

ESTIMASI ANOMALI LOKAL MEDAN LISTRIK AKIBAT PERAMBATAN TSUNAMI

Saiful Anam

Mahasiswa Prodi S-1 Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya
saifulanam@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Perambatan tsunami bisa memicu fenomena induksi elektromagnetik di laut dalam bentuk anomali lokal medan magnet dan anomali lokal medan listrik. Penelitian skripsi ini bertujuan untuk menganalisis mekanisme pembangkitan anomali lokal medan listrik melalui persamaan matematis yang menghubungkan antara dinamika tsunami dan anomali lokal medan listrik akibat perambatan tsunami. Dinamika tsunami direpresentasikan oleh besaran kecepatan tsunami dan simpangan vertikal permukaan air laut akibat kehadiran tsunami. Anomali lokal medan listrik yang dihitung sebagai komponen horisontal medan listrik induksi e_x merupakan hasil kali antara kecepatan tsunami c dan anomali lokal medan magnet yang dihitung sebagai komponen vertikal medan magnet sekunder b_z . Apabila asumsi frozen-flux berlaku, maka estimasi analitik medan listrik induksi akibat tsunami Chili 2010 memberikan hasil $e_x = 0,10 \mu\text{V/m}$ yang sesuai dengan estimasi visual $e_x = 0,12 \mu\text{V/m}$ dan tidak berbeda signifikan dengan temuan peneliti terdahulu yang relevan $e_x = 0,14 \mu\text{V/m}$. Untuk kasus Tohoku 2011, estimasi analitik memberikan hasil $e_x = 1,15 \mu\text{V/m}$ yang tidak berbeda signifikan dengan estimasi visual berbasis waveform penelitian terdahulu $e_x = 1,13 \mu\text{V/m}$. Untuk kasus Chili 2015, ditemukan estimasi analitik nilai rerata $e_x = 0,03 \mu\text{V/m}$. Untuk kasus ini, kesesuaian antara estimasi analitik dan estimasi visual anomali lokal medan listrik diberikan secara tidak langsung oleh data magnetogram b_z dari INTERMAGNET dan BCMT. Selain kesesuaian tersebut di atas, temuan penting lain dalam penelitian ini adalah data b_z sensitif terhadap data simpangan vertikal permukaan air laut η akibat kehadiran tsunami. Oleh karena itu, akurasi estimasi analitik anomali lokal medan listrik e_x ditentukan oleh akurasi data simpangan vertikal permukaan air laut η .

Kata Kunci: tsunami, induksi elektromagnetik, anomali lokal medan listrik e_x , Chili 2010, Tohoku 2011, Chili 2015

Abstract

Tsunami propagation can generate electromagnetic induction in the ocean in the forms of both magnetic field local anomaly and electric field local anomaly. This study aims to analyze mechanisms of the generation of the electric field anomaly through a mathematical equation that relates the dynamics of a tsunami wave to tsunami-induced electric field anomaly owing to the passage of the wave. Tsunami dynamics is represented by tsunami speed and vertical surface elevation in the presence of tsunami. The tsunami-generated electric field referred here to as the horizontal component e_x of the corresponding electric field is calculated from the product of the tsunami flow speed c and the secondary magnetic field referred here to as the vertical component b_z of the corresponding magnetic field anomaly. In the light of frozen-flux assumption, analytic estimate of the induced electric field associated with the 2010 Chilean tsunami was found to be $e_x = 0,10 \mu\text{V/m}$ in good agreement with visual inspection $e_x = 0,12 \mu\text{V/m}$ and not far different from $e_x = 0,14 \mu\text{V/m}$ obtained from previous work. For the case of the 2011 Tohoku, the estimate was $e_x = 1,15 \mu\text{V/m}$, consistent with graphical estimate on tsunami-induced electric field waveform $e_x = 1,13 \mu\text{V/m}$ from relevant previous work. For the 2015 Chilean tsunami, $e_x = 0,03 \mu\text{V/m}$, where agreement for this value was provided by b_z recorded at a particular station of INTERMAGNET and BCMT. Another important finding extracted from this study is that b_z is sensitive with respect to field data of sea surface elevation or tsunami wave height η . Therefore, level of accuracy in the estimation of electric field local anomaly e_x is primarily determined by η .

Keywords: tsunami, electromagnetic induction, electric field local anomaly e_x , 2010 Chili, 2011 Tohoku, 2015 Chili

PENDAHULUAN

Sebagai fluida konduktif, air laut mengalir memotong medan magnet bumi dan dapat memicu induksi elektromagnetik yang terukur sebagai anomali lokal medan magnet dan medan listrik. Fenomena alam ini disebut sebagai efek dinamo lautan yang dapat dipelajari melalui pengamatan jauh dengan bantuan satelit (Tyler *et al.*, 2003) dan kajian teoretik (Tyler, 2005). Penelitian tentang pembangkitan medan magnet sekunder, baik dengan pendekatan teoretik (Tyler, 2005) maupun pengukuran langsung dengan bantuan berbagai instrumen

ukur (Manoj *et al.*, 2011; Ichihara *et al.*, 2013) sudah banyak dikaji, namun penelitian tentang anomali lokal medan listrik belum banyak dibahas. Alasan pertama adalah kendala teknis pengukuran dan instrumen ukur di lapangan. Alasan kedua adalah belum ada nilai referensi medan listrik utama mengingat bumi bukanlah objek elektrik sehingga walaupun anomali lokal medan listrik dapat terukur di lapangan namun tidak ada cara untuk membuat perbandingan dengan nilai referensi medan listrik utama.

Efek dinamo lautan dalam bentuk anomali lokal medan elektromagnetik dapat diamati saat terjadi

perambatan tsunami (Kopytenko *et al.*, 2012; Minami and Toh, 2013; Tatehata *et al.*, 2015). Anomali lokal medan elektromagnetik bisa terekam oleh instrumen ukur elektromagnetik dan digunakan untuk mendeteksi kehadiran tsunami. Dengan memanfaatkan kombinasi data yang diperoleh dari Global Positioning System (GPS) dan stasiun pengamatan yang berada di darat, Kamogawa and Kakinami (2013) membuktikan bahwa anomali lokal medan listrik dipicu oleh perambatan tsunami. Sebelum temuan Kamogawa and Kakinami (2013) yang menyatakan bahwa tsunami sebagai pemicu anomali medan elektromagnetik, Manoj *et al.* (2010) telah lebih dahulu melaporkan temuan anomali lokal medan listrik sebagai akibat perambatan tsunami Aceh 2004 dengan memanfaatkan instrumen elektrometer yang sensitif dan diletakkan di dasar laut. Meskipun relatif kecil, namun intensitas anomali lokal medan listrik dapat terukur sebesar 10 mV/km (Manoj *et al.*, 2010). Dalam penelitian skripsi ini, kasus tsunami yang dibahas adalah tsunami besar Chili 2010, Tohoku 2011, dan Chili 2015, di mana fokus penelitian adalah menentukan intensitas anomali lokal medan listrik akibat perambatan tsunami. Ketiga kasus tsunami tersebut dipilih karena dibangkitkan oleh gempa bawah laut dengan magnitudo > 8. Dengan magnitudo yang besar, maka simpangan vertikal permukaan laut dari keadaan setimbang adalah relatif besar yang memberikan efek pembangkitan komponen vertikal medan magnet sekunder yang relatif besar dan terekam oleh instrumen ukur magnetik dan akan memicu pembangkitan anomali lokal medan listrik yang terukur sebagai komponen horisontal medan listrik.

Pembahasan anomali lokal medan listrik dimulai dari pembangkitan anomali lokal medan magnet. Dalam konteks ini, persamaan induksi magnetik (Cholifah, 2016) yang menjadi basis perhitungan anomali lokal medan magnet adalah sebagai berikut,

$$\partial_t b_z = -\nabla_H \cdot (F_z u_H) + \kappa \nabla^2 b_z \quad (1)$$

di mana b_z dan F_z berturut-turut adalah komponen vertikal medan sekunder (menembus tegak lurus ke luar permukaan geopotensial) dan komponen vertikal medan magnet utama bumi, u_H adalah komponen horisontal medan kecepatan gerak air laut (tidak bergantung pada kedalaman laut), ∇^2 adalah Laplacian, dan ∇_H adalah komponen horisontal operator diferensial spasial ∇ .

Persamaan (1) di atas mengandung variabel b_z sebagai besaran fisis yang digunakan untuk estimasi anomali lokal medan magnet dan medan listrik dalam penelitian ini. Tyler (2005) terkait dengan masalah induksi elektromagnetik di laut adalah konsep kecepatan fase gelombang yang dituliskan sebagai $c = \omega/k$ dan konsep kecepatan difusi (vertikal) air laut yang dituliskan sebagai $c_d = 2\kappa/h$. Dua konsep kecepatan tersebut membentuk

kecepatan c_s gelombang tsunami dalam notasi kompleks yang didefinisikan sebagai berikut,

$$c_s = c + ic_d \quad (2)$$

di mana definisi umum untuk kecepatan fase gelombang c di atas dapat diganti dengan $c = \sqrt{gh}$ (g adalah percepatan gravitasi bumi lokal) karena tsunami dikategorikan sebagai *non-dispersive, shallow, long, surface-gravity water waves* dengan kecepatan rambat yang tidak bergantung pada frekuensi (Kundu and Cohen, 2002). Adanya kompetisi antara proses adveksi dan proses difusi menunjukkan kebergantungan anomali lokal medan magnet akibat tsunami yang terukur sebagai komponen vertikal medan sekunder b_z pada parameter-parameter lokal c , c_d , F_z , η , dan h . Komponen vertikal medan magnet sekunder b_z dapat dihitung dari

$$b_z = \frac{c}{c_s} \frac{\eta}{h} \cdot F_z \quad (3)$$

di mana h adalah kedalaman laut dan η adalah simpangan vertikal muka air laut dihitung dari permukaan laut.

Selain itu Tyler (2005) memberikan argumen melalui simulasi fisis *phase lag* antara b_z dan η bahwa pendekatan *frozen-flux* adalah masuk akal. Pendekatan ini mengasumsikan aliran fluks massa air laut dalam arah horisontal melalui perambatan gelombang tsunami mendominasi perpindahan massa air laut dalam arah vertikal melalui proses difusi atau secara matematis $c \gg c_d$ sehingga $c_s \approx c$. Apabila pendekatan ini diambil, maka persamaan (2.3) berubah menjadi sederhana,

$$b_z = \frac{\eta}{h} \cdot F_z \quad (4)$$

yang digunakan untuk estimasi anomali lokal medan magnet bumi secara analitik.

Komponen medan magnet sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah komponen vertikal b_z sehingga komponen medan listrik sekunder yang sesuai untuk diperhitungkan adalah komponen horisontal medan listrik e_x (mengingat arah getar vektor medan magnet sekunder tegak lurus terhadap arah getar vektor medan listrik sekunder). Dengan analogi dinamika objek fisis yang bergerak lurus beraturan di mana resultan gaya yang bekerja pada objek fisis tersebut adalah sama dengan nol, maka hubungan matematis antara gaya magnetik (Lorentz) dan gaya listrik (Coulomb) yang bekerja pada objek fisis berupa ion-ion positif air laut dapat dituliskan sebagai berikut,

$$q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = -q\mathbf{E} \quad (5)$$

di mana q adalah muatan listrik ion-ion positif air laut dan \mathbf{v} adalah vektor kecepatan rambat gelombang tsunami. Berdasarkan persamaan (4) tersebut maka dapat dituliskan secara aljabar skalar estimasi anomali lokal medan listrik sebagai berikut,

$$e_x = cb_z \quad (6)$$

di mana c adalah kecepatan gelombang tsunami seperti yang didefinisikan sebagai $c = \sqrt{gh}$ untuk kasus *non-dispersive, long wave approximation*.

METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini berjenis penelitian penerapan, karena menerapkan teori dan konsep fisika yang relevan dengan teori dinamo lautan (Tyler, 2005). Efek induksi elektromagnetik aliran air laut tersebut menghasilkan medan magnet dan medan listrik sekunder (Minami and Toh, 2013; Sugioka *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014). Penelitian skripsi ini menggunakan data sekunder yang tersedia *on line* secara gratis di www.intermagnet.org yang dikelola oleh *International Real-time Magnetic Observatory Network* (INTERMAGNET), suatu jaringan global stasiun magnetik, dan www.bcmt.fr yang dikelola oleh *Bureau Central de Magnetisme Terrestre* (BCMT), jaringan stasiun magnetik pemerintah Perancis. Oleh karena itu, pelaksanaan penelitian ini tidak memerlukan instrumen ukur khusus selain akses internet.

B. Variabel Operasional Penelitian

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Variabel manipulasi adalah F_z dari data magnetik global, h dari data batimetri global, η dari data tsunami Chili 2010, data tsunami Jepang 2011, data tsunami Chili 2015, dan beberapa data yang relevan. Variabel respons adalah besaran fisis yang berubah karena manipulasi F_z , h , dan η . Dalam penelitian skripsi ini, variabel respons adalah komponen vertikal medan magnet sekunder b_z dan komponen horisontal medan listrik sekunder e_x . Variabel kontrol adalah sesuatu yang tidak berubah selama proses estimasi anomali lokal medan magnet dalam bentuk komponen vertikal b_z dan medan listrik dalam bentuk komponen horisontal e_x , yaitu $c = \sqrt{gh}$ (kecepatan gelombang tsunami berbasis teori *frozen-flux*).

C. Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian skripsi ini berupa data numerik dan data magnetogram. Data numerik diperoleh dari: (1) data magnetik global yang tersedia gratis di <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/> yang dikelola oleh *International Association of Geomagnetism and Aeronomy* (IAGA) dalam bentuk model magnetik *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) Generasi 12; (2) data batimetri laut dari <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/> dikelola oleh pemerintah US melalui *National Geophysical Data Centre* (NGDC), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA); (3) data tsunami Chili 2010, Jepang 2011 dan Chili 2015 serta data tsunami

untuk kasus-kasus tsunami yang lain melalui penelusuran informasi di <http://www.ngdc.noaa.gov>. Selain data numerik tersebut, peneliti juga memanfaatkan data magnetogram yang diperoleh dari www.intermagnet.org dan www.bcmt.fr.

D. Teknik Pengolahan Data

Data numerik dari beberapa sumber laman yang bisa dipercaya memberikan nilai nominal variabel manipulasi F_z , h , dan η yang digunakan untuk menghitung nilai komponen vertikal medan sekunder b_z melalui persamaan (4). Hasil perhitungan b_z berdasarkan persamaan (4) dibandingkan dengan estimasi nilai b_z berdasarkan cuplikan grafik magnetogram dari INTERMAGNET di www.intermagnet.org dan BCMT di www.bcmt.fr. Selanjutnya besarnya nilai e_x dihitung dengan persamaan (6) menggunakan hasil perhitungan b_z yang telah didapatkan dari persamaan (4).

Estimasi anomali lokal medan listrik secara analitik dihitung berdasarkan persamaan (6) yang memuat variabel b_z dan e_x untuk 3 kasus: (1) tsunami Chili 27/2/2010, (2) tsunami Tohoku Jepang 11/3/2011, (3) tsunami Chili 16/9/2015.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kesesuaian antara Estimasi Analitik dan Observasi Visual

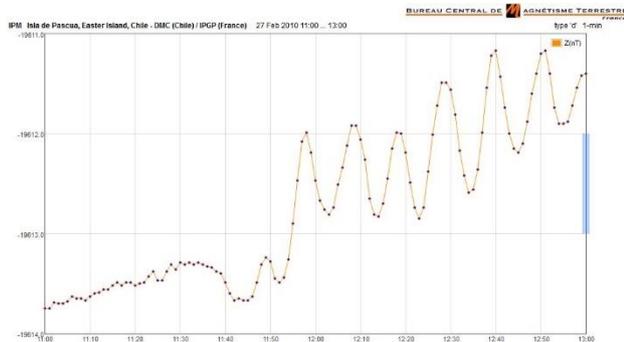
No	Kasus tsunami	Nama stasiun	h (m)	c (m/s)	b_z (nT)	e_x ($\mu\text{V/m}$)
1	Chili 2010	S8	4384	207,3	0,51	0,10
		S9	5096	223,5	0,39	0,09
		IPM	6933	260,7	0,44	0,11
2	Tohoku 2011	21418	5698	236,31	12,56	2,97
		B14	5830	239,03	15,02	3,59
		KAK	10272	317,28	15,60	4,95
3	Chili 2015	32402	4070	199,71	0,28	0,055
		32401	4830	217,56	0,07	0,015
		IPM	6933	260,66	0,19	0,050

Tabel 1 merupakan hasil perhitungan menggunakan persamaan (4) dan persamaan (6) untuk ketiga kasus tsunami yang dibahas dengan g diambil sebesar $9,8 \text{ m/s}^2$. Pada tabel tersebut terlihat dengan jelas ada perbedaan pada masing-masing kasus tsunami. Pada kasus tsunami Chili 2010 nilai yang ditemukan sesuai dengan temuan Sugioka *et al.* (2014) di mana nilai e_x dilaporkan sebesar $0,14 \mu\text{V/m}$. Pada kasus tsunami Tohoku 2011 nilai b_z yang ditemukan didukung oleh temuan Cholifah (2016) dan Prastowo *et al.* (2017) dan

merupakan titik tengah dari temuan Ichihara *et al.* (2013) yang melaporkan bahwa nilai $b_z = 12-19$ nT.

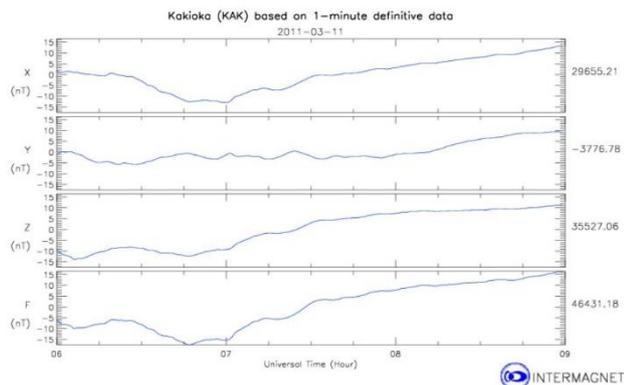
Tabel 1. Hasil perhitungan ketiga kasus tsunami dengan persamaan (4) dan (6).

Data magnetogram dari kasus tsunami Chili 2010 didapatkan dari stasiun IPM yang diakses dari BCMT pada pukul 11:45 UTC seperti Gambar 1. Magnetogram tersebut menunjukkan adanya anomali b_z sebesar 0,48 nT. Hal ini berarti nilai yang terhitung adalah sesuai kejadian di lapangan.



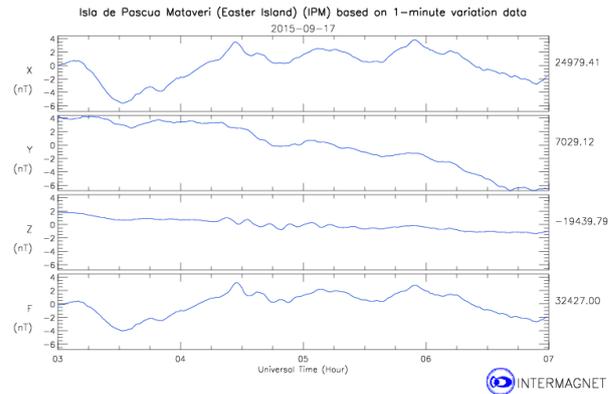
Gambar 1. Magnetogram dari BCMT untuk kasus Chili 2010 yang terekam oleh stasiun magnetik IPM.

Nilai b_z Magnetogram pada kasus tsunami Tohoku 2011 didapatkan dari stasiun KAK, INTERMAGNET seperti terlihat pada Gambar 2 di kolom ketiga adalah sebesar 15,6 nT. Hal ini juga menunjukkan nilai yang terhitung adalah sesuai kejadian di lapangan.



Gambar 2. Magnetogram dari INTERMAGNET kasus Tohoku 2011 yang terekam oleh stasiun magnetik KAK.

Pada kasus tsunami Chili 2015, magnetogram di ambil dari stasiun IPM pada pukul 04:18 UTC 17/9/2015 seperti pada Gambar 3 di mana b_z pada plot magnetogram ketiga ditemukan sebesar 0,25 nT (berada dalam rentang $b_z = 0,05-0,28$ nT berdasarkan estimasi analitik).



Gambar 3. Magnetogram dari INTERMAGNET untuk kasus Chili 2015 yang terekam oleh stasiun magnetik IPM.

B. Akurasi Estimasi Analitik

Pada bagian sebelumnya telah dipaparkan hasil-hasil estimasi anomali lokal medan listrik e_x berdasarkan nilai anomali lokal medan magnet b_z yang dihitung dengan teori *frozen-flux* dan inspeksi visual atau estimasi berdasarkan data magnetogram dari INTERMAGNET dan BCMT. Beberapa faktor dapat dikatakan sebagai penyebab variasi nilai b_z relatif terhadap kasus tsunami yang ditinjau. Anomali lokal medan magnet b_z ditentukan oleh F_z , η , dan h , berbasis teori *frozen-flux*. Alih-alih dua besaran F_z dan h , nampaknya simpangan vertikal permukaan laut η menjadi besaran pembeda. Hasil estimasi nilai b_z (secara langsung mempengaruhi nilai e_x) sangat sensitif terhadap perubahan kecil η dan oleh karena itu akurasi estimasi η menjadi krusial. Berdasarkan uraian ini maka akurasi data η memengaruhi kualitas hasil e_x .

C. Urgensi Hasil Penelitian

Pembangkitan medan elektromagnetik sekunder ini (anomali lokal medan magnet dan anomali lokal medan listrik) juga dibahas oleh beberapa peneliti terdahulu, misalnya Manoj *et al.* (2010) yang melaporkan adanya medan listrik induksi saat tsunami Aceh 2004. Selain itu, intensitas medan listrik induksi yang terdeteksi oleh instrumen ukur bawah laut juga dilaporkan saat tsunami Chili 2010 (Sugioka *et al.*, 2014) dan kasus Tohoku 2011 (Kamogawa and Kakinami, 2013; Zhang *et al.*, 2014). Meskipun sederhana, namun persamaan (4.2) efektif mampu menjelaskan fenomena induksi elektromagnetik di laut terbuka akibat tsunami.

Hasil-hasil penelitian ini membuka peluang kemungkinan merancang dan melaksanakan penelitian dalam bidang mitigasi bencana kebumihan terkait dengan bencana tsunami. Metode deteksi dini gelombang tsunami akibat gempa bumi tektonik bawah laut atau sumber lain, Kelemahan sistem peringatan dini tsunami berbasis monitoring sinyal seismik adalah tidak mampu mengungkap dinamika tsunami dalam zona propagasi di laut dan zona mitigasi di pantai dan daratan dekat pantai.

Sensor elektromagnetik yang sensitif untuk mendeteksi medan elektromagnetik sekunder (b_z dan e_x) bisa mengungkap kehadiran dan dinamika tsunami dalam zona propagasi di laut terbuka, misalnya memberikan informasi secara cepat tentang tinggi gelombang tsunami η dan kecepatan tsunami c .

PENUTUP

Simpulan

Perambatan gelombang tsunami di laut terbuka memicu fenomena induksi elektromagnetik (Manoj *et al.*, 2010; Minami and Toh, 2013; Minami *et al.*, 2015) dalam bentuk anomali lokal medan magnet (medan magnet induksi) dan anomali lokal medan listrik (medan listrik induksi). Intensitas medan listrik induksi dapat dihitung dengan persamaan sederhana yang membutuhkan pengetahuan tentang medan magnet induksi. Dalam penelitian ini, medan magnet induksi dihitung dengan pendekatan *frozen-flux* (Tyler, 2005). Hasil hitung medan magnet induksi digunakan untuk estimasi medan listrik induksi dengan bantuan kecepatan terukur gelombang tsunami di laut terbuka.

Untuk kasus Chili 2010, medan listrik induksi akibat tsunami ditemukan sebesar $e_x = 0,10 \mu\text{V/m}$. Nilai anomali lokal medan listrik tersebut tidak berbeda signifikan dengan temuan Sugioka *et al.* (2014) yang melaporkan $e_x = 0,14 \mu\text{V/m}$. Kesesuaian temuan nilai e_x dalam penelitian ini dibandingkan dengan temuan Sugioka *et al.* (2014) adalah relatif tinggi. Hal ini terjadi karena ada kesesuaian yang tinggi antara medan magnet induksi akibat tsunami $b_z = 0,46 \text{ nT}$ berdasarkan estimasi analitik dengan bantuan pendekatan *frozen-flux* dalam penelitian ini dan $b_z = 0,47\text{-}0,48 \text{ nT}$ berdasarkan estimasi visual dengan bantuan magnetogram dari INTERMAGNET dan BCMT serta $b_z = 0,5 \text{ nT}$ (Sugioka *et al.*, 2014). Hal ini berarti tidak ada perbedaan yang signifikan antara estimasi analitik dan visual dalam penentuan nilai medan listrik induksi akibat tsunami.

Untuk kasus Tohoku 2011, ditemukan rentang nilai $e_x = 0,8\text{-}5,0 \mu\text{V/m}$. Untuk 4 data dari instrumen ukur bawah laut yang relevan dengan penelitian Zhang *et al.* (2014), ditemukan rerata $e_x = 1,19 \mu\text{V/m}$ berbasis estimasi analitik. Nilai rerata e_x tersebut tidak berbeda signifikan dengan $e_x = 1,13 \mu\text{V/m}$ berbasis estimasi visual. Untuk kasus Chili 2015, ditemukan nilai $e_x = 0,01\text{-}0,06 \mu\text{V/m}$. Amplitudo maksimum $e_x = 0,06 \mu\text{V/m}$ untuk kasus ini sekitar 2 kali lebih kecil dari $e_x = 0,10 \mu\text{V/m}$ untuk kasus Chili 2010. Hal ini berarti setiap kejadian meskipun lokasi episenternya berdekatan, namun memiliki karakteristik sendiri yang menjadi penyebab perbedaan intensitas medan elektromagnetik sekunder.

Dalam penelitian ini, intensitas medan elektromagnetik induksi akibat tsunami (anomali lokal

medan magnet b_z dan anomali lokal medan listrik e_x) ditemukan sangat sensitif terhadap perubahan kecil simpangan vertikal permukaan air laut η saat gelombang tsunami melintas di suatu kawasan di laut terbuka. Berdasarkan hal ini, maka penulis menyimpulkan bahwa akurasi estimasi analitik anomali lokal medan listrik e_x sangat ditentukan oleh akurasi anomali lokal medan magnet b_z dan simpangan vertikal permukaan air laut η .

Saran

Akurasi estimasi analitik anomali lokal medan listrik e_x sangat ditentukan oleh akurasi data simpangan vertikal permukaan air laut η . Oleh karena itu, estimasi analitik e_x harus selalu dilengkapi dengan estimasi visual yang bisa diperoleh melalui data magnetogram dari INTERMAGNET dan BCMT maupun referensi lain yang relevan sebagai pembanding. Penelitian ini membutuhkan penelitian lanjutan untuk mendukung gagasan monitoring sinyal magnetik sebagai alternatif monitoring sinyal seismik untuk pengembangan deteksi dini tsunami.

DAFTAR PUSTAKA

- Cholifah, L. 2016. *Estimasi anomali lokal medan magnet bumi akibat perambatan gelombang tsunami dalam perspektif teori dinamo aliran air laut*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Jurusan Fisika, FMIPA, Unesa.
- 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, doi:10.1002/jgra.50118, pp.1751-1754.
- Kopytenko, Y. A., Ismaguilov, V. S., Hattori, K. and Hayakawa, M. 2012. Anomaly disturbances of the magnetic fields before the strong earthquake in Japan on March 11, 2011. *Annals of Geophysics*. Special issue: earthquake precursors, Vol.55, No.1, doi:10.4401/ag-5260, pp.101-107.
- Kundu, P. K. and Cohen, I. M. 2002. *Fluid Mechanics*. San Diego: Academic Press, US. pp.1-730.
- Manoj, C., Kuvshinov, A., Neetu, S., and Harinarayana, T. 2010. Can undersea voltage measurements detect tsunamis?. *Earth Planets Space*, Vol.62, pp.353-358.
- Manoj, C. Maus, S. and Chulliat, A. 2011. Observation of magnetic fields generated by tsunamis. *Earth and Observatory System (EOS)*, Vol.92, No.2, January 11, 2011, 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.
- Prastowo, T., Cholifah L., Ngkoimani L. O., Safiuddin L. O. 2017. Tsunami-magnetic signals and magnetic anomaly generated by tsunami wave propagation at open seas. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, Vol.13, No.1, pp.59-70
- Sugioka, H., Hamano, Y., Baba, K., Kasaya, T., Tada, N. and Suetsugu, D. 2014. Tsunami: ocean dynamo generator. *Scientific Reports* at www.nature.com, 4:3596, pp.1-7.
- 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.
- Tyler, R. H., Maus, S. and Luhr, H. 2003. Satellite observations of magnetic fields due to ocean tidal flow. *Science*, Vol.299, 10 January 2003, pp.239–241.
- Tyler, R. H. 2005. A simple formula for estimating the magnetic field generated by tsunami flow. *Geophysical Research Letters*, Vol.32, L09608, pp.1-4.
- Zhang, L., Baba, K., Liang, P., Shimizu, H. and Utada, H. 2014. The 2011 Tohoku Tsunami observed by an array of ocean bottom electro-magnetometers. *Geophysical Research Letters*, Vol.41, doi:10.1002/2014GL060850, pp.1-8.