

Pemanfaatan Data Satelit Sentinel-5P untuk Pemantauan SO₂ Pasca Erupsi Gunung Anak Krakatau

Utilization of Sentinel-5P Satellite Data for SO₂ Monitoring after Anak Krakatau Eruption

Fanny Aditya Putri¹, Udhi Catur Nugroho¹, Randy Prima Brahmantara², dan Arum Tjahjaningsih¹

¹Pusat Riset Penginderaan Jauh, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

²Pusat Data dan Informasi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

e-mail: fanny.aditya.putri@brin.go.id

Naskah diterima 12 April 2020, selesai direvisi 15 Februari 2023, dan disetujui 17 Februari 2023

ABSTRAK

Salah satu gunung api yang cukup diwaspadai di Indonesia adalah Gunung Anak Krakatau yang terletak di Selat Sunda. Aktivitas letusan gunung api ini telah terjadi secara sporadis dalam beberapa dekade terakhir. Berdasarkan data PVMBG, pada bulan April 2020 Gunung Anak Krakatau mengalami erupsi. Gas SO₂ yang diemisikan pada saat erupsi gunung api perlu dipantau persebarannya. Gas SO₂ tersebut di udara dapat bereaksi dengan uap air membentuk senyawa sulfat yang dapat menyebabkan hujan asam. Selain dapat menyebabkan hujan asam dalam skala lokal, SO₂ dari letusan gunung api juga dapat mempengaruhi iklim secara global. Teknologi penginderaan jauh satelit telah banyak digunakan untuk memantau SO₂ pasca erupsi gunung api. *European Space Agency* (ESA) meluncurkan satelit Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) yang memiliki misi melakukan monitoring polusi udara dengan mengamati konsentrasi gas-gas yang ada di atmosfer. Salah satu sensor yang dibawa oleh satelit Sentinel-5P adalah *The TROPospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI). Penelitian ini merupakan kajian awal untuk menguji kemampuan Sentinel-5P dalam memantau konsentrasi gas SO₂ pasca erupsi gunung api, dengan studi kasus erupsi Gunung Anak Krakatau pada tanggal 10 April 2020. Pada penelitian ini data satelit Sentinel-5P yang digunakan adalah data level 2 yang sudah memiliki geolokasi dan berbentuk *Vertical Column Density* (VCD). Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh bahwa peningkatan konsentrasi SO₂ teramati oleh Sentinel-5P pada tanggal 11 April dan mencapai konsentrasi terbanyak pada tanggal 12 April. Setelah tanggal 12 April, konsentrasi SO₂ mulai menurun tetapi tetap menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai di awal bulan April. Hal ini disebabkan oleh adanya beberapa erupsi yang terekam di seismograf, walaupun secara visual tidak teramati. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa satelit Sentinel-5P dapat digunakan untuk pemantauan peningkatan konsentrasi SO₂ akibat erupsi gunung api.

Kata kunci: Erupsi, gunung api, Sentinel-5P, SO₂

ABSTRACT

Anak Krakatau which is located in Sunda Strait is one of the volcano in Indonesia that need to be aware of. This volcano activities has been occurred sporadically in recent decades. Based on data of PVMBG, in April 2020 there was an eruption of Anak Krakatau. The distribution of SO₂ gas emitted during the eruption of the volcano needs to be monitored. The SO₂ gas in the air can react with water vapor to form sulfate compounds which can cause acid rain. Besides being able to cause acid rain on a local scale, SO₂ from volcanic eruptions can also affect the climate globally. Satellite remote sensing technology has been widely used to monitor SO₂ after volcanic eruptions. The European Space Agency (ESA) launched the Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) satellite whose mission is to monitor air pollution by observing the concentration of gases in the atmosphere. One of the sensors carried by the Sentinel-5P satellite is The TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). This research is a preliminary study to test Sentinel-5P's ability to monitor SO₂ gas concentrations after a volcanic eruption, with a case study of the eruption of Anak Krakatau on April 10, 2020. In this study, the Sentinel-5P satellite data used is level 2 that already have geolocation and is in the form of Vertical Column Density (VCD). Based on the results, it was found that an increase in the SO₂ concentration was observed by Sentinel-5P on April 11 and reached the peak concentration on April 12. After April 12, the SO₂ concentration started to decline but

continued to show higher values compared to the values at the beginning of April. This is due to the presence of several eruptions recorded on the seismograph, although they are not visually observable. Thus it can be concluded that the Sentinel-5P satellite can be used for monitoring the increase in SO₂ concentrations due to volcanic eruptions.

Keywords: Eruption, volcano, Sentinel-5P, SO₂

PENDAHULUAN

Indonesia mempunyai 127 gunung api aktif. Gunung api tersebut terletak sepanjang Pulau Sumatera, Pulau Jawa, hingga sampai sisi timur Pulau Nusa Tenggara dan sisi utara Pulau Sulawesi (<https://magma.esdm.go.id>). Kondisi ini membuat banyak wilayah di Indonesia beresiko terhadap erupsi gunung api.

Produk erupsi gunung api salah satunya adalah gas yang dikeluarkan pada saat sebelum erupsi, saat erupsi, dan setelah erupsi. Gas di dalam magma mempunyai viskositas yang sangat rendah dan ekspansinya yang besar menyebabkan gas bergerak ke atas jauh lebih cepat dibandingkan fase lainnya, sehingga gas vulkanik dapat digunakan sebagai salah satu parameter dalam pemantauan aktivitas suatu gunung api (Sutaningsih drr., 2010). Jenis gas gunung api diantaranya yaitu uap air (H₂O), karbon dioksida (CO₂), hidrogen sulfida (H₂S), sulfur dioksida (SO₂), hidrogen klorida (HCl), dan hidrogen fluorida (HF) (Vaselli drr., 2006).

Gas SO₂ merupakan salah satu gas yang penting untuk dipantau emisinya. Gas SO₂ di udara dapat bereaksi dengan uap air membentuk senyawa sulfat yang dapat menyebabkan hujan asam. Hujan asam dapat menyebabkan korosi pada logam, kerusakan bangunan, hingga iritasi pada kulit (Cheng drr., 1987). Selain dapat menyebabkan hujan asam dalam skala lokal, SO₂ dari letusan gunung api juga dapat mempengaruhi iklim secara global. Misalnya, letusan Gunung Tambora pada tahun 1815 menyebabkan Eropa pada tahun 1816 mengalami tahun tanpa musim panas (Hamdi, 2014).

Dalam beberapa dekade terakhir, salah satu gunung api di Indonesia yang sangat aktif adalah Gunung Anak Krakatau (Gaol dan Serhalawan, 2019). Gunung Anak Krakatau mengalami beberapa kejadian erupsi di bulan April 2020. Salah satu erupsi yang cukup besar terjadi pada

tanggal 10 April pukul 21.58 yang menghasilkan kolom abu mencapai ±357 meter di atas permukaan laut, kemudian diikuti erupsi pukul 22.35 yang menghasilkan ketinggian kolom abu mencapai ±657 meter di atas permukaan laut. Gunung Anak Krakatau kembali mengalami erupsi hingga tanggal 11 April 2020 pukul 03.30 dengan tipe strombolian (ESDM, 2020).

Agar aktivitas gunung api pada saat fase aktif dapat terpantau dengan rutin, khususnya emisi SO₂, maka dibutuhkan teknologi untuk mengetahui informasi emisi SO₂ dari jarak jauh. Teknologi ini dibutuhkan untuk menghindari keterbatasan dan juga keamanan surveyor dalam melakukan pengamatan. Teknologi yang dapat digunakan untuk melakukan emisi gas SO₂ di gunung api adalah satelit penginderaan jauh (De Foy drr., 2009; Wang drr., 2013). Salah satu satelit yang dapat digunakan untuk melihat dinamika SO₂ adalah satelit Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P). Satelit ini diluncurkan oleh *European Space Agency* (ESA) untuk melihat polusi di udara dan memantau konsentrasi gas di atmosfer. Sensor yang digunakan untuk misi tersebut adalah *The TROPOspheric Monitoring Instrument* (TROPOMI). TROPOMI mengukur radiasi sinar ultraviolet pada spektrum yang tinggi. Hasil dari pengukuran ini diharapkan akan meningkatkan resolusi spasial (menjadi 7 km x 3,5 km pada nadir) dibandingkan dengan instrumen pengukur sebelumnya yaitu OMI dan GOME-2 (Theys drr., 2017). Tujuan penelitian ini adalah sebagai studi awal untuk menguji kemampuan satelit Sentinel-5P dalam memantau sebaran gas SO₂ pasca erupsi Anak Krakatau 2020.

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Pada penelitian ini pemantauan SO₂ pasca erupsi dilakukan terhadap Gunung Anak

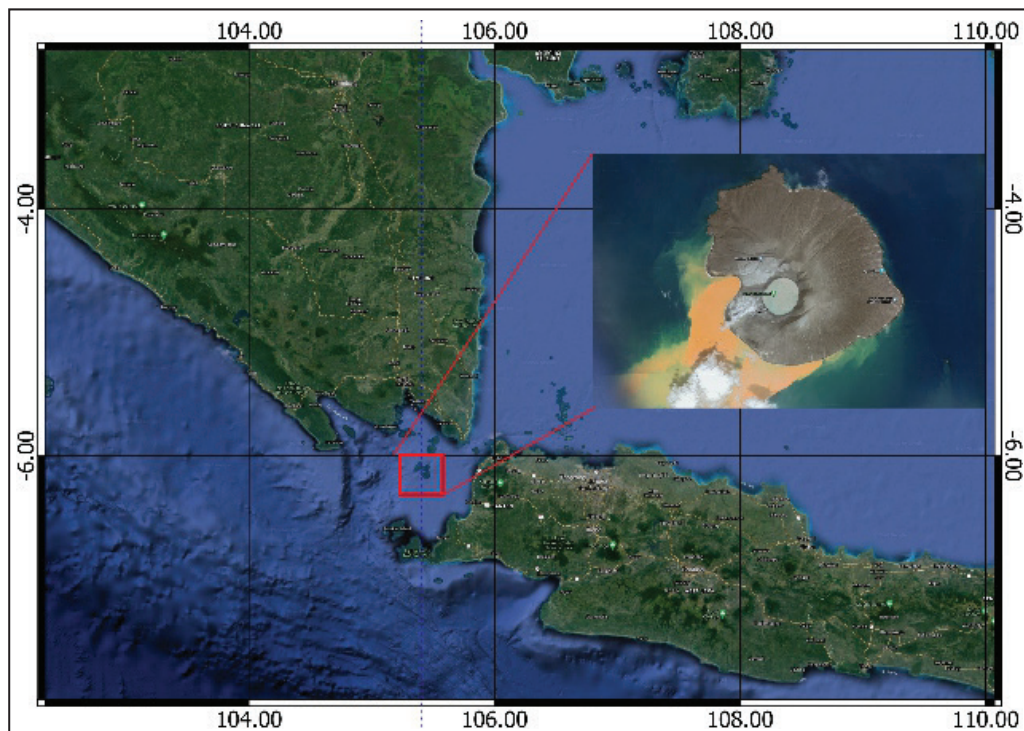
Krakatau. Gunung Anak Krakatau berada di koordinat $6^{\circ}06'05.8''$ LS dan $105^{\circ}25'22.3''$ BT (<https://vsi.esdm.go.id>) (Gambar 1). Secara administratif, Gunung Anak Krakatau masuk dalam Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Gunung Anak Krakatau dikelilingi oleh lautan Selat Sunda yang memisahkan Pulau Sumatera dan Pulau Jawa. Di sekitar Gunung Anak Krakatau terdapat Pulau Sertung di sebelah barat, Pulau Panjang di sebelah timur, dan Pulau Rakata di sebelah tenggara. Pulau - pulau ini dan Gunung Anak Krakatau sendiri merupakan hasil dari aktivitas vulkanik Gunung Krakatau di masa lampau (Sutawidjaja, 2006).

Data Penelitian

Data SO_2 yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari sensor TROPOMI satelit Sentinel-5P. Sentinel-5P memiliki resolusi temporal harian dan resolusi spasial $7 \times 3,5 \text{ km}^2$ yang lebih tinggi dibandingkan dengan satelit pendahulunya seperti OMI AURA (Theys dr., 2019).

Data Sentinel-5P dapat diunduh melalui *website Copernicus*. Data Sentinel-5P yang diunduh dari *website Copernicus* memiliki format data NetCDF (*Network Common Data Form*). Data yang tersedia mulai dari bulan Desember 2018. ESA menyediakan dua produk data Sentinel-5P yaitu produk *near-real time* (NRTI) yang tersedia selama 1 bulan setelah akuisisi dan kemudian akan digantikan oleh produk *Offline* (OFFL). Produk OFFL didasarkan pada kalibrasi terkonsolidasi dan data tambahan sehingga dapat memberikan kualitas data yang lebih baik dibandingkan dengan produk NRTI. Ukuran file produk OFFL juga jauh lebih besar dibandingkan dengan produk NRTI karena mencakup wilayah yang lebih luas (ESA, 2020).

Data Sentinel-5P juga tersedia pada platform *Google Earth Engine* (GEE). GEE merupakan platform berbasis *cloud* yang diciptakan oleh Google yang dapat digunakan untuk menganalisis dan visualisasi dataset geospasial. GEE memiliki akses terhadap berbagai data satelit, termasuk data Sentinel-5P baik data NRTI



Gambar 1. Lokasi Gunung Anak Krakatau.

maupun OFFL. Namun, ada jeda waktu sekitar 3-4 hari antara data Sentinel-5P yang tersedia di *website Copernicus* dan GEE.

Metode Penelitian

Satelit Sentinel-5P biasanya melintasi wilayah Indonesia pada pukul 06.00 UTC atau 13.00 WIB. Pada penelitian ini data satelit Sentinel-5P yang digunakan adalah data level 2. Data level 2 merupakan produk yang sudah memiliki *geolocation*. *Slant Column Density* (SCD) dari SO_2 diperoleh dengan menggunakan *Differential Optical Absorption Spectroscopy* (DOAS) dalam spektrum UV (312-326 nm). Kemudian SCD dikonversi menjadi *Vertical Column Density* (VCD) dengan menggunakan *Air Mass Factor* (AMF) (Theys drr., 2017). Nilai VCD atau total kolom vertikal inilah yang digunakan sebagai nilai konsentrasi SO_2 yang diemisikan oleh Gunung Anak Krakatau.

Nilai maksimum SO_2 total kolom selama bulan April 2020 diperoleh dari data Sentinel-5P yang disediakan pada GEE. Nilai maksimum dihitung dengan batas area 16x13 km yang melingkupi Gunung Anak Krakatau dan sekitarnya. Nilai maksimum yang diperoleh kemudian ditampilkan dalam sebuah grafik.

Pengolahan data untuk melihat sebaran gas SO_2 secara spasial dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai metode/perangkat. Sihotang drr. (2020) menggunakan *software Sentinel Application Platform* (SNAP) dan ArcGIS untuk melakukan pemantauan SO_2 Gunung Sinabung. Pengolahan menggunakan metode ini membutuhkan tahapan yang cukup panjang. Panoply merupakan salah satu *software* yang dapat digunakan langsung untuk visualisasi sebaran spasial SO_2 tanpa adanya pengolahan lebih lanjut. Pada penelitian ini visualisasi data SO_2 untuk tanggal 9-20 April 2020 dilakukan menggunakan Panoply. Panoply adalah sebuah *open source software* berbasis java yang dapat digunakan untuk membaca, melihat, dan membuat plot data NetCDF, HDF, dan GRIB. Panoply

dapat diunduh melalui situs GISS NASA. Pada proses visualisasi SO_2 , jenis plot yang dipilih adalah *Georeferenced Lon-Lat* yaitu jenis plot berdasarkan bujur dan lintangnya. Selanjutnya dilakukan proses *cropping*, penyesuaian skala, serta perbaikan tampilan. Untuk keperluan visualisasi, data SO_2 yang digunakan adalah SO_2 dengan ketinggian *plume* 7 km dan skala konsentrasi 0,5 - 3 (10^{-3} mol/m_2).

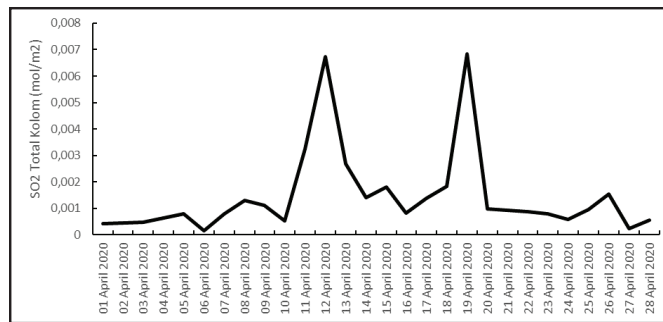
Data trajektori dari model HYSPLIT digunakan sebagai data penunjang arah sebaran gas SO_2 pasca erupsi Anak Krakatau. HYSPLIT adalah sebuah model yang dikembangkan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). HYSPLIT telah digunakan dalam berbagai simulasi transportasi atmosfer, dispersi, serta deposisi polutan dan bahan berbahaya (Chai drr., 2017; Stein drr., 2015; Wang drr., 2010). HYSPLIT menggunakan gabungan antara pendekatan Lagrangian, kerangka acuan bergerak, serta metodologi Eulerian. Pada penelitian ini, HYSPLIT dijalankan secara langsung pada website NOAA. Sebagai perbandingan dengan Sentinel-5P digunakan data SO_2 dari OMI AURA. Data SO_2 OMI AURA dapat diakses pada <https://disc.gsfc.nasa.gov>.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Munculnya Gunung Anak Krakatau dimulai pada munculnya erupsi tipe *Sursey* pada tahun 1927 di sekitar bekas kawah Gunung Krakatau (Pratomo, 2006). Kegiatan gunung api ini terjadi terus menerus hingga munculnya sebuah pulau gunung api di tahun 1929. Sejak lahirnya, Gunung Anak Krakatau tumbuh cukup cepat akibat sering terjadinya erupsi yang berlangsung hampir setiap tahun (Sutawidjaja, 2006). Di tahun 2020, pada bulan April terdapat aktivitas erupsi Gunung Anak Krakatau yang terekam pada konsentrasi SO_2 total kolom di area sekitar Gunung Anak Krakatau (Gambar 2).

Erupsi pertama terjadi pada tanggal 10 April 2020. Namun, konsentrasi SO_2 pada tanggal tersebut belum mengalami peningkatan karena

Pemanfaatan Data Satelit Sentinel-5P untuk Pemantauan SO_2
Pasca Erupsi Gunung Anak Krakatau



Gambar 2. Nilai maksimum SO_2 Total Kolom di area sekitar Gunung Anak Krakatau.

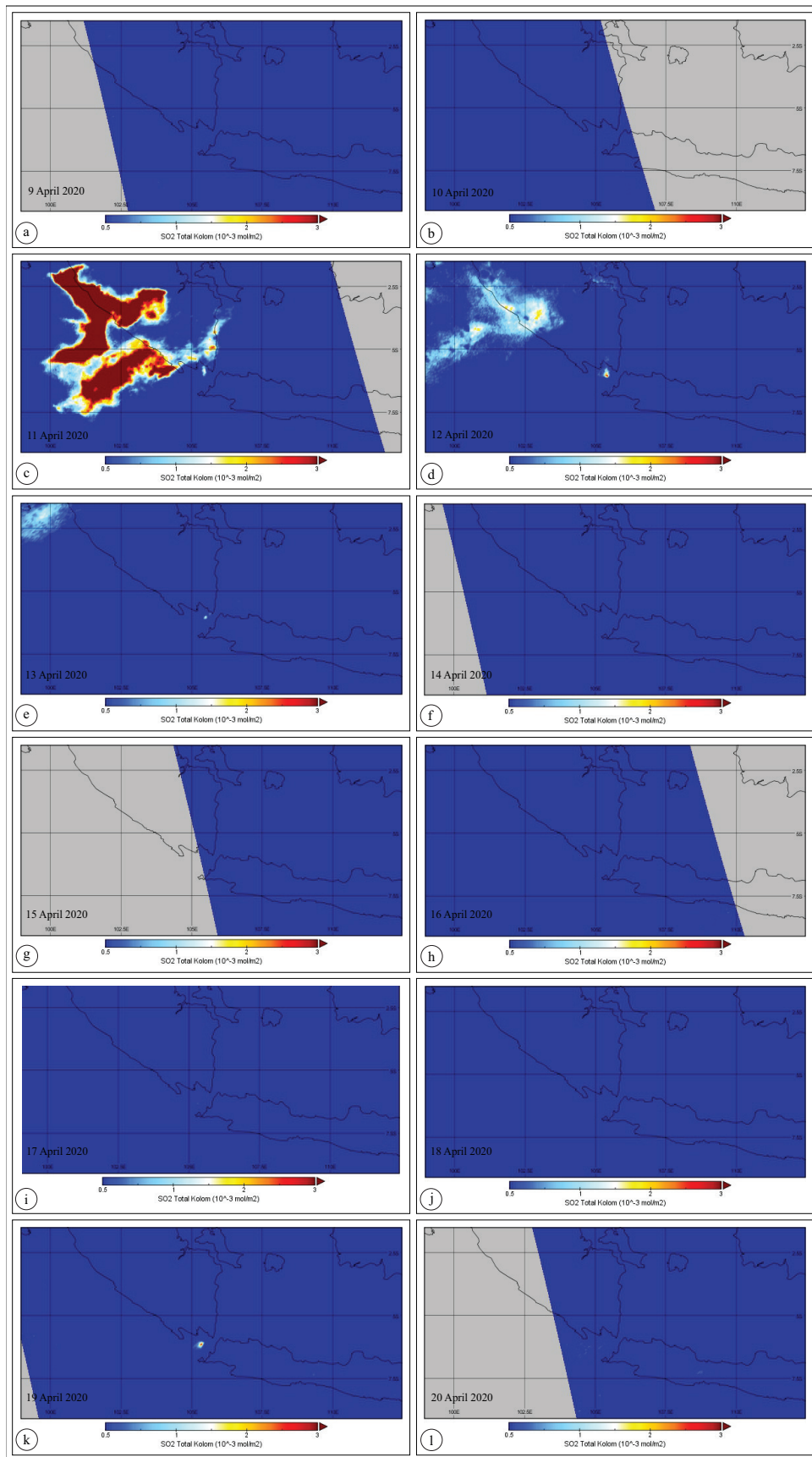
perekaman satelit Sentinel-5P berlangsung sekitar pukul 13:53 WIB, sedangkan erupsi terjadi pada pukul 21:58 dan 22:35 WIB. Peningkatan konsentrasi terjadi mulai tanggal 11 April. Konsentrasi SO_2 terbanyak terjadi pada tanggal 12 April. Hal ini disebabkan oleh akumulasi SO_2 akibat erupsi menerus tipe strombolian yang terjadi di Gunung Anak Krakatau hingga tanggal 11 April 2020 pukul 03:30 WIB dan erupsi pada pukul 17:48 WIB. Erupsi tipe Strombolian ini berupa semburan lava pijar dari magma yang dangkal. Nama Strombolian diadopsi dari letusan gunung api Stromboli di Italia. Letusan tipe ini tidak terlalu kuat, tetapi bersifat bersambung terus menerus dan berlangsung dalam jangka waktu yang lama (Taddeucci drr., 2015).

Setelah tanggal 12 April, konsentrasi SO_2 mulai menurun tetapi tetap menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai di awal bulan April. Penurunan konsentrasi SO_2 ini dapat dikaitkan dengan penurunan aktivitas vulkanik Gunung Anak Krakatau. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya erupsi yang dapat diamati secara visual walaupun ada beberapa erupsi yang terekam di seismograf. PVMBG melaporkan terjadinya erupsi pada 13 April pukul 20:54 WIB, 14 April 2020 pukul 06:28 WIB, 16 April 2020 pukul 14:47 WIB, 17 April 2020 pukul 07:49 dan 17:32 WIB. Setelah 18 April hanya gumpalan gas dan uap yang dilaporkan, naik hingga 100 m di atas kawah (ESDM, 2020). Konsentrasi SO_2 kembali tinggi pada tanggal 19 April. Berdasarkan grafik pada Gambar 1, Sentinel-5P dapat mengamati pen-

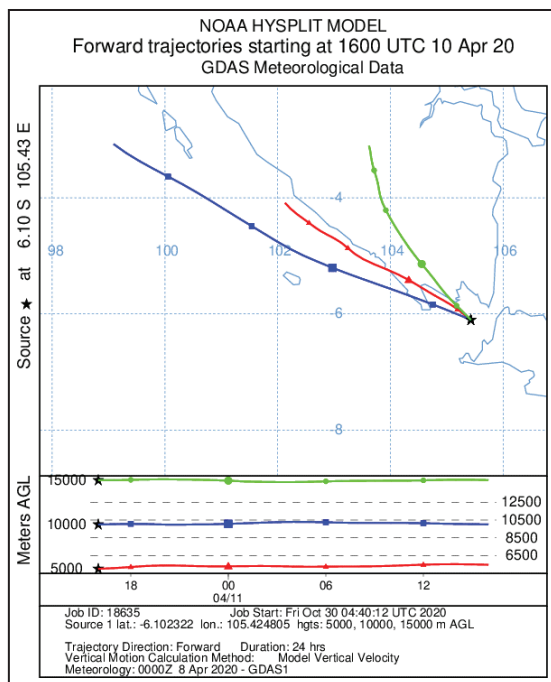
ingkatan konsentrasi SO_2 akibat erupsi-erupsi tersebut.

Konsentrasi SO_2 pada tanggal 12 April 2020 mencapai 0,0067 mol/m² atau setara dengan sekitar 428 mg/m². Jumlah ini sangat signifikan dibandingkan SO_2 yang diemisikan pada saat tidak aktif. Bani drr. (2015) menggunakan spektroskopi *UV airborne* untuk mengukur SO_2 dan memperoleh hasil bahwa pada saat tidak aktif, Gunung Anak Krakatau mengemisikan SO_2 sebanyak 83 mg/m². Emisi SO_2 pada erupsi April 2020 ini masih lebih rendah bila dibandingkan dengan jumlah SO_2 yang diemisikan pada erupsi Desember 2018 yang total nilainya mencapai sekitar 173 kiloton dalam 11 hari (Goodier & Paris, 2019).

Sebaran spasial SO_2 pada tanggal 9-20 April 2020 ditunjukkan pada Gambar 3. Visualisasi secara spasial digunakan untuk mengetahui arah persebaran SO_2 hasil erupsi. Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa pada tanggal 9 dan 10 April belum adanya SO_2 yang terdeteksi sesuai dengan pembahasan sebelumnya. Pada tanggal 11 April 2020 sekitar pukul 13:34 WIB terlihat SO_2 bergerak ke arah barat laut Gunung Anak Krakatau. Hal ini sesuai dengan trajektori output model HYSPLIT NOAA pada tanggal 10 April 2020 pukul 16:00 UTC atau 23:00 WIB (Gambar 4). Pada tanggal 12 April terlihat bahwa konsentrasi SO_2 yang menyebar sudah mulai menunjukkan penurunan, tetapi untuk area Gunung Anak Krakatau dan sekitarnya masih tinggi. Hasil ini sesuai dengan hasil nilai SO_2 total kolom maksimum pada Gambar 1.



Gambar 2. Nilai maksimum SO₂ Total Kolom di area sekitar Gunung Anak Krakatau.



Gambar 4. Trajektori output model Hysplit NOAA pada tanggal 10 April 2020 pukul 23:00 WIB.

Setelah tanggal 13 April sebaran SO_2 sudah tidak terdeteksi. SO_2 kembali terdeteksi meningkat pada tanggal 19 April, tetapi area persebarannya hanya di sekitar Gunung Anak Krakatau.

KESIMPULAN

Peningkatan aktivitas vulkanik Gunung Anak Krakatau terutama emisi gas SO_2 -nya pada bulan April 2020 dapat dipantau menggunakan satelit Sentinel-5P. Pemantauan dapat dilakukan terhadap konsentrasi/jumlah SO_2 maupun persebarannya secara spasial. Berdasarkan hasil pengolahan data dapat dilihat bahwa konsentrasi gas SO_2 mengalami dinamika kenaikan dan penurunan selama periode pemantauan. Secara spasial dapat juga dilihat arah dominan persebaran SO_2 pasca erupsi. Persebaran SO_2 pada umumnya searah dengan persebaran abu vulkanik, sehingga data tersebut dapat juga dijadikan acuan saat sebaran abu vulkanik tidak dapat dipantau menggunakan satelit optik karena beberapa kendala, misalnya tutupan awan. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat dilakukan untuk pemantauan SO_2 secara

kontinu, tidak hanya pasca erupsi. Pemantauan SO_2 gunung api penting dilakukan karena dapat digunakan untuk interpretasi proses vulkanik. Dengan demikian diharapkan dapat menjadi salah satu mitigasi bencana erupsi gunung api.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada ESA, NASA, dan NOAA atas data-data yang dapat diakses secara publik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Pusat Riset Penginderaan Jauh yang telah memfasilitasi dalam pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Bani, P., Normier, A., Bacri, C., Allard, P., Gunawan, H., Hendrasto, M., Surono, and Tsanev, V. (2015). First measurement of the volcanic gas output from Anak Krakatau, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 302, 237-241. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.008>
- Chai, T., Crawford, A., Stunder, B., Pavolonis, M. J., Draxler, R., and Stein, A. (2017). Improving volcanic ash predictions with the HYSPLIT dispersion model by assimilating MODIS satellite retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(4), 2865-2879. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2865-2017>
- Cheng, R. J., Hwu, J. R., Kim, J. T., and Leu, S. M. (1987). Deterioration of marble structures: The role of acid rain. *Analytical Chemistry*, 59(2), 104-106. <https://doi.org/10.1021/ac00129a743>
- De Foy, B., Krotkov, N. A., Bei, N., Herndon, S. C., Huey, L. G., Martínez, A. P., Ruiz-Suárez, L. G., Wood, E. C., Zavala, M., and Molina, L. T. (2009). Hit from both sides: Tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO_2 retrievals during the MILAGRO field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(24), 9599-9617. <https://doi.org/10.5194/acp-9-9599-2009>

- ESA. *Data Products*. Diakses dari <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products> pada November 2020
- ESDM. *Berita Gunungapi*. Diakses dari <https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/aktivitas-gunungapi> pada Oktober 2020
- Gaol, A. L. dan Serhalawan, Y. R. (2019). Krakatau Di Selat Sunda (Studi Kasus : 23-28 Desember 2018) Gunung Anak Krakatau Di Selat Sunda (Studi Kasus : 23-28 Desember 2018). *Buletin Meteorologi Dan Geofisika*, 9(8), 31-37.
- Goodier, M. and Paris, R. (2019). SO₂ and tephra emissions during the December 22, 2018 Anak Krakatau flank-collapse eruption. *Volcanica*, 2(2), 91-103. <https://doi.org/10.30909/vol.02.02.91103>
- Hamdi, S. (2014). Kajian Peningkatan Kandungan Aerosol Stratosfer. *Berita Dirgantara*, 15(2), 40-49.
- 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.vol1no4.20065>
- Sihotang, E., Artaningh, F., Septi, T., dan Dimara, A. (2020). Pemantauan Konsentrasi Gas SO₂ di Sekitar Gunung Sinabung Menggunakan Citra Satelit Sentinel-5 Precursor. *July 2019*.
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., and Ngan, F. (2015). NOAA's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Sutaningsih, N. E., Nurnusanto, I., Sukarnen, & Suryono. (2010). Bahaya gas vulkanik Gunung Salak, Jawa Barat. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 1(2), 79-90.
- Sutawidjaja, I. (2006). Pertumbuhan Gunung Api Anak Krakatau setelah letusan katastrofis 1883. *Indonesian Journal on Geoscience*, 1(3), 143-153. <https://doi.org/10.17014/ijog.vol1no3.20063>
- Taddeucci, J., Edmonds, M., Houghton, B., James, M. R., and Vergnolle, S. (2015). Hawaiian and Strombolian Eruptions. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00027-4>
- Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., Pedernana, M., Arellano, S., Galle, B., Fernandez, D., Carlito, C. J. M., Barrington, C., Taisne, B., Delgado-Granados, H., Loyola, D., and Van Roozendaal, M. (2019). Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39279-y>
- Theys, Nicolas, De Smedt, I., Yu, H., Danckaert, T., Van Gent, J., Hörmann, C., Wagner, T., Hedelt, P., Bauer, H., Romahn, F., Pedernana, M., Loyola, D., and 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>
- Vaselli, O., Tassi, F., Giannini, L., Capaccioni, B., and Montegrossi, G. (2006). Sampling and Analysis of Volcanic Gases. *Acta Vulcanologica*, 18(1/2), 1000-1012. <https://doi.org/10.1400/93821>
- Wang, F., Chen, D. S., Cheng, S. Y., Li, J. B., Li, M. J., and Ren, Z. H. (2010). Identification of regional atmospheric PM₁₀ transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis. *Environmental Modelling and Software*, 25(8), 927-934. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.02.004>
- Wang, J., Park, S., Zeng, J., Ge, C., Yang, K., Carn, S., Krotkov, N., and Omar, A. H. (2013). Modeling of 2008 Kasatochi volcanic sulfate direct radiative forcing: Assimilation of OMI SO₂ plume height data and comparison with MODIS and CALIOP observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(4), 1895-1912. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1895-2013>