

Observasi Osilasi Resonansi Atmosfer di Ionosfer Setelah Erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki Tahun 2025 Menggunakan GNSS-TEC

Observation of Atmospheric Resonance Oscillations in the Ionosphere After the 2025 Lewotobi Laki-laki Eruption Using GNSS-TEC

Ririn Wuri Rahayu^{1*} & Susilowati¹

¹Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding Author: ririnwurirahayu@upnyk.ac.id

Article Info:

Received: 26 - 09 - 2025

Accepted: 27 - 10 - 2025

Published: 31 - 10 - 2025

Kata kunci: Gangguan ionosfer, Erupsi Gunung Api, GNSS-TEC

Abstrak: Erupsi gunung berapi dapat menghasilkan gelombang akustik dan gravitasi di atmosfer yang merambat ke lapisan ionosfer dan menimbulkan osilasi. Gangguan tersebut dapat terdeteksi melalui variasi Total Electron Content (TEC) yang diperoleh dari pengamatan *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Penelitian ini menganalisis respons ionosfer akibat erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki pada 1 Agustus 2025 di Indonesia dengan memanfaatkan data GNSS-TEC dari stasiun CORS terdekat. Analisis difokuskan pada variasi *slant TEC* yang diamati dari beberapa satelit GNSS. Hasil menunjukkan pola osilasi yang paling jelas pada satelit GPS G32 dan GLONASS R2. Setelah dilakukan penyaringan *high-pass* untuk menghilangkan tren jangka panjang, seri waktu residual TEC memperlihatkan pola osilasi monokromatik dengan periode sekitar 3–5 menit, yang menunjukkan adanya gangguan ionosfer tipe kontinu. Analisis spektrum menggunakan metode Blackman–Tukey mengindikasikan komponen frekuensi dominan pada kisaran 3,7–5,4 mHz, yang berkaitan dengan frekuensi resonansi akustik atmosfer. Temuan ini menunjukkan adanya osilasi resonansi atmosfer di ionosfer yang dipicu oleh erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki, serta menegaskan potensi penggunaan observasi GNSS-TEC untuk pemantauan aktivitas vulkanik di Indonesia.

Keywords: *Ionospheric Disturbances, Volcanic Eruption, GNSS-TEC*

Abstract: *Volcanic eruptions can generate acoustic and gravity waves in the atmosphere that propagate upward into the ionosphere and induce oscillations. These disturbances can be detected through variations in the Total Electron Content (TEC) derived from Global Navigation Satellite System (GNSS) observations. This study analyzes the ionospheric response to the eruption of Mount Lewotobi Laki-laki on August 1, 2025, in Indonesia, using GNSS-TEC data from the nearest CORS station. The analysis focuses on variations in slant TEC observed from several GNSS satellites. The results show the clearest oscillation pattern on the GPS G32 and GLONASS R2 satellite. After applying a high-pass filter to remove long-term trends, the residual TEC time series exhibits a monochromatic oscillation pattern with a period of approximately 3–5 minutes, indicating a continuous-type ionospheric disturbance. Spectral analysis using the Blackman–Tukey method reveals dominant frequency components in the range of 3.7–5.4 mHz, corresponding to atmospheric acoustic resonance frequencies. These findings indicate the presence of atmospheric resonance oscillations in the ionosphere triggered by the Lewotobi Laki-laki eruption and highlight the potential of GNSS-TEC observations for monitoring ionospheric signatures of volcanic activity in Indonesia.*

How to Cite:

Rahayu, R. W., Susilowati (2025). Observasi Osilasi Resonansi Atmosfer di Ionosfer Setelah Erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki Tahun 2025 Menggunakan GNSS-TEC. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 5(2), 75-86. <https://doi.org/10.31315/imagi.v5i2.15708>.

1. PENDAHULUAN

Gangguan ionosfer akibat aktivitas geofisika besar seperti gempa bumi dan erupsi gunung api telah menjadi fokus penelitian dalam dua dekade terakhir. Fenomena ini terjadi ketika energi mekanik dari permukaan bumi merambat ke atmosfer dalam bentuk gelombang akustik dan gravitasi, yang kemudian mencapai lapisan ionosfer dan mengubah kerapatan elektron di sana. Perubahan ini dapat dideteksi melalui pengamatan *Total Electron Content* (TEC) menggunakan sistem *Global Navigation Satellite System* (GNSS), sehingga membuka peluang baru dalam bidang *ionospheric seismology* dan *volcanology*.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa erupsi gunung berapi dapat menghasilkan dua tipe utama gangguan ionosfer (Heki, 2006; Heki & Fujimoto, 2022a). Tipe pertama (*Type-1*) ditandai oleh osilasi resonansi atmosfer yang bersifat harmonik dan berlangsung cukup lama, dengan frekuensi khas sekitar 3,7–5,4 mHz (periode 3–5 menit). Osilasi ini dihasilkan oleh interferensi antara gelombang akustik yang bergerak naik dan turun di antara permukaan bumi dan lapisan mesosfer, membentuk fenomena resonansi atmosfer (Tahira, 1995). Gangguan jenis ini umumnya muncul setelah erupsi kontinu (*Plinian-type eruption*) yang berlangsung selama beberapa jam, seperti yang diamati pada erupsi Soufrière Hills tahun 2003 (Dautermann et al., 2009) dan Pinatubo tahun 1991 (Kanamori & Mori, 1992). Selain itu, studi yang mencakup tiga gunung berapi (Merapi 2010, Kelud 2014, dan Calbuco 2015) menunjukkan bahwa osilasi TEC harmonik yang berkisar di frekuensi ~4 mHz dan berlangsung dalam rentang puluhan hingga ratusan menit, memang dapat dihubungkan dengan aktivitas erupsi yang bersifat kontinu (Cahyadi dkk., 2020).

Sebaliknya, Tipe kedua (*Type-2*) menunjukkan pola impulsif jangka pendek dengan bentuk gelombang *N-shaped* dan periode sekitar 1–2 menit. Gangguan ini biasanya muncul sekitar 8–10 menit setelah erupsi eksplosif tunggal (terutama tipe *Vulcanian*) dan berbeda dari osilasi harmonik yang berlangsung lebih lama. Misalnya, dalam studi perbandingan lima erupsi vulkanik di Jepang antara 2004 hingga 2015 ditemukan bahwa variasi TEC menunjukkan pola *N-shaped* dengan durasi sekitar 80 detik, yang diperkirakan sebagai respons gelombang akustik yang tiba di lapisan F ionosfer (Cahyadi dkk., 2021). Lebih lanjut, penelitian lain menjelaskan bahwa gangguan tipe ini muncul sangat cepat setelah erupsi eksplosif tunggal dan merambat dengan kecepatan sekitar 0,8–1,0 km/detik, yaitu kecepatan gelombang akustik di lapisan F (Heki & Fujimoto, 2022b). Karakteristik impulsif dan singkat dari *Type-2* ini menunjukkan bahwa sumbernya bukanlah aktivitas kontinu, melainkan ledakan yang sangat cepat dan terfokus.

Fenomena dua tipe gangguan ionosfer tersebut menunjukkan bahwa setiap erupsi gunung api dapat memicu respons atmosfer dan ionosfer dengan karakteristik yang bergantung pada mekanisme letusan, energi yang dilepaskan, serta kondisi atmosfer saat kejadian. Oleh karena itu, penting untuk meneliti apakah pola serupa juga muncul pada erupsi gunung api di wilayah lain, terutama di Indonesia yang merupakan salah satu daerah dengan aktivitas vulkanik tertinggi di dunia. Meskipun berbagai studi telah dilakukan di Jepang dan wilayah Pasifik Barat, penelitian mengenai respons ionosfer akibat erupsi di Indonesia masih relatif terbatas.

Salah satu peristiwa penting yang dijadikan studi kasus penelitian ini adalah erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki di Provinsi Nusa Tenggara Timur. Berdasarkan data Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), erupsi signifikan terjadi pada 1 Agustus 2025 pukul 20.48 WITA (12.48 UT), setelah sebelumnya teramati peningkatan aktivitas kegempaan vulkanik sejak sore hari. Letusan tersebut menghasilkan kolom abu tebal dengan ketinggian mencapai beberapa kilometer di atas kawah, disertai lontaran material pijar dan hujan abu di wilayah sekitarnya. Akibat aktivitas ini, status gunung ditetapkan pada Level IV (Awat) dan wilayah dalam radius 6–7 km dari kawah dinyatakan terlarang untuk aktivitas masyarakat (PVMBG, 2025). Aktivitas vulkanik yang cukup kuat ini berpotensi menghasilkan gelombang akustik dan gravitasi yang merambat hingga ionosfer, sehingga menjadi kasus ideal untuk mengamati respons ionosfer akibat aktivitas vulkanik di Indonesia.

Penelitian ini memanfaatkan data pengamatan GNSS-TEC dari jaringan *Continuously Operating Reference Station* (CORS) yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) untuk menganalisis

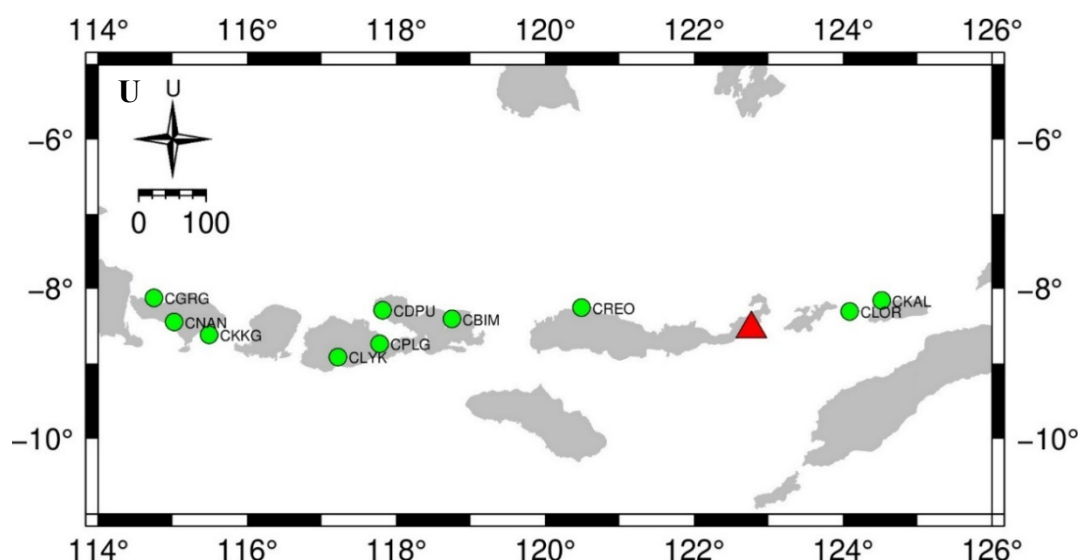
variasi ionosfer yang terjadi selama dan setelah erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki 1 Agustus 2025. Analisis difokuskan pada pola osilasi resonansi atmosfer (*Type-1*) yang muncul sebagai respons ionosfer terhadap aktivitas vulkanik tersebut. Proses analisis dilakukan melalui penyaringan high-pass guna menghilangkan tren jangka panjang dan transformasi spektral untuk mengidentifikasi komponen frekuensi dominan yang berkaitan dengan fenomena resonansi atmosfer. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai mekanisme propagasi gangguan atmosfer-ionosfer akibat erupsi gunung api, sekaligus menjadi bukti empiris awal adanya osilasi resonansi atmosfer di ionosfer akibat aktivitas vulkanik di Indonesia. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan sistem pemantauan aktivitas vulkanik berbasis GNSS di masa mendatang, seiring dengan semakin meluasnya jaringan pengamatan geospasial nasional.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat & Bahan

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari stasiun pemantauan GNSS permanen yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) Indonesia. Stasiun ini dikenal dengan stasiun CORS yang merupakan jaringan pengamatan di seluruh wilayah Indonesia. Adapun sebaran stasiun CORS yang digunakan pada penelitian ini tersebar di wilayah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat dan Bali (**Gambar 1**). Berikut data yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah:

- Data pengamatan satelit GNSS dari stasiun CORS berupa file RINEX observasi versi 2.11 dengan interval data 30 detik dari satelit GPS dan GLONASS pada tanggal 1 Agustus 2025 (*Day of Year* 213), yang diunduh dari portal resmi BIG (<https://srgi.big.go.id/rinex/v1/download-file-box>). Informasi terkait stasiun yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 1**.
- Data navigasi satelit (*Navigation RINEX*) versi 2.10 yang berisi parameter orbit satelit untuk perhitungan posisi satelit GNSS, yang diunduh dari situs resmi NASA CDDIS (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/>).
- Data Navigasi Satelit, diunduh dari: (<http://garner.ucsd.edu/pub/nav>)
- Program pengolahan TEC dan posisi satelit berbasis fortran (rdmrx.f dan rdeph.f) yang diunduh dari <https://ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>



Gambar 1. Sebaran stasiun GNSS CORS (lingkaran hijau) yang digunakan untuk pengamatan ionosfer pada erupsi gunung Lewotobi Laki-laki 2025, dengan lokasi gunung ditandai dengan segitiga merah.

Tabel 1. Daftar stasiun pengamatan GNSS CORS yang digunakan pada studi kasus erupsi gunung Lewotobi Laki-laki 2025

No	Stasiun	Provinsi	Koordinat Lokasi	Jarak ke pusat erupsi (km)
1	CLOR	NTT	124,09° T ; -8,307° S	147,46
2	CKAL	NTT	124,52° T ; -8,159° S	197,10
3	CREO	NTT	120,49° T ; -8,256° S	252,77
4	CBIM	NTB	118,75° T ; -8,407° S	442,37
5	CDPU	NTB	117,82° T ; -8,291° S	545,18
6	CPLG	NTB	117,78° T ; -8,738° S	549,01
7	CLYK	NTB	117,22° T ; -8,915° S	611,42
8	CKKG	BALI	115,49° T ; -8,620° S	800,48
9	CNAN	BALI	115,02° T ; -8,446° S	852,36
10	CGRG	BALI	114,75° T ; -8,126° S	883,55

2.2 Metode

2.2.1 Pengolahan Posisi Satelit dan SIP

Data RINEX navigasi diolah menggunakan program *rdeph.f* yang ditulis dalam bahasa pemrograman Fortran untuk menghitung posisi orbit satelit GNSS yang melintas pada hari pengamatan. Hasil perhitungan posisi satelit tersebut kemudian digunakan untuk menentukan posisi *Ionospheric Pierce Point* (IPP) dan *Sub-Ionospheric Point* (SIP), yaitu titik proyeksi jalur sinyal satelit pada lapisan ionosfer dan di permukaan bumi.

Pengolahan penentuan IPP dan SIP dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB, dengan mempertimbangkan dua posisi utama, yaitu posisi *receiver* (stasiun CORS) dan satelit GNSS pada setiap *epoch* pengamatan. Posisi IPP dihitung pada ketinggian ionosfer 300 km, kemudian ditransformasikan secara geometris ke permukaan bumi untuk memperoleh posisi SIP. Hasil pengolahan ini divisualisasikan dalam bentuk plot distribusi SIP di permukaan bumi yang menggambarkan lintasan satelit pengamat TEC selama periode pengamatan.

2.2.2 Pengolahan Data GNSS-TEC

Nilai TEC yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil pengamatan sepanjang lintasan *Line of Sight* (LOS) antara satelit GNSS dan stasiun penerima di permukaan bumi. Nilai tersebut dikenal sebagai *Slant TEC* (STEC), yang menggambarkan total jumlah elektron bebas di sepanjang jalur propagasi sinyal GNSS dari satelit ke receiver. Perhitungan nilai STEC dilakukan menggunakan perangkat lunak Fortran melalui program *rdnx.f*, yang dirancang untuk mengolah data observasi GNSS dari setiap stasiun CORS. Program ini membaca file RINEX observasi dan menghitung nilai STEC menggunakan metode *ionospheric linear combination* (persamaan 1), yaitu dengan memanfaatkan perbedaan fase sinyal pada dua frekuensi pembawa utama (L1 dan L2).

Secara matematis, nilai STEC dihitung menggunakan persamaan (Hofmann-Wellenhof dkk., 2008; Komjathy, 1997):

$$\Delta STEC = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} (\Delta L_1 - \Delta L_2) \quad (1)$$

Dengan:

- $\Delta STEC$ = perubahan STEC (satuan: TECU, dimana 1 TECU = 10^{16} elektron/m²)
- f_1 dan f_2 = frekuensi pembawa sinyal GNSS (untuk GPS masing-masing sebesar 1575,42 MHz dan 1227,60 MHz)
- ΔL_1 dan ΔL_2 = perbedaan fase pengamatan pada masing-masing frekuensi (satuan: meter)
- 40,3 = konstanta fisik yang menghubungkan fase gelombang elektromagnetik dengan densitas elektrok di ionosfer

Persamaan di atas memanfaatkan sifat dispersif gelombang radio di ionosfer, di mana perbedaan fase antara dua frekuensi membawa informasi mengenai jumlah elektron bebas sepanjang lintasan propagasi sinyal. Hasil perhitungan STEC dari setiap epoch pengamatan kemudian disimpan dalam format matriks waktu–satelit untuk setiap stasiun pengamatan (Hernández-Pajares et al., 2009).

2.2.3 Penyaringan dan Analisis Sinyal

Untuk menonjolkan variasi jangka pendek akibat gelombang akustik atmosfer, data Slant TEC (STEC) yang telah dikoreksi selanjutnya diproses dengan penyaringan high-pass menggunakan frekuensi potong sekitar 1 mHz. Penyaringan ini bertujuan untuk menghilangkan komponen tren harian dan variasi jangka panjang pada sinyal TEC, sehingga hanya tersisa fluktuasi berfrekuensi tinggi yang berkaitan dengan gangguan atmosfer dan resonansi akustik.

Proses penyaringan dilakukan pada data residual TEC hasil pengamatan tiap stasiun CORS, dengan interval pengamatan 30 detik. Hasil penyaringan kemudian divisualisasikan dalam domain waktu terhadap waktu universal (UT), dengan fokus pada periode sekitar ± 3 jam dari waktu erupsi utama. Dalam rentang waktu tersebut, diharapkan muncul pola osilasi berulang yang harmonik selama 20–60 menit setelah erupsi, yang merupakan ciri khas dari gangguan ionosfer tipe-1 (resonansi atmosfer). Hasil penyaringan ini menjadi dasar untuk analisis lanjutan dalam domain frekuensi, guna mengidentifikasi komponen osilasi dominan yang berkaitan dengan resonansi atmosfer global.

2.2.4 Analisis Spektral

Untuk mengidentifikasi komponen frekuensi dominan dari osilasi ionosfer yang terekam pada data GNSS-TEC, dilakukan analisis spektrum daya menggunakan metode *Blackman–Tukey*. Metode ini dipilih karena mampu mengurangi kebocoran spektral (*spectral leakage*) dan memberikan estimasi frekuensi yang stabil pada deret waktu berdurasi terbatas, seperti data TEC hasil observasi harian.

Sebelum dilakukan transformasi frekuensi, sinyal residual TEC terlebih dahulu dihitung fungsi autokorelasinya (persamaan 2). Kemudian ditransformasikan ke domain frekuensi menggunakan *Discrete Fourier Transform* (DFT) yang secara matematis dituliskan pada persamaan 3 dan 4, untuk memperoleh distribusi spektrum daya (Blackman & Tukey, 1958). Puncak-puncak pada spektrum daya yang terdeteksi menunjukkan adanya osilasi dominan pada frekuensi tertentu yang berkaitan dengan proses fisik di atmosfer atas.

Persamaan fungsi autokorelasi dan perhitungan spektrum daya sebagai DFT yang merupakan rumus dasar metode *Blackman–Tukey* adalah sebagai berikut (Blackman & Tukey, 1958):

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{N-|k|} \sum_{t=0}^{N-|k|-1} x_t x_{t+|k|}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$$\hat{S}(f) = \sum_{k=-M}^M \tilde{R}(k) e^{-j2\pi f k \Delta t} \quad (3)$$

Karena $\tilde{R}(k)$ adalah nyata dan genap, sering ditulis dalam bentuk kosinus:

$$\hat{S}(f) = \tilde{R}(0) + 2 \sum_{k=1}^M \tilde{R}(k) \cos(2\pi f k \Delta t) \quad (4)$$

Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan frekuensi resonansi atmosfer yang telah dilaporkan pada penelitian terdahulu, yaitu sekitar 3,7–5,4 mHz (Tahira, 1995; Heki & Fujimoto, 2022a). Rentang frekuensi tersebut berasosiasi dengan mode resonansi atmosfer global, yang dihasilkan oleh interferensi gelombang akustik vertikal antara permukaan bumi dan lapisan mesosfer. Kehadiran puncak pada kisaran frekuensi ini diinterpretasikan sebagai indikasi kuat adanya osilasi resonansi atmosfer (*Type-1*) di lapisan ionosfer setelah erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki tahun 2025.

2.2.5 Validasi Kondisi Geomagnetik dan Aktivitas Matahari

Untuk memastikan bahwa anomali *Total Electron Content* (TEC) yang diamati benar-benar disebabkan oleh aktivitas erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki dan bukan akibat gangguan dari luar seperti

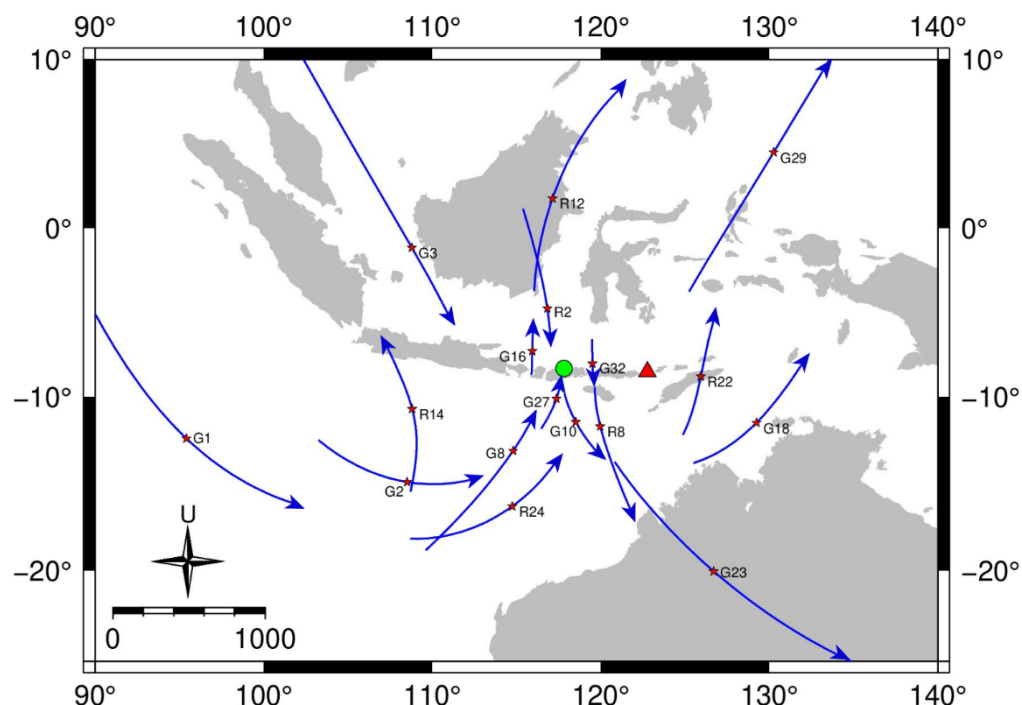
badai geomagnetik atau peningkatan aktivitas Matahari, dilakukan validasi kondisi cuaca antariksa selama periode pengamatan. Tiga parameter utama yang digunakan dalam analisis validasi ini adalah *Disturbance Storm Time (Dst) Index*, *Planetary K (Kp) Index*, dan *F10.7 Solar Flux Index*, yang masing-masing merepresentasikan kondisi geomagnetik dan aktivitas Matahari selama periode pengamatan. Data ketiga parameter tersebut diperoleh dari *Space Weather Prediction Center (SWPC–NOAA)* dan *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto* untuk tanggal 1 Agustus 2025 (DOY 213). Parameter-parameter ini digunakan untuk memastikan bahwa kondisi ionosfer berada dalam keadaan tenang (*quiet condition*) sehingga variasi TEC yang diamati benar-benar disebabkan oleh aktivitas erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki, bukan akibat gangguan geomagnetik atau peningkatan aktivitas Matahari.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil dan Analisis Trajektori Sub-Ionospheric Point (SIP)

Hasil perhitungan posisi *Sub-Ionospheric Point (SIP)* dari satelit GPS dan GLONASS pada periode erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki, 1 Agustus 2025 pukul 12.00–15.00 UT, ditunjukkan pada **Gambar 2**. Garis berwarna biru menggambarkan lintasan proyeksi SIP di permukaan bumi, sedangkan arah orbit satelit ditunjukkan oleh panah. Simbol segitiga merah menandakan posisi Gunung Lewotobi Laki-Laki, dan lingkaran hijau menunjukkan lokasi stasiun CORS yang digunakan dalam penelitian ini. Bintang merah kecil di tengah lintasan SIP menunjukkan posisi SIP saat letusan utama berlangsung (12.48 UT).

Dari hasil perhitungan orbit, diketahui bahwa satelit GPS yang melintas di wilayah pengamatan meliputi G1, G2, G3, G8, G10, G16, G18, G23, G27, G29, dan G32, sedangkan satelit GLONASS yang terdeteksi antara lain R2, R8, R12, R14, R22, dan R24. Lintasan SIP dari beberapa satelit tersebut menunjukkan posisi geometrik satu arah (*one-way geometry*) antara lokasi stasiun pengamatan dan sumber erupsi. Kondisi ini penting untuk memperoleh deteksi variasi TEC yang lebih jelas terhadap sumber gangguan atmosfer-ionosfer.



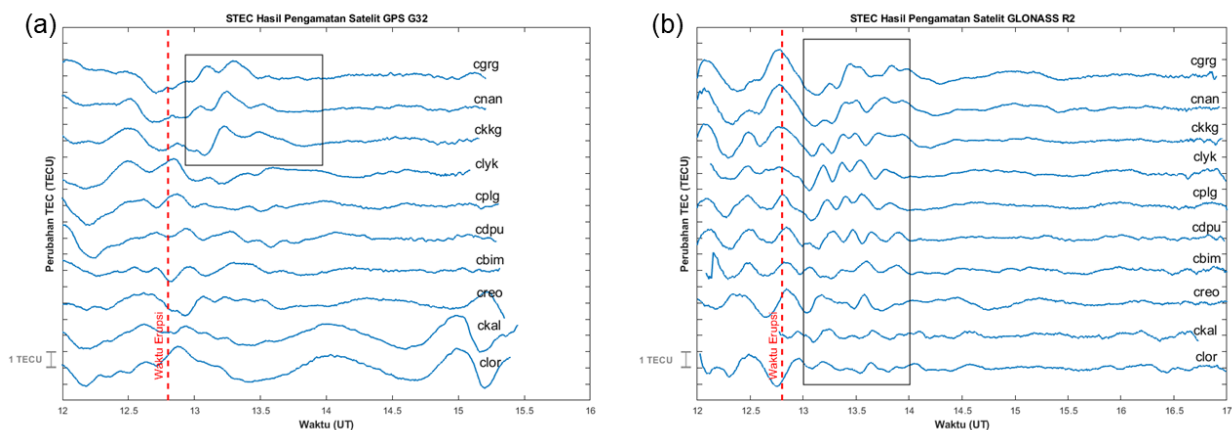
Gambar 2. Trajektori Sub-Ionospheric Point (SIP) dari satelit GPS (G) dan GLONASS (R) pada 1 Agustus 2025 (12.00–15.00 UT). Segitiga merah menunjukkan posisi Gunung Lewotobi Laki-Laki, sedangkan lingkaran hijau menunjukkan lokasi stasiun CORS CDPU. Garis biru menggambarkan lintasan SIP satelit yang digunakan dalam analisis GNSS-TEC

Trajektori SIP yang melintas di sekitar lokasi erupsi (terutama dari satelit GLONASS R2 dan GPS G32) memperlihatkan potensi deteksi anomali TEC yang signifikan. Hasil ini menjadi dasar dalam tahap

analisis berikutnya untuk mengidentifikasi respons ionosfer terhadap gelombang akustik dan resonansi atmosfer yang dihasilkan oleh aktivitas erupsi.

3.2 Hasil dan Analisis Perubahan TEC

Variasi perubahan *Slant Total Electron Content* (STEC) yang diperoleh dari dua satelit representatif, yaitu GPS G32 dan GLONASS R2, ditunjukkan pada **Gambar 3**. Grafik menggambarkan dinamika perubahan TEC terhadap waktu *Universal Time* (UT) pada sejumlah stasiun GNSS di sekitar area pengamatan. Garis vertikal merah menandai waktu terjadinya letusan utama yaitu pada 12.48 UT.



Gambar 3. Variasi perubahan STEC hasil pengamatan satelit (a) GPS G32 dan (b) GLONASS R2 selama periode letusan

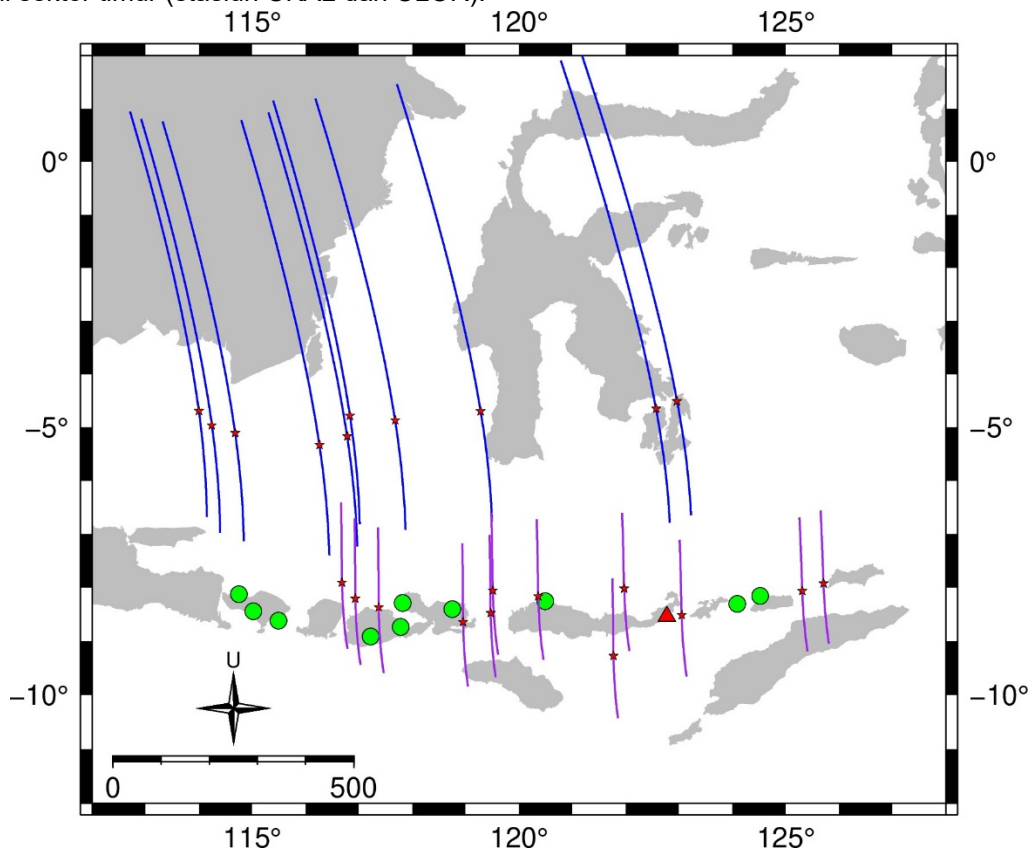
Pada **Gambar 3a** pengamatan STEC dari satelit GPS G32, terlihat bahwa setelah waktu letusan, beberapa stasiun seperti CKKG, CNAN, dan CGRG (ditandai dalam kotak hitam) menunjukkan adanya fluktuasi signifikan pada nilai STEC dengan amplitudo sekitar 1–2 TECU dan periode osilasi antara 15–25 menit. Respon ini muncul sekitar 10–15 menit setelah letusan, yang mengindikasikan adanya gangguan ionosfer akibat gelombang atmosferik yang menjalar ke atas (*upward coupling*). Ketiga stasiun tersebut dipilih karena memiliki lintasan SIP yang relatif berdekatan secara geometrik dengan kolom erupsi, serta memperlihatkan pola osilasi yang paling konsisten di antara semua stasiun. Hal ini menunjukkan bahwa arah orbit GPS G32 memiliki konfigurasi sudut pandang yang sensitif terhadap variasi densitas elektron di wilayah sumber gangguan.

Sementara itu, **Gambar 3b** pengamatan STEC dari satelit GLONASS R2 menunjukkan pola STEC pasca-letusan yang cukup jelas pada beberapa stasiun di sekitar sumber, namun ada perbedaan spasial yang perlu dijelaskan. Sebelumnya diasumsikan bahwa stasiun yang paling dekat akan menunjukkan amplitudo terbesar; tetapi pada data ini CKAL dan CLOR tidak memperlihatkan gangguan yang jelas. Padahal kedua stasiun tersebut memiliki jarak yang paling dekat dengan pusat erupsi (**Tabel 1**). Perbedaan ini dapat dijelaskan dengan beberapa faktor geometri dan propagasi fisik sebagai berikut.

Pertama, titik-titik sensitivitas pengukuran TEC adalah IPP atau SIP pada ketinggian ionosfer (~300 km), bukan posisi receiver di permukaan. Jika SIP yang terkait dengan CKAL dan CLOR pada masa lewatnya satelit GLONASS R2 berada di sebelah timur episentrum (seperti terlihat pada peta lintasan SIP **Gambar 4**), sedangkan gelombang akustik-gravitasi (AGW) yang kuat dipropagasi lebih dominan ke arah barat / barat laut pada waktu itu. Hal ini menunjukkan bahwa *line of sight* (LOS) antara satelit dan stasiun CKAL maupun CLOR tidak melewati zona propagasi utama gelombang gangguan di ionosfer. Dengan kata lain, kedekatan lokasi receiver tidak selalu menjamin respons yang paling baik, karena posisi proyeksi ionosfer (SIP) dan arah gelombang berperan penting dalam menentukan apakah jalur sinyal melintasi kolom elektron yang terganggu.

Kedua, propagasi AGW bersifat anisotropik: arah dan amplitudo gelombang dipengaruhi oleh arah kolom erupsi, kecepatan dan arah angin mesosfer/stratosfer, serta topografi lokal yang dapat mengarahkan atau meredam gelombang (Heki & Fujimoto, 2022a; Cahyadi dkk., 2020). Menurut laporan resmi, letusan

Gunung Lewotobi Laki-Laki memunculkan kolom abu berwarna kelabu yang intens ke arah barat dan barat laut (PVMBG,2025). Dengan demikian, stasiun-stasiun yang berada di sektor barat atau barat laut dari pusat erupsi akan lebih dahulu dan lebih kuat menerima gelombang gangguan, dibandingkan stasiun yang terletak di sektor timur (stasiun CKAL dan CLOR).

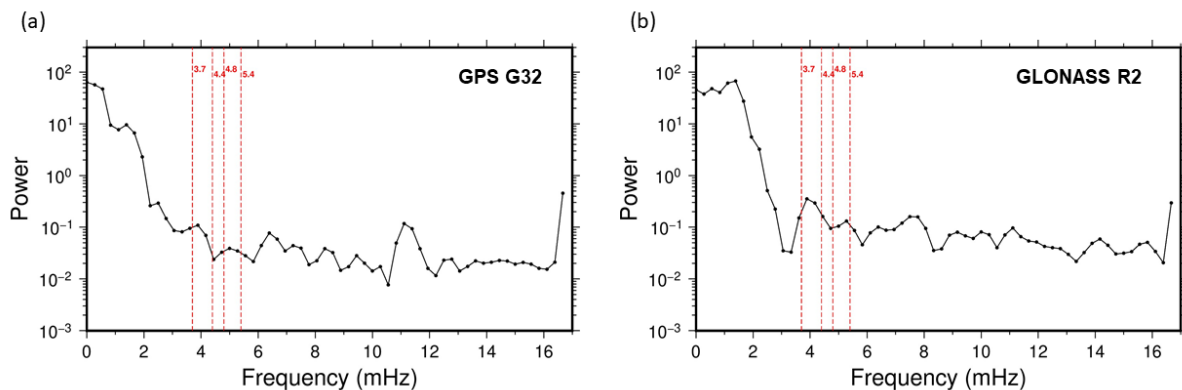


Gambar 4. Trajektori *Sub-Ionospheric Point* (SIP) dari satelit GPS G32 (garis ungu) dan GLONASS R2 pada 1 Agustus 2025 (12.00–15.00 UT). Segitiga merah menunjukkan posisi Gunung Lewotobi Laki-Laki, sedangkan lingkaran hijau menunjukkan lokasi stasiun CORS CDPU. Bintang merah kecil menunjukkan SIP saat letusan utama (12.48 UT)

Temuan ini memperlihatkan bahwa baik GPS maupun GLONASS mampu merekam adanya respon ionosferik terhadap letusan vulkanik, dengan karakteristik *Traveling Ionospheric Disturbances* (TIDs) yang diinduksi oleh gelombang akustik-gravitasi (AGW). Respon ionosfer semacam ini sejalan dengan hasil-hasil penelitian sebelumnya terhadap kejadian serupa, seperti pada letusan Kelud 2014 (Nakshima dkk., 2016) dan Hunga Tonga 2022 (Heki, 2024), di mana pola osilasi periodik pada TEC juga teramati beberapa menit hingga jam setelah letusan utama.

3.3 Analisa Spektrum Frekuensi

Gelombang akustik-gravitasi (AGW) merupakan penyebab utama yang memicu gangguan ionosfer saat terjadi erupsi gunung berapi. Analisis spektrum frekuensi dari fluktuasi TEC memungkinkan identifikasi komponen frekuensi dominan yang berkaitan dengan resonansi atmosferik dan propagasi gelombang dari sumber letusan ke ionosfer. Dalam penelitian ini, spektrum frekuensi dihitung menggunakan metode *Blackman-Tukey* dengan data input berupa nilai perubahan TEC yang telah melalui *high-pass filter* untuk menonjolkan fluktuasi pasca-erupsi. Pendekatan ini memungkinkan deteksi osilasi periodik dan pemisahan antara komponen gangguan yang diinduksi oleh letusan dengan variasi latar belakang ionosfer (Cahyadi & Heki, 2015; Cahyadi dkk., 2022).



Gambar 5. Spektrum frekuensi perubahan STEC pasca-erupsi Gunung Lewotobi. (a) GPS 32, (b) GLONASS R2. Garis putus merah menunjukkan frekuensi puncak dominan 3,7; 4,4; 4,8; dan 5,4 mHz, yang mengindikasikan gelombang akustik-gravitasi dan kemungkinan mode resonansi atmosfer rendah.

Spektrum frekuensi STEC dari satelit GPS 32 (Gambar 5a) dan GLONASS R2 (Gambar 5b) menunjukkan beberapa puncak daya dominan pada 3,7; 4,4; 4,8; dan 5,4 mHz. Puncak pada 3,7 dan 4,4 mHz muncul hampir pada level yang sama di kedua satelit, sementara puncak 4,8 dan 5,4 mHz memiliki amplitudo relatif lebih kecil. Pola ini konsisten antara dua sistem satelit yang berbeda, menegaskan bahwa sinyal gangguan bukan artefak pengolahan data.

Puncak spektrum ini muncul setelah proses high-pass filtering, menandakan bahwa fluktuasi tersebut terkait langsung dengan fase pasca-erupsi dan menonjol di atas variabilitas latar belakang ionosfer. Pada frekuensi lebih rendah (<3 mHz), daya spektrum relatif tinggi namun tidak terkait langsung dengan mode resonansi, kemungkinan akibat ketidaksempurnaan *polynomial detrending*.

Frekuensi 3,7 mHz dan 4,4 mHz konsisten dengan mode resonansi atmosfer rendah (Lamb dan Brunt-Väisälä modes), dengan periode sekitar 4–5 menit. Mode ini biasanya diinduksi oleh gangguan besar seperti erupsi gunung berapi, dan menunjukkan propagasi gelombang akustik-gravitasi (AGW) ke ionosfer. Frekuensi 4,8 mHz dan 5,4 mHz mencerminkan gelombang akustik lokal dengan periode lebih pendek (≈ 3 – $3,5$ menit), yang kemungkinan berasal dari fase awal letusan atau gangguan atmosfer lokal. Puncak ini mengindikasikan adanya komponen osilasi periodik tambahan selain mode resonansi global.

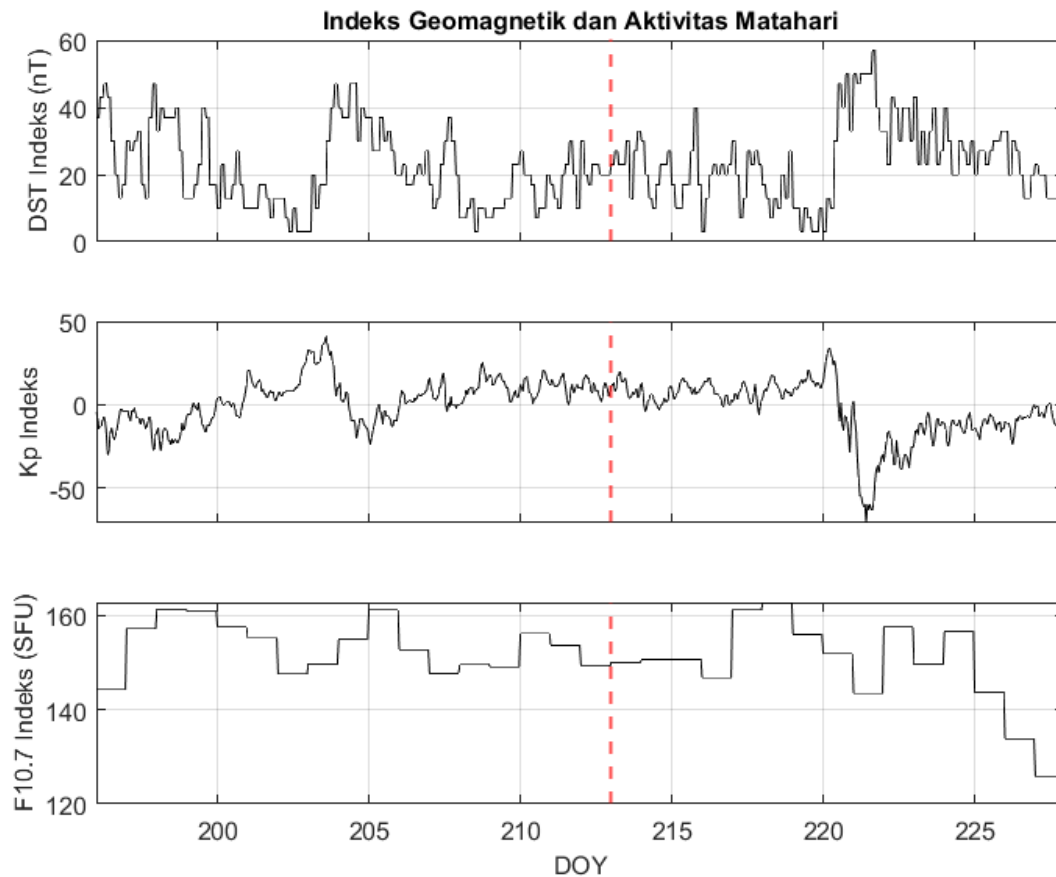
Konsistensi puncak antar-satelit mendukung hipotesis bahwa fluktuasi TEC ini dipicu oleh letusan Gunung Lewotobi 1 Agustus 2025 dan tidak berasal dari variabilitas latar belakang ionosfer. Meskipun demikian, puncak spektrum yang relatif tumpul menunjukkan SNR terbatas, sehingga spektrum hanya memberikan indikasi resonansi, bukan bukti definitif.

3.4 Validasi Kondisi Geomagnetik dan Aktivitas Matahari

Kondisi ionosfer sangat dipengaruhi oleh dinamika internal maupun faktor eksternal, termasuk aktivitas Matahari dan gangguan geomagnetik. Fluktuasi jumlah ion dan elektron di lapisan ini dapat menimbulkan variasi TEC yang signifikan. Oleh karena itu, dalam menganalisis respon ionosfer terhadap peristiwa lokal seperti erupsi gunung berapi, gempa bumi, atau typhoon, perlu dilakukan validasi kondisi cuaca antariksa. Validasi ini dilakukan dengan memeriksa Dst Indeks, yang menggambarkan tingkat gangguan medan magnet horizontal di permukaan Bumi dekat ekuator dengan resolusi 1 jam, serta Kp Indeks, yang merepresentasikan gangguan geomagnetik global dengan resolusi 3 jam. Selain itu, aktivitas Matahari dapat dikonfirmasi melalui F10.7 Indeks, yang mencerminkan radiasi Matahari pada panjang gelombang 10,7 cm dan berkorelasi dengan kepadatan elektron di ionosfer (Jin dkk., 2015; Wen & Jin, 2020). Pendekatan ini memastikan bahwa setiap anomali yang diamati dalam TEC dapat dikaitkan dengan peristiwa lokal, bukan karena variasi geomagnetik atau solar flare global.

Dst Indeks menunjukkan intensitas badai geomagnetik berdasarkan perubahan medan magnet horizontal di permukaan bumi. Nilai Dst > -50 nT menunjukkan kondisi geomagnetik tenang (Gonzalez et al., 1994). Kp Indeks merepresentasikan gangguan geomagnetik global dengan skala 0–9. Nilai Kp < 5 menunjukkan kondisi geomagnetik tenang hingga sedikit bergejolak, sedangkan Kp ≥ 5 menandakan badai

geomagnetik (Menvielle & Berthelier, 1991). F10.7 Indeks mencerminkan aktivitas Matahari pada panjang gelombang 10,7 cm dan berkorelasi dengan jumlah elektron di ionosfer. Nilai F10.7 antara 120–200 SFU menunjukkan aktivitas Matahari sedang (Tapping, 2013).



Gambar 5. Indeks Geomagnetik dan Aktivitas Matahari (Dst indeks, KP indeks, dan F10.7 Indeks) dari DOY 196 hingga 227. Garis putus merah menunjukkan DOY 213.

Hasil plot nilai Dst indeks, KP indeks, dan F10.7 Indeks dari 15 Juli 2025 hingga 15 Agustus 2025 (DOY 196-227) pada **Gambar 5** menunjukkan variasi indeks geomagnetik (Dst dan Kp) dan aktivitas matahari (F10.7) selama periode pengamatan sebelum dan sesudah erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki 2025. Garis merah pada **Gambar 5** adalah DOY 213 saat terjadi erupsi, nilai Dst Indeks sebesar 30 nT, nilai KP Indeks 4, dan nilai F10.7 Indeks 150 SFU. Kombinasi ini menunjukkan bahwa tidak ada badai geomagnetik atau flare Matahari yang signifikan. Dengan demikian, fluktuasi TEC yang diamati pasca-erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki dapat diinterpretasikan sebagai respon ionosfer terhadap gangguan lokal akibat letusan, bukan pengaruh aktivitas geomagnetik atau Matahari global.

4 KESIMPULAN

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki pada 1 Agustus 2025 menghasilkan respons ionosfer yang nyata dalam bentuk fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) yang terekam melalui pengamatan GNSS multi-konstelasi dari sistem GPS dan GLONASS. Analisis lintasan *Sub-Ionospheric Point* (SIP) menunjukkan bahwa satelit GPS G32 dan GLONASS R2 melintas dekat dengan sumber erupsi sehingga membentuk konfigurasi geometrik satu arah yang sensitif terhadap gangguan ionosfer lokal. Variasi TEC yang diamati setelah waktu letusan utama (12.48 UT) memperlihatkan fluktuasi dengan amplitudo sekitar 1–2 TECU dan periode 15–25 menit, yang muncul

sekitar 10–15 menit pasca-erupsi. Pola ini menunjukkan adanya propagasi gelombang akustik-gravitasi (AGW) dari kolom erupsi menuju lapisan ionosfer.

Analisis spektrum menggunakan metode *Blackman–Tukey* menunjukkan komponen frekuensi dominan pada kisaran 3,7–5,4 mHz, yang berkorelasi dengan mode resonansi atmosfer (*Lamb dan Brunt–Väisälä*) dengan periode sekitar 3–5 menit. Analisis spektrum frekuensi mengindikasikan bahwa osilasi tersebut berasal dari proses resonansi atmosfer yang diinduksi oleh aktivitas erupsi, bukan dari variasi latar belakang ionosfer. Validasi kondisi geomagnetik dan aktivitas Matahari menunjukkan nilai Dst sebesar +30 nT, Kp sebesar 4, dan F10.7 sebesar 150 SFU, yang menandakan kondisi ruang angkasa yang relatif tenang. Oleh karena itu, anomali TEC yang terdeteksi dapat diinterpretasikan sebagai efek lokal yang ditimbulkan oleh aktivitas vulkanik. Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi bahwa erupsi Gunung Lewotobi Laki-Laki 2025 memicu osilasi resonansi atmosfer di lapisan ionosfer, serta menunjukkan efektivitas pemanfaatan observasi GNSS-TEC sebagai metode deteksi dan pemantauan dampak ionosferik dari aktivitas vulkanik di wilayah Indonesia.

Daftar Pustaka

- Blackman, R. B., & Tukey, J. W. (1958). *The Measurement of Power Spectra: From the Point of View of Communications Engineering*. Dover Publications.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2015). Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes. *Geophysical Journal International*, 200(1), 116-129. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu343>
- Cahyadi, M. N., Rahayu, R. W., Heki, K., & Nakashima, Y. (2020). Harmonic ionospheric oscillation by the 2010 eruption of the Merapi volcano, Indonesia, and the relevance of its amplitude to the mass eruption rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405, Article 107047. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107047>
- Cahyadi, M. N., Rahayu, R. W., Heki, K., & Nakashima, Y. (2021). Comparison of volcanic explosions in Japan using impulsive ionospheric disturbances. *Earth, Planets and Space*, 73, Article 157. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01539-5>
- Dautermann, T., Calais, E., Mattioli, G., & Jansma, P. (2009). GPS detection and modeling of ionospheric disturbances caused by the 2003 explosion of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B2). <https://doi.org/10.1029/2008JB005722>
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasylunas, V. M. (1994). What is a geomagnetic storm?. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4), 5771–5792. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Heki, K. (2006). Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophysical Research Letters*, 33(14). <https://doi.org/10.1029/2006GL026249>
- Heki, K., & Fujimoto, T. (2022a). Two types of ionospheric disturbances by volcanic eruptions: Lessons from the 2021 eruption of Fukutoku-Okanoba Volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 74(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01654-8>
- Heki, K., & Fujimoto, T. (2022b). Atmospheric modes excited by the 2021 August eruption of the Fukutoku-Okanoba volcano, Izu–Bonin Arc, observed as harmonic TEC oscillations by QZSS. *Earth, Planets and Space*, 74(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01587-5>
- Heki, K. (2024). Atmospheric resonant oscillations by the 2022 January 15 eruption of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano from GNSS-TEC observations. *Geophysical Journal International*, 236(3), 1840-1847. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae023>
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., Orús, R., García-Rigo, A., Feltens, J., Komjathy, A., Schaer, S. C., & Krankowski, A. (2009). The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, 83(3–4), 263–275. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS — Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer-Verlag Wien.

- Jin, S., Occhipinti, G., & Jin, R. (2015). GNSS ionospheric seismology: Recent observational evidences and characteristics. *Earth-Science Reviews*, 147, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.04.006>
- Kanamori, H., & Mori, J. (1992). Harmonic excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B12), 17351–17357. <https://doi.org/10.1029/92JB01791>
- Menvielle, M., & Berthelier, A. (1991). The K-derived planetary indices: Description and availability. *Reviews of Geophysics*, 29(3), 415–432. <https://doi.org/10.1029/91RG00994>
- Nakashima, Y., Heki, K., Takeo, A., Cahyadi, M. N., Aditiya, A., & Yoshizawa, K. (2016). Atmospheric resonant oscillations by the 2014 eruption of the Kelud volcano, Indonesia, observed with the ionospheric total electron contents and seismic signals. *Earth and Planetary Science Letters*, 434, 112–116. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.029>
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. (2025, Agustus 1). *Informasi letusan Gunung Lewotobi Laki-Laki*. MAGMA Indonesia. <https://magma.esdm.go.id/v1/gunung-api/informasi-letusan/bf35a6f2-6ed6-11f0-8afe-005056b54356/show>
- Tahira, M. (1995). Acoustic resonance of the atmosphere at 3.7 mHz. *Geophysical Research Letters*, 22(22), 2929–2932. <https://doi.org/10.1029/95GL02811>
- Tapping, K. F. (2013). The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). *Space Weather*, 11(7), 394–406. <https://doi.org/10.1002/swe.20064>
- Watada, S., & Kanamori, H. (2010). Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid Earth during the 1991 Mount Pinatubo eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B12). <https://doi.org/10.1029/2010JB007747>
- Wen, Y., & Jin, S. (2020). Traveling ionospheric disturbances characteristics during the 2018 Typhoon Maria from GPS observations. *Remote Sensing*, 12(4), 746. <https://doi.org/10.3390/rs12040746>