

## EFEK GELOMBANG TSUNAMI ACEH 2004 PADA GANGGUAN IONOSFER BERGERAK SKALA MENENGAH DARI PENGAMATAN JARINGAN GPS SUMATRA

Asnawi Husin\*, Buldan Muslim

Pusat Sains Antariksa LAPAN

\*E-mail korespondensi: [asnawi@lapan.go.id](mailto:asnawi@lapan.go.id)

### ABSTRACT

*Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbance (MSTID), thought to be manifestation of atmospheric gravity wave (AGW) in the ionospheric altitude that propagates horizontally and effects on in the electron density structure of ionosphere. These atmospheric gravity waves sourced from lower atmospheric activities such as typhoons, volcanic eruptions and tsunamis. Wave energy by its coupling induction process can travel to the ionosphere region. It has been understood that the TID's wave structure have an impact on the propagation of radio waves in the ionosphere so that it will affect the performance of navigation satellite-based positioning measurements. Based on Aceh tsunami in December 2004, this study aimed to investigation of the induction of atmospheric gravity waves in the ionosphere using total electron content (TEC) data from the Sumatra GPS network (Sumatra GPS Array, SUGAR). The detection technique of TEC changes due to AGW induction with a filter to separate medium scale disturbance at the ionospheric pierce point at an altitude of 350 km (IPP, Ionospheric Pierce Point). The results show the horizontal wavelength of a medium-scale TID around  $180 \pm 12$  Km with a velocities of around  $376 \pm 9$  ms<sup>-1</sup>. Based on two-dimensional map, the TID moves to the southeast.*

**Keywords:** AGW, Ionosfer, MSTID, Tsunami, TEC

### ABSTRAK

*Gangguan ionosfer bergerak skala menengah (Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances, MSTID) skala menengah adalah manifestasi gelombang gravitas atmosfer (AGW, Atmospheric Gravity Wave) ditinggikan lapisan ionosfer yang bergerak mendatar sehingga menimbulkan gangguan pada kerapatan elektron di lapisan ionosfer. Gelombang gravitas atmosfer tersebut berasal dari aktivitas atmosfer bawah seperti badai typhon, erupsi gunung berapi dan tsunami. Energi gelombang dengan proses induksi koplingnya dapat merambat hingga ke lapisan ionosfer. Telah dipahami kemunculan struktur gelombang TID berimbas pada propagasi gelombang radio di lapisan ionosfer sehingga akan mempengaruhi kinerja pengukuran posisi berbasis satelit navigasi. Kejadian tsunami Aceh pada Desember 2004 dijadikan kajian induksi gelombang gravitas atmosfer di lapisan ionosfer menggunakan data kandungan elektron (TEC, Total Electron Content) dari jaringan GPS Sumatra (Sumatra GPS Array, SUGAR). Teknik deteksi perubahan TEC akibat induksi AGW dengan filter untuk memisahkan gangguan skala medium pada titik ionosfer di ketinggian 350 km (IPP, Ionospheric Pierce Point). Hasil menunjukkan panjang gelombang horizontal dari TID skala menengah sekitar  $180 \pm 12$  Km dengan kecepatan sekitar  $376 \pm 9$  ms<sup>-1</sup>. Dari hasil peta dua dimensi, TID bergerak ke arah tenggara..*

**Kata kunci:** AGW, Ionosfer, MSTID, Tsunami, TEC

Diterima 19-08-2019 | Disetujui 30-09-2019 | Dipublikasi 31-10-2019

### PENDAHULUAN

Sebagian besar tsunami timbul akibat dari kejadian gempa dengan pusat gempa berada di dasar laut. Karakter gempa seperti ini adalah

subduksi lempeng tektonik yang menimbulkan getaran seismik. Getaran dan pergerakan keatas yang mendadak saat terjadi gempa menyebabkan gelombang sunami air laut [1]. Saat terjadi sunami, ayunan getaran

permukaan laut dapat membangkitkan gelombang gravitasi atmosfer (AGW)[2,3]. Mekanisme momentum AGW mencapai ketinggian ionosfer melalui kopling proses gelombang Rayleigh dan gelombang akustik yang menimbulkan tumbukan antara partikel netral dan partikel bermuatan sehingga memungkinkan perubahan pada distribusi ion dan elektron di lapisan ionosfer [1,4-8].

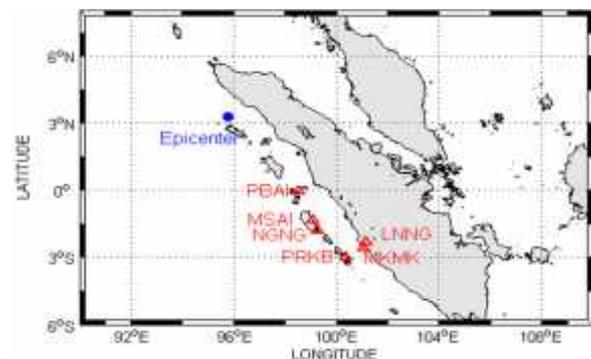
Bencana tsunami terjadi di Aceh pada 26 Desember 2004, yang merupakan bencana terbesar di Indonesia dengan skala gempa mencapai 9,1 hingga 9,3 SR, pusat gempa terletak dekat kepulauan Simeuleu pada pukul 00,59 UT atau sekitar pukul 07,59 waktu setempat. Gempa tersebut menimbulkan getaran dasar laut sekitar 20 hingga 25 Km dari pesisir pantai barat daya Sumatra. Efek gempa bumi pada ionosfer dari pengukuran kandungan elektron (TEC, *Total Electron Content*, dalam TEC Unit) juga telah banyak dilaporkan. Dalam studi ini, dilakukan investigasi karakteristik gangguan ionosfer bergerak skala menengah, MSTID, *Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbance*) yang muncul daerah sekitar pusat gempa tsunami Aceh. Jaringan GPS Sumatra (SUGAR, *Sumatra GPS Array*) menyediakan informasi terkait patahan Sumatra. SUGAR diasuh oleh lembaga ilmu pengetahuan Indonesia (LIPI) dan *California Institute of Technology* (Caltech) dan *Earth Observatory of Singapore* (EOS) dengan data akses di laman <http://sopac.ucsd.edu>. Selain digunakan untuk studi pergerakan lempeng tektonik, data SUGAR juga dapat digunakan untuk studi variasi TEC akibat kemunculan MSTID saat terjadi tsunami. Data satu hari saat terjadi tsunami yaitu 26 Desember 2004 digunakan pada saat gangguan geomagnet rendah.

## TINJAUAN PUSTAKA

Studi sebelumnya [2,9] telah mendemonstrasikan bahwa *Travelling Ionospheric Disturbance* (TID) adalah manifestasi dari interaksi antara ionosfer dan AGW. Berdasarkan energinya, ada tiga tipe

TID, yaitu tipe besar yaitu *Large Scale TID* (LSTD), tipe menengah, MSTID dan tipe kecil, *Small Scale TID*, SSTID. Pembahasan mengenai mekanisme terjadinya MSTID telah banyak dibahas, diantaranya terkait gelombang gravity atmosfer [10], terminator matahari [11] dan tsunami [12]. MSTID mempunyai skala horizontal sekitar 50 hingga 500 Km dengan periode 0.2 hingga 1 jam [13]. Berbagai jenis teknik pengamatan juga telah dilakukan terkait gangguan di ionosfer akibat tsunami dari gempa bumi, misalnya pengamatan dengan ionosonda [14], radar SuperDARN [15,16] dan juga dengan teknik foto airglow [1]. Teknik lain dalam studi gangguan ionosfer akibat gempa dan tsunami adalah dengan menggunakan jaringan penerima satelit navigasi (GNSS, *Global Navigation Satellite System*), seperti pada [17,12] menggunakan jaringan GNSS di Jepang (GEONET, *GPS Earth Observation Network*) dan menggunakan satu titik penerima GNSS [18].

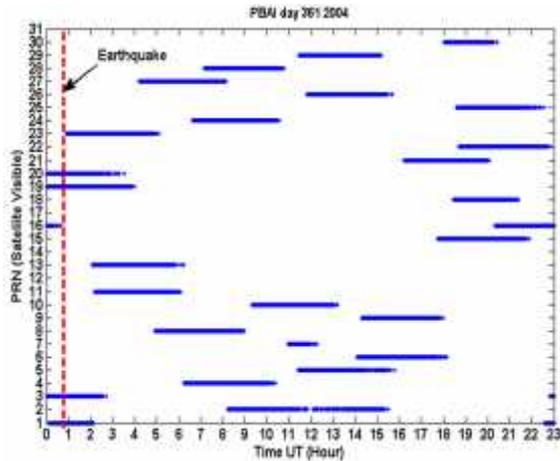
## METODE PENELITIAN



**Gambar 1.** Distribusi jaringan GPS SUGAR untuk studi MSTID saat tsunami Aceh 2004

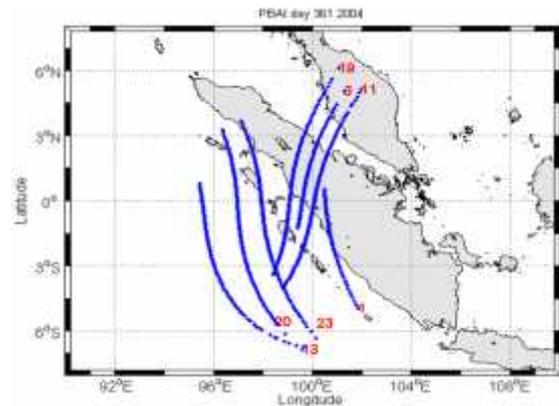
Data GPS standart RINEX, (*Receiver Independent Exchange*) dari 6 stasiun titik pengamatan SUGAR, seperti ditunjukkan pada Gambar 1, digunakan untuk studi variasi TEC yang diasosiasikan dengan kemunculan MSTID saat tsunami Aceh Desember 2004. Koordinat Geografi GPS SUGAR yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1. Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, bahwa data yang digunakan sebagian besar berada pada sektor selatan terhadap pusat gempa, hal ini

disebabkan keterbatasan data yang tersedia. Untuk mendapatkan nilai TEC dari data RINEX digunakan software ilmiah yang dikembangkan oleh GOPI Krishna Samela [19].



**Gambar 2.** Sinyal satelit GPS SUGAR dari stasiun PBAI, dari satelit nomer 1 (PRN 1) hingga satelit 32 (PRN 32) selama 24 jam pengamatan saat terjadi gempa (garis putus merah menunjukkan waktu terjadi gempa).

Sudah dipahami bahwa variasi jangka panjang aktivitas matahari berpengaruh pada variasi TEC yang mengacu pada variasi harian, variasi musim dan variasi siklus matahari yang dikenal sebagai variasi regular. Variasi regular ini memiliki frekuensi yang rendah. Sedangkan gangguan pada frekuensi tinggi pada variasi TEC dengan kejadian pada skala waktu yang pendek, umumnya diakibatkan oleh badai geomagnet dan gangguan ionosfer akibat dinamika kopling dari atmosfer bawah (periode 2 menit hingga 2 hari) [20].



**Gambar 3.** Lintasan satelit saat terjadi gempa dan enam jam setelahnya yang terekam dari stasiun PBAI yaitu PRN1, PRN3, PRN11, PRN13, PRN19, PRN20 dan PRN 23.

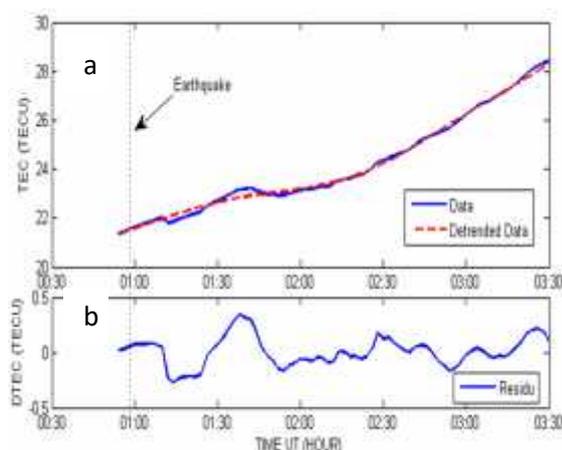
MSTID yang merupakan manifestasi AGW di ketinggian ionosfer akan menyebabkan fluktuasi dengan frekuensi tinggi pada variasi pengukuran TEC dengan periode waktu 0.2 hingga 1 jam. Berdasarkan ciri ini, maka metode untuk mendeteksi kejadian MSTID adalah dengan identifikasi fluktuasi atau gangguan variasi frekuensi tinggi pada nilai TEC. Pada dasarnya identifikasi ini dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, sebagai contoh dengan teknik menghitung perubahan TEC pada skala waktu tertentu atau ROT (*Rate of TEC*) [21], filter lolos antara [12], dan filter lolos atas [22]. Untuk menghilangkan variasi jangka panjang pada variasi TEC, maka digunakan fungsi Matlab filtfilt [23] filter lolos atas dengan frekuensi pemotongnya sekitar 0.278 mHz yang senilai dengan periode sekitar 1 jam.

**Tabel 2.** Geografi puncak maksimum dTEC dari seluruh stasiun GPS SUGAR dan hasil perhitungan panjang gelombang dan kecepatan MSTID yang terdeteksi

Kode Stasiun	Maksimum dTEC(1)		Maksimum dTEC(2)		Panjang gelombang (Km)	Kecepatan (m/s)
	Lintang geografi (°)	Bujur geografi (°)	Lintang geografi(°)	Bujur geografi(°)		
PBAI	0.08	97.31	0.34	97.7	161.83±4	79.33±2
MSAI	0.30	98.24	0.35	98.44	160.78 ±1	58.25±1
NGNG	0.20	98.39	0.27	98.62	184.24 ±1	59.05±1
PRKB	0.25	99.4	0.27	99.66	190.19 ±2	60.96±2
LNNG	0.26	100.14	0.26	100.39	198.78 ±4	59.16±1
MKMK	0.28	100.08	0.24	100.32	192.34 ±2	59.28±2

Untuk menghindari efek sudut datang dan multipath, maka sudut elavasi dari sinyal satelit dipilih diatas 20° dan data hanya dipilih saat terjadi gempa yaitu mulai pukul 00,59 hingga enam jam kedepan. Pada Gambar 2, ditunjukkan contoh data dari stasiun PBAI pada 26 Desember 2004, saat terjadi gempa. Gambar tersebut menunjukkan ada sekitar 28 (PRN, *Pseudo Random Noise*), setelit GPS yang melintas dalam satu hari pengamatan yakni dari pukul 00,00 hingga pukul 23,00 waktu universal UT. Garis merah putus menandakan saat mulai terjadi gempa. Dapat dilihat juga bahwa beberapa satelit melintas saat mulai terjadi gempa hingga enam jam berikutnya adalah satelit PRN1, PRN3, PRN11, PRN13, PRN19, PRN20 dan PRN23. Jalur lintasan dari satelit pada periode waktu tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.

Pada Gambar 4a, menunjukkan contoh proses filter data asli (garis biru) dari sinyal satelit GPS nomor 23 (PRN23), dengan filter lolos atas data TEC runtun waktu dari pukul 00,30 hingga 03,30 UT, (*Universal Time*), yaitu sekitar pukul 07,30 hingga pukul 10,30 WIB. Pada Gambar 4b adalah hasil filter, delta TEC, (dTEC) yang menunjukkan terbentuk gelombang yang terjadi sesaat setelah gempa (garis putus vertikal), yang mengindikasikan sebagai gelombang MSTID.



**Gambar 4.** (a) Menunjukkan data asli TEC (garis biru) sinyal satelit PRN23 di PBAI dengan proses detrend filter lolos atas (garis putus merah). Garis hitam putus adalah saat gempa terjadi sekitar pukul 01,00. (b) adalah

hasil filter, memperlihatkan ripple gelombang MSTID.

Dengan mengabaikan gerak relatif satelit GPS melintas terhadap bumi, yang dapat menyebabkan efek Doppler, maka panjang gelombang MSTID diperoleh dengan pendekatan yaitu dengan cara menentukan jarak antara puncak ke puncak gelombang maksimum yang terbentuk yaitu dengan menggunakan formula Haversine [24].

$$\text{Range} = 2 \cdot R \cdot \text{arc Sin}(\sqrt{h}) \quad (1)$$

$$h = \text{Sin}^2\left(\frac{L_1 - L_2}{2}\right)$$

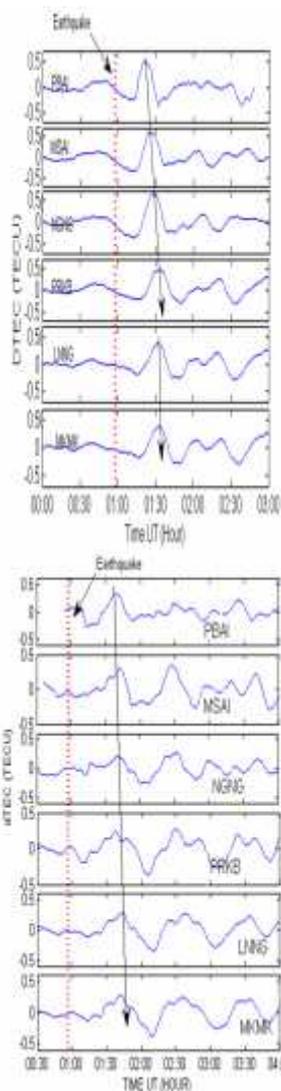
$$+ \text{Cos}(\text{Lat1}) \cdot \text{Cos}(\text{Lat2}) \cdot \text{Sin}^2\left(\frac{L_1 - L_2}{2}\right) \quad (2)$$

dengan: Lat1 adalah lintang geografi titik maksimum dTEC 1, Lat2 adalah lintang geografi titik maksimum dTEC 2, Lon1 adalah bujur geografi titik maksimum dTEC 1 dan Lon2 adalah bujur geografi titik maksimum dTEC 2 serta R adalah jejari bumi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pada Gambar 4(b) menunjukkan adanya gangguan pada TEC sesaat setelah gempa yang berbentuk gelombang. Data TEC tersebut adalah hasil proses filter lolos atas dengan batas 0,28 mHz yang setara dengan periode satu jam yaitu periode dari MSTID. Berdasarkan Gambar 1, stasiun PBAI terletak berdekatan dengan pusat gempa, diikuti oleh stasiun MSAI, NGNG, PRKB, LNNG dan MKMK. Gambar 5 adalah hasil filter data TEC (dTEC) dari PRN 20 dan PRN 23 dilihat dari enam stasiun SUGAR. Dari gambar tersebut dapat dilihat gelombang terbentuk sekitar 15 menit setelah gempa yang teramati di stasiun PBAI dan diikuti gelombang yang sama teramati di stasiun MSAI namun beberapa saat setelah pembentukan di PBAI. Selanjutnya juga teramati di NGNG, PRKB, LNNG dan di MKMK. Energi dari gelombang juga melemah ketika menjauh dari pusat gempa seperti ditunjukkan pada gambar tersebut. Dari Gambar 5 tersebut, gelombang yang diasosiasikan sebagai MSTID bergerak

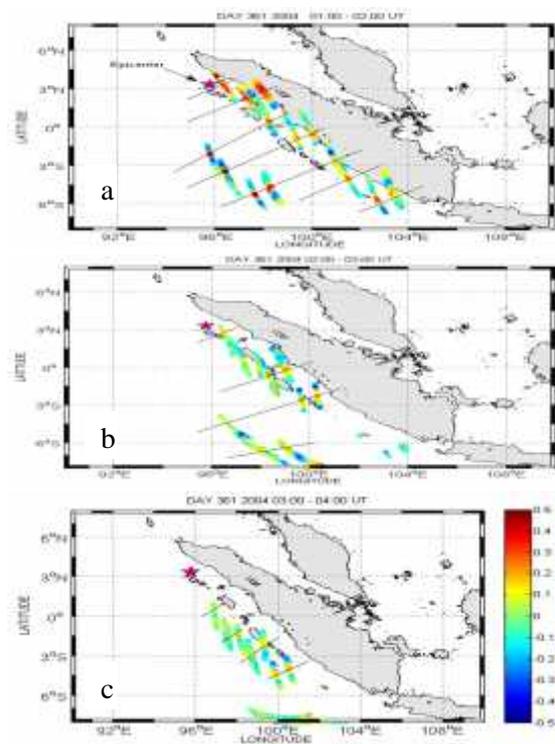
dari PBAI menuju ke MKMK dengan indikasi amplitudo gelombang terus melemah.



**Gambar 5.** (a) Variasi waktu perubahan TEC dTEC PRN20 (a) dan PRN23 (b) hari ke 361/26 Desember 2004 sesaat setelah gempa yang mengindikasikan gelombang bergerak dari PBAI menuju ke MKMK. Garis merah putus adalah saat gempa terjadi.

Untuk melihat arah pergerakan gelombang, maka dTEC yang merepresentasikan gangguan MSTID dari semua satelit yang melintas sesaat setelah gempa terjadi hingga enam jam berikutnya, dilakukan pemetaan dua dimensi yang berbasis pada titik ionosfer. Proses tersebut dilakukan secara simultan dari keenam titik pengamatan SUGAR. Seperti ditunjukkan pada Gambar 6, gangguan ionosfer dTEC untuk variasi spasial dan variasi waktu

diimplementasikan kedalam tiga interval waktu yaitu a) pukul 01,00-02,00, b)02,00-03,00 dan c)03,00-04,00.



**Gambar 6.** (a) Peta dua dimensi gangguan TEC (dTEC) dalam tiga interval waktu. a) pukul 01,00-02,00, b)02,00-03,00 dan c)03,00-04,00. Mengindikasikan MSTID bergerak kearah tenggara.

Dari hasil peta dua dimensi tersebut, MSTID bergerak kearah tenggara. Pergerakan gelombang diindikasikan dengan melihat maksimum dan minimum dTEC, dipandu dengan garis lurus hitam pada peta yang merupakan puncak-puncak gelombang. Pada peta tersebut titik pusat gempa ditandai dengan tanda bintang, sehingga seperti yang didapat dilihat pada Gambar 6 (a) bahwa pada sekitar pukul 01,00 hingga 02,00 maksimum dTEC pertama kali terbentuk didekat pusat gempa dan berikutnya pada jam 02,00-03,00 kadar nilai maksimum dTEC mulai berkurang dan terus berkurang pada jam berikutnya yaitu pukul 03.00-04,00 yang mengindikasikan energi gelombang terus berkurang ketika menjauh dari pusat gempa.

Dari hasil peta dua dimensi tersebut, MSTID bergerak ke arah tenggara. Pergerakan gelombang diindikasikan dengan melihat maksimum dan minimum dTEC, dipandu dengan garis lurus hitam pada peta yang merupakan puncak-puncak gelombang. Pada peta tersebut titik pusat gempa ditandai dengan tanda bintang, sehingga seperti yang didapat dilihat pada Gambar 6 (a) bahwa pada sekitar pukul 01,00 hingga 02,00 maksimum dTEC pertama kali terbentuk di dekat pusat gempa dan berikutnya pada jam 02,00-03,00 kadar nilai maksimum dTEC mulai berkurang dan terus berkurang pada jam berikutnya yaitu pukul 03.00-04,00 yang mengindikasikan energi gelombang terus berkurang ketika menjauh dari pusat gempa.

Dalam kasus studi ini, gangguan pada variasi TEC yang diasosiasikan sebagai MSTID direpresentasikan pada model ionosfer sebagai lapisan tunggal (*single layer model*) [25]. Dengan demikian bahwa untuk menghitung kecepatan MSTID tersebut maka pemodelan yang dilakukan harus proporsional dengan ketinggian ionosfer sebenarnya yaitu ditinggikan sekitar 350 km [18]. Tabel 2 adalah panjang gelombang MSTID pada skala mendatar dan kecepatan MSTID dari seluruh penerima GPS yang dihitung berdasarkan persamaan 1 yaitu dengan mengambil jeda waktu antara maksimal dTEC. Maka berdasarkan Tabel 2 kecepatan skalar dari MSTID adalah sekitar  $156.4 \pm 4 \text{ ms}^{-1}$ .

Dengan menganggap bahwa gelombang merambat pada arah yang seragam, Sedangkan vektor resultan dari kecepatan MSTID adalah  $376 \pm 9 \text{ ms}^{-1}$ . Hasil ini terkonfirmasi laporan sebelumnya dengan menggunakan jaringan GNSS [18].

## KESIMPULAN

Deteksi dan analisis MSTID dari variasi perubahan TEC saat terjadi tsunami Aceh 2004 telah dilakukan dengan menggunakan jaringan GPS Sumatra SUGAR pada saat aktivitas geomagnet pada kondisi rendah. Data sinyal satelit dari enam stasiun SUGAR

terdeteksi adanya gangguan pada variasi TEC yang diindikasikan sebagai gelombang MSTID terbentuk sekitar 15 menit setelah gempa kuat pertama. Dari analisis dua maksimum puncak gangguan TEC (dTEC) diperoleh karakteristik MSTID yaitu panjang gelombang sekitar  $180 \pm 12 \text{ Km}$  dan kecepatan sekitar  $376 \pm 9 \text{ ms}^{-1}$ . Dari peta dua dimensi diperoleh gerak gelombang MSTID yang mengarah ke arah Tenggara

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada RISTEKDIKTI yang telah mendukung riset INSINAS Flagship LAPAN tahun 2018 "PENGEMBANGAN SISTEM PERINGATAN DINI GEMPA BUMI DAN TSUNAMI BERBASIS DATA GNSS REAL TIME" riset insentif pratama dan PUI RISTEKDIKTI. Juga terimakasih kepada LIPI yang telah menyediakan data RINEX SUGAR serta Gopi Semela untuk software GPSTEC

## REFERENSI

1. Makela, J. J., Lognonné, P., Hébert, H., Gehrels, G. & Lisa Rolland. (2011). Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (24), pp.L00G02.
2. Hines, C. O. (1960). Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, 38(11), 1441–1481.
3. Peltier, W. R. & Hines, C. O. (1976). On the possible detection of tsunamis by a monitoring of the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 81(12), 1995–2000.
4. Davies, K. & Baker, D. M (1964), Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.*, 70, 2251 – 2253.
5. Kelley, M. C., Livingston, R, & McCready, M. (1985). Large amplitude thermospheric oscillations induced by an earthquake, *Geophys. Res.Lett.*, 12, 577–580, doi:10.1029/GL012i009p00577.
6. Calais, E. & Minster, J. B.(1994). GPS detection of ionospheric perturbations

- following the January 17, 1994, Northridge earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1045–1048, doi:10.1029/95GL00168.
7. Occhipinti, G. E., Kherani, A. & Lognonné, P. (2008). Geomagnetic dependence of ionospheric disturbances induced by tsunamigenic internal gravity waves, *Geophys. J. Int.*, 173, 753–765, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03760.x.
  8. Hickey, M. P., G. Schubert, G. & Walterscheid, R.L (2009), Propagation of tsunami-driven gravity waves into the thermosphere and ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 114, A08304, doi:10.1029/2009JA014105.
  9. Hooke, W. H. (1968). Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves,," *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30, 795–823. doi:10.1029/2007JA012946.
  10. Kelder, H. & Spoelstra, T. A. (1987). Medium scale TIDs observed by radio interferometry and differential Doppler techniques, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 49, 7–17.
  11. Somsikov, V. M. (1995). On mechanisms for the formation of atmospheric irregularities in the solar terminator region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57(1).75 – 83.
  12. Galvan, D. A., Komjathy, A., Hickey, M., Stephens, P., Snively, J. B., Song, T., Butala, M., & A. J. Mannucci, A.J. (2012). Ionospheric signatures of Tohoku-Okii tsunami of March 11, 2011: Model comparisons near the epicenter, *Radio Sci.*, 47, RS4003, doi:10.1029/2012RS005023.
  13. Hocke, K. & Schlegel, K. (1996). A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995, *Ann. Geophys.*, 14, 917–940, doi:10.1007/s00585-996-0917-6,
  14. Maruyama, T., Tsugawa, T., Kato H, A. Saito, A., Otsuka, Y., & M. Nishioka, M. (2011). Ionospheric multiple stratifications and irregularities induced by the 2011 Tohoku earthquake. *Earth Planets Space*, 63(7), 863–873, doi:10.5047/eps.2011.06.008.
  15. Nishitani N., Ogawa T., Otsuka Y., Hosokawa K. & Hori T. (2011). Propagation of large amplitude ionospheric disturbances with velocity dispersion observed by the SuperDARN Hokkaido radar after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets, and Space*, 63, p.891-896.
  16. Ogawa T., Nishitani N., Tsugawa T., and Shiokawa K. (2012). Giant ionospheric disturbances observed with the SuperDARN Hokkaido HF radar and GPS network after the 2011 Tohoku earthquake, *Earth, Planets, and Space*, 64, pp.1295-1307.
  17. Saito, A., Fukao, S & Miyazaki, S. (1998). High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3079–3082.
  18. Savastano, G., Komjathy, A., Verkhoglyadova, O., Mazzoni, A., Crespi, M., Wei, Mannucci, A.J. (2017). Real-Time Detection of Tsunami Ionospheric Disturbances with a Stand-Alone GNSS Receiver: A Preliminary Feasibility Demonstration, *Sci. Rep.* 7, 46607; doi: 10.1038/srep46607. 2017.
  19. Rama Rao, P. V. S., Gopi Krishna, S., Niranjana, K & Prasad, D. (2006). Temporal and spatial variations in TEC using simultaneous measurements from Indian GPS network of receivers during low solar activity period of 2004–05. *Ann. Geophys.*, 24, 3279–3292, doi:10.5194/angeo24-3279.
  20. Yügit, E., & Medvedev, A.S. (2015). Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Advances in Space Res.* 55, 983-1003 doi:10.1016/j.asr.2014.11.020
  21. Warnant, R. & Pottiaux, E. (2000). The increase of the ionospheric activity as measured by GPS, *Earth Planets Space*, 52, 1055–1060.
  22. Husin, A., Abdullah, M., & Momani, M.A. (2011). Observation of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Peninsular Malaysia based on IPP trajectories," *Radio Sci.*, 46, RS2018, doi:10.1029/2010RS004408.
  23. Trauth, M. H. (2006). *MATLAB® Recipes for Earth Sciences*, Springer, New York.
  24. Song, H. Y., & Jun, S. L. (2015). Detecting Positioning Errors and Estimating Correct Positions by Moving Window." *PLoS ONE* 10.12. pp: e0143618.

25. De Agostino, M., & Piras, M. (2011). Earthquake forecasting: A possible solution considering the GPS ionospheric delay. *Natural Hazards and Earth System*

*Science*, 11(12), 3263–3273.  
<https://doi.org/10.5194/nhess-11-3263-2011>



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