

DETEKSI EFEK GEMPA BUMI PADA IONOSFER MENGGUNAKAN DATA GNSS (DETECTION OF THE EARTHQUAKE EFFECT ON THE IONOSFER USING GNSS DATA)

Anwar Santoso^{1*}, Buldan Muslim¹, Siti Inayah Fitriyani^{2*}

¹ Pusat Sains Antariksa, Kedeputan Bidang Sains Antariksa dan Atmosfer – LAPAN
Jalan Dr. Djundjuran 133 Bandung, 40173

² Mahasiswi S1 Jurusan Fisika Universitas Pendidikan Indonesia (UPI)
Jalan Ganesha 10 Bandung

*E-mail korespondensi: anwar.santoso@lapan.go.id; sifmjs@gmail.com

ABSTRACT

Seismic activities such as earthquakes can cause atmospheric and infrared gravitational waves. If the earthquake happens to be strong enough ($M > 6$ SR), these waves can spread to the ionosphere altitude so that ionospheric fluctuations in the order of atmospheric and infrasonic gravitational waves can appear in the ionosphere. The ionospheric wave monitoring system associated with earthquakes from GNSS data has been developed from a network of GNSS observation stations in Indonesia and beyond. By using the sliding Fast Fourier Transform (SFFT) program on GNSS data, the disturbed ionospheric TEC position and TEC will be carried out. The results of previous studies, differential TEC showed irregular fluctuations in the order of several tens of seconds to several tens of minutes in the ionosphere with average amplitude varying in order of less than 0.01 TECU. At certain times the ionospheric fluctuations become more regular with an amplitude reaching greater than 0.01 TECU. As a case study, in this paper a methodological examination will be conducted on the events of Aceh earthquake on December 26, 2004 ($M = 9.2$ SR), Tohoku March 11, 2011 ($M = 9$ SR) and Yogyakarta May 27, 2006 ($M = 6.2$ SR).

Keywords: GNSS, Ionosphere TEC, Earthquakes, Gravity wave, Infrasonic wave

ABSTRAK

Kegiatan seismik seperti gempa bumi dapat menyebabkan gelombang gravitasi atmosfer dan inframerah. Jika gempa bumi terjadi cukup kuat ($M > 6$ SR), gelombang ini dapat menyebar ke ketinggian ionosfer sehingga fluktuasi ionosfer dalam urutan gelombang gravitasi atmosfer dan infrasonik dapat muncul di ionosfer. Sistem pemantauan gelombang ionosfer yang terkait dengan gempa bumi dari data GNSS telah dikembangkan dari jaringan stasiun pengamatan GNSS di Indonesia dan sekitarnya. Dengan menggunakan program geser Fast Fourier Transform (SFFT) pada data GNSS, posisi TEC ionosfer yang terganggu dan TEC akan dilakukan. Hasil penelitian sebelumnya, TEC diferensial menunjukkan fluktuasi tidak beraturan dalam urutan puluhan detik hingga beberapa puluh menit di ionosfer dengan amplitudo rata-rata bervariasi dalam urutan kurang dari 0,01 TECU. Pada waktu-waktu tertentu fluktuasi ionosfer menjadi lebih teratur dengan amplitudo mencapai lebih besar dari 0,01 TECU. Sebagai studi kasus, dalam makalah ini akan dilakukan pemeriksaan metodologis tentang peristiwa gempa Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 ($M = 9,2$ SR), Tohoku 11 Maret 2011 ($M = 9$ SR) dan Yogyakarta 27 Mei 2006 ($M = 6.2$ SR).

Kata kunci: GNSS, TEC ionosfer, Gempa bumi, Gelombang gravitasi, Gelombang infrasonik

Diterima 27-08-2019 | Disetujui 15-01-2020 | Dipublikasi 31-03-2020

PENDAHULUAN

Secara umum, Indonesia terletak di

perbatasan tiga lempeng tektonik utama yaitu lempeng Indo-Australia, Pasifik dan Eurasia. Indonesia cukup sering menerima gempa bumi

yang disebabkan oleh pergerakan tiga lempeng tektonik tersebut. Karena itu, studi untuk mengetahui dampak gempa bumi sangat penting. Salah satunya dengan memanfaatkan teknologi GNSS. Ada 2 metode untuk menganalisis efek gempa bumi pada ionosfer menggunakan data GNSS, yaitu *Pre-seismic Ionospheric Disturbance* (PID) dan *Co-seismic Ionospheric Disturbance* (CID). PID anomali dapat bertahan selama 1-2 minggu sebelum gempa terjadi. Sedangkan anomali CID hanya berlangsung 15 menit hingga 1 jam setelah gempa. CID dapat digunakan untuk sistem peringatan dini tsunami dengan episentrum yang cukup jauh dari pantai [1].

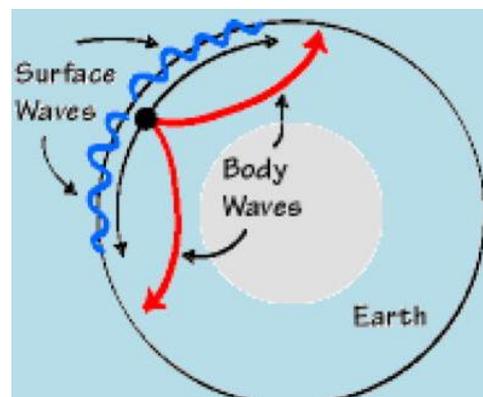
Studi terbaru menunjukkan bahwa efek gempa bumi dan tsunami di ionosfer melalui gravitasi atmosfer dan gelombang akustik telah ditemukan dalam kasus gempa besar seperti Gempa Bumi Aceh, 26 Desember 2004 ($M = 8,9$ SR) dan gempa bumi Tohoku, 11 Maret 2011 ($M = 9$ SR). Pengaruh gempa bumi pada ionosfer terjadi melalui Coupling Litosphere-Atmosphere-Ionosphere (LAI) [2]. Amplitudo terbesar dari gelombang seismik di gelombang permukaan bumi adalah gelombang permukaan, salah satunya adalah gelombang Rayleigh. Gelombang seismik merambat di sepanjang permukaan bumi melalui kerak dan matle atas dengan kecepatan antara 3-4 km/s. Gelombang ini dapat menghasilkan gelombang atmosfer yang merambat ke atas dengan periode lebih besar dari 10 detik. Gelombang infrasonik menyebar di atmosfer dan mereka mencapai ionosfer, energi gelombang mereka ditransfer ke ionosfer melalui tabrakan antara ion dan elektron dan sehingga membawa gelombang infrasonik ke dalam ionosfir. Sehingga, gelombang infrasonik dapat dideteksi menggunakan beberapa peralatan pengamatan ionosfer seperti GNSS [2; 3].

Makalah ini membahas tentang deteksi efek gempa pada ionosfer menggunakan data GNSS. Studi kasus digunakan gempa bumi Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 ($M = 9,2$ SR), Tohoku 11 Maret 2011 ($M = 9$ SR) dan Yogyakarta 27 Mei 2006 ($M = 6,2$ SR).

Penelitian awal ini akan berguna dalam upaya sistem peringatan dini Tsunami hanya untuk episentrum jauh dari tepi pantai.

TINJAUAN PUSTAKA

Seismologi adalah studi tentang gempa bumi dan seismik. Gelombang seismik dapat didefinisikan sebagai, "gelombang energi yang disebabkan oleh pecahnya batu secara tiba-tiba di dalam bumi atau ledakan" [4]. Dua jenis gelombang utama adalah gelombang tubuh dan gelombang permukaan. Gelombang tubuh dapat melakukan perjalanan melalui lapisan dalam bumi, tetapi gelombang permukaan hanya bisa bergerak di sepanjang permukaan seperti riak di air. Gempa bumi memancarkan energi seismik baik sebagai gelombang tubuh maupun permukaan (Gambar 1).

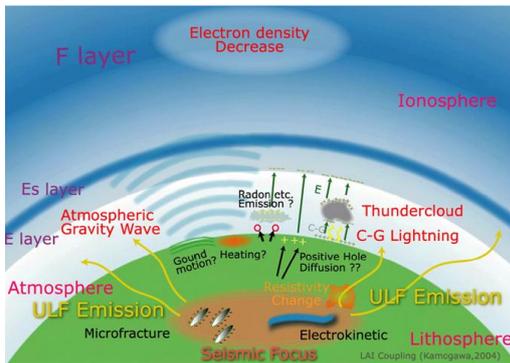


Gambar1. Gelombang "body" dan permukaan [4].

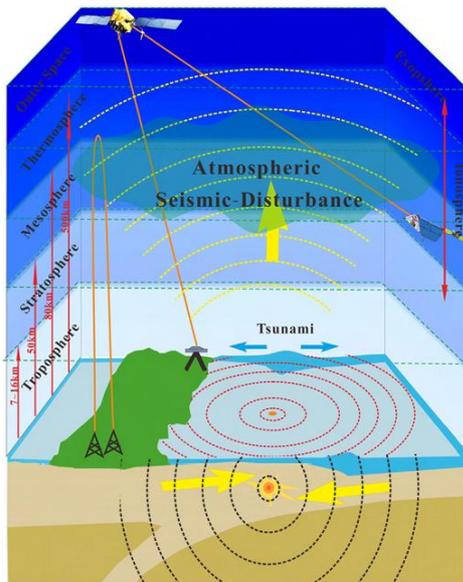
Kamogawa [5] mengusulkan mekanisme yang mungkin untuk transportasi energi dari litosfer ke atmosfer-ionosfer pada Gambar 2. Umumnya medan listrik atmosfer yang dihasilkan pada atau dekat permukaan tanah selama periode seismik diasumsikan menyebabkan anomali ionosfer. Namun, apakah gangguan ionosfer pra-seismik ini terkait dengan gempa bumi atau tidak masih

kontroversial. Sulit untuk mengekstraksi variasi latar belakang TEC yang jelas. Hingga kini tidak ada definisi eksplisit untuk gangguan ionosfer preseismik. Salah satu efeknya adalah metode penyaringan atau *de-*

trended, terutama untuk mempertimbangkan amplitudo gangguan.



Gambar 2. Kopling Litosfer-Atmosfer-Ionosfer [5].



Gambar 3. Gangguan seismo-ionosferik dari pengamatan GNSS [9].

Setelah mendapatkan data GNSS, kami menggunakan pemfilteran 3-10 menit jendela untuk menghilangkan kebisingan frekuensi tinggi dan tren latar belakang TEC yang disebabkan oleh variasi temporal dan spasial pada *ionosphere pierce point* (IPP). Di sini kita menetapkan panjang jendela sebagai 3-10 menit untuk gangguan campuran (termasuk sinyal yang terkait dengan mode yang berbeda), yaitu 1,7–5,6 mHZ, hanya mencakup frekuensi dominan mode resonansi akustik antara permukaan tanah dan termosfer yang lebih rendah [6; 7]. Biasanya, *Four order zero-phase Butterworth filter* digunakan karena besarnya rata-rata yang maksimal. Metode

moving average juga dapat digunakan untuk menghapus variasi TEC latar belakang [8]. Dengan menggunakan seri residu TEC, anomali seismo-ionosfer dapat dideteksi selama gempa bumi (Gambar 3) [9].

METODE PENELITIAN

Data GNSS diperoleh dari Badan Infoemasi dan Geospasial (BIG). Data GNSS juga dapat dengan mudah diturunkan menggunakan Persamaan (1) dan (2) dengan pengamatan GNSS yang bagus. Di sini bias instrumen tidak dipertimbangkan, karena konstan dalam waktu singkat yang tidak memiliki pengaruh pada variasi data GNSS setelah penyaringan. Menggunakan seri residu GNSS, anomali seismo-ionosfer dapat dideteksi selama gempa bumi [9].

$$L'_{1j} = \rho^i_{\alpha j} - d^l_{ion1j} + d^l_{tropj} + \quad (1)$$

$$c(\tau^i - \tau_j) - \lambda(b'_{1j} + N'_{1j}) + \varepsilon^i_{l,1j}$$

$$P' = \rho^i_{\sigma j} + d^l_{ion1j} + d^l_{tropj} + c(\tau^i - \tau_j) + d^i_1 + d_{1j} + \varepsilon^i_{p,1j} \quad (2)$$

$$P' = \rho^i_{\sigma j} + d^l_{ion2j} + d^l_{tropj} + c(\tau^i - \tau_j) + d^i_2 + d_{2j} + \varepsilon^i_{p,2j}$$

dimana:

L = Pengukuran fase pembawa

P = Pengukuran kode

ρ = Jarak sebenarnya antara satelit dan penerima GNSS

d_{ion} = Penundaan ionosfer

d_{trop} = Penundaan troposfer

c = Kecepatan cahaya dalam vakum

τ = Kesalahan jam satelit dan penerima

b = Fase muka bias instrumen

d = Penundaan kode bias instrumen

N = Ambiguitas fase pembawa

ε = Residu dalam pengukuran GNSS

Penundaan ionospheric dapat diperoleh dari perbedaan fase GNSS frekuensi ganda dan pengamatan kode. Setelah menggabungkan pengamatan pseudorange dan fase pembawa dari GNSS frekuensi ganda, TEC miring dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut [9; 10; 11].

$$\begin{aligned}
 STEC &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 - L_2 + \\
 &\quad \lambda_1(N_1 - b_1) - \lambda_2(N_2 - b_2) + \varepsilon_l) \\
 &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)} (P_1 - P_2 \\
 &\quad (d_1 - d_1) + \varepsilon_p) \quad (3)
 \end{aligned}$$

Biasanya, diasumsikan bahwa semua elektron di ionosfer terkonsentrasi dalam cangkang tipis yang disebut lapisan ionosfer pusat pada ketinggian 300-600 km di mana kerapatan elektron maksimum. Fungsi pemetaan kosinus digunakan untuk mengonversi STEC ke TEC vertikal (VTEC) [12].

$$VTEC = STEC * \left(\arcsin \left(\frac{R \sin z}{R + H} \right) \right) \quad (4)$$

di mana R adalah jari-jari Bumi, H adalah tinggi cangkang tipis dari ionosfer dan z adalah sudut puncak satelit. Tinggi cangkang dipilih oleh 300 km sesuai dengan kerapatan elektron maksimum.

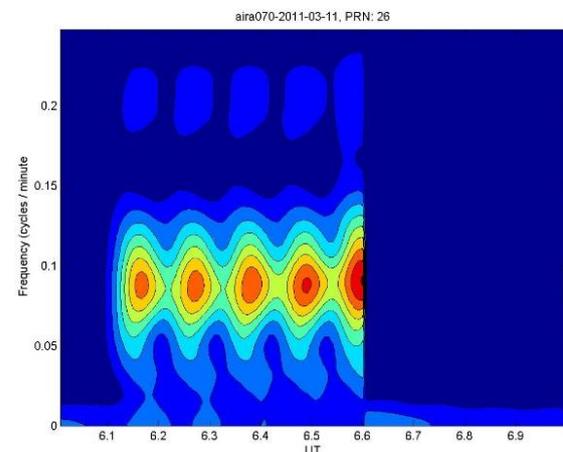
Analisis spektrum gelombang ionosfer dilakukan pada menit data GNSS selama satu jam, kemudian perhitungan FFT dilakukan setiap menit data GNSS dan bergerak setiap menit disingkat dengan Sliding Fast Fourier Transform (SFFT). Hasil analisis spektrum mencakup informasi periodisitas variasi TEC dari urutan detik hingga sekitar 500 detik (dari data TEC 1 Hz, dengan balok setiap menit) dan informasi gelombang ionosfer dengan periode beberapa menit hingga puluhan menit (dari data GNSS setiap 30 detik dalam balok setiap satu jam) [13].

Selain itu, data yang digunakan adalah data lapangan geomagnetik, yaitu indeks Dst [14]. Data indeks Dst digunakan untuk memastikan apakah anomali ionosfer yang telah diperoleh

disebabkan oleh gempa bumi atau karena efek cuaca badai geomagnetik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gempa bumi Tohoku terjadi pada hari Jumat tanggal 11 Maret tahun 2011 pukul 14:46 JST ((05:46) UTC) selama 5 menit terjadi di lepas pantai Pasifik Tōhoku berkekuatan 9,0–9,1 (Mw) dengan pusat gempa sekitar 70 kilometer (43 mil) timur Semenanjung Oshika Tōhoku dan pusat hiposentrum di kedalaman bawah laut sekitar 24,4 km (15,2 mi). Gempa utama didahului oleh serangkaian gempa awal dengan kekuatan 7,2 Mw pada 9 Maret yang terletak 40 kilometer (25 mi) dari zona gempa 11 Maret, dan diikuti oleh tiga gempa lainnya pada hari yang sama di atas 6 Mw. Satu menit sebelum gempa [15]. Gempa susulan sebesar 7,0 terjadi pukul 15:06 waktu setempat, M7,4 pukul 15:15 waktu setempat dan M7,2 pukul 15:26 waktu setempat. Lebih dari seratus gempa susulan berkekuatan 4,5 atau lebih besar terjadi sejak gempa pertama [16]. Adanya jejak gempa sebelum gempa bumi utama pukul 05.46 UT terdeteksi dari pengamatan TEC ionosfer dengan periode sekitar 4 menit seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

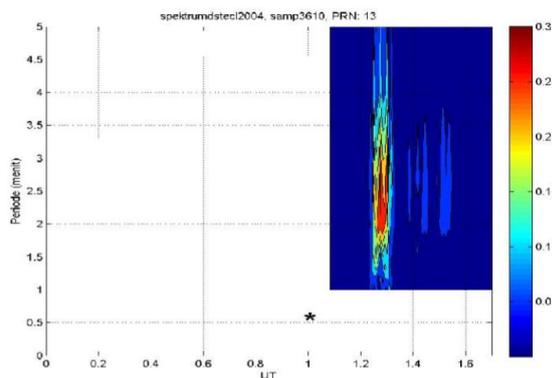


Gambar 4. Hasil olah data TEC pada hari kejadian gempa bumi Tohoku, Jepang tanggal 11 Maret 2011. Gelombang ionosfer infrasonik muncul sekitar 24 menit setelah gempa bumi.

Dari Gambar 4 di atas, tampak bahwa terdeteksi gelombang akibat gempa bumi

sebelum gempa utama Tohoku, Jepang tanggal 11 Maret 2011 pukul 05.46 UT (episentrum 38°19'19" N; 142°22'08" E). Gelombang ionosfer infrasonik muncul sekitar 15 menit setelah gempa bumi, yang dapat dideteksi menggunakan data TEC dari stasiun Aira (29° 49' N; 136° 06' E atau sekitar 1000 km dari episentrum gempabumi) seperti dapat dilihat pada Gambar 4 tersebut. Gempa bumi ini juga memicu gelombang tsunami.

Gempa Bumi Yogyakarta Mei 2006 adalah peristiwa gempa Bumi tektonik kuat yang mengguncang Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah pada Sabtu pagi, 27 Mei 2006 kurang lebih pukul 05:55:03 WIB selama 57 detik. Gempa Bumi tersebut berkekuatan 5,9 pada skala Richter. BMKG menentukan pusat gempa berada di 8.03 LS dan 110,32 pada kedalaman 11,3 Km dan kekuatan 5.9 SR Mb (Magnitude Body) atau setara 6.3 SR Mw (Magnitude Moment). Walaupun pusat gempa terjadi di laut, namun tidak menimbulkan tsunami. Sayangnya kejadian gempabumi Yogyakarta tidak terdeteksi melalui data TEC karena tidak ditemukannya data bisa diolah dan diduga amplitude gempanya relatif kecil.



Gambar 5. Gelombang ionosfer infrasonik muncul sekitar 13 menit setelah gempa bumi Aceh, 26 Desember 2004 pukul 00:59 UT.

Gempa bumi Samudra Hindia 2004 terjadi pada pukul 08:58:53 UTC tanggal 26 Desember; episentrumnya terletak di lepas pantai barat Sumatra, Indonesia. Guncangan gempa tersebut berskala 9,1–9,3 [15]. Gempa ini memicu gelombang tsunami. Efek gempa

ke ionosfer berupa gelombang ionosfer infrasonik terdeteksi muncul 13 menit setelahnya menggunakan data TEC.

KESIMPULAN

Efek gempa bumi pada ionosfer telah dapat terdeteksi dengan menggunakan data GNSS. Efek tersebut teramati melalui gelombang ionosfer infrasonik yang muncul sekitar 13 menit - 15 menit setelah gempa bumi. Gempa bumi dengan amplitude besar, berpotensi besar memicu gelombang tsunami.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Dr. Buldan Muslim, M.Si sebagai ketua Insinas 2019 untuk akomodasi untuk mengambil bagian dalam SNF UNRI 2019 dan Kepala Pusat Sains Antariksa-LAPAN, yang telah memberikan izin untuk menghadiri seminar ini. Terima kasih juga kepada BIG dan Kyushu University karena telah mengizinkan untuk menggunakan data TEC

REFERENSI

1. Saputra, F. A. & Cahyadi, M. N. (2017). Analisis Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Bumi Sumatera Barat Tanggal 2 Maret 2016. *Jurnal Teknik ITS*, **6**(2), F318-F323.
2. Lognonne, P., Artru, J., Garcia, R., Crespon, F., Ducic, V., Jeansou, E., Occhipinti, G., Helbert, J., Moreaux, G., & Godet, P. E. (2006). Ground based GPS imaging of ionospheric post-seismic signal. *Planetary and Space Science*, **54**, 528-540.
3. Sunardi, B., Muslim, B., Sakya, A. E., Rohadi, S., Sulastri, & Murjaya, J. (2018). Ionospheric earthquake effects detection based on Total Electron Content (TEC) GPS correlation. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* (2018) 012014, doi: 10.1088/1755-1315/132/1/012014.

4. Kamogawa, M. (2006). Preseismic lithosphere atmosphere ionosphere coupling. *EOS Trans. Am. Geophys Union*, **87**(40), 417-242.
5. Matsumara, M., Saito, A., Iyemori, T., Shinagawa, H., Tsugawa, T., Otsuka, Y., Nishioka, M., & Chen, C. H. (2011). Numerical simulations of atmospheric wave excited by the 2011 of the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**(7), 885-889.
6. Lognonne, P., Clevede, E., & Kanamori, H. (1998). Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode summation for a spherical earth model with realistic atmosphere. *Geophys J. Int.*, **135**(2), 338-406.
7. Tsugawa, T., Saito, A., Otsuka, Y., Nishioka, M., Maruyama, T., Kato, H., Nagatsuma, T., & Murata, K. T. (2011). Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 of the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**(7), 875-879.
8. Jin, S., Occhipinti, G., & Jin, R. (2015). GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Science Reviews*, **147**, 54-64.
9. Brunini, C. & Azpilicueta, F. J. (2009). Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content. *J. Geodesy*, **83**(8), 773-785.
10. Muslim, B., Sunardi, B., Aldrian, E., & Prayogo, A. S. (2014). *Pengembangan Sistem Monitoring Gelombang Ionosfer Terkait Gempa Bumi Menggunakan Data GPS (GPSIonquake)*. Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa – LAPAN, Bandung, 25 November 2014.
11. Jin, R., Jin, S. G., & Feng, G. P. (2012). *M-DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases*. *GPS Solutions*, **16**(4), 541-548.
12. UpSEIS. (2006). *What Is Seismology?* Diakses pada 20 Juli 2019 URL: <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>.
13. WDC geomagnetic. (2019). *Geomagnetic data service*. WDC Kyoto University, Kyoto-Japan. Diakses pada 19 Februari 2019, URL: <http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/wdc/Sec3.html>.



Artikel ini menggunakan lisensi
[Creative Commons Attribution
 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)