

GANGGUAN MAGNETIK DAN ELEKTRIK AKIBAT PERAMBATAN GELOMBANG TSUNAMI

¹⁾Fadia Shifa Arianto, ²⁾Muhammad Nurul Fahmi, ³⁾Arie Realita

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: fadiashifa.21025@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari gangguan elektromagnetik sebagai pembangkitan sinyal medan magnet sekunder dan variasi total electric content (TEC) di ionosfer akibat tsunami besar lintas Samudra Pasifik. Analisis dilakukan terhadap tiga peristiwa tsunami, yaitu Hunga Tonga 2022, Tohoku 2011, dan Chile 2010. Data gangguan magnetik diperoleh dengan menggunakan tiga parameter utama yaitu η , h , dan F_z yang diambil dari laman resmi NOAA. Data tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil observasi dari stasiun magnetik global INTERMAGNET. Sedangkan data gangguan elektrik diperoleh melalui observasi satelit GNSS-TEC. Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan metode statistik dan pengamatan sinyal untuk mendeteksi anomali sebelum dan saat terjadi tsunami. Hasil Analisis menunjukkan tingkat kesesuaian nilai b_z yang tinggi antara estimasi analitik dan observasi. Pada tsunami Tonga 2022, selisih berkisar 0,04-0,60 nT; Tohoku 2011 berkisar 0,00-0,90 nT; dan Chilee 2010 berkisar 0,00-0,06 nT. Selain itu, variasi TEC menunjukkan gangguan signifikan pada ionosfer, dengan adanya fluktuasi nilai TEC yang terdeteksi sebelum hingga beberapa jam setelah kejadian tsunami. Temuan ini menegaskan bahwa tsunami, baik yang dipicu gempa bumi maupun erupsi vulkanik, dapat menghasilkan gangguan elektromagnetik yang terukur, dan berpotensi untuk dimanfaatkan untuk studi pendahuluan sistem deteksi dini bencana.

Kata Kunci: gelombang tsunami, erupsi vulkanik, gempa bumi, variasi medan magnet sekunder, variasi GNSS-TEC.

Abstract

This research aims to study electromagnetic disturbances as the generation of secondary magnetic field signals and total electron content (TEC) variations in the ionosphere due to major trans-Pacific tsunamis. Analysis was conducted on three major tsunami events, namely Hunga Tonga 2022, Tohoku 2011, and Chile 2010. Magnetic disturbance data were obtained using three main parameters, namely η , h , and F_z , taken from the official NOAA website. The data was then compared with the observations from the global INTERMAGNET magnetic stations. Meanwhile, the electrical disturbance data was obtained through GNSS-TEC satellite observations. The data obtained is then processed using statistical methods and signal observation to detect anomalies before and during a tsunami. The analysis results show a high level of agreement in b_z values between the analytical estimates and observations. In the Tonga tsunami 2022, the difference ranged from 0.04-0.60 nT; Tohoku 2011 ranged from 0.00-0.90 nT; and Chile 2010 ranged from 0.00-0.06 nT. Additionally, TEC variations show significant disturbances in the ionosphere, with decreases and fluctuations in TEC values detected from before to several hours after the tsunami event. These findings confirm that tsunamis, whether triggered by earthquakes or volcanic eruptions, can produce measurable electromagnetic disturbances, and have the potential to be utilized for preliminary studies of early disaster detection systems.

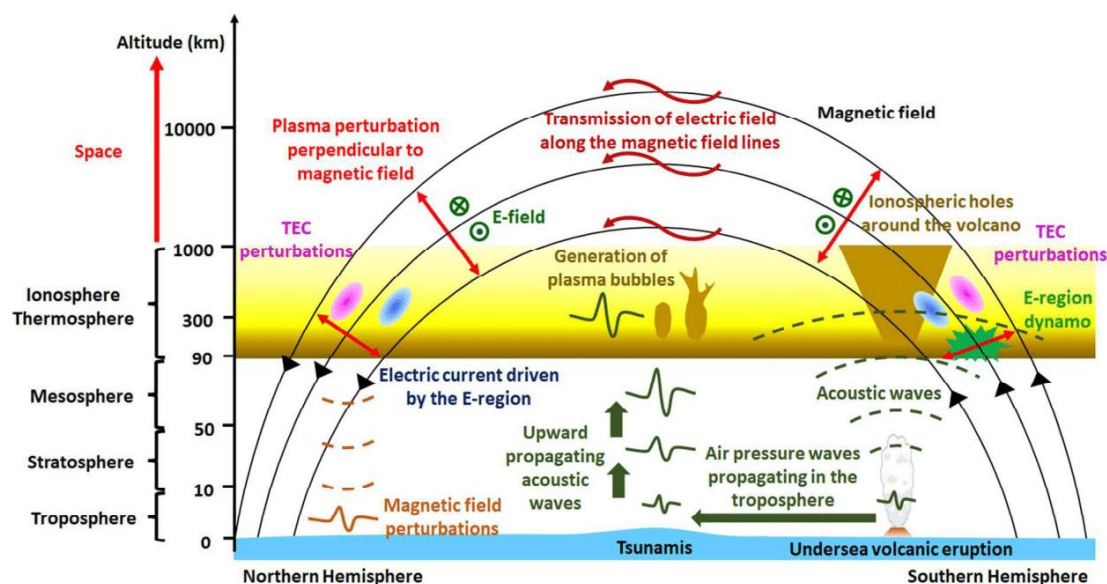
Keywords: tsunami waves, volcanic eruptions, earthquakes, secondary magnetic field variations, GNSS-TEC variations.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Erupsi vulkanik dahsyat Hunga Tonga pada 15 Januari 2022 menginduksi beberapa fenomena fisika pada permukaan laut dan lapisan atmosfer (Adushkin *et al.*, 2022; Ajith *et al.*, 2022). Erupsi tersebut memicu meteo-tsunami dengan kecepatan yang jauh lebih besar dari kecepatan tsunami konvensional (Lynett *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023). Perambatan meteo-tsunami di laut tersebut membangkitkan sinyal lemah magnetik relatif terhadap medan magnet Bumi yang terdeteksi oleh instrumen ukur sebagai anomali magnetik (Schnepf *et al.*, 2022; Chernogor, 2023). Erupsi Hunga 2022 juga memicu gangguan elektrik berupa perubahan total electric content (TEC) pada ionosfer yang merambat sebagai travelling ionospheric disturbance (TID) (Ghent and Crowell, 2022; Ravanelli *et al.*, 2023; Heki, 2024).

Fenomena fisika yang terlibat dalam peristiwa erupsi vulkanik Hunga Tonga adalah sangat kompleks (lihat Gambar 1). Gelombang kejut yang diradiasikan dari puncak Hunga ke atmosfer memicu gangguan pada lapisan atmosfer terdekat dengan permukaan Bumi sampai lapisan atmosfer bagian atas (Dalal *et al.*, 2023; Shinbori *et al.*, 2023; Shinagawa and Miyoshi, 2024). Gangguan atmosferik ini menyebabkan gangguan medan magnet magnetik dengan intensitas kecil yang disebut sebagai medan magnet sekunder (Schnepf *et al.*, 2022; Chernogor, 2023; Prianbikasatiarsa dan Prastowo, 2024). Selain gangguan magnetik, gangguan atmosferik akibat erupsi Hunga 2022 juga berupa gangguan elektrik dalam bentuk variasi TEC dan fenomena TID (Ghent and Crowell, 2022; Ravanelli *et al.*, 2023; Heki, 2024).



Gambar 1. Mekanisme pembangkitan sinyal lemah medan magnet sekunder akibat perambatan tsunami dan gangguan medan listrik dalam bentuk variasi TEC dan fenomena TID pada lapisan atmosfer bagian atas akibat erupsi vulkanik Hunga 2022 (sumber: Shinbori *et al.* (2023).

Mekanisme pembangkitan medan magnet sekunder akibat *tsunami passage* dapat dipelajari dari gerak air laut (saat terjadi tsunami) sebagai fluida konduktif yang memotong garis-garis gaya medan magnet Bumi dan membangkitkan anomali magnetik (Tyler, 2005; Manoj *et al.*, 2011; Ichihara *et al.*, 2013; Sugioka *et al.*, 2014; Minami *et al.*, 2015). Intensitas anomali magnetik tersebut terukur oleh instrumen yang berada di dasar laut, di mana ada kesesuaian antara prediksi dan observasi untuk nilai b_z yang diperoleh dari prediksi tidak berbeda signifikan dengan data magnetogram (Cholifah, 2016; Prastowo *et al.*, 2020).

Mekanisme gangguan elektrik pada lapisan atmosfer bagian atas akibat erupsi Hunga 2022 adalah sebagai berikut. Seperti yang dilihat pada Gambar 1, gelombang kejut dari ledakan dahsyat Hunga memicu gangguan atmosferik berupa rambatan horizontal Lamb wave di troposfer (Ghent and Crowell, 2022) dan

rambatan vertikal gelombang akustik sampai ke ionosfer (Miyoshi and Shinagawa, 2023; Shinbori *et al.*, 2023). Rambatan gelombang akustik tersebut mengganggu keseimbangan jumlah ion positif dan negatif di ionosfer yang terekam oleh GNSS sebagai variasi TEC (Themens *et al.*, 2022; Ravanelli *et al.*, 2023; Heki, 2024).

B. Medan Magnet Sekunder

Interaksi antara gelombang tsunami dan medan magnet bumi (dengan orde $2,5-6,5 \times 10^4$ nT) menghasilkan medan magnet sekunder dengan intensitas lemah yang terukur sebagai anomali magnetik (Tyler, 2005). Pembangkitan anomali magnetik ini dipelajari melalui persamaan induksi magnetik berikut,

$$\partial_t b_z = -\nabla_H \cdot (Z \mathbf{u}_H) + \kappa \nabla^2 b_z \quad (1)$$

di mana $\kappa = (\mu\sigma)^{-1}$ adalah konstanta difusi magnetik air laut, dengan μ adalah permeabilitas magnetik air laut dan σ adalah konduktivitas air laut. Parameter b_z adalah komponen vertikal medan magnet sekunder, Z adalah komponen vertikal medan magnet Bumi dan $\mathbf{u}_H$ adalah komponen horisontal kecepatan gerak air laut, ∇^2 adalah Laplacian sedangkan ∇_H adalah komponen horisontal operator diferensial ∇ . Namun persamaan tersebut masih belum bisa digunakan untuk menghitung nilai b_z secara langsung. Penyederhanaan lebih lanjut persamaan (1) di atas adalah dengan menerapkan persamaan kontinuitas sebagai kekekalan massa dan volume air laut.

Bentuk eksplisit hasil penyederhanaan tersebut adalah

$$b_z = \frac{c}{c_s} \frac{\eta}{d} Z \quad (2)$$

Dimana $c_s = c + i c_d$ adalah kecepatan kompleks, $c = \sqrt{gd}$ (*long wave speed*) dan c_d adalah kecepatan difusi air laut. Menurut Tyler (2005), oleh karena $c \gg c_d$ (asumsi *frozen flux*) maka $c_s \approx c$, sehingga persamaan (2.2) berubah menjadi

$$b_z = \frac{\eta}{d} Z \quad (3)$$

yang digunakan untuk estimasi komponen vertikal b_z medan magnet sekunder. Untuk Z dan d bernilai tertentu, maka b_z sebagai parameter magnetik dikontrol sepenuhnya oleh η sebagai parameter tsunami. Dalam penelitian ini, nilai b_z yang diperoleh dari persamaan (3) diuji kesesuaiannya dengan magnetogram (Schnepf *et al.*, 2016; Prastowo *et al.*, 2020; Minami *et al.*, 2021; Schnepf *et al.*, 2022) untuk berbagai kasus perambatan tsunami lintas samudera.

C. Total Electric Content (TEC)

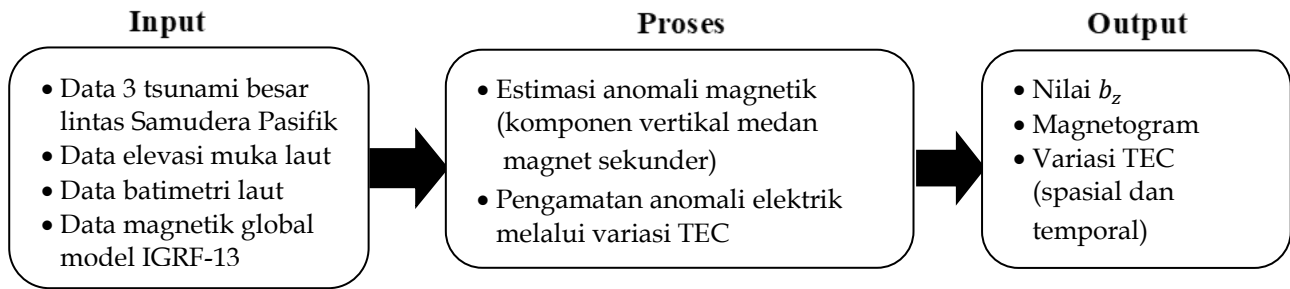
Perpindahan permukaan Bumi secara tiba-tiba yang disebabkan bencana geologi menghasilkan gelombang gravitasi atmosfer yang mengakibatkan gangguan keseimbangan densitas elektron skala global di ionosfer dalam bentuk anomali TEC, yang dapat teramati melalui satelit *Global Navigation Satellite System* (GNSS-TEC). Fenomena ini memperjelas hasil temuan penelitian terdahulu (Kamogawa and Kakinami, 2013; Astafyeva, 2019; Ajith *et al.*, 2022; Themens *et al.*, 2022; Witze, 2022; Liu *et al.*, 2023; Wright *et al.*, 2022; Shinbori *et al.*, 2023; Hamidi *et al.*, 2024; Shinagawa and Miyoshi, 2024).

Dalam Segi mitigasi tsunami di Indonesia kombinasi pemanfaatan data anomali magnetik dan TEC berpotensi dalam meningkatkan deteksi dini dan respon cepat terhadap tsunami, sehingga pendekatan ini dapat menjadi tambahan penting dalam sistem peringatan dini tsunami nasional maupun global.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Data penelitian ini data sekunder dengan dua fokus penelitian. Pada fokus pertama yaitu, parameter penentuan b_z berupa: (1) elevasi muka laut η dan kedalaman laut d , dan (2) komponen vertikal Z medan magnet utama Bumi. Fokus kedua variasi TEC, berupa: (1) pengamatan variasi TEC spasial dan temporal pada kolom lapisan atmosfer di atas area *tsunami passage*. Rancangan penelitian bisa dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Skema penelitian pembangkitan sinyal gangguan magnetik dan elektrik akibat tsunami.

B. Variabel Operasional Penelitian

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini untuk pembangkitan medan magnet sekunder, variabel manipulasi adalah stasiun magnetik dengan variasi lokasi geografis, variabel kontrol adalah tiga kasus tsunami besar lintas Samudra Pasifik (tsunami Hunga 2022, Tsunami Tohoku 2011, dan Tsunami Chile 2010), dan Variabel respon adalah komponen vertikal b_z medan magnet sekunder (anomali magnetik). Untuk gangguan elektrik atau variasi TEC, variabel manipulasi adalah stasiun meteorologi, variabel kontrol tiga kasus tsunami besar lintas Samudra Pasifik, dan variabel respon adalah peta distribusi spasial dan temporal TEC.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data dalam penelitian adalah data sekunder berupa data numerik variabel η , d , b_z , grafik magnetik akibat tsunami dari magnetogram, dan peta distribusi TEC spasial dan temporal. Seluruh besaran yang dibutuhkan bisa diakses melalui laman resmi NOAA. Data elevasi muka laut (η) bisa diakses melalui <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/recenttsunamis-table.shtml>, data kedalaman lokal laut (d) diakses melalui <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>, dan data komponen vertikal medan magnet utama Bumi (F_z) diperoleh melalui <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/>. Selain data di atas, penelitian ini juga memanfaatkan data magnetogram berupa sinyal magnetik yang diperoleh di laman www.intermagnet.org, dan peta distribusi TEC spasial, temporal yang diperoleh melalui <https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/GPS/GPS-TEC/>.

D. Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data untuk pembangkitan sinyal magnetik dilakukan dengan menggunakan pendekatan *frozen flux* (Tyler, 2005), yang melibatkan parameter η , d , dan F_z untuk setiap stasiun magnetik yang digunakan. Kemudian berdasarkan persamaan induksi magnetik dengan pendekatan tersebut, komponen b_z dihitung secara analitik dan dibandingkan dengan data magnetogram. Dengan demikian, tingkat kesesuaian antara b_z analitik dengan observasi magnetogram bisa diuji secara langsung. Sementara itu, pembangkitan gangguan elektrik diperoleh melalui data dari laman GNSS-TEC. Data tersebut dipilih berdasarkan waktu kejadian tsunami untuk memperoleh peta distribusi spasial dan temporal TEC. Data ini memungkinkan identifikasi anomali TEC yang terjadi sebelum, selama, dan setelah tsunami.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kesesuaian Antara Estimasi Analitik dan Observasi Data Medan Magnet Sekunder (Tsunami Hunga Tonga 2022)

Tsunami Hunga Tonga yang terjadi pada 15 Januari 2022 merupakan dampak langsung dari erupsi dahsyat gunung berapi bawah laut Hunga. Letusan ini menjadi salah satu peristiwa vulkanik paling kuat dalam Sejarah modern, dengan awan abu yang membubung hingga ketinggian 57 kilometer. Sesuai dengan hasil penelitian terdahulu oleh (Schnepf *et al.*, 2016) bahwa gelombang tsunami menghasilkan sinyal magnetik dengan intensitas lemah yang terukur sebagai medan magnet sekunder Bumi, maka pada tabel 1 di bawah ini memberikan data lapangan dari NOAA yang digunakan untuk menghitung komponen vertikal medan magnet sekunder (b_z) untuk tsunami Hunga 2022, yang terjadi pukul 04:15 UTC.

Tabel 1. Estimasi nilai b_z berbasis analitik untuk kasus Hunga 2022.

No.	Stasiun Magnetik	Lokasi Stasiun		Elevasi Muka Laut η (m)	Kedalaman Laut d (m)	Intensitas F_z (nT)	Estimasi b_z (nT)
		Bujur	Lintang				
1	APIA	171,760°E	13,830°N	0,07	3389,16	19106,8	0,40
2	HON	157,867°E	21,307°N	0,06	4682	21492,9	0,61
3	SHU	156,780°E	52,663°N	0,1	4528	46392,6	1,10
4	EYR	172,393°E	43,474°N	0,01	101,695	53425	5,30
5	ASP	133,883°E	23,761°N	0,09	600,133	43733,7	6,60

Informasi Pada tabel 1 menyebutkan 5 stasiun pemantau medan magnet Bumi yang digunakan, yaitu APIA, HON, SHU, EYR, dan ASP. Kolom terakhir pada tabel berisi estimasi analitik b_z berbasis pendekatan *frozen flux* dengan data η , d , dan F_z yang telah dikumpulkan. Hasil tersebut dibandingkan dan diuji tingkat kesesuaiannya dengan b_z yang diperoleh dari magnetogram (Tabel 2).

Tabel 2. Komparasi antara nilai b_z analitik dengan magnetogram

No.	Stasiun Magnetik	Lokasi Stasiun		Jarak dari Episenter (km)	Jam Kedatangan (UTC)	Intensitas b_z (nT)	b_z (nT) dari Magnetogram
		Bujur	Lintang				
1	APIA	171,760°E	13,830°N	836	05.22	0,40	0,44
2	HON	157,867°E	21,307°N	4997	08.52	0,61	0,70
3	SHU	156,780°E	52,663°N	8307	11.21	1,10	1,30
4	EYR	172,393°E	43,474°N	2791,8	05.40	5,30	5,60
5	ASP	133,883°E	23,761°N	5210,5	08.57	6,60	7,20

Tabel 2 diatas memberikan informasi bahwa nilai b_z berdasarkan analitik relatif lebih kecil dibandingkan nilai b_z yang diperoleh melalui magnetogram. Hal ini disebabkan b_z analitik dihitung menggunakan parameter η , d , dan F_z yang masing-masing membawa ketidakpastian. Relatif dengan d dan F_z ketidakpastian pengukuran η adalah cukup besar sehingga memengaruhi akurasi hasil perhitungan b_z . Selain itu, data yang diperoleh dari magnetogram memiliki kemampuan untuk mengukur medan magnet secara langsung dan menangkap fluktuasi cepat yang disebabkan oleh aktivitas tsunami. Di sisi lain, metode analitik b_z mungkin tidak mampu merepresentasikan dinamika perubahan medan magnet secara *real-time*. Hal ini dapat menyebabkan nilai b_z yang dihitung cenderung menjadi lebih rendah dibandingkn dengan data observasi langsung. Namun demikian, hasil ini menunjukkan Tingkat kesesuaian yang cukup tinggi, yaitu selisih terkecil tercatat pada stasiun APIA sebesar 0,04 nT, yang merupakan stasiun medan dekat. Sementara itu, stasiun lain yang tergolong medan jauh memiliki selisih yang bervariasi antara 0,09–0,60 nT. Hasil penelitian ini sesuai dengan temuan terdahulu oleh (Minami *et al.*, 2015; Saito *et al.*, 2019; Lin *et al.*, 2021; Minami *et al.*, 2021; Schnepf *et al.*, 2022) dalam hal *tsunami passage* membangkitkan sinyal magnetik dengan intensitas yang dapat diperkirakan dengan bantuan pendekatan *frozen flux*.

B. Kesesuaian Antara Estimasi Analitik dan Observasi Data Medan Magnet Sekunder (Tsunami Tohoku 2011)

Peristiwa tsunami Tohoku yang pada 11 Maret 2011 merupakan dampak langsung dari gempa bawah laut berkekuatan 9,0 Mw yang mengguncang lepas Pantai Timur Jepang, dengan gelombang tsunami yang dihasilkan mencapai 40 meter. Gelombang tsunami dan aktivitas seismik yang intens dapat memengaruhi

medan magnet lokal melalui perubahan tekanan dan pergerakan air laut. Maka pada tabel 3 di bawah ini memberikan data gangguan magnetik b_z dari NOAA untuk kasus tsunami Tohoku 2011, yang terjadi pukul 05:46 UTC.

Tabel 3. Estimasi nilai b_z berbasis analitik untuk kasus Tohoku 2011.

No.	Stasiun Magnetik	Lokasi Stasiun		Elevasi Muka Laut η (m)	Kedalaman Laut d (m)	Intensitas F_z (nT)	Estimasi b_z (nT)
		Bujur	Lintang				
1	SHU	188,225°BT	13,807°LS	1,8	5500	35745,6	11,50
2	GUA	132,232°BT	12,992°LU	0,34	5695	7756,1	0,50
3	KAK	149,360°BT	35,320°LS	1,2	10.272	35380,9	4,10
4	APIA	146,264°BT	20,090°LS	0,12	4962	14575,7	0,50
5	KNY	130,880°BT	31,424°LS	2,7	145,667	32900,7	6,10

Informasi pada tabel 3 menyebutkan 5 stasiun pemantau medan magnet Bumi yang digunakan, yaitu SHU, GUA, KAK, APIA, dan KNY. Kolom terakhir pada tabel berisi estimasi analitik b_z yang kemudian dibandingkan dan diuji tingkat kesesuaiannya dengan b_z yang diperoleh dari magnetogram (Tabel 4).

Tabel 4. Komparasi antara nilai b_z analitik dengan magnetogram

No.	Stasiun Magnetik	Lokasi Stasiun		Jarak dari Episenter (km)	Jam Kedatangan (UTC)	Intensitas b_z (nT)	b_z (nT) dari Magnetogram
		Bujur	Lintang				
1	SHU	156,940°BT	52,650°LU	1950	06.19	11,50	10,60
2	GUA	132,232°BT	12,992°LU	2987	06.14	0,50	0,60
3	KAK	149,360°BT	35,320°LS	704	05.56	4,10	4,50
4	APIA	146,264°BT	20,090°LS	2059	05.55	0,50	0,50
5	KNY	130,880°BT	31,424°LS	7846	06.00	6,10	6,30

Tabel 4 diatas menunjukkan bahwa nilai b_z analitik relative lebih kecil dibandingkan dengan nilai b_z yang diperoleh dari magnetogram. Perbedaan ini disebabkan oleh faktor yang sama seperti pada kasus tsunami Hunga 2022, yaitu keterbatasan pendekatan model analitik dalam merepresentasikan kompleksitas medan magnet aktual di lapangan. Namun demikian, hasil ini menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup tinggi, yaitu selisih terkecil tercatat pada stasiun API sebesar 0,00 nT, sementara itu, stasiun lainnya memiliki selisih yang bervariasi antara 0,10–0,90 nT.

C. Kesesuaian Antara Estimasi Analitik dan Observasi Data Medan Magnet Sekunder (Tsunami Chilee 2010)

Tsunami Chile yang terjadi pada 27 Februari 2010 merupakan dampak langsung dari gempa bawah laut berkekuatan 8,8 Mw yang mengguncang lepas Pantau Maule. Gelombang tsunami yang dihasilkan mencapai ketinggian 14 meter. Serupa dengan kasus tsunami Tohoku, tsunami Chile juga memengaruhi medan magnet lokal, maka Pada tabel 5 di bawah ini memberikan data analitik b_z dari NOAA untuk tsunami Chile 2010, yang terjadi pukul 06:34 UTC.

Tabel 5. Estimasi nilai b_z analitik untuk kasus tsunami Chilee 2010

No.	Stasiun Magnetik	Lokasi Stasiun		Elevasi Muka Laut η (m)	Kedalaman Laut d (m)	Intensitas F_z (nT)	Estimasi b_z (nT)
		Bujur	Lintang				
1	PPT	149,580°BT	17,550°LU	0,22	1099,96	18.866	3,70
2	HUA	86,426°BT	17,365°LU	0,24	4439	17514,7	0,95
3	IPM	109,400°BT	27,100°LU	0,15	2268,74	18960,4	1,25
4	HON	157,867°BT	21,310°LU	0,1	2919,12	21602,6	0,74
5	PANAMA	90,686°BB	4,924°LU	0,12	3262	14732,7	0,55

Informasi pada tabel 5 menyebutkan 5 stasiun pemantau medan magnet Bumi yang digunakan, yaitu PPT, HUA, IPM, HON, dan Panama. Kolom terakhir pada tabel berisi estimasi analitik b_z yang kemudian dibandingkan dan diuji tingkat kesesuaiannya dengan b_z yang diperoleh dari magnetogram (Tabel 6).

Tabel 6. Komparasi antara nilai b_z analitik dengan magnetogram

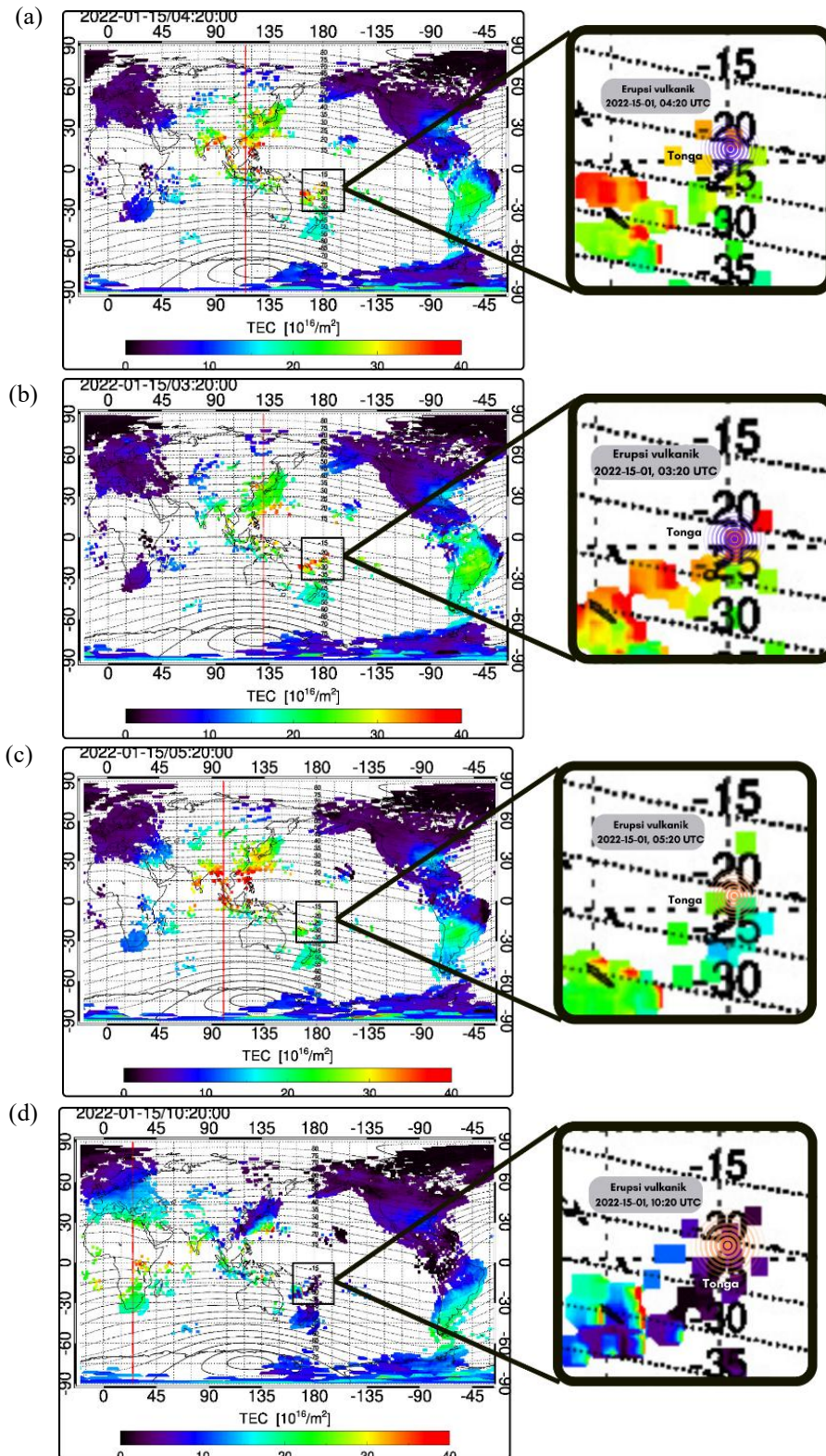
No	Stasiun Magnetik	Lokasi Stasiun		Jarak dari Episenter (km)	Jam Kedatangan (UTC)	Intensitas b_z (nT)	b_z (nT) dari Magnetogram
		Bujur	Lintang				
1	PPT	149,580°BT	17,550°LU	7705	17.33	3,70	3,70
2	HUA	86,426°BT	17,365°LU	2410	09.50	0,95	1,00
3	IPM	109,400°BT	27,100°LU	3584	11.54	1,25	1,30
4	HON	157,867°BT	21,310°LU	10948	16.58	0,74	0,80
5	Panama	90,686°BB	4,924°LU	4926	12:45	0,55	-

Tabel 6 diatas menunjukkan bahwa nilai b_z analitik relatif lebih kecil dibandingkan nilai b_z magnetogram. Perbedaan ini disebabkan oleh faktor yang sama seperti pada kasus Hunga 2022 dan Tohoku 2011, yaitu keterbatasan dalam merepresentasikan kompleksitas medan magnet aktual di lapangan. Namun, hasil ini menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup tinggi, yaitu selisih terkecil tercatat pada stasiun PPT sebesar 0,00 nT, sementara itu, stasiun lainnya memiliki selisih yang bervariasi antara 0,05–0,06 nT.

D. Peta Distribusi TEC Spasial dan Temporal Saat Peristiwa Tsunami Akibat Erupsi Vulkanik dan Gempa Bawah Laut

1. Tsunami Hunga Tonga Akibat Letusan Gunung Berapi Hunga (15 Januari 2022)

Ledakan erupsi Hunga mengakibatkan runtuhnya dua pertiga badan gunung dan memicu gelombang tinggi tsunami (Astafeva *et al.*, 2022). Interaksi antara magma panas dan air laut tersebut menghasilkan gumpalan abu vulkanik dan uap besar yang mencapai ketinggian 33-35 km dan memicu gelombang kejut raksasa yang menghasilkan gelombang akustik dan gravitasi yang merambat vertikal dan memicu gangguan ionosfer (Themens *et al.*, 2022; Witze, 2022; Zhang *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2023). Sehingga Gambar 2 di bawah ini memberikan data lapangan anomali TEC yang didapatkan melalui pengamatan GNSS-TEC.



Gambar 2. Peta distribusi variasi elektron total ionosfer (TEC) global berdasarkan data GNSS-TEC pada 15 Januari 2022, yang divisualisasikan dengan skala (0-40 TECu), dari hitam (rendah) hingga merah (tinggi), dengan fokus pada wilayah kepulauan Tonga. Panel kanan merupakan pembesaran area episentrum untuk memperjelas anomali TEC; (a) Kenaikan nilai TEC pukul 03:20 UT sebelum tsunami (kurva merah); (b-c-d) Penipisan ionosfer berupa variasi penurunan TEC pada pukul 04:20 UT saat tsunami terjadi (kurva oranye), pukul 05:20 UT 1 jam setelah tsunami (kurva hijau), dan 10:20 UT 6 jam setelah tsunami (kurva ungu).

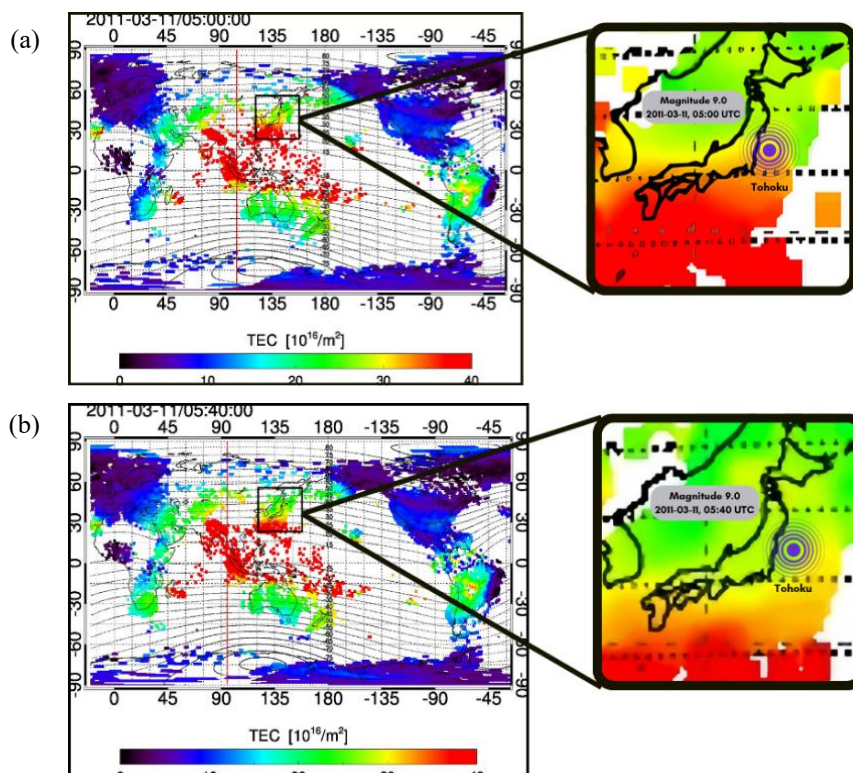
Berdasarkan hasil pengamatan GNSS-TEC pada Gambar 2, terlihat bahwa nilai TEC rentang waktu sekitar 1 jam sebelum tsunami, yakni pukul 03:20 UT, TEC menunjukkan kurva berwarna merah dengan nilai sekitar ± 32 TECu. Kemudian pada pukul 04:20 UT atau sekitar 5 menit setelah terjadinya tsunami, terjadi

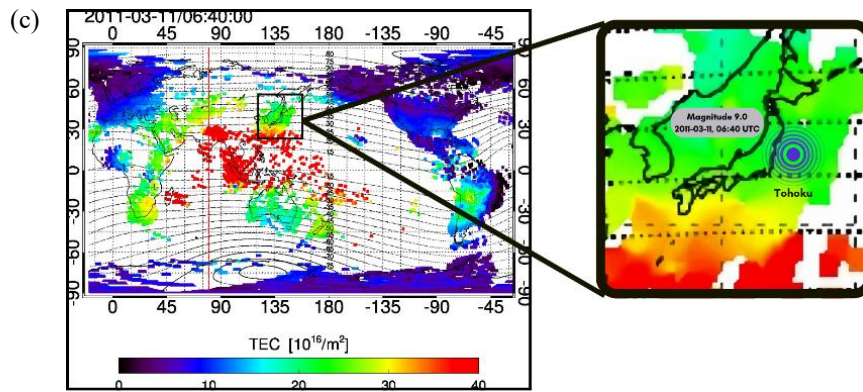
penurunan TEC yang diindikasikan dengan perubahan warna cenderung dengan nilai TEC berkisar ± 30 TECu. Penurunan ini terus berlanjut hingga 1 jam bahkan 6 jam setelah tsunami yaitu pada pukul 05:20 UT hingga 10:20 UT yang menunjukkan perubahan kurva warna hijau ke ungu, dengan nilai TEC mencapai angka ± 20 hingga ± 5 TECu. Tren penurunan ini mengindikasikan adanya gangguan distribusi elektron di ionosfer akibat aktivitas vulkanik maupun tsunami yang terjadi. Hal ini sesuai dengan pernyataan Feng *et al.* (2023) yang menyebutkan nilai normal TEC tanpa gangguan pada pagi hari berkisar 10-20 TECu, siang hari 30-40 TECu, dan malam hari <10 TECu.

Sehingga hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa letusan gunung api bawah laut Hunga yang disertai tsunami memberikan dampak signifikan terhadap ionosfer, ini ditunjukkan oleh penurunan nilai TEC yang jauh di bawah kondisi normal harian, hingga 6 jam setelah tsunami. Hasil ini selaras dengan temuan Themens *et al.* (2022), yang menyatakan bahwa gelombang ionosfer skala kecil terus diproduksi di dekat area letusan hingga 6 jam setelah letusan dimulai. Fenomena tersebut dapat dijelaskan oleh fakta bahwa ledakan erupsi menghasilkan gelombang kejut yang lebih kuat daripada gempa bumi, karena sumbernya yang terletak pada kedalaman dangkal di bawah air tetapi tidak di bawah tanah. Akibatnya, gangguan ionosfer yang ditandai dengan penurunan nilai TEC berlangsung lebih lama. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa tsunami yang dipicu oleh aktivitas vulkanik bawah laut dapat mengakibatkan gangguan ionosfer yang persisten dalam skala waktu beberapa jam (Astafyeva *et al.*, 2013; Aa *et al.*, 2022; Astafyeva *et al.*, 2022).

2. Tsunami Tohoku akibat Gempa Bawah Laut 9,0 Mw (11 Maret 2011)

Pada 11 Maret 2011 pukul 05:46 UTC, terjadi gempa bawah laut Tohoku dengan kekuatan 9,0 Mw yang memicu tsunami besar lintas Samudra Pasifik dan mengganggu kestabilan elektron di ionosfer. Ini dikarenakan energi besar yang dilepaskan pada saat peristiwa gempa dan tsunami menghasilkan gelombang akustik dan gelombang gravitasi atmosfer yang merambat secara vertikal mencapai lapisan ionosfer (He *et al.*, 2022; Kamogawa and Kakinami, 2013; Rolland *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2010). Sehingga Gambar 3 memberikan data lapangan gangguan ionosfer berupa anomali TEC yang didapatkan melalui pengamatan GNSS-TEC.





Gambar 3. Peta distribusi variasi elektron total ionosfer (TEC) global berdasarkan data GNSS-TEC pada 11 Maret 2011 yang divisualisasikan dengan skala (0-40 TECu), dari hitam (rendah) hingga merah (tinggi), dengan fokus pada wilayah Tohoku, Jepang. Panel kanan merupakan pembesaran area episentrum untuk memperjelas anomali TEC; (a) Kenaikan nilai TEC pukul 05:00 UT sebelum tsunami (kurva oranye); (b-c) Penipisan ionosfer berupa variasi penurunan TEC pada pukul 05:40 UT saat tsunami terjadi (kurva kuning), pukul 06:40 UT 1 jam setelah tsunami (kurva hijau).

Berdasarkan hasil pengamatan satelit GNSS-TEC pada Gambar 3(a), terlihat anomali berupa kenaikan TEC (kurva warna oranye) ~40 menit sebelum gempa yang memicu tsunami, yaitu pukul 05:00 UT dengan nilai TEC ± 30 TECu. Hal ini jelas merupakan anomali mengingat nilai normal harian TEC wilayah Tohoku pada rentang waktu malam hingga dini hari hanya ~5–15 TECu, pagi hari ~10–20 TECu, dan siang hari ~25–35 TECu (Le *et al.*, 2012; Nishioka *et al.*, 2021). Hasil ini sesuai dengan temuan oleh (Kamogawa and Kakinami, 2013; He *et al.*, 2022) yang menyatakan adanya anomali berupa fluktuasi TEC yang disebabkan redistribusi elektron di ionosfer akibat medan listrik yang diinduksi oleh aktivitas seismic-pra gempa. Kemudian pengamatan dilanjutkan pukul 05:40 UT atau 6 menit setelah gempa yang memicu tsunami, pada rentang waktu ini nilai TEC mulai menurun melalui perubahan kurva warna dari oranye ke kuning kehijauan dengan nilai TEC berkisar ± 28 TECu. Penurunan nilai TEC terus berlanjut hingga pukul 06:40 UT sekitar 1 jam pasca tsunami, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(c) kurva warna berubah menjadi hijau dengan nilai TEC berkisar ~25 TECu.

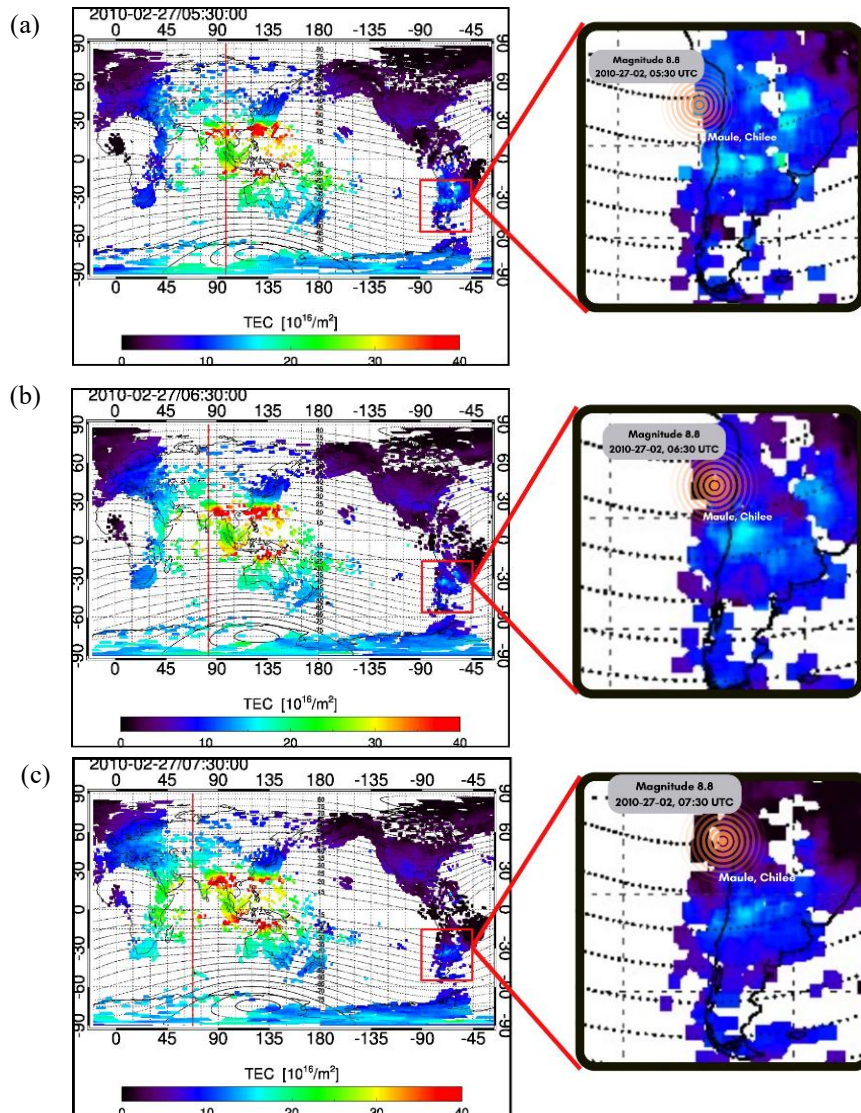
Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh, bahwa gempa bumi bawah laut yang disertai tsunami pada peristiwa Tohoku 2011, memberikan dampak signifikan terhadap kondisi ionosfer, ini ditunjukkan melalui perubahan anomali TEC yang menyimpang jauh dari nilai normal hariannya yang teramati mulai 40 menit sebelum terjadinya bencana, hingga 1 jam pengamatan setelah peristiwa tersebut. Hasil ini sesuai dengan penelitian terdahulu yang mengungkapkan adanya peningkatan TEC pada 40 menit sebelum mainshock ditemukan, dan setelah kedatangan gelombang akustik co-seismik, TEC tidak pulih tetapi menurun karena tsunami (Heki, 2011; Le *et al.*, 2012; Kamogawa and Kakinami, 2013; He *et al.*, 2022).

3. Tsunami Chilee Akibat Gempa Bawah Laut 8,8 Mw (27 Februari 2010)

Gempa bawah laut Maule Chilee dengan kekuatan 8,8 Mw memicu tsunami dan mengganggu kestabilan elektron di ionosfer. Ini dikarenakan energi besar yang dilepaskan pada saat peristiwa gempa dan tsunami menghasilkan gelombang akustik dan gelombang gravitasi atmosfer yang merambat secara vertikal mencapai lapisan ionosfer (Ravanelli *et al.*, 2020; Kashkin *et al.*, 2021). Sehingga Gambar 4 di bawah ini memberikan data lapangan gangguan ionosfer berupa anomali TEC yang didapatkan melalui pengamatan GNSS-TEC.

Berdasarkan hasil pengamatan satelit GNSS-TEC pada Gambar 4(a), terlihat nilai TEC (kurva warna biru muda) ~60 menit sebelum gempa yang memicu tsunami, yaitu pukul 05:30 UT dengan nilai TEC berkisar ± 15 TECu. Kemudian pengamatan dilanjutkan pada pukul 06:30 UT atau 4 menit setelah gempa yang memicu tsunami, nilai TEC mengalami penurunan melalui perubahan kurva warna biru muda ke biru tua seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(b) dengan nilai TEC berkisar ± 10 TECu. Penurunan nilai TEC terus berlanjut

hingga pukul 07:30 UT sekitar satu jam pasca tsunami, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(c) kurva warna berubah menjadi ungu dengan nilai TEC berkisar ~ 5 TECu.



Gambar 4. Peta distribusi variasi elektron total ionosfer (TEC) global berdasarkan data GNSS-TEC pada 27 Februari 2010 yang divisualisasikan dengan skala (0-40 TECu), dari hitam (rendah) hingga merah (tinggi), dengan fokus pada wilayah Maule, Chile. Panel kanan merupakan pembesaran area episentrum untuk memperjelas anomali TEC; (a) Kenaikan nilai TEC pukul 05:30 UT sebelum tsunami (kurva biru muda); (b-c) Penipisan ionosfer berupa variasi penurunan TEC pada pukul 06:30 UT saat tsunami terjadi (kurva biru tua), pukul 07:30 UT 1 jam setelah tsunami (ungu).

Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa gempa bumi bawah laut yang disertai tsunami pada peristiwa Maule, Chile 2010, memberikan dampak signifikan terhadap kondisi ionosfer, ini ditunjukkan melalui perubahan berupa anomali TEC yang terus menurun hingga satu jam setelah tsunami terjadi. Penurunan tersebut tidak lazim terjadi pada kondisi normal, mengingat pada pukul 06:30 UT maupun 07:30 UT, posisi matahari sudah terbit, yang mengakibatkan proses ionisasi di ionosfer mengalami peningkatan yang berkontribusi terhadap kenaikan kepadatan elektron dan nilai TEC. Namun hasil pengamatan menunjukkan pola sebaliknya, yaitu penurunan nilai TEC yang dapat dikaitkan dengan gangguan ionosfer akibat peristiwa gempa dan tsunami sebelumnya (Putra and Eka, 2022).

Penelitian ini menunjukkan bahwa perambatan gelombang tsunami dapat menimbulkan gangguan magnetik dan elektrik yang signifikan. Temuan ini memiliki implikasi ilmiah dalam memperkuat pemahaman tentang interaksi Bumi-laut-atmosfer, serta studi tambahan pendahuluan sistem peringatan dini tsunami.

Penelitian ini juga membuka peluang studi lanjutan mengenai mekanisme fisik yang menyebabkan munculnya gangguan elektromagnetik selama peristiwa tsunami, serta pengembangan model prediktif berbasis data geomagnetik dan elektrik untuk menentukan sensitivitas dan keandalan sensor dalam mengidentifikasi sinyal-sinyal awal tsunami. Temuan ini juga dapat diaplikasikan dalam upaya mitigasi, khususnya pada sistem deteksi dini tsunami. Dengan memanfaatkan instrumen pemantauan yang tersedia, seperti seismograf, Dart Buoy, dan GNSS, maka potensi keakuratan sebagai parameter tambahan sistem peringatan dini menjadi lebih besar.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil perbandingan kesesuaian antara nilai bz yang diperoleh estimasi analitik dan observasi visual, ditemukan tingkat kesesuaian yang tinggi pada ketiga kasus tsunami besar lintas Samudra Pasifik. Pada kasus tsunami Tonga 2022, selisih nilai bz antara estimasi hasil analitik dan observasi berkisar 0,04–0,60 nT. Untuk kasus tsunami Tohoku 2011, selisih nilai bz antara hasil estimasi analitik dan observasi berkisar 0,00–0,90 nT. Sedangkan pada kasus tsunami Chilee 2010, selisih nilai bz antara hasil estimasi analitik dan observasi jauh lebih kecil, berkisar 0,00–0,06 nT. Rentang selisih yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa pendekatan analitik memberikan hasil yang konsisten dengan data observasi magnetogram. Dengan demikian, hasil ini menguatkan keberlakuan teori *frozen flux* dalam konteks gangguan magnetik akibat tsunami, sejalan dengan temuan penelitian terdahulu (Schnepf et al., 2016; Prastowo et al., 2020; Minami et al., 2021).

Analisis variasi TEC pada tiga kasus tsunami besar menunjukkan adanya gangguan signifikan pada ionosfer. Pada tsunami Tonga 2022 yang dipicu erupsi vulkanik, gangguan elektrik ditandai dengan penurunan TEC hingga 6 jam pasca tsunami dengan nilai TEC mencapai ~ 5 TECu. Pada kasus tsunami Tohoku 2011 yang dipicu gempa 9,0 Mw, gangguan ini ditandai oleh fluktuasi TEC 40 menit pra gempa, kemudian TEC terus menurun hingga waktu kejadian tsunami hingga 1 jam pasca tsunami. Hasil ini sesuai dengan temuan terdahulu terkait respons ionosfer terhadap gelombang akustik *co-seismic*. Sementara itu, pada kasus tsunami Chilee 2010 yang dipicu gempa 8,8 Mw, gangguan ini ditandai oleh penurunan TEC hingga 1 jam pasca tsunami dengan nilai TEC mencapai ~ 5 TECu. Secara keseluruhan, ketiga kasus menunjukkan bahwa tsunami, baik yang dipicu gempa maupun erupsi, dapat memengaruhi kondisi ionosfer secara nyata dan terukur.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan penggunaan model prediktif berbasis data TEC dan komponen geomagnetik seperti bz , guna meningkatkan kemampuan deteksi dini terhadap bencana seperti tsunami, baik yang dipicu gempa maupun erupsi vulkanik. Selain itu, disarankan untuk menggunakan data TEC dari berbagai satelit GNSS agar diperoleh gambaran gangguan ionosfer yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Aa, E., Zhang, S.R., Erickson, P.J., Vierinen, J., Coster, A.J., Goncharenko, L.P., Spicher, A., William, R. 2022. Significant ionospheric hole and equatorial plasma bubbles after the 2022 Tonga volcano eruption. *Earth and Space Science*, Vol. 20, pp. 7.
- Adushkin, V.V., Rybnov, Y.S. and Spivak, A.A. 2022. Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano. *Journal of Volcanology and Seismology*, Vol. 16, No. 4, pp. 251–263.
- Ajith, K.K., Sunil, A.S., Sunil, P.S., Thomas, D., Kunnummal, P. and Rose, M.S. 2022. Atmospheric and ionospheric signatures associated with the 15 January 2022 cataclysmic Hunga–Tonga volcanic eruption: a multi-layer observation. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 179, pp. 4267–4277.

- Astafyeva, E., Rolland, L., Lognonne, P., Khelfi, K., Yahagi, T. 2013. Parameters of seismic sources as deduced from 1 Hz ionospheric GPS data: Case study of the 2011 Tohoku-Oki event. *Journal of Geophysical Research*, Vol.119, No. 9.
- Astafyeva, E. 2019. Ionospheric detection of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, Vol. 57, No. 4, pp. 1265–1288.
- Astafyeva, E., Maletckii, B., Mikesell, T.D., Munaibari, E., Ravanelli, M., Coisson, P., Manta, F. and Rolland, L. 2022. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, No. 10.
- Chernogor, L.F. 2023. Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, Vol. 253, No. 106107.
- Cholifah, L. 2016. Estimasi anomali lokal medan magnet Bumi akibat perambatan gelombang tsunami dalam perspektif teori dinamo aliran air laut. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Prodi Fisika, FMIPA Unesa. Hal. 1–57.
- Dalal, P., Kundu, B., Panda, J. and Jin, S. 2023. Atmospheric Lamb wave pulse and volcanic explosivity index following the 2022 Hunga Tonga (South Pacific) eruption. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 10.
- Feng, J., Yuan, Y., Zhang, T., Zhang, Z., Meng, D. 2023. Analysis of ionospheric anomalies before the Tonga volcanic eruption on 15 January 2022, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, Vol. 15, pp. 19.
- Ghent, J.N. and Crowell, B.W. 2022. Spectral characteristics of ionospheric disturbances over the southwestern Pacific from the 15 January 2022 Tonga eruption and tsunami. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 20.
- Hamidi, M., Ahadi, S., Friska, V. and Marzuki, M. 2024. Investigating ultra-low frequency emissions and total electron content anomalies as earthquake precursors in Sumatra (2019–2020). *Kuwait Journal of Science*, Vol. 51, No. 100196.
- Han, S.C., McClusky, S., Mikesell, T.D., Rolland, L., Okal, M., Benson, C. 2023. CubeSat GPS observation of travelling ionospheric disturbances after the 2022 Hunga-Tonga Hunga-Ha’apai volcanic eruption and its potential use for tsunami warning. *Earth and Space Science*, Vol. 10, pp. 4.
- He, L., Wu, L., Heki, K., Guo, C. 2022. The conjugate ionospheric anomalies preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Earth Science: Geohazards and Georisks*, Vol. 10.
- Heki, K. 2011. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, pp. 17.
- Heki, H. 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*, Vol. 236, pp. 1840–1847.
- Ho, T-C., Mori, N. and Yamada, M. 2023. Ocean gravity waves generated by the meteotsunami at the Japan Trench following the 2022 Tonga volcanic eruption. *Earth, Planets and Space*, Vol. 75, No. 25.
- Hu, G., Li, L., Ren, Z. and Zhang, K. 2023. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 23, Issue 2, pp. 675–691.
- Ichihara, H., Hamano, Y., Baba, K. and Kasaya, T. 2013. Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetometer. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 382, pp. 117–124.
- Kamogawa, M. and Kakinami, Y. 2013. Is an ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-oki earthquake a precursor? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.118, No. 4, pp. 1751–1754.
- Kashkin, V., Rubleva, T., Simonov, K., Zabrodin, A., Kabanov, A. 2021. Variations of the total electronic concentration in the ionosphere in seismically active region. *E3S Web of Conferences* 333, Vol. 02012.
- Le, H., Liu, L., Liu, Y.J., Zhao, B., Chen, Y., Wan, W. 2012. The ionospheric anomalies prior to the M9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 62, pp. 476–484.
- Lin, Z., Toh, H. and Minami, T. 2021. Direct comparison of the tsunami generated magnetic field with sea level change for the 2009 Samoa and 2010 Chile tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 126, Issue 11.
- Liu, J.Y., Tsai, H.F., Lin, C.H., Kamogawa, M., Chen, Y.I., Lin, C.H., Huang, B.S., Yu, S.B., Yeh, Y.H. 2010. Coseismic ionospheric disturbances triggered by the Chi-Chi earthquake. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115(8), pp. 1–12.
- Liu, L., Morton, Y.J., Cheng, P.H., Amores, A., Wright, C.J. and Hofmann, L. 2023. Concentric traveling ionospheric disturbances (CTIDs) triggered by the 2022 Tonga volcanic eruption. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 128, Issue 2.
- Lynett, P., McCann, M., Zhou, Z., Renteria, W., Borrero, J., Greer, D., Fa’anunu, O., Bosserelle, C., Jaffe, B., Selle, S.L., Ritchie, A., Snyder, A., Nasr, B., Bott, J., Graehl, N., Synolakis, C., Ebrahimi, B. and Cinar,

- G.E. 2022. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai eruption. *Nature*, Vol. 609, Issue 7928, pp. 728–743.
- Manoj, C. Maus, S. and Chulliat, A. 2011. Observation of magnetic fields generated by tsunamis. *Earth and Observatory System*, Vol. 92, No. 2, pp. 13–14.
- Minami, T. and Toh, H. 2013. Two-dimensional simulations of the tsunami dynamo effect using the finite element method. *Geophysical Research Letters*. Vol. 40, pp. 4560–4564.
- Minami, T., Toh, H. and Tyler, R.H. 2015. Properties of electromagnetic fields generated by tsunami first arrivals: classification based on the ocean depth. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, pp. 2171–2178.
- Minami, T. 2017. Motional induction by tsunamis and ocean tides: 10 years of progress. *Survey in Geophysics*, Vol. 38, pp. 1097–1132.
- Minami, T., Toh, H., Ichihara, H. and Kawashima, I. 2017. Three-dimensional time domain simulation of tsunami-generated electromagnetic fields: Application to the 2011 Tohoku earthquake tsunami: simulation of tsunami magnetic signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, Issue 12, pp. 9559–9579.
- Minami, T., Schnepf, N.R. and Toh, H. 2021. Tsunami-generated magnetic fields have primary and secondary arrivals like seismic waves. *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 2287.
- Miyoshi, Y. and Shinagawa, H. 2023. Upward propagation of gravity waves and ionospheric perturbations triggered by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption. *Earth, Planet and Space*, Vol. 75, No. 68.
- Nishioka, M., Saito, S., Tao, C., Shiota, D., Tsugawa, T., Ishii, M. 2021. Statistical analysis of ionospheric total electron content (TEC): long-term estimation of extreme TEC in Japan. *Earth, Planet and Space*, Vol. 73, No. 52.
- Prastowo, T., Madlazim and Cholifah, L. 2020. Analysis of tsunami-magnetic anomaly signal in Indonesian regions using theoretical approach and recorded magnetogram. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 39, No. 1, pp. 1–17.
- Prianbikasatiarsa, N. dan Prastowo, T. 2024. Analisis pembangkitan medan magnetik sekunder akibat perambatan gelombang tsunami pada kasus Hunga Tonga–Hunga Ha’apai, Tonga 2022. *Inovasi Fisika Indonesia*, Vol. 13, No. 2, pp. 80–89.
- Putra. and eka, M. 2022. *Analisa gangguan ionosfer akibat tsunami menggunakan model 3D tomografi dengan metode GNSS-TEC*. Thesis. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Ravanelli, M., Crespi, M., Foster, J. 2020. Tids detection from ship-bases GNSS Receiver: First test on 2010 Maule tsunami. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- Rolland, L.M., Occhipinti, G., Lognonne, P., Loevenbruck, A. 2010. Ionospheric gravity waves detected offshore Hawaii after tsunamis. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37.
- Ravanelli, M., Astafyeva, E., Munaibari, E., Rolland, L. and Mikesell, T.D. 2023. Ocean-ionosphere disturbances due to the 15 January 2022 Hunga–Tonga Hunga-Ha’apai eruption. *Geophysical Research Letters*, Vol. 50, No. 10.
- Ren, Z., Higuera, P. and Liu, P.L-F. 2023. On tsunami waves induced by atmospheric pressure shock waves after the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano eruption. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 128, Issue 4, pp. 1–21.
- Saito, T., Matsumoto, S., Nakahara, H., Lida, H. 2019. Tsunami effects on geomagnetic variations. *Pure and Applied Geophysics*.
- Santallanes, S.R., Ruiz-Angulo, A. and Melgar, D. 2022. Tsunami waveform stacking and complex tsunami forcings from the Hunga–Tonga eruption. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 180, pp. 1861–1875.
- Schnepf, N.R., Manoj, C., An, C., Sugioka, H. and Toh, H. 2016. Time-frequency characteristics of tsunami magnetic signals from four Pacific Ocean events. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 173, pp. 3935–3953.
- Schnepf, N.R., Minami, T., Toh, H. and Nair, M.C. 2022. Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 10.
- Shinagawa, H. and Miyoshi, Y. 2024. Simulation study of atmosphere-ionosphere variations driven by the eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai on 15 January 2022. *Earth, Planets and Space*, Vol. 76, No. 15.
- Shinbori, A., Otsuka, Y., Sori, T., Nishioka, M., Septi, P., Tsuda, T., Nishitani, N., Kumamoto, A., Tsuchiya, F., Matsuda, S., Kasahara, Y., Matsuoka, A., Nakamura, S., Miyoshi, Y. and Shinohara, I. 2023. New aspects of the upper atmospheric disturbances caused by the explosive eruption of the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano. *Earth, Planet and Space*, Vol. 75, No. 175.
- Spivak, A.A., Rybnov, Y.S., A. Riabov, S.A., Soloviev, S.P. and Kharlamov, V.A. 2020. Acoustic, magnetic, and electric effects of Stromboli volcano eruption, Italy, in July–August 2019. *Physics of the Solid Earth*, Vol. 56, No. 5, pp. 708–720.

- Sugioka, H., Hamano, Y., Baba, K., Kasaya, T., Tada, N. and Suetsugu, D. 2014. Tsunami: ocean dynamo generator. *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 3596.
- Themens, D.R., Watson, C., Žagar, N., Vasylyevych, S., Elvidge, S., McCaffrey, A., Prikryl, P., Reid, B., Wood, A. and Jayachandran, P.T. 2022. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, No. 7.
- Tyler, R.H. 2005. A simple formula for estimating the magnetic field generated by tsunami flow. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L09608.
- Witze, A. 2022. Why the Tongan volcanic eruption was so shocking. *Nature*, Vol. 602, pp. 376–378.
- Wright, C. J., Hindley, N., Alexander, M. J., Barlow, M., Hoffmann, L., Mitchell, C., et al. 2022. Tonga eruption triggered waves propagating globally from surface to edge of space. *Earth and Space Science Open Archive*, Vol. 60, pp. 741–746.
- Zhang, S.R., Vierinen, J., Aa, E., Goncharenko, L.P., Erickson, P.J., Rideout, W., Coster, A.J., Spicher, A. 2022. Tonga volcanic induced global propagation of ionospheric disturbances via lamb waves. *Frontier in Astronomy and Space Sciences*, Vol. 9, pp. 871–275.