

# Analisis Profil Vertikal Stabilitas Atmosfer Selama Sebaran Abu Vulkanik Gunung Marapi di Wilayah Bandara Minangkabau Padang

Muhammad Faisal Rohman<sup>1</sup>, Risang Bayu Firdaus<sup>2</sup>, Yosafat Donni Haryanto<sup>3</sup>

<sup>123</sup>Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG), Tangerang Selatan

## Email Penulis

<sup>1</sup>muhammad.faisal.rohman21@gmail.com  
<sup>2</sup>bayurisang5@gmail.com

## Kata Kunci:

Abu Vulkanik, Radiosonde, Parameter Udara Atas

## Keywords:

Volcanic Ash, Radiosonde, Upper Air Parameters

## ABSTRAK

Di penghujung tahun 2023, Indonesia dikejutkan dengan meletusnya Gunung Marapi yang ada di Sumatra Barat. Gunung ini termasuk dalam salah satu kategori gunung berapi yang masif aktif di Indonesia dengan aktivitas vulkaniknya yang mengeluarkan partikel-partikel vulkanis ke atmosfer. Kondisi ini tentunya akan berdampak terhadap stabilitas atmosfer disekitarnya. Penelitian ini bertujuan menganalisa dan membandingkan profil vertikal stabilitas atmosfer pada periode dengan intensitas vulkanik yang kuat/masif dengan periode dimana intensitas vulkanik dari Gunung Marapi yang kurang signifikan. Penelitian ini juga memanfaatkan hasil citra satelit TROPOMI untuk mengetahui intensitas vulkanik dari sebaran dan kosentrasasi SO<sub>2</sub> yang terekam satelit. Profil vertikal stabilitas atmosfer didapat dari hasil olahan data Radiosonde di Bandara Minangkabau Padang dengan hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi stabilitas atmosfer bersifat labil bersyarat berdasarkan nilai lapse rate dan untuk profil vertikal atmosfer menunjukkan adanya peningkatan ketinggian dan nilai dari parameter selama periode masif tersebut, seperti Lifting Condensation Level (LCL), Convective Condensation Level (CCL), Equilibrium Level (EL), ketinggian tropopause, dan precipitable water. Namun berkebalikan dengan Relative Humidity (RH) dimana intensitas vulkanik yang kuat/masif menyebabkan penurunan kelembapan relatif.

## ABSTRACT

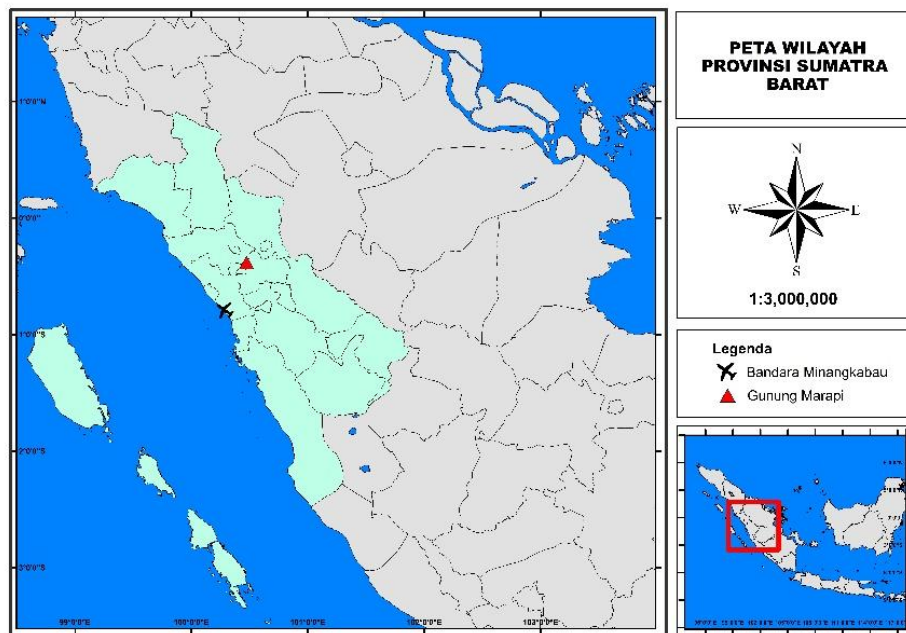
At the end of 2023, Indonesia was shocked by the eruption of Mount Marapi in West Sumatra. This mountain is included in one of the categories of massive, active volcanoes in Indonesia with volcanic activity that emits volcanic particles into the atmosphere. This condition will certainly have an impact on the stability of the surrounding atmosphere. This research aims to analyze and compare the vertical profile of atmospheric stability in periods with strong/massive volcanic intensity with periods where the volcanic intensity of Mount Marapi is less significant. This research also utilizes the results of TROPOMI satellite imagery to determine volcanic intensity from the distribution and concentration of SO<sub>2</sub> recorded by satellite. The vertical atmospheric stability profile was obtained from the results of processed Radiosonde data at Minangkabau Airport in Padang with the research results showing that the atmospheric stability condition was conditionally unstable based on the lapse rate value and the vertical atmospheric profile showed an increase in height and parameter values during this massive period, such as Lifting Condensation Level (LCL), Convective Condensation Level (CCL), Equilibrium Level (EL), tropopause height, and precipitable water. However, this is the opposite of Relative Humidity (RH), where strong/massive volcanic intensity causes a decrease in relative humidity.

## PENDAHULUAN

Pendahuluan Gunung Marapi merupakan salah satu gunung berapi aktif di Indonesia yang terletak di Provinsi Sumatra Barat. Menurut laporan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), status gunung Merapi ditetapkan dalam level Level II (Waspada) per tanggal 3 Desember 2023 akibat aktivitas gunung ini yang mengalami erupsi eksplosif disertai dengan adanya aliran piroklastik dan gempa vulkanik. Aktivitas vulkanis dari gunung Marapi menyebabkan sebaran abu vulkanik yang berpengaruh pada kondisi atmosfer di sekitarnya, termasuk pada kondisi stabilitas vertikal atmosfer.

Stabilitas vertikal udara ke atas merupakan gambaran kondisi fisis suatu parcel atau gugusan udara pada suatu kondisi ketinggian dan waktu yang sedemikian yang dapat berkembang dengan pengembangan teori dan persamaan fisika seperti hukum hidrostatika dan termodinamika (Winarso, 2009). Data pengamatan Radiosonde dapat memberikan informasi mengenai stabilitas vertikal udara ke atas. Observasi udara atas dengan menggunakan Radiosonde telah menjadi bagian yang representatif untuk digunakan dalam observasi atmosfer (Haimberger, 2006). Lapse rate (laju susut suhu) didefinisikan sebagai penurunan suhu terhadap ketinggian atmosfer atau gradien suhu vertikal negatif (Tjasyono, 2007). Terdapat tiga macam penurunan suhu terhadap ketinggian yaitu lapse rate udara sekitar ( $\gamma$ ), lapse rate adiabatik kering ( $\gamma_d$ ) dan lapse rate adiabatik basah ( $\gamma_s$ ) dengan nilai lapse rate adiabatik kering sekitar  $9.8^\circ\text{C}/\text{km}$  dan nilai lapse rate adiabatik basah sekitar  $4.6^\circ\text{C}/\text{km}$  (Prawirowardoyo, 1996). Melalui nilai lapse rate ini dapat dilakukan pengkalsifikasian stabilitas atmosfer yang terdiri atas stabil mutlak ( $\gamma < \gamma_s < \gamma_d$ ), labil bersyarat ( $\gamma_s < \gamma < \gamma_d$ ), dan labil mutlak ( $\gamma_s < \gamma_d < \gamma$ ). Secara vertikal terdapat beberapa level (ketinggian) penting, yaitu Lifting Condensation Level (LCL), Convective Condensation Level (CCL), Equilibrium Level (EL), dan ketinggian tropopause.

## METODE



**Gambar 1.** Peta lokasi penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di Bandara Minangkabau Padang yang terletak pada  $00^\circ47'12''$  S dan  $100^\circ16'50''$  E. Gunung Marapi sendiri secara administratif terletak di Kabupaten Agam dan Tanah Datar pada koordinat  $0^\circ22'50''$  S dan  $100^\circ28'24''$  E. Jika dilihat dari peta Bandara Minangkabau terletak di sebelah barat daya dari Gunung Marapi dengan jarak

sekitar 90 km. Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. Data Citra Satelit Tropomi yang diakses melalui website <http://so2.gsfc.nasa.gov/>
2. Data pengamatan Radiosonde dari Stasiun Meteorologi Minangkabau yang diakses melalui website <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2022 dan 2023 mengacu pada periode di mana terjadi frekuensi letusan Gunung Marapi yang tinggi dan rendah. Aktivitas vulkanis dari Gunung Marapi diamati melalui Citra Satelit TROPOMI dimana hasil citra satelit memperlihatkan jumlah dan sebaran SO<sub>2</sub>.

Selain itu, dalam penelitian ini dilakukan pengolahan data hasil pengamatan radiosonde melalui aplikasi RAOB sehingga memperoleh data LCL, CCL, EL, ketinggian tropopause, dan RH vertikal. Sedangkan untuk menghitung lapse rate dapat dilakukan dengan rumusan sebagai berikut:

$$\gamma = - \frac{\partial T}{\partial Z}$$

Keterangan

$\gamma$  = lapse rate (°C/m)

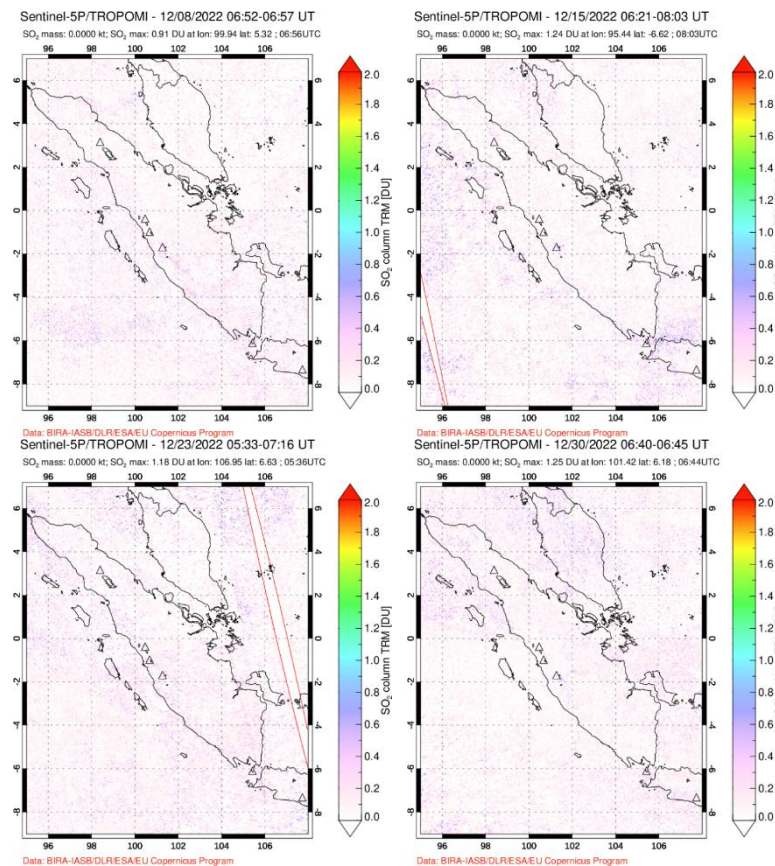
$\partial T$  = perubahan suhu (°C)

$\partial Z$  = perubahan ketinggian (m)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

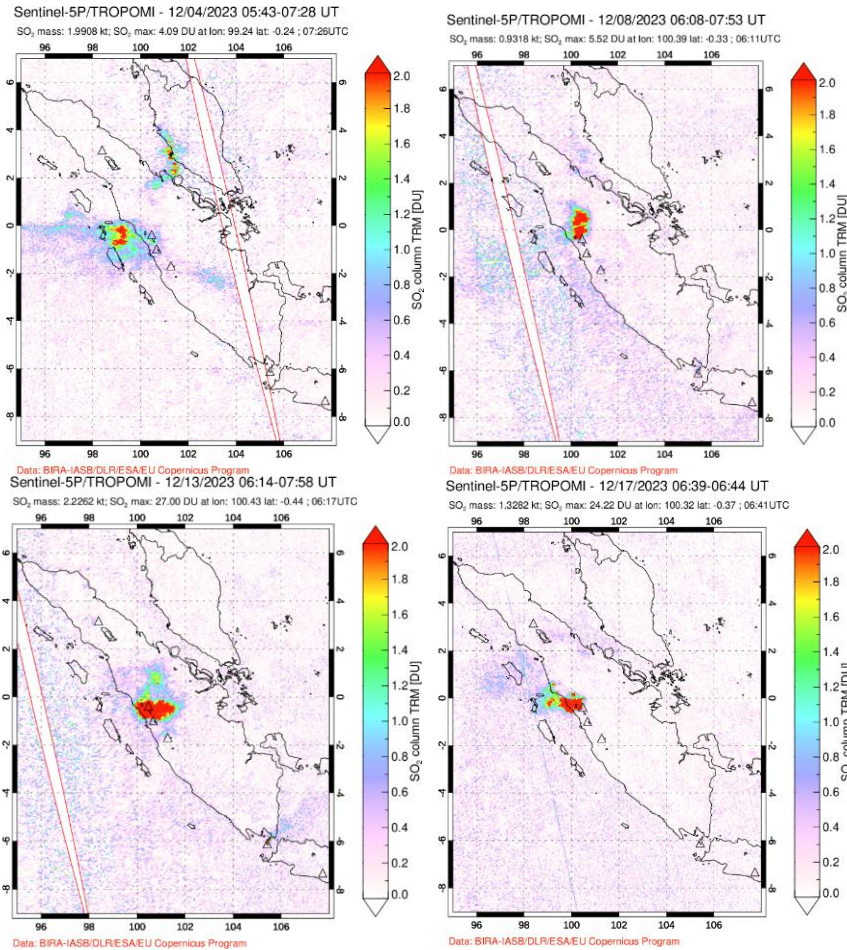
### A. Analisis Hasil Citra Satelit

Hasil citra satelit TROPOMI menunjukkan distribusi spasial dan konsentrasi gas SO<sub>2</sub> di atmosfer.



**Gambar 2.** Sebaran SO<sub>2</sub> selama periode Desember 2022

Gambar 2 menunjukkan sedikitnya distribusi SO<sub>2</sub> akibat aktivitas vulkanis gunung merapi yang terekam satelit selama periode Desember 2022. Meskipun selama periode tersebut, gunung merapi mengalami beberapa kali erupsi. Hal ini bisa terjadi karena Beberapa erupsi mungkin tidak menghasilkan jumlah gas sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) yang signifikan, sehingga distribusinya pada gambar tampak kurang mencolok.

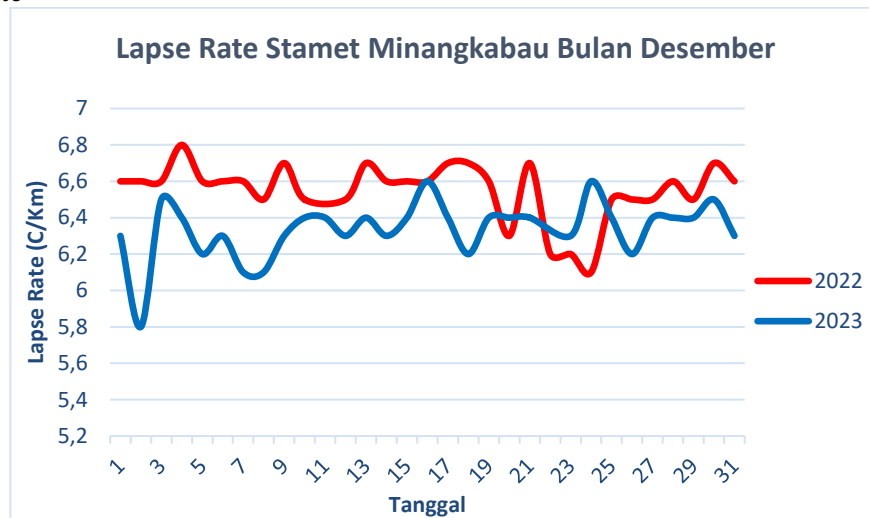


**Gambar 3.** Sebaran SO<sub>2</sub> selama periode Desember 2023

Sedangkan Gambar 3 menunjukkan adanya pola distribusi spasial dari SO<sub>2</sub> dengan konsentrasi yang signifikan. Hal ini menandakan aktivitas gunung merapi yang begitu masif menyebabkan terjadinya erupsi vulkanik dengan intensitas yang tinggi. Erupsi vulkanik yang kuat cenderung akan melepaskan lebih banyak gas vulkanik ke atmosfer termasuk SO<sub>2</sub>. Jika dilihat secara temporal, distribusi spasial dan konsentrasi SO<sub>2</sub> semakin meningkat sejak tanggal 4 Desember 2023 dengan puncaknya tanggal 13 Desember 2023 dan mulai mengalami penurunan intensitas pada tanggal 17 Desember 2023. Pada tanggal 13 Desember 2023, terlihat bahwa jumlah gas vulkanik yang dilepaskan ke atmosfer dalam tingkat yang tinggi. Ini mencerminkan periode erupsi yang paling kuat atau signifikan.

## B. Analisis Profil Vertikal Stabilitas Atmosfer

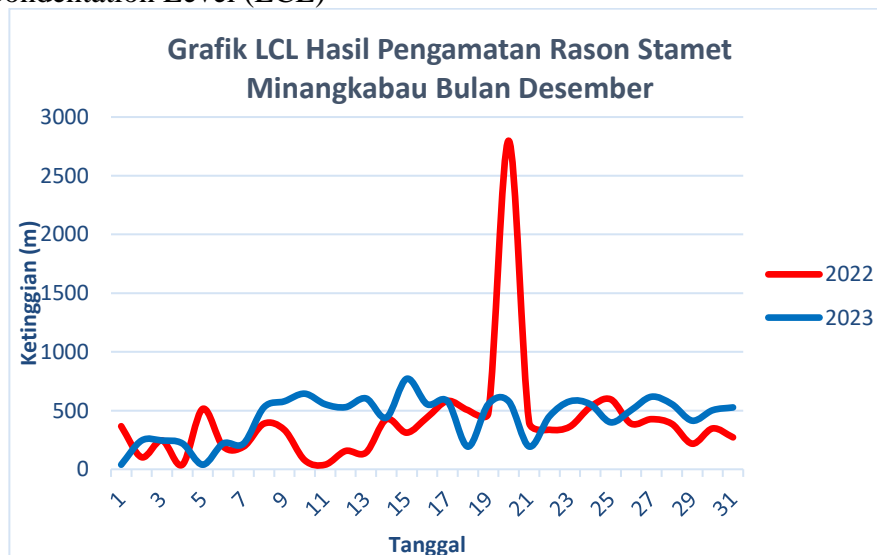
### 1. Lapse Rate



**Gambar 4.** Grafik lapse rate di Stamet Minangkabau pada bulan Desember 2022 dan Desember 2023

Berdasarkan nilai lapse rate, kondisi stabilitas vertikal atmosfer di Padang menunjukkan kondisi stabilitas udara yang labil bersyarat ( $\gamma_s < \gamma < \gamma_d$ ) untuk kedua periode tersebut. Lapse rate pada periode dimana intensitas dan frekuensi aktivitas vulkanis gunung marapi yang masif terlihat lebih rendah dibandingkan dengan periode dengan intensitas dan frekuensi aktivitas vulkanis yang kurang signifikan. Adanya gas-gas vulkanik seperti sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>) yang memiliki kemampuan untuk memantulkan sinar matahari dan meredam radiasi termal menyebabkan penurunan suhu di atmosfer. Penurunan suhu ini menciptakan lapse rate yang lebih rendah dimana suhu menurun lebih lambat dengan ketinggian.

### 2. Lifting Condensation Level (LCL)



**Gambar 5.** Grafik LCL di Stamet Minangkabau pada bulan Desember 2022 dan Desember 2023

Lifting Condensation Level (LCL) adalah ketinggian di mana suatu paket udara akan mencapai titik jenuh jika diangkat secara adiabatik. Intensitas vulkanis yang masif akan menyebabkan pelepasan sejumlah besar material vulkanik ke atmosfer yang dapat menyebabkan pendinginan atmosfer. Pendinginan atmosfer ini akan menurunkan suhu udara di atmosfer yang mengakibatkan penurunan ketinggian LCL. Namun pada beberapa kejadian

seperti yang terjadi pada tanggal 9-13 Desember 2023 menunjukkan ketinggian LCL yang lebih tinggi dibandingkan periode dengan intensitas vulkanis yang kurang signifikan.

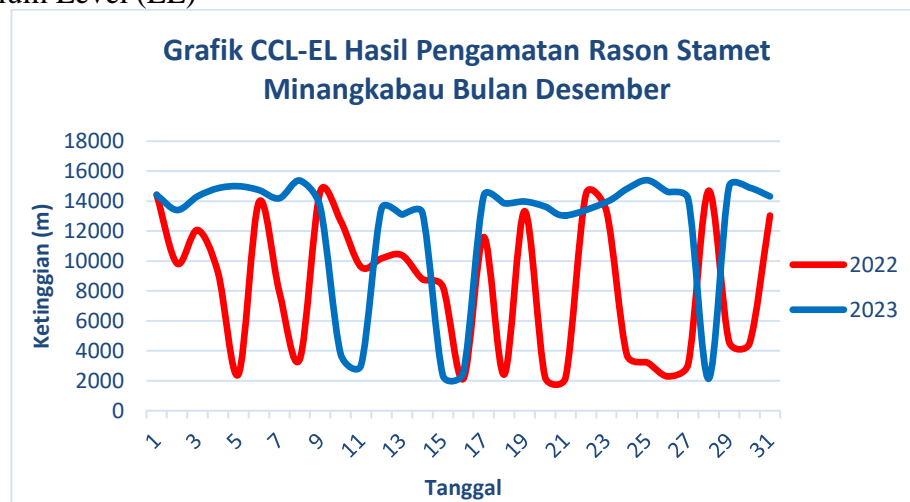
### 3. Convective Condensation Level (CCL)



**Gambar 6.** Grafik CCL di Stamet Minangkabau pada bulan Desember 2022 dan Desember 2023

Convective Condensation Level (CCL) merujuk pada ketinggian di mana uap air di atmosfer mulai mengembun menjadi awan konvektif. Penurunan suhu akibat aktivitas vulkanis yang masif juga dapat menurunkan ketinggian CCL. Hal ini dikarenakan udara yang naik menjadi lebih cepat mencapai suhu di mana uap air mulai mengembun. Jika CCL lebih rendah maka awan konvektif mungkin terbentuk pada ketinggian yang lebih rendah dan berpotensi meningkatkan curah hujan.

### 4. Equilibrium Level (EL)

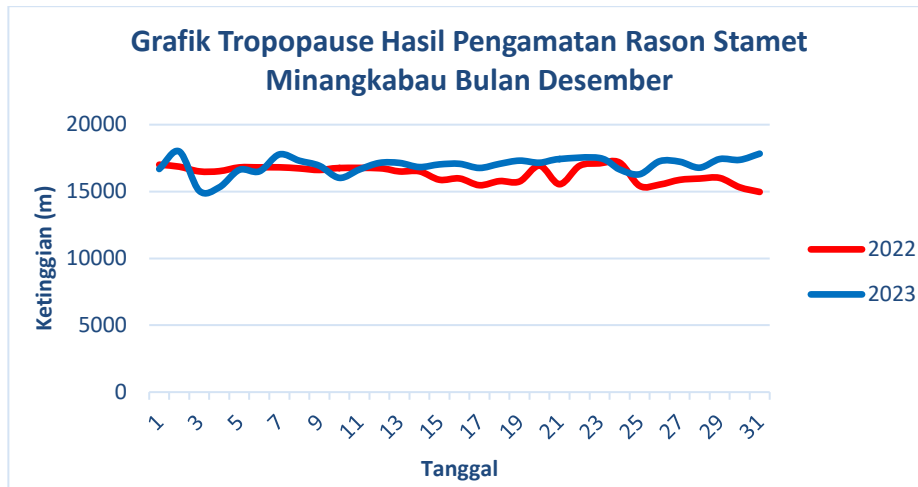


**Gambar 7.** Grafik EL di Stamet Minangkabau pada bulan Desember 2022 dan Desember 2023

Equilibrium Level (EL) adalah konsep yang digunakan dalam meteorologi untuk menggambarkan ketinggian di mana suatu paket udara yang naik memiliki suhu yang sama dengan lingkungannya. EL seringkali terkait dengan fenomena cuaca seperti pembentukan awan dan badai petir. Hasil pengolahan data pengamatan radiosonde pada bulan Desember tahun 2022 dan 2023 dari Stasiun Meteorologi Minangkabau menunjukkan bahwa ketinggian EL pada periode Desember 2022 dan Desember 2023 sangat bervariasi. Rata-rata ketinggian

EL pada periode Desember 2023 lebih tinggi daripada periode Desember 2022 dengan rata-rata ketinggian mencapai 12318 m. Peningkatan EL akibat aktivitas vulkanis dapat memperluas potensi untuk pembentukan awan konvektif yang lebih tinggi dan lebih kuat.

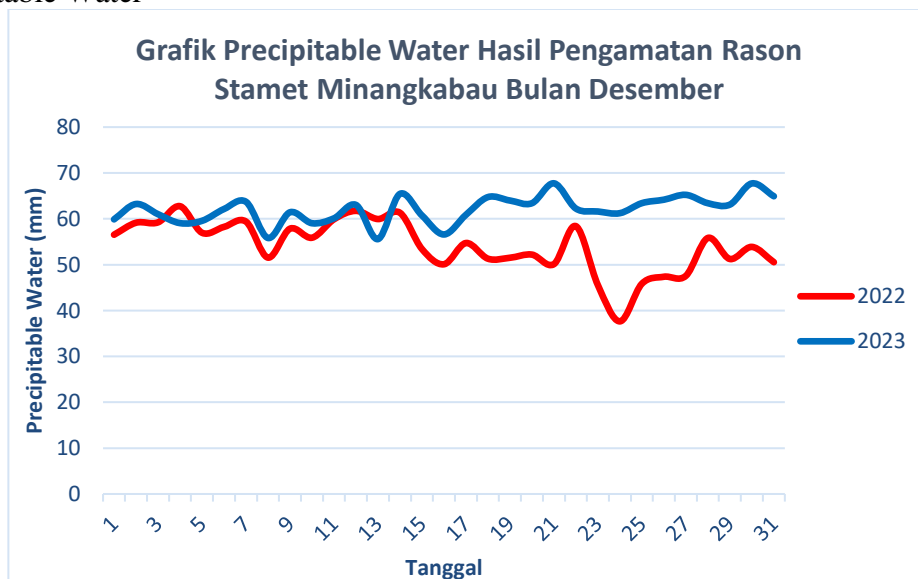
5. Tropopause



**Gambar 8.** Grafik ketinggian Tropopause di Stamet Minangkabau pada bulan Desember 2022 dan Desember 2023

Pada grafik ketinggian tropopause menunjukkan bahwa umumnya ketinggian tropopause pada periode Desember 2023 (intensitas vulkanis yang masif) lebih tinggi daripada periode Desember 2022 (intensitas vulkanis yang kurang signifikan). Pada Desember 2023, rata-rata ketinggian tropopause adalah 16937 m dengan ketinggian maksimum mencapai 17994 m. Aktivitas vulkanis yang melepaskan aerosol ke atmosfer menyebabkan penurunan suhu udara di lapisan troposfer. Penurunan suhu di troposfer ini berimplikasi pada penurunan tekanan udara di troposfer yang menyebabkan terjadinya ekspansi atmosfer di troposfer sehingga ketinggian tropopause menjadi meningkat.

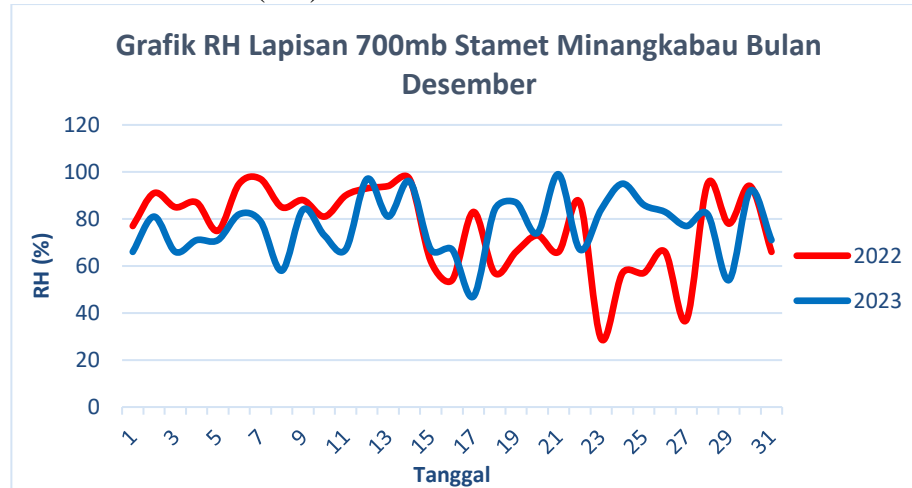
6. Precipitable Water



**Gambar 8.** Grafik nilai precipitable water di Stamet Minangkabau pada bulan Desember 2022 dan Desember 2023

Berdasarkan grafik tersebut menunjukkan bahwa banyaknya precipitable water pada bulan Desember 2022 umumnya lebih rendah dibandingkan pada bulan Desember 2023. Grafik precipitable water pada bulan Desember 2023 menunjukkan adanya tren positif atau naik yang menandakan peningkatan banyaknya precipitable water dari waktu ke waktu. Hal ini disebabkan karena partikel-partikel vulkanik hasil letusan vulkanik berperan sebagai inti pembentuk awan (cloud condensation nuclei/CCN). CCN adalah wadah bagi uap air untuk berkondensasi membentuk tetesan air dalam awan atau dengan kata lain CCN berfungsi meningkatkan proses nukleasi awan yang mengakibatkan pembentukan awan konvektif penghasil hujan.

### 7. Kelembaban Udara Relatif (RH) Vertikal



**Gambar 9.** Grafik nilai RH lapisan 700mb di Stamet Minangkabau pada bulan Desember 2022 dan Desember 2023

Hasil pengolahan data pengamatan radiosonde menunjukkan bahwa nilai RH vertikal pada bulan Desember 2022 di lapisan 700 mb cenderung lebih rendah dibandingkan pada bulan Desember 2023. Kelembapan relatif menunjukkan perbandingan antara jumlah uap air yang ada di udara dengan jumlah uap air maksimum yang bisa dikandung oleh udara pada suhu yang sama. Namun, keberadaan partikel-partikel vulkanik ini dengan sifat higroskopisnya mampu mengurangi kadar uap air di udara yang berdampak pada menurunnya kelembapan relatif. Partikel-partikel ini merupakan bagian dari CCN yang memfasilitasi pembentukan awan dengan menarik uap air yang ada disekitarnya sehingga menyebabkan penurunan kelembapan relatif di wilayah yang terkena imbas dari sebaran abu vulkanik ini. Penurunan kelembapan relatif akibat aktivitas vulkanis gunung merapi yang masif pada tanggal 4, 8, 13, dan 17 Desember 2023 sejalan dengan teori dan hasil citra satelit TROPOMI yang diberikan/digambarkan.

### SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan diatas, diketahui bahwa distribusi spasial dan konsentrasi SO<sub>2</sub> yang terekam melalui citra satelit TROPOMI terlihat lebih signifikan pada bulan Desember 2023 yang menandakan bahwa pada periode tersebut intensitas dan frekuensi vulkanik dari gunung merapi kuat/masif, sedangkan aktivitas vulkanik pada bulan Desember 2022 kurang signifikan ditandai dengan sedikitnya sebaran dan konsentrasi SO<sub>2</sub> yang terekam. Kondisi stabilitas vertikal atmosfer dari hasil olahan nilai lapse rate adalah bersifat labil bersyarat atau netral untuk dua periode tersebut. Aktivitas vulkanik dengan intensitas dan frekuensi vulkanik yang masif berpengaruh pada beberapa profil vertikal atmosfer yang



menyebabkan adanya peningkatan ketinggian dan nilai dari profil vertikal atmosfer tersebut. Namun, aktivitas gunung dengan mengeluarkan partikel-partikel vulkanik justru akan mengurangi kelembapan relatif.

## **DAFTAR RUJUKAN**

- Badan Geologi, “Press Release Erupsi Gunung Marapi Sumatera Barat 3 Desember 2023”  
<https://geologi.esdm.go.id/media-center/press-release-erupsi-gunung-marapi-sumatera-barat-3-desember-2023>
- P. A. Winarso, *Analisa Cuaca 1*. Jakarta: Akademi Meteorologi dan Geofisika, 2009.
- Haimberger, L. *Homogenization of Radiosonde Temperature Time Series Using Innovation Statistics*. Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, Vienna, Austria, 2006
- Tjasyono, B. H. K. *Meteorologi Indonesia Volume 1, Karakteristik dan Sirkulasi Atmosfer*. Badan Meteorologi dan Geofisika. Jakarta, 2007.
- S. Prawirowardoyo, *Meteorologi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 1996.
- Simanungkalit, C. W. dan Saragih, I. J. A., 2021. Profil Vertikal Stabilitas Atmosfer Ketika Sebaran Abu Vulkanik Gunung Sinabung di Sekitar Bandara Kualanamu. *Jurnal Meteorologi, Klimatologi Geofisika dan Instrumentasi* Vol. 1, No. 1, Agustus 2021, pp. 40-47.
- Lisnawati; Makmur, E. E. S. dan Permana, D. S., 2017. Profil Lapse Rate Vertikal Di Wilayah Indonesia. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika* Vol. 18 No. 2 Tahun 2017: 95-106.
- Noang, A. V.; Putra, Y. S. dan Adriat, R., Analisis Karakteristik Udara Atas Wilayah Bandar Udara Internasional Supadio Berdasarkan Data Radiosonde. *Jurnal Prisma Fisika*, Vol. 9, No. 1 (2021), Hal. 48-54.2021
- Zainul, A., *Karakteristik Udara Atas Wilayah Bandar Udara SoekarnoHatta Menggunakan Program RAOB Studi Kasus Tahun 2007-2008*. Institut Pertanian Bogor. Bogor, 2010.
- Syaifulah, M. D., *Analisis Kondisi Udara Atas Wilayah Indonesia*. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. Jakarta, 2017.
- Ahrens, C. D., *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. 2009.