

ANALISIS PEMBANGKITAN MEDAN MAGNETIK SEKUNDER AKIBAT METEO-TSUNAMI HUNGA TONGA-HUNGA HA'APAI, TONGA 2022

¹⁾Nichou Prianbikasatiarsa, ²⁾Tjipto Prastowo

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nichou.20033@mhs.unesa.ac.id

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

Abstrak

Penelitian ini menganalisis mekanisme pembangkitan medan magnetik sekunder (anomali lokal medan magnet Bumi) akibat *tsunami passage* lintas Samudera Pasifik saat terjadi erupsi vulkanik HTHH Tonga pada tanggal 15 Januari 2022. Tujuan penelitian ini adalah menguji kesesuaian antara medan magnetik sekunder yang diturunkan dari persamaan analitik dan observasi berbasis data magnetogram. Asumsi penting yang bersifat fundamental, yaitu pendekatan *frozen-flux* di mana proses adveksi air laut mendominasi proses difusi. Pendekatan inilah yang menjadi basis rumusan estimasi komponen vertikal medan magnet sekunder b_z yang dipengaruhi tiga parameter sekaligus, yaitu F_z (komponen vertikal medan magnet utama Bumi), d (kedalaman laut) dan η (elevasi muka laut) untuk kasus tsunami HTHH Tonga 2022. Hasil-hasil penelitian berupa estimasi analitik b_z yang selalu lebih besar dari nilai b_z yang diperoleh dari magnetogram. Selisih nilai b_z hasil estimasi dan observasi berkisar antara 0,03–0,44 nT yang dikategorikan tidak signifikan dan membuktikan kesesuaian antara hasil perhitungan analitik dan data visual magnetogram adalah relatif tinggi. Temuan penelitian ini dalam hal keberlakuan teori *frozen-flux* sesuai dengan temuan terdahulu pada beberapa kasus *trans-oceanic tsunamis* yang dipicu oleh gempa tektonik bawah laut. Implikasi penelitian ini adalah sumber pemicu tsunami tidak memengaruhi keberlakuan teori *frozen-flux*.

Kata Kunci: HTHH Tonga 2022, *tsunami passage*, medan magnet sekunder

Abstract

This study analyzes the mechanism of secondary magnetic field generation (local anomalies of the Earth's magnetic field) due to the trans-Pacific Ocean tsunami during the HTHH Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. The purpose of this study is to test the skill between secondary magnetic fields derived from analytical equations and observations based on magnetogram data. An important fundamental assumption is the frozen flux approach where the seawater advection process dominates the diffusion process. This approach is the basis for the estimation formula for the secondary vertical magnetic field component b_z which is influenced by three parameters at once, namely F_z (the main vertical magnetic field component of the Earth), d (sea depth) and η (sea surface elevation) for the 2022 HTHH Tonga tsunami case. Results - The results of the study are in the form of analytical estimates of b_z which are always greater than the b_z value obtained from the magnetogram. The difference in the estimated and observed b_z values ranges from 0.03–0.44 nT, which is categorized as insignificant and proves that the uniformity between the analytical calculation results and the visual magnetogram data is relatively high. The findings of this study in terms of the validity of the frozen-flux theory are in accordance with previous findings in several cases of trans-oceanic tsunamis triggered by undersea tectonic earthquakes. The implication of this study is that the source of the tsunami trigger does not affect the validity of the frozen-flux theory.

Keywords: HTHH Tonga 2022, *tsunami passage*, secondary magnetic field

I. PENDAHULUAN

Tsunami adalah peristiwa alam perpindahan masif massa dan volume air laut. Saat *tsunami passage*, aliran fluida konduktif air laut memotong garis-garis medan magnet utama Bumi yang berfungsi sebagai sumber sekunder medan magnet Bumi (Tyler, 2005). Pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami yang dipicu oleh gempa telah banyak dilaporkan (Ichihara *et al.*, 2013; Minami and Toh, 2013; Sugioka *et al.*, 2014; Minami *et al.*, 2015; Tatehata *et al.*, 2015; Klausner *et al.*, 2016; Schnepf *et al.*, 2016; Minami *et al.*, 2017). Sampai publikasi serupa dalam tiga tahun terakhir (Prastowo *et al.*, 2020; Minami *et al.*, 2021; Lin *et al.*, 2021), masih belum banyak yang membahas pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami yang dipicu oleh erupsi vulkanik (Schnepf *et al.*, 2022).

Intensitas medan magnet pada peristiwa pembangkitan sinyal magnetik akibat *tsunami passage* yang dipicu oleh gempa adalah jauh lebih kecil dibandingkan dengan intensitas medan magnet utama Bumi. Meskipun demikian, sinyal lemah magnetik tersebut terukur oleh jaringan stasiun magnetik di darat dan di udara (Tyler, 2005; Wang and Liu, 2013) maupun oleh instrumen magnetik *Ocean Bottom Electro-Magnetometer* (OBEM) yang berada di dasar laut (Ichihara *et al.*, 2013; Sugioka *et al.*, 2014; Minami *et al.*, 2015).

Secara prinsip, *ocean dynamo effect* bisa diuji saat terjadi tsunami yang dipicu oleh gempa besar bawah laut (Kopytenko *et al.*, 2012; Minami and Toh, 2013; Tatehata *et al.*, 2015). Saat gelombang tsunami merambat di laut lepas, maka massa dan volume air laut bisa bergerak dengan kecepatan yang mencapai 800 km/jam (Santallanes *et al.*, 2022). Gerak horisontal air laut tersebut memicu efek induksi elektromagnetik dalam bentuk anomali lokal terhadap medan magnet utama Bumi (Tyler, 2005; Manoj *et al.*, 2011; Minami *et al.*, 2015). Terminologi anomali lokal digunakan karena anomali magnetik tersebut teramati dan terukur di lokasi di mana gelombang tsunami pemicu dibangkitkan (*locality in space*). Pengertian lokal bisa juga diperluas karena hanya terjadi saat *tsunami passage* (*locality in time*).

Tsunami bisa dipicu oleh sumber tektonik, misalnya gempa bawah laut atau longsor bawah laut (Gusman *et al.*, 2019; Nakata *et al.*, 2020; Nagai *et al.*, 2021; Heidarzadeh and Mulia, 2022) dan non-tektonik, misalnya erupsi vulkanik di laut (Paris *et al.*, 2014; Paris, 2015) atau keruntuhan bodi gunung (*flank collapse*) karena instabilitas lereng (Muhari *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2020). Dalam konteks global, erupsi vulkanik bawah laut Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH), Tonga 2022 memicu *volcanic tsunami* dan menginduksi rambatan gelombang atmosfer yang membangkitkan *meteo-tsunami* (Astafyeva *et al.*, 2022; Ghent and Crowell, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022; Schnepf *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023).

Dengan mempertimbangkan keunikan kasus HTHH 2022 (Schnepf *et al.*, 2022), maka penelitian ini membahas pembangkitan sinyal lemah magnetik akibat perambatan *volcanic tsunami* dan *meteo-tsunami*. Fokus perhatian adalah apakah *ocean dynamo effect* masih berlaku untuk kasus HTHH 2022 dan apakah deteksi dini tsunami melalui pengukuran anomali lokal medan magnet (Prastowo *et al.*, 2020) masih reliabel untuk kasus HTHH. Dalam konteks mitigasi bencana tsunami, topik penelitian ini penting mengingat potensi bencana tsunami (*volcanic tsunami* dan *meteo-tsunami*) masih besar dan bisa terjadi di Indonesia dengan keberadaan gunung api aktif Anak Rakata di Selat Sunda.

Gerak air laut sebagai fluida konduktif yang memotong garis-garis medan magnet utama Bumi menghasilkan arus induksi dan medan magnet sekunder (Tyler, 2005; Manoj *et al.*, 2011). Mekanisme induksi mekanik-elektromagnetik di lautan seperti itu dikenal sebagai *ocean dynamo effect* (Ichihara *et al.*, 2013; Minami and Toh, 2013; Sugioka *et al.*, 2014; Minami *et al.*, 2015). Momentum yang paling tepat untuk mendeteksi kehadiran peristiwa anomali magnetik adalah pada saat terjadi perambatan gelombang tsunami di laut lepas. Pengukuran anomali magnetik dilakukan berbasis persamaan induksi magnetik yang berlaku untuk gerak air laut saat terjadi tsunami. Persamaan tersebut mendiskripsikan evolusi medan magnet akibat dua proses yang berlawanan, yaitu adveksi horisontal yang bekerja untuk produksi medan magnet dan difusi magnetik yang bekerja untuk kontra-produksi medan magnet (Tyler, 2005).

Dalam bentuk yang eksplisit, persamaan induksi magnetik yang berlaku untuk gerak air laut akibat perambatan tsunami di laut lepas adalah

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

dengan $\kappa = (\mu\sigma)^{-1}$ adalah konstanta difusi magnetik air laut dengan μ adalah permeabilitas magnetik air laut dan σ adalah konduktivitas air laut. Variabel b_z dan F_z berturut-turut adalah komponen vertikal medan magnet sekunder dan komponen vertikal medan magnet utama Bumi, $\mathbf{u}_H$ adalah komponen horisontal kecepatan gerak air laut, ∇^2 adalah Laplacian dan ∇_H adalah komponen horisontal operator diferensial spasial ∇ . Persamaan (1) menjadi basis untuk mempelajari masalah fisis variasi temporal komponen vertikal medan

magnet sekunder $\partial_t b_z$ yang dikenal sebagai pembangkitan sinyal magnetik akibat perambatan tsunami (Ichihara *et al.*, 2013; Sugioka *et al.*, 2014; Minami *et al.*, 2015).

Tyler (2005) menyampaikan solusi Fourier yang berlaku untuk daerah $z \geq 0$ (di mana $z = 0$ adalah permukaan air laut dan $z > 0$ adalah daerah udara terbuka) dalam bentuk

$$b_z = -\frac{\sinh(\alpha d/2)}{\alpha \kappa (\alpha \sinh(\alpha d/2) + \kappa \cosh(\alpha d/2))} \nabla_H \cdot (F_z \mathbf{u}_H) e^{-kz} \quad (2)$$

di mana d adalah kedalaman laut dan $\alpha = (k^2 - \frac{i\omega}{\kappa})^{1/2}$. Persamaan (2) masih mengandung kesulitan teknis apabila langsung digunakan untuk menghitung b_z . Oleh karena itu, penyederhanaan lebih lanjut diperlukan agar fungsi hiperbolik tidak lagi muncul secara eksplisit dalam persamaan. Penyederhanaan dilakukan dengan mempertimbangkan dua aspek rasio, yaitu: (1) rasio $d/2$ terhadap λ ; dan (2) rasio d terhadap δ (*skin depth*), kedalaman penetrasi gelombang EM dalam medium konduktif (Tyler, 2005; Ichihara *et al.*, 2013; Minami *et al.*, 2015).

Berdasarkan kedua aspek rasio tersebut di atas, maka persamaan (2) dapat diterapkan di permukaan laut ($z = 0$) dan disederhanakan menjadi

$$b_z \approx -\left(1 - \frac{i\omega d}{2\kappa}\right)^{-1} \frac{d}{2\kappa} \{k^{-1} \nabla_H \cdot (F_z \mathbf{u}_H)\} \quad (3)$$

Beberapa parameter yang relevan dengan perambatan gelombang tsunami di laut (Tyler, 2005) adalah periode tsunami ≥ 10 menit, kedalaman laut $d \sim 400-5000$ m sehingga kecepatan tsunami $c \sim 200-220$ ms⁻¹ setara dengan 720-800 km/jam (Santallanes *et al.*, 2022), panjang gelombang tsunami $\lambda \sim 120$ km, konduktivitas air laut $\sigma \sim 4$ Sm⁻¹ dan permeabilitas magnetik air laut didekati $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ WbA⁻¹m⁻¹. Karena Persamaan (3) masih juga belum bisa digunakan untuk menghitung komponen vertikal medan magnet sekunder b_z , maka Penyederhanaan lebih lanjut adalah dengan mempertimbangkan persamaan kontinuitas untuk aliran air laut dalam bentuk

$$\nabla_H \cdot (F_z \mathbf{u}_H) = \frac{i\omega F_z \eta}{d} \quad (4)$$

di mana η adalah elevasi muka laut diukur dari permukaan laut (Tyler, 2005; Ichihara *et al.*, 2013; Sugioka *et al.*, 2014; Minami *et al.*, 2015).

Substitusi persamaan (4) ke dalam persamaan (3) menghasilkan bentuk berikut

$$\frac{b_z}{F_z} = \frac{c}{c_s} \frac{\eta}{d} \quad (5)$$

di mana $c_s = c + i c_d$ adalah kecepatan kompleks dengan $c = \sqrt{gd}$ dan c_d adalah kecepatan difusi air laut. Menurut Tyler (2005), oleh karena $c \gg c_d$ maka $c_s \approx c$, sehingga persamaan (5) berubah menjadi

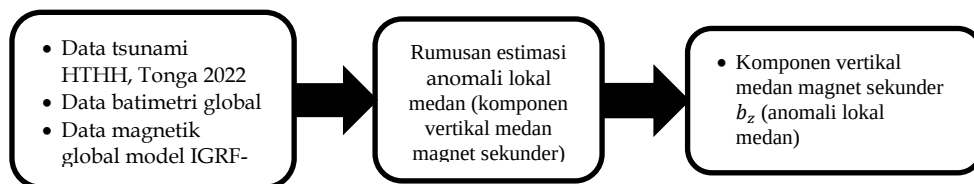
$$\frac{b_z}{F_z} = \frac{\eta}{d} \quad (6)$$

yang digunakan untuk menghitung komponen vertikal medan magnet sekunder, konsisten dengan temuan Minami *et al.* (2015). Persamaan (6) merupakan kesebandingan antara rasio b_z terhadap F_z dan rasio η terhadap d . Untuk F_z dan d bernilai tertentu, maka b_z dikontrol sepenuhnya oleh η (Minami *et al.*, 2015). Dalam penelitian ini, nilai b_z dari persamaan (6) diuji kesesuaiannya dengan magnetogram dari beberapa stasiun magnetik (Schnepf *et al.*, 2022) dengan mempertimbangkan bahwa nilai b_z yang diperoleh merupakan batas atas estimasi anomali magnetik akibat perambatan tsunami (Prastowo *et al.*, 2020).

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Data penelitian merupakan data sekunder berupa: (1) elevasi muka laut dan kedalaman laut yang diakses dari laman NCTR dan NCEI dan (2) komponen medan magnet utama Bumi yang diakses dari laman IAGA. Rancangan penelitian bisa dilihat pada Gambar 1, di mana asumsi yang diambil adalah proses adveksi mendominasi difusi air laut. Asumsi ini dikenal sebagai pendekatan *frozen-flux* yang menjadi basis untuk estimasi komponen vertikal medan magnet sekunder (Tyler, 2005; Minami *et al.*, 2015). Selain itu, asumsi lain adalah tsunami bergerak dengan kecepatan yang hanya bergantung pada kedalaman laut.



Gambar 1. Rancangan penelitian pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami HTHH, Tonga 2022.

B. Teknik Pengumpulan Data

Data dalam penelitian adalah data sekunder berupa data numerik variabel η , d , F_z dan grafik *magnetic waveform* akibat *tsunami passage* dari magnetogram. Seluruh besaran yang dibutuhkan tersebut bisa diakses di laman NOAA. Data elevasi muka laut (η) diakses melalui <https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/> dan <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/dart/2022tonga.html>, data kedalaman lokal laut (d) diakses melalui <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/> yang memberikan data dimana letak lokasi stasiun pemantau magnet Bumi berada, dan data komponen vertikal medan magnet utama Bumi (F_z) diperoleh melalui <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/>. Selain data di atas, penelitian ini juga memanfaatkan data magnetogram berupa sinyal magnetik akibat *tsunami passage* yang diperoleh dari 10 stasiun magnetik (API, ASP, CNB, CTA, EYR, IPM, KAK, KNY, MMB, PPT) yang tersebar di perimeter Samudera Pasifik dan diakses bebas di laman www.intermagnet.org.

C. Teknik Pengolahan Data

Kasus erupsi vulkanik HTHH, Tonga 2022 memicu pembangkitan tsunami lintas Samudera Pasifik dan rambatan gelombang akustik-gravitasi pada lapisan atmosfer global. Pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami HTHH, Tonga 2022 direkam oleh beberapa stasiun magnetik yang tersebar di beberapa lokasi permukaan Bumi. Untuk setiap stasiun magnetik, besaran terukur η , d , F_z dicari secara langsung melalui laman yang relevan. Kemudian berdasarkan persamaan induksi magnetik dengan pendekatan *frozen flux* (Tyler, 2005; Minami *et al.*, 2015), komponen vertikal medan magnet sekunder akibat *tsunami passage* b_z dihitung dan dibandingkan dengan grafik magnetogram dari INTERMAGNET. Dengan demikian, kesesuaian antara prediksi b_z dan pengamatan oleh instrumen magnetogram bisa diuji secara langsung.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Erupsi Vulkanik HTHH Sumber Pembangkit Anomali Magnetik

Erupsi vulkanik bawah laut HTHH tanggal 15 Januari 2022 pukul 04:15 UTC dengan episenter 20,54° LS dan 184,62° BT memicu tsunami dan pembangkitan medan magnet sekunder. Fenomena ini mempertegas temuan penelitian terdahulu (Schnepf *et al.*, 2016) yang menyatakan bahwa *tsunami passage* menginduksi sinyal lemah magnetik dengan kekuatan beberapa nano Tesla. Schnepf *et al.* (2016) memanfaatkan 4 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik akibat gempa bawah laut di perimeter Samudera Pasifik dengan $M_w > 8,0$. Berbasis persamaan (6) gagasan Tyler (2005) yang telah diuji oleh Minami *et al.* (2015), Schnepf *et al.* (2016) berhasil membuktikan bahwa komponen vertikal medan magnet sekunder b_z akibat tsunami yang dipicu oleh gempa tektonik ditentukan oleh beberapa parameter yang tertulis pada persamaan (6).

Penelitian ini berbeda dengan penelitian terdahulu (Minami *et al.*, 2015; Schnepf *et al.*, 2016) dalam hal sumber pembangkit medan magnet sekunder adalah erupsi vulkanik bawah laut (Adushkin *et al.*, 2022; Schnepf *et al.*, 2022). Radiasi sinyal lemah magnetik akibat erupsi HTHH terekam oleh beberapa instrumen pemantau medan magnet yang dikelola oleh INTERMAGNET. Hasil rekaman dalam bentuk magnetogram digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini, yaitu menguji kesesuaian antara estimasi medan magnet sekunder berbasis persamaan analitik pada persamaan (6) dan pengamatan langsung melalui magnetogram dari laman www.intermagnet.org.

B. Kesesuaian antara Estimasi Analitik dan Observasi Visual

Pembangkitan sinyal lemah magnetik akibat tsunami HTHH 2022 merupakan isu menarik. Dalam penelitian ini, intensitas medan magnet sekunder ditentukan dengan dua metode, yaitu estimasi analitik dan observasi visual. Estimasi analitik berbasis pendekatan *frozen flux* pada persamaan (6) sedangkan observasi visual berbasis rekaman magnetogram dari jaringan stasiun pemantau medan magnet. Dalam konteks pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami (Schnepf *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2021; Schnepf *et al.*, 2022), sumber pemicu tsunami adalah penting karena sumber pemicu tsunami ikut menentukan perilaku perambatan tsunami.

Erupsi vulkanik HTHH 2022 memicu pembangkitan gelombang tsunami dengan dua fase, yaitu tsunami konvensional dengan kecepatan sekitar 800 kmj⁻¹ dalam jangkauan medan dekat ≤ 1300 km (Carvajal *et al.*, 2022; Tika dkk., 2024) dan *meteo-tsunami* dalam jangkauan medan jauh > 1300 km dengan kecepatan yang jauh lebih besar, bervariasi antara 1100-1200 kmj⁻¹ (Lynett *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023; Tika dkk., 2024). Dengan demikian, selain sumber pemicu tsunami yang berbeda dengan

kasus-kasus terdahulu fenomena akselerasi tsunami pada kasus HTHH 2022 juga ikut menjadi pertanyaan apakah relasi matematis pada persamaan (6) tetap berlaku.

Tabel 1 di bawah ini memberikan data lapangan yang digunakan untuk menghitung komponen vertikal medan magnet sekunder b_z .

Tabel 1. Estimasi analitik b_z berbasis persamaan (6) untuk kasus HTHH 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	API	188,225°BT	13,807°LS	0,07	450,713	19109,2	2,97
2	ASP	133,883°BT	23,762°LS	0,09	563,761	43801,5	6,99
3	CNB	149,360°BT	35,320°LS	0,09	916,577	53057,3	5,21
4	CTA	146,264°BT	20,090°LS	0,06	362,026	37750,6	6,26
5	EYR	172,393°BT	43,474°LS	0,01	99,181	53442,7	5,39
6	IPM	250,580°BT	27,171°LS	0,01	551,543	18584,0	0,34
7	KAK	140,186°BT	36,232°LU	0,01	98,818	36011,4	3,64
8	KNY	130,880°BT	31,420°LU	0,02	251,651	33430,6	2,66
9	MMB	144,190°BT	43,910°LU	0,01	219,666	42601,7	1,94
10	PPT	210,426°BT	17,567°LS	0,03	413,018	18411,9	1,34

Informasi pada Tabel 1 menyebutkan beberapa stasiun pemantau medan magnet Bumi (jaringan INTERMAGNET) yang digunakan dalam penelitian ini. Kolom terakhir pada tabel tersebut berisi estimasi analitik b_z berbasis pendekatan *frozen flux* pada persamaan (6) dengan data η , d , F_z yang telah dikumpulkan. Hasil perhitungan estimasi analitik b_z akan diuji kesesuaiannya dengan b_z yang diperoleh dari magnetogram (Tabel 2).

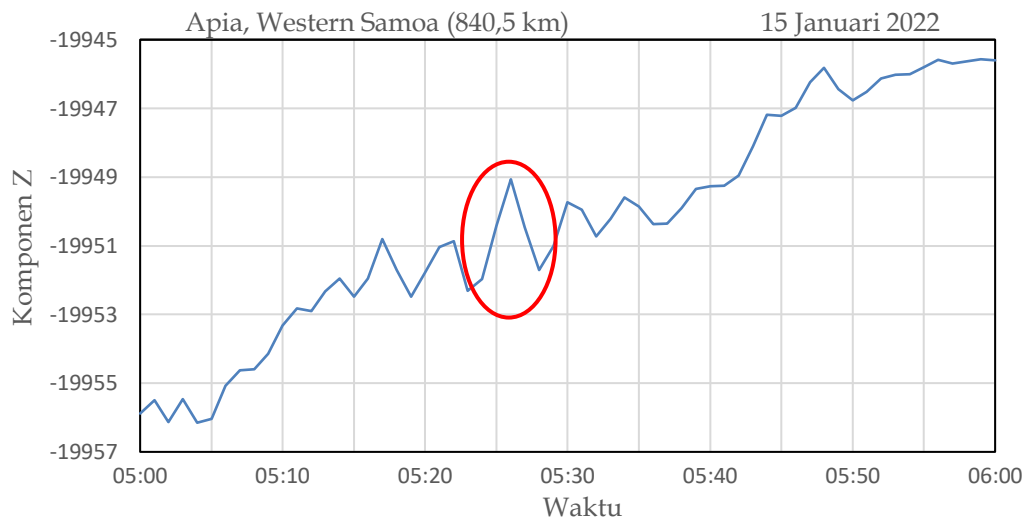
Tabel 2. Komparasi antara nilai b_z dari estimasi analitik dan magnetogram.

No	Stasiun Magnetik	Lokasi Stasiun		Jarak dari Episenter (km)	Jam Kedatangan	Estimasi b_z (nT)	b_z (nT) dari Magnetogram
		Bujur	Lintang				
1	API	188,225°BT	13,807°LS	840,5	05:25 UTC	2,97	2,64
2	ASP	133,883°BT	23,762°LS	5210,5	09:04 UTC	6,99	6,20
3	CNB	149,360°BT	35,320°LS	3806,8	07:40 UTC	5,21	4,25
4	CTA	146,264°BT	20,090°LS	3990,5	07:50 UTC	6,26	5,47
5	EYR	172,393°BT	43,474°LS	2791,8	06:45 UTC	5,39	4,78
6	IPM	250,580°BT	27,171°LS	6659,4	10:08 UTC	0,34	0,21
7	KAK	140,186°BT	36,232°LU	7850,4	11:19 UTC	3,64	2,93
8	KNY	130,880°BT	31,420°LU	8134,4	11:20 UTC	2,66	2,28
9	MMB	144,190°BT	43,910°LU	8264,0	11:22 UTC	1,94	1,60
10	PPT	210,426°BT	17,567°LS	2729,7	06:39 UTC	1,34	1,10

Tabel 2 memberikan informasi bahwa nilai b_z hasil perhitungan analitik selalu lebih besar dari nilai b_z yang diperoleh dari magnetogram. Hal itu karena b_z pada persamaan (6) dihitung dari beberapa parameter yaitu η , d , F_z di mana masing-masing membawa ketidakpastian. Relatif dibandingkan dengan d dan F_z ,

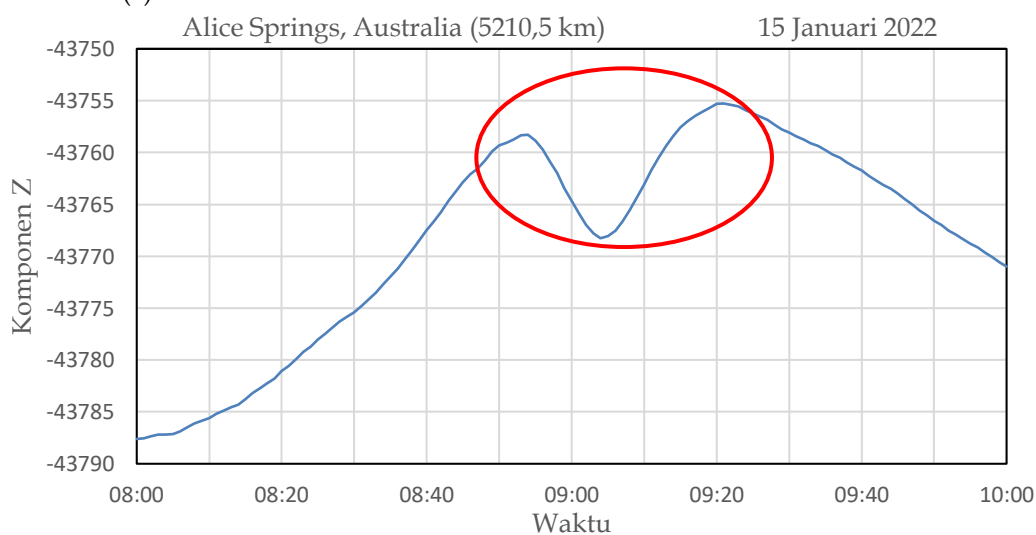
ketidakpastian pengukuran η adalah paling besar karena tidak ada cara untuk mengukur η secara langsung. Oleh karena itu, keakuratan hasil perhitungan analitik b_z banyak dipengaruhi oleh keakuratan data η .

Sebagai komparasi, estimasi analitik b_z diuji kesesuaiannya dengan rekaman magnetogram dari jaringan stasiun magnetik INTERMAGNET. Sebagai contoh, magnetogram dari stasiun magnetik API, ASP, KNY membuktikan bahwa saat terjadi tsunami HTHH 2022 ada variasi sinyal magnetik yang teramati dan terukur oleh ketiga stasiun magnetik tersebut.



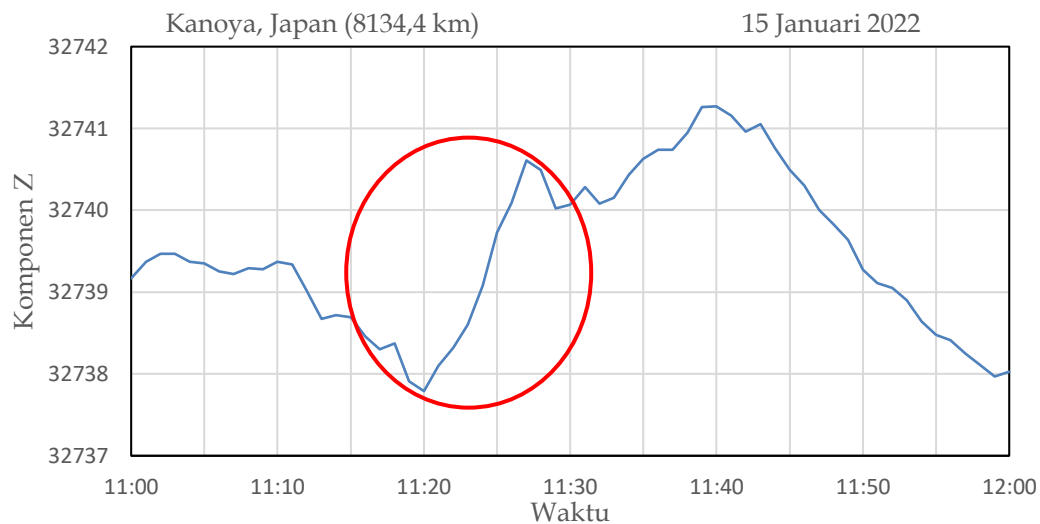
Gambar 2. Magnetogram dari stasiun API yang berada pada jarak 840,5 km dari episenter erupsi HTHH mendeteksi kehadiran sinyal lemah magnetik 2,64 nT pada jam 05:25 UTC.

Gambar 2 menceritakan bahwa tsunami HTHH melintas stasiun API jelang jam 05:25 UTC dengan amplitudo maksimum terukur pada sekitar jam 05:26 UTC. Dengan asumsi *eruption onset time* adalah jam 04:15 UTC dan mempertimbangkan jam tiba gelombang tsunami di stasiun API, maka estimasi kecepatan tsunami adalah berkisar antara 720-830 kmj⁻¹ bergantung pada beberapa faktor, termasuk durasi erupsi (tidak diketahui pasti). Namun, stasiun API berada pada jangkauan medan dekat sehingga tsunami yang melalui stasiun API masih dikategorikan sebagai tsunami konvensional berdasarkan nilai kecepatannya (Tika dkk., 2024). Gangguan kestabilan medan magnet Bumi akibat tsunami HTHH terekam dalam bentuk sinyal komponen vertikal medan magnet sekunder b_z (lingkaran merah). Magnetogram tersebut menunjukkan bahwa anomali lokal medan magnetik b_z dengan amplitudo sebesar 2,64 nT yang tidak terlalu jauh dari estimasi b_z berbasis persamaan (6).



Gambar 3. Magnetogram dari stasiun ASP yang berada pada jarak 5210,5 km dari episenter erupsi HTHH mendeteksi kehadiran sinyal lemah magnetik 6,20 nT pada jam 09:04 UTC.

Gambar 3 di atas memberikan konfirmasi empiris bahwa magnetogram stasiun ASP yang berlokasi di $23,762^{\circ}$ LS dan $133,883^{\circ}$ BT mendeteksi kehadiran tsunami HTHH ± 4 jam 49 menit dari *onset time* yaitu sekitar jam 09:04 UTC. Gangguan kestabilan medan magnet Bumi akibat tsunami HTHH terekam dalam bentuk sinyal komponen vertikal medan sekunder b_z (lingkaran merah). Magnetogram tersebut menunjukkan anomali lokal b_z dengan amplitudo 6,20 nT yang tidak terlalu jauh dari estimasi b_z berbasis persamaan (6).



Gambar 4. Magnetogram dari stasiun KNY yang berada pada jarak 8134,4 km dari episenter erupsi HTHH mendeteksi kehadiran sinyal lemah magnetik 2,28 nT antara jam 11:20 sampai 11:27 UTC.

Gambar 4 di atas memberikan konfirmasi empiris bahwa magnetogram stasiun KNY yang berlokasi di $31,42^{\circ}$ LU dan $130,88^{\circ}$ BT mendeteksi kehadiran tsunami HTHH antara jam 11:20–11:27 UTC. Gangguan kestabilan medan magnet Bumi akibat tsunami HTHH terekam dalam bentuk sinyal b_z (lingkaran merah) sebesar 2,28 nT yang tidak terlalu jauh dari estimasi berbasis persamaan (6).

C. Akurasi Estimasi Analitik b_z

Meskipun hasil perhitungan estimasi analitik b_z relatif akurat dibandingkan dengan nilai b_z yang diperoleh dari magnetogram 10 stasiun pemantau dari jaringan stasiun INTERMAGNET (lihat Tabel 2), namun koreksi tetap dilakukan agar kesesuaian antara estimasi analitik b_z dan data magnetogram semakin tinggi. Nampaknya elevasi permukaan laut η menjadi besaran pembeda. Hasil estimasi b_z sangat sensitif terhadap perubahan kecil η sehingga akurasi η menjadi krusial. Berdasarkan argumentasi tersebut, maka akurasi data η sangat memengaruhi kualitas hasil perhitungan analitik b_z . Untuk menyelaraskan kesesuaian antara estimasi analitik b_z dengan data magnetogram, maka dibutuhkan toleransi *error* untuk nilai η maksimal sebesar 10% dari nilai yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 3. Komparasi antara nilai b_z dari estimasi analitik dan magnetogram dengan koreksi untuk data elevasi muka laut η sebesar 10%.

No	Stasiun Magnetik	Elevasi Muka Laut η (m)	Kedalaman Laut d (m)	Intensitas F_z (nT)	Estimasi b_z (nT)	b_z (nT) dari Magnetogram	Persentase <i>error</i> b_z
1	API	0,063	450,713	19109,2	2,67	2,64	1%
2	ASP	0,081	563,761	43801,5	6,29	6,20	2%
3	CNB	0,081	916,577	53057,3	4,69	4,25	10%
4	CTA	0,054	362,026	37750,6	5,63	5,47	3%
5	EYR	0,009	99,181	53442,7	4,85	4,78	1%
6	IPM	0,009	551,543	18584,0	0,30	0,21	44%
7	KAK	0,009	98,818	36011,4	3,28	2,93	12%
8	KNY	0,018	251,651	33430,6	2,39	2,28	5%

9	MMB	0,009	219,666	42601,7	1,75	1,60	9%
10	PPT	0,027	413,018	18411,9	1,20	1,10	9%

Informasi pada Tabel 3 melaporkan kesesuaian b_z antara estimasi analitik dan data magnetogram dengan derajat yang lebih baik daripada Tabel 2, di mana selisih nilai b_z antara kedua teknik tersebut ditemukan dalam rentang 0,03–0,44 nT yang dikategorikan relatif kecil. Kesesuaian nilai b_z antara hasil estimasi dan hasil observasi yang diberikan oleh magnetogram menunjukkan sembilan dari sepuluh stasiun memberikan persentase *error* yang relatif kecil (kecuali untuk stasiun IPM). Dengan demikian, hasil perhitungan b_z berdasarkan persamaan (6) dan b_z yang diperoleh dari magnetogram jaringan stasiun pemantau magnetik INTERMAGNET terbukti menunjukkan kesesuaian yang relatif tinggi seperti yang ditemukan oleh para peneliti terdahulu (Tyler, 2005; Minami *et al.*, 2015; Schnepf *et al.*, 2016; Prastowo *et al.*, 2020; Minami *et al.*, 2021; Lin *et al.*, 2021; Schnepf *et al.*, 2022) yang mendiskusikan sinyal lemah magnetik akibat *tsunami passage* dengan intensitas yang bisa diukur dengan pendekatan *frozen flux* pada persamaan (6). Tidak diketahui pasti apa penyebab penyimpangan nilai b_z yang terlalu besar (44%) yang terekam oleh stasiun IPM. Namun jelas bahwa persamaan (6) sangat sensitif terhadap perubahan kecil parameter η . Dalam hal ini, sumber pemicu tsunami apakah gempa tektonik bawah laut atau erupsi vulkanik bawah laut tidak ikut memengaruhi keberlakuan pendekatan *frozen flux* dan persamaan (6) tersebut.

Poin penting lain dari Tabel 3 adalah seluruh hasil perhitungan analitik b_z bernilai lebih besar dari b_z yang diperoleh dari magnetogram. Selisih terkecil yaitu 0,03 nT diperoleh saat tsunami melewati stasiun API yang dikategorikan sebagai stasiun medan dekat. Stasiun-stasiun nomer 2–10 pada Tabel 3 memiliki selisih kesesuaian b_z yang bervariasi antara 0,09–0,44 nT, di mana stasiun-stasiun tersebut dikategorikan sebagai stasiun medan jauh. Tsunami tiba di stasiun-stasiun ini dengan kecepatan yang bervariasi antara 1080–1130 kmj⁻¹, jauh lebih besar dari kecepatan tsunami konvensional yang tiba di stasiun API. Tsunami yang terdeteksi oleh stasiun-stasiun medan jauh dikenal sebagai *meteo-tsunami* (Tika dkk., 2024). Penelitian ini tidak mampu mengungkap alasan mengapa seluruh hasil perhitungan analitik b_z bernilai lebih besar dari b_z yang diperoleh dari data magnetogram. Mengatakan bahwa *meteo-tsunami* bertanggungjawab terhadap hasil *over estimate* dibandingkan dengan yang diperoleh dari magnetogram adalah spekulatif.

IV. KESIMPULAN

Pembangkitan medan magnet sekunder dengan intensitas lemah < 6,5 nT akibat tsunami HTHH Tonga 2022 yang dipicu oleh erupsi vulkanik terdeteksi oleh jaringan stasiun magnetik global INTERMAGNET dalam bentuk sinyal terukur magnetogram. Sinyal lemah tersebut bisa diprediksi dengan memanfaatkan pendekatan *frozen flux* (Tyler, 2005) yang telah teruji kebenarannya (Minami *et al.*, 2015; Schnepf *et al.*, 2016) untuk kasus *trans-oceanic tsunamis* yang dipicu oleh gempa tektonik bawah laut.

Estimasi analitik b_z berbasis persamaan (6) memberikan nilai b_z yang selalu lebih besar dari nilai b_z yang diperoleh dari magnetogram. Selisih nilai b_z hasil estimasi dan observasi berkisar antara 0,03–0,44 nT yang dikategorikan tidak signifikan. Dengan demikian, kesesuaian antara hasil perhitungan analitik b_z dan yang diperoleh dari magnetogram adalah relatif tinggi. Temuan penelitian ini dalam hal keberlakuan teori *frozen flux* sesuai dengan temuan penelitian terdahulu (Schnepf *et al.*, 2016; Prastowo *et al.*, 2020; Minami *et al.*, 2021). Meskipun telah berhasil membuktikan keberlakuan teori *frozen flux*, namun penelitian ini tidak mampu mengungkap alasan mengapa seluruh hasil perhitungan analitik b_z bernilai lebih besar dari b_z yang diperoleh dari magnetogram. Kehadiran *meteo-tsunami* belum tentu berkaitan dengan hasil *over estimate* b_z .

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis ingin mengungkapkan terima kasih kepada dua lembaga yang berperan penting, yaitu NOAA Center for Tsunami Research (NCTR) dan National Centers for Environmental Information (NCEI), atas ketersediaan data η (elevasi muka laut) yang digunakan untuk menyelesaikan masalah dalam penelitian ini. Data informasi tersebut dapat diakses melalui link laman <https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/>, dan <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/dart/2022tonga.html>. d (kedalaman laut) dapat diakses melalui <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/> dan F_z (komponen vertikal medan magnet utama Bumi) diperoleh dari model magnetik global IAGA (IGRF-13) melalui <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/> juga kepada pihak pengelola jaringan stasiun magnetik global INTERMAGNET di laman www.intermagnet.org atas data visual magnetogram. Terima kasih kepada reviewers sekaligus dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan yang bersifat membangun terhadap penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- 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, Issue 10.
- Carvajal, M., Sepúlveda, I., Gubler, A. and Garreaud, R. 2022. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 6, pp. 1-4.
- Dogan, G.G., Yalciner, A.C., Annunziato, A., Yalciner, B. and Necmioglu, O. 2023. Global propagation of air pressure waves and consequent ocean waves due to the January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Ocean Engineering*, Vol. 267, No. 113174.
- 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.
- Gusman, A.R., Supendi, P., Nugraha, A.D., Power, W., Latief, H., Sunendar, H., Widiyantoro, S., Daryono, Wiyono, S.H., Hakim, A., Muhari, A., Wang, X., Burbidge, D., Palgunadi, K., Hamling, I. and Daryono, M.R. 2019. Source model for tsunami inside Palu Bay following the 2018 Palu earthquake, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, Issue 15, pp. 8721-8730.
- Heidarzadeh, M. and Mulia, I.E. 2022. A new dual earthquake and submarine landslide source model for the 28 September 2018 Palu (Sulawesi), Indonesia tsunami. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 65, No. 1, pp. 97-109.
- 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.
- 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.
- 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 609, pp. 728-743.
- Manoj, C. Maus, S. and Chulliat, A. 2011. Observation of magnetic fields generated by tsunamis. *Earth and Observatory System (EOS)*, 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., 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. 1, pp. 2287.
- Muhari, A., Heidarzadeh, M., Susmoro, H., Nugroho, H.D., Kriswati, E., Supartoyo, Wijanarto, A. B., Imamura, F. and Arikawa, T. 2019. The December 2018 Anak Krakatau volcano tsunami as inferred from post-tsunami field surveys and spectral analysis. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, pp. 5219-5233.
- Nagai, K., Muhari, A., Pakoksung, K., Watanabe, M., Suppasri, A., Arikawa T. and Imamura, F. 2021. Consideration of submarine landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 63, Issue 4, pp. 446-466.
- Nakata, K., Katsumata, A. and Muhari, A. 2020. Submarine landslide source models consistent with multiple tsunami records of the 2018 Palu tsunami, Sulawesi, Indonesia. *Earth Planet and Space*, Vol. 72, No. 44.

- Paris, R., Switzer, A.D., Belousova, M., Belousov, A., Ontowirjo, B., Whelley, P. L. and Ulvrová, M. 2014. Volcanic tsunami: a review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia Indonesia, Philippines, Papua New Guinea. *Natural Hazards*, Vol. 70, pp. 447–470.
- Paris, R. 2015. Source mechanisms of volcanic tsunamis. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 373.
- 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.
- Ren, Z., Wang, W., Wang, Y. and Hou, J. 2020. Numerical study of the triggering mechanism of the 2018 Anak Krakatau tsunami: eruption or collapsed landslide ? *Natural Hazardz*, Vol. 102, pp 1–13.
- Santellanes, 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. In *Global tsunami science: Future Times*, 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.
- Sugioka, H., Hamano, Y., Baba, K., Kasaya, T., Tada, N. and Suetsugu, D. 2014. Tsunami: ocean dynamo generator. *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 3596.
- Tatehata, H., Ichihara, H. and Hamano, Y. 2015. Tsunami-induced magnetic fields detected at Chichijima Island before the arrival of the 2011 Tohoku earthquake tsunami. *Earth, Planets and Space*, Vol. 67, pp. 185–195.
- Tika, N.M.A.S., Prastowo, T. dan Fahmi, M.N. 2024. Penentuan cepat rambat dan decay time meteo-tsunami akibat erupsi vulkanik Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Tonga 2022. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, Vol. 13, No. 2, pp. 1–12.
- Tyler, R.H. 2005. A simple formula for estimating the magnetic field generated by tsunami flow. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L09608.
- Wang, B. and Liu, H. 2013. Space-time behaviour of magnetic anomalies induced by tsunami waves in open ocean. *Proceedings of The Royal Society A* 469.