikasikan bahwa



Gambar 7. Grafik Harian Nilai Maksimum Konsentrasi SO_2 Pada Periode Anomali di Gunung Semeru 2019-2024



Gambar 8. Grafik Harian Kejadian Kegempaan Erupsi/Letusan Pada Periode Anomali di Gunung Semeru 2019-2024

peningkatan tekanan magmatik memicu pelepasan gas yang tertangkap beberapa hari kemudian.

Periode Mei–Juni 2020 menunjukkan akumulasi gas bertahap sejak pertengahan Mei, mencapai 4,63 µg/m³ bersamaan dengan kejadian erupsi 25 Mei. Aktivitas gempa dan emisi gas tetap tinggi hingga akhir Juni, menunjukkan dinamika tekanan yang berlangsung cukup lama setelah letusan.

Juni–Juli 2021 memperlihatkan lonjakan SO_2 hingga 6 µg/m³ tanpa adanya perubahan signifikan pada kegempaan atau laporan erupsi besar. Hal ini menunjukkan adanya proses magmatik laten di bawah permukaan yang tidak menghasilkan aktivitas visual, namun tetap berdampak terhadap peningkatan emisi gas.

Pada Maret–Mei 2022, lonjakan SO_2 baru teramati akhir April–Mei, setelah sebelumnya terjadi beberapa erupsi skala kecil pada bulan Maret. Nilai maksimum

mencapai 5,95 µmol/m² pada 22 Mei, bersamaan dengan lonjakan kegempaan. Ini mengindikasikan fase akumulasi tekanan magmatik yang tertunda setelah fase erupsi awal.

Juni–Juli 2023 mencatat lonjakan tertinggi selama periode studi (>9 µg/m³), mendahului puncak aktivitas kegempaan yang tercatat lebih dari 140 kejadian per hari pada 30 Juli. Pola ini memperkuat peran SO_2 sebagai indikator awal sebelum terjadinya erupsi masif.

Terakhir, periode Juli–Agustus 2024 menunjukkan pola dinamis, di mana konsentrasi gas tinggi pada Juli menurun tajam menjelang akhir bulan saat intensitas erupsi meningkat. Tren ini kemudian berbalik pada Agustus, dengan kenaikan kembali SO_2 dan aktivitas gempa. Hal ini mencerminkan siklus tekanan–pelepasan dalam sistem magmatik Gunung Semeru.

Dari keseluruhan analisis, dapat disimpulkan bahwa lonjakan konsentrasi SO_2 umumnya berkorelasi dengan peningkatan aktivitas kegempaan dan kejadian erupsi. Namun, tidak semua erupsi didahului oleh lonjakan konsentrasi SO_2, yang mengindikasikan bahwa pemantauan SO_2 perlu dikombinasikan dengan data kegempaan dan visual observasi lain untuk memperkuat prediksi aktivitas vulkanik.

B. Uji Korelasi Peningkatan SO_2 Terhadap Data Kegempaan/Letusan PVMBG

Untuk menguji hubungan antara peningkatan konsentrasi gas SO_2 dengan aktivitas kegempaan atau letusan Gunung Semeru, digunakan pendekatan regresi linier dan uji signifikansi statistik-t untuk koefisien regresi. Uji ini bertujuan untuk melihat apakah variabel konsentrasi SO_2 secara signifikan mempengaruhi jumlah kejadian gempa erupsi dalam kurun waktu harian setiap tahun.

Tabel 1. Hasil Uji Korelasi Nilai Maksimum Konsentrasi SO_2 dengan Kejadian Kegempaan Erupsi/Letusan

Tahun	Pearson	T-Statistic
2019	0,609	14,626
2020	0,03	0,661
2021	0,258	5,079
2022	0,010	0,199
2023	-0,060	-1,149
2024	0,294	5,833

Tab. 1 menunjukkan bahwa hubungan antara peningkatan konsentrasi SO_2 dan jumlah kejadian kegempaan erupsi bersifat fluktuatif dari tahun ke tahun. Korelasi yang signifikan secara statistik (*p-value* < 0.05 dan |t-statistik| > t-kritis) hanya ditemukan pada tahun 2019, 2021, dan 2024, yang mengindikasikan adanya hubungan nyata antara emisi gas vulkanik dan aktivitas kegempaan pada tahun-tahun tersebut.

Secara khusus, tahun 2019 mencatat hubungan yang sangat kuat, dengan t-statistik 14,626, menandakan korelasi yang sangat signifikan. Sementara tahun 2021 dan 2024 menunjukkan hubungan yang lebih lemah namun tetap signifikan, dengan t-statistik masing-masing 5,085 dan 5,869. Hal ini mendukung dugaan bahwa peningkatan gas SO_2 dapat berperan sebagai indikator aktivitas vulkanik, terutama saat sistem gunung api dalam fase tekanan tinggi.

Sebaliknya, pada tahun 2020, 2022, dan 2023, korelasi tidak signifikan (*p-value* > 0,05), menunjukkan bahwa pada periode tersebut fluktuasi SO_2 tidak sejalan dengan aktivitas kegempaan, kemungkinan karena pelepasan gas terjadi tanpa disertai peningkatan tekanan magmatik yang cukup untuk memicu gempa atau erupsi.

Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa hubungan antara SO_2 dan kegempaan tidak selalu konsisten, namun dapat menjadi indikator penting dalam periode tertentu, terutama saat mendekati fase erupsi signifikan.

C. Uji Korelasi Peningkatan SO_2 Terhadap Data Pencarian Erupsi Semeru *Google Trends*

Analisis ini bertujuan untuk melihat apakah terdapat hubungan antara peningkatan konsentrasi gas SO_2 yang merupakan indikator aktivitas vulkanik, dengan volume pencarian informasi terkait erupsi Gunung Semeru di *Google Trends* yang mencerminkan perhatian publik.

Tabel 2. Hasil Uji Korelasi Nilai Maksimum Konsentrasi SO_2 dengan Pencarian *Google Trends*

Tahun	Pearson	T-Statistic
2019	-0,057	-1,092
2020	0,037	0,708
2021	-0,073	-1,399
2022	-0,049	-0,948
2023	-0,076	-1,462
2024	-0,075	-1,451

Berdasarkan **Tab. 2** hasilnya menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan yang signifikan antara kedua variabel tersebut di semua tahun yang dianalisis. Seluruh nilai t-statistik tercatat lebih kecil dari nilai t-kritis pada α = 0,05 (±1,9665) dan *p-value* > 0,05 (meskipun tidak ditampilkan, ini dapat disimpulkan dari nilai t yang rendah), sehingga secara statistik gagal menolak hipotesis nol (H_0).

Koefisien Pearson seluruhnya mendekati nol, baik bernilai negatif maupun positif lemah (misalnya: -0,057 di 2019, 0,037 di 2020, hingga -0,075 di 2024). Ini menunjukkan tidak adanya korelasi linear yang berarti antara naik turunnya konsentrasi SO_2 dengan intensitas pencarian masyarakat terhadap topik "Erupsi Semeru" di internet.

Meskipun terjadi peningkatan aktivitas vulkanik yang ditandai oleh naiknya emisi SO_2, publik tidak langsung

meresponsnya dalam bentuk pencarian informasi online, atau mereka baru bereaksi ketika erupsi benar-benar terjadi dan diberitakan luas. Dengan kata lain, *Google Trends* lebih merefleksikan dampak media atau kejadian besar aktual (erupsi signifikan), bukan dinamika teknis internal gunung api seperti emisi gas SO_2. Secara keseluruhan, analisis ini menegaskan bahwa pencarian *Google Trends* tidak dapat dijadikan indikator awal atau proksi langsung terhadap dinamika gas vulkanik, dan lebih tepat digunakan sebagai alat pemantauan persepsi publik atau reaksi sosial terhadap aktivitas gunung api yang telah terjadi.

D. Uji Korelasi Perhitungan Delay

Analisis korelasi delay dilakukan untuk mengevaluasi hubungan temporal antara konsentrasi maksimum SO_2 dan kejadian kegempaan erupsi Gunung Semeru periode 2019–2024. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi apakah emisi gas SO_2 dapat berperan sebagai indikator awal aktivitas vulkanik atau sebagai respons terhadapnya. Uji korelasi dilakukan dalam dua arah: (1) SO_2 → Gempa dan (2) Gempa → SO_2, dengan penundaan (delay) 0, 7, dan 14 hari.

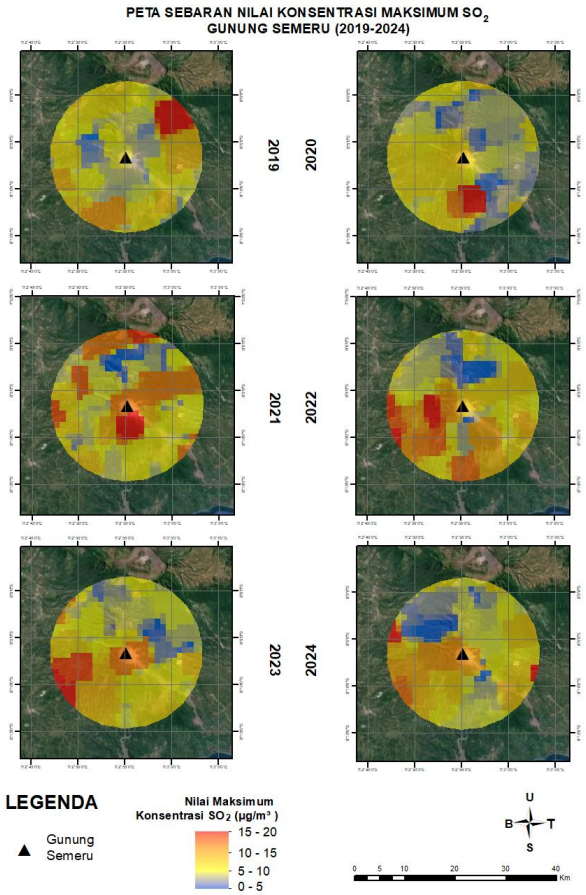
Tabel 3. Hasil Uji Korelasi Data Kegempaan Erupsi/Letusan terhadap Perhitungan Delay

Delay	Arah Korelasi	Pearson	T-statistic
Hari H	SO_2 (hari ke-t) → Kejadian Gempa (hari ke-t)	0,290	14,220
7 Hari	SO_2 (hari ke-t) → Gempa/Letusan (t+7)	0,307	15,113
14 Hari	SO_2 (hari ke-t) → Gempa/Letusan (t+14)	0,324	16,035
7 Hari	Gempa/Letusan (hari ke-t) → SO_2 (t+7)	0,274	13,381
14 Hari	Gempa/Letusan (hari ke-t) → SO_2 (t+14)	0,247	11,941

Tab. 3 menunjukkan hasil analisis menunjukkan bahwa arah korelasi dari SO_2 ke kejadian gempa memberikan nilai korelasi tertinggi, yaitu pada delay 14 hari dengan r = 0,324 dan t-statistik = 16,035. Korelasi ini lebih kuat dibanding arah sebaliknya, yang cenderung lebih lemah. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan emisi SO_2 cenderung mendahului lonjakan kejadian kegempaan, sehingga berpotensi sebagai indikator awal erupsi.

E. Hasil Visualisasi Konsentrasi SO_2 Tahun 2019 – 2024

Peta ini merupakan hasil pengolahan data rata-rata tahunan dari nilai maksimum konsentrasi SO_2 selama periode 2019-2024, dengan cakupan area beradius 15 km dari pusat kawah Gunung Semeru. Nilai konsentrasi diklasifikasikan ke dalam empat kelas, yaitu 0–5 µg/m³, 5–10 µg/m³, 10–15 µg/m³, dan 15–20 µg/m³.



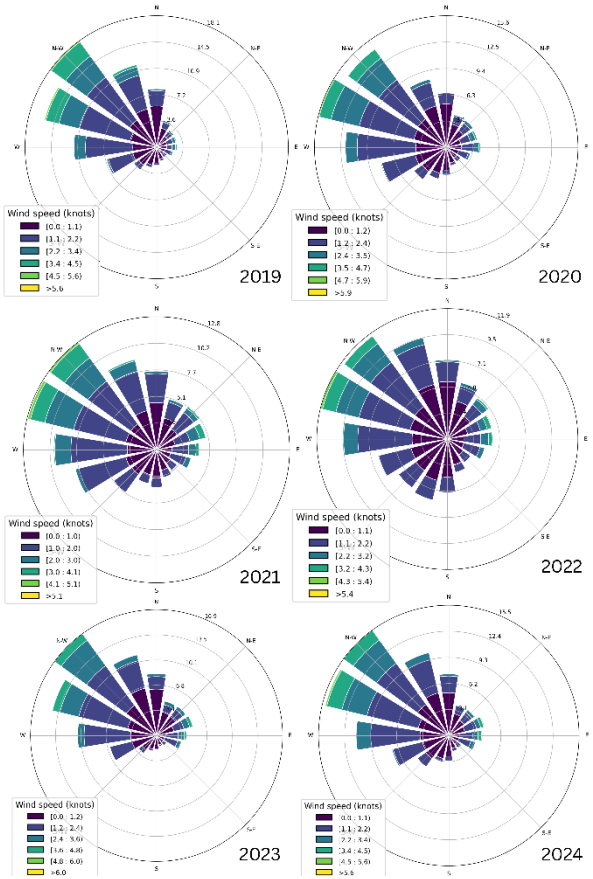
Gambar 9. Visualisasi Sebaran Nilai Konsentrasi Maksimum SO_2

Pada **Gamb. 9** terlihat adanya variasi arah dan intensitas sebaran emisi antar tahun. Tahun 2019 memperlihatkan konsentrasi tinggi mengarah ke timur laut dan tenggara dari kawah. Pada tahun 2020, pola distribusi cenderung merata dengan dominasi kelas 5–10 µg/m³ dan peningkatan konsentrasi ke arah selatan. Tahun 2021 mencatat lonjakan konsentrasi yang signifikan hingga kelas tertinggi (15–20 µg/m³) yang terdistribusi di sekitar kawah, menyebar ke selatan dan timur laut. Sebaran tahun 2022 bergeser ke arah barat dan barat daya, dengan cakupan yang lebih luas. Pada 2023, akumulasi konsentrasi maksimum tampak dominan di arah barat dan barat daya, yang kemungkinan dipengaruhi oleh arah

angin tahunan. Terakhir, tahun 2024 menunjukkan pola sebaran yang kembali terkonsentrasi di sekitar kawah dan mengarah ke barat, didominasi oleh kelas 10–15 µg/m³. Pola-pola sebaran ini mencerminkan dinamika emisi gas vulkanik dan pengaruh atmosferik seperti arah angin tahunan terhadap penyebaran SO_2 dari Gunung Semeru.

F. Validasi Visualisasi Konsentrasi SO_2 Tahun 2019 – 2024 Terhadap Arah Angin (Windrose)

Untuk memvalidasi arah penyebaran konsentrasi maksimum SO_2 di sekitar Gunung Semeru, dilakukan analisis terhadap arah angin tahunan dalam bentuk diagram *windrose* dari tahun 2019 hingga 2024. Diagram ini menyajikan informasi arah datangnya angin dominan, kecepatan, serta frekuensi kemunculannya.



Gambar 10. *Windrose* di Atas Gunung Semeru 2019-2024

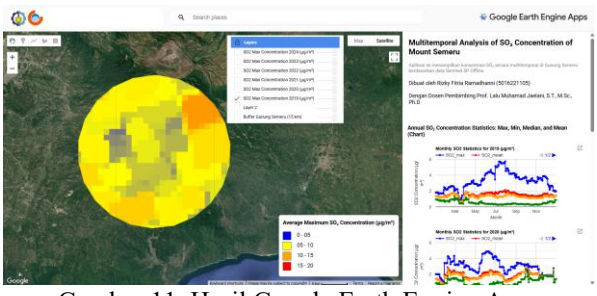
Gamb. 10 diketahui bahwa angin dominan tiap tahun umumnya berasal dari sektor barat hingga barat laut (W–NW). Panjang batang menunjukkan frekuensi kemunculan angin dari arah tertentu, di mana batang yang lebih panjang menunjukkan arah datang angin yang lebih sering. Dengan demikian, arah sebaran gas SO_2 umumnya akan mengikuti arah *downwind* (menjauh dari arah datang angin).

Pada tahun 2019, angin dominan berasal dari barat laut, yang berkontribusi terhadap sebaran SO_2 ke arah timur laut dan tenggara. Tahun 2020 menunjukkan keterkaitan logis antara angin dominan dari barat dan barat laut dengan sebaran SO_2 ke arah selatan. Hal serupa juga terjadi pada tahun 2021, di mana angin dari timur laut menyebabkan penyebaran SO_2 ke arah barat daya. Namun, pada tahun 2022, 2023, dan 2024, ditemukan ketidaksesuaian antara arah angin dominan dan lokasi konsentrasi SO_2 maksimum, dengan akumulasi gas terletak di sisi datangnya angin.

Faktor-faktor seperti dinamika angin musiman, turbulensi lokal akibat topografi kompleks Gunung Semeru, serta arah letusan lateral kemungkinan berperan dalam ketidaksesuaian tersebut. Untuk melengkapi analisis tahunan, dilakukan juga validasi pada skala harian (misalnya 14 Juli 2023), yang menunjukkan bahwa kecepatan angin rendah (low advection) dapat membatasi penyebaran gas, menyebabkan akumulasi lokal di sekitar kawah.Hasil ini mengindikasikan bahwa validasi spasial konsentrasi SO_2 terhadap arah angin penting untuk meningkatkan pemahaman terhadap perilaku dispersi gas vulkanik. Integrasi antara data emisi dan kondisi atmosfer ini mendukung pengembangan sistem pemodelan risiko paparan SO_2 yang lebih akurat di wilayah Gunung Semeru.

G. Hasil Google Earth Engine Apps

Hasil akhir dari penelitian ini adalah Google Earth Engine Apps yang dirancang untuk menampilkan peta sebaran konsentrasi gas SO_2 secara interaktif, serta grafik nilai konsentrasi SO_2 dari 2019-2024. Tujuan utama pengembangan aplikasi ini adalah untuk menyajikan data hasil pemantauan vulkanik secara sederhana, informatif, dan mudah dipahami. Gambar 11 menunjukkan tampilan antarmuka aplikasi yang telah dikembangkan, dengan peta dinamis dan grafik pendukung. Aplikasi ini dapat diakses secara daring melalui tautan berikut: https://its.id/m/KonsentrasiSO2Semeru



Gambar 11. Hasil Google Earth Engine Apps

Dengan adanya Google Earth Engine Apps ini, diharapkan pemantauan dan analisis awal terhadap potensi peningkatan aktivitas vulkanik dapat dilakukan dengan lebih cepat, efisien, dan berbasis data spasial yang akurat.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa penelitian ini berhasil mengidentifikasi tren nilai maksimum konsentrasi SO_2 di atas Gunung Semeru selama periode 2019 hingga 2024. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi SO_2 mengalami fluktuasi tahunan dengan lonjakan tertinggi terjadi pada tahun 2024, yaitu mencapai nilai rata-rata maksimum konsentrasi SO_2 9,0186 µg/m³ dengan nilai maksimum puncak bernilai 9,7281 µg/m³. Tahun-tahun lain yang juga menunjukkan peningkatan signifikan antara lain 2019, 2021, dan 2022. Beberapa lonjakan konsentrasi SO_2 terjadi bersamaan atau mendahului peningkatan kejadian kegempaan dan erupsi, seperti yang teramati pada periode Juni-Juli 2019, Januari-Februari 2020, Mei-Juni 2020, Juni-Juli 2021, Maret-Mei 2022, Juni-Juli 2023, dan Juli-Agustus 2024. Pola tren ini mengindikasikan bahwa konsentrasi maksimum SO_2 dapat menjadi indikator awal potensi peningkatan aktivitas vulkanik Gunung Semeru.

Visualisasi spasial konsentrasi maksimum SO_2 per tahun yang dihasilkan dalam penelitian ini mampu menunjukkan arah dan sebaran konsentrasi gas secara detail. Sebaran konsentrasi tinggi cenderung mengarah ke timur dan tenggara kawah, yang konsisten dengan arah dominan angin hasil analisis *windrose* tahunan. Perubahan arah dan intensitas sebaran antar tahun memberikan pemahaman mengenai variabilitas kondisi atmosfer dan dinamika vulkanik yang memengaruhi distribusi emisi gas. Visualisasi ini penting sebagai dasar pemetaan wilayah terdampak dan pendukung analisis risiko paparan gas vulkanik.

Selain itu, penggunaan citra satelit Sentinel-5P melalui platform GEE berhasil diterapkan dalam membangun aplikasi interaktif untuk pemantauan konsentrasi SO_2. Aplikasi yang dikembangkan mampu menyajikan peta sebaran gas tahunan, grafik tren nilai konsentrasi maksimum, serta fitur interaktif lainnya untuk eksplorasi data spasial secara langsung melalui Google Earth Engine Apps. Implementasi ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi penginderaan jauh dengan pemrosesan berbasis cloud dapat menghasilkan sistem monitoring yang informatif, efisien, dan mudah diakses. Hasil ini mendukung pengembangan sistem mitigasi bencana berbasis data spasial untuk pemantauan aktivitas vulkanik berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) atas penyediaan data aktivitas vulkanik Gunung Semeru, MAGMA Idonesia – Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) penyedia data laporan kejadian erupsi gunung semeru, Copernicus Climate Data Store dan European Space Agency (ESA) atas ketersediaan data satelit Sentinel-5P dan data meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Pratomo, "Klasifikasi gunung api aktif Indonesia, studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah," *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 1, no. 4, pp. 209–227, Dec. 2006, doi: 10.17014/ijog.1.4.209-227.

[2] S. Purnama, "Delapan gunung api mengalami erupsi 66.197 kali sepanjang tahun 2023," ANTARA. Accessed: Oct. 22, 2024. [Online]. Available: https://www.antaranews.com/berita/3916788/delapan-gunung-api-mengalami-erupsi-66197-kali-sepanjang-tahun-2023

[3] P. Hedelt, D. S. Efremenko, D. G. Loyola, R. Spurr, and L. Clarisse, "Sulfur dioxide layer height retrieval from Sentinel-5 Precursor/TROPOMI using FP_ILM," *Atmos Meas Tech*, vol. 12, no. 10, pp. 5503–5517, Oct. 2019, doi: 10.5194/amt-12-5503-2019.

[4] A. Dimara, B. Hamuna, and L. Dimara, "Pemanfaatan Citra Satelit Sentinel-2A Untuk Pemetaan Habitat Dasar Perairan Dangkal (Studi Kasus: Teluk Humbolt, Kota Jayapura)," *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan Papua*, vol. 3, Jun. 2020, doi: DOI:https://doi.org/10.31957/acr.v3i1.1213.

[5] E. Sihotang, F. Artaningh, T. Septi Anggraini, and A. Dimara Sakti, "Pemantauan Konsentrasi Gas SO2 di Sekitar Gunung Sinabung Menggunakan Citra Satelit Sentinel-5 Precursor," 2019. [Online]. Available: http://jurnal.mapin.or.id/index.php/jpji/issue/archive

[6] M. R. Karliansyah *et al.*, "KEMENTERIAN LINGKUNGAN HIDUP: PEDOMAN TEKNIS PENYUSUNAN INVENTARISASI EMISI PENCEMAR UDARA DI PERKOTAAN," 2017.

[7] A. Cofano, F. Cigna, L. Santamaria Amato, M. Siciliani de Cumis, and D. Tapete, "Exploiting Sentinel-5P TROPOMI and Ground Sensor Data for the Detection of Volcanic SO2 Plumes and Activity in 2018–2021 at Stromboli, Italy," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 6991, Oct. 2021, doi: 10.3390/s21216991.

[8] J. de Vries *et al.*, "TROPOMI on ESA's Sentinel 5p ready for launch and use," K. Themistocleous, D. G. Hadjimitsis, S. Michaelides, and G. Papadavid, Eds., Aug. 2016, p. 96880B. doi: 10.1117/12.2240839.

[9] ESA, "Introducing Sentinel-5P." Accessed: Nov. 29, 2024. [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Introducing_Sentinel-5P

[10] M. A. Mahardianti, S. E. Prabawa, and A. F. Effendi, "Studi Perubahan Indeks Kerapatan Vegetasi terhadap Suhu Permukaan Tanah dan Indeks Kualitas Udara dengan Pemanfaatan Citra Satelit Landsat 8 di Kabupaten Gresik," *GEOID*, vol. 19, no. 3, pp. 386–404, Oct. 2024, doi: 10.12962/geoid.v19i3.2251.

[11] N. Theys *et al.*, "Sulfur dioxide vertical column DOAS retrievals from the Ozone Monitoring Instrument: Global observations and comparison to ground-based and satellite data," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, no. 6, pp. 2470–2491, Mar. 2015, doi: 10.1002/2014JD022657.