

DETEKSI GELOMBANG GRAVITASI ATMOSFER PADA KETINGGIAN IONOSFER AKIBAT LETUSAN GUNUNG MERAPI 25 OKTOBER 2010

Asnawi Husin dan Buldan Muslim
Pusat Sains Antariksa - LAPAN
Email: asnawihs@yahoo.com

Abstract

Data from three GPS stations located around the area of Mount Merapi (-7.53, 110.43) has been used to study the effect of the Mount Merapi eruptions on the generation of the atmospheric gravity waves (AGW) at the height of the ionosphere. Data with a resolution of 30 seconds of GPS receiver from National Land Agency (BPN, Badan Pertanahan Nasional) namely Slaman ((-7.706, 110.3), Boyolali ((-7.54, 110.6) and Demak ((-6.89, 110.63) has been processed to obtain TEC (Total Electron Content). Mount Merapi erupted on October 25, 2010 at 14:04, 14:24 and 15:15 local time caused 222 volcanic earthquakes and hot gas spewed into atmosphere. To detect changes in the TEC due to the eruption, data from all three stations were analyzed by using TEC deviation (DTEC) and high pass filter to separate of small to medium temporal scale of disturbances with particular attention to the satellite at sub-ionospheric point (ionospheric pierce point IPP) which is about 300 km altitude. Analysis of TEC deviation from three GPS stations after several hours of the eruption showed ionospheric disturbances with the scale of period of less than 30 minutes. The disturbances occurred at about 16:30 UT or 23:30 local time with a maximum amplitude (peak to peak) of 1.5 TECU (1 TECU = 10^{16} elektron/m²) observed at Boyolali station. Amplitude disturbances were weakened observed at Demak station. From these amplitude and period, it is suspected that there has been penetration of atmospheric gravity waves in the ionospheric height namely medium scale travelling ionospheric disturbance (MSTID), because of the TID is a manifestation of atmospheric gravity waves at the ionospheric height.

Keywords : AGW, GPS, Ionosfer, Merapi

Abstrak

Data dari tiga stasiun GPS yang terletak di sekitar kawasan gunung Merapi (-7.53 LS, 110.43 BT) telah digunakan untuk study pengaruh letusan gunung Merapi terhadap pembangkitan gelombang gravitasi atmosfer (Atmospheric Gravity Wave, AGW) di ketinggian ionosfer. Data dengan resolusi 30 detik dari penerima GPS stasiun tetap BPN (Badan Pertanahan Nasional) (yaitu Sleman (-7.706 LS, 110.3 BT), Boyolali (-7.54 LS, 110.6 BT) dan Demak (-6.89 LS, 110.63 BT) telah diproses untuk mendapatkan nilai TEC (Total Electron Content). Gunung Merapi meletus pada tanggal 25 Oktober 2010 jam 14:04, 14:24 dan 15:15 waktu lokal yang menimbulkan 222 kejadian gempa vulkanik serta memuntahkan gas panas ke atmosfer. Untuk mendeteksi perubahan TEC akibat letusan maka data dari ketiga stasiun dianalisis dengan deviasi TEC dan *high pass filter* untuk memisahkan gangguan temporal skala kecil sampai menengah dengan perhatian pada satelit tertentu di atas titik ionosfer (ionospheric pierce point, IPP) yaitu ketinggian sekitar 300 km. Hasil analisis deviasi TEC dari tiga stasiun GPS setelah beberapa jam terjadinya letusan gunung Merapi memperlihatkan adanya gangguan dengan skala periode kurang dari 30 menit. Gangguan terjadi pada sekitar pukul 16:30 UT atau pukul 23:30 waktu lokal dengan amplitudo maksimum (peak to peak) sekitar

1.5 TECU (1 TECU = 10^{16} elektron/m²) terjadi di GPS stasiun Boyolali. Amplitudo teramati melemah di GPS stasiun Demak. Dari amplitudo dan periode gangguan, maka diduga bahwa telah terjadi penetrasi gelombang gravity atmosfer sehingga terjadi gangguan di ionosfer yaitu gangguan ionosfer bergerak skala menengah (MSTID), karena TID adalah manifestasi dari gelombang atmosfer gravity di ketinggian ionosfer.
Kata Kunci: AGW, GPS, Ionosfer, Merapi

1. PENDAHULUAN

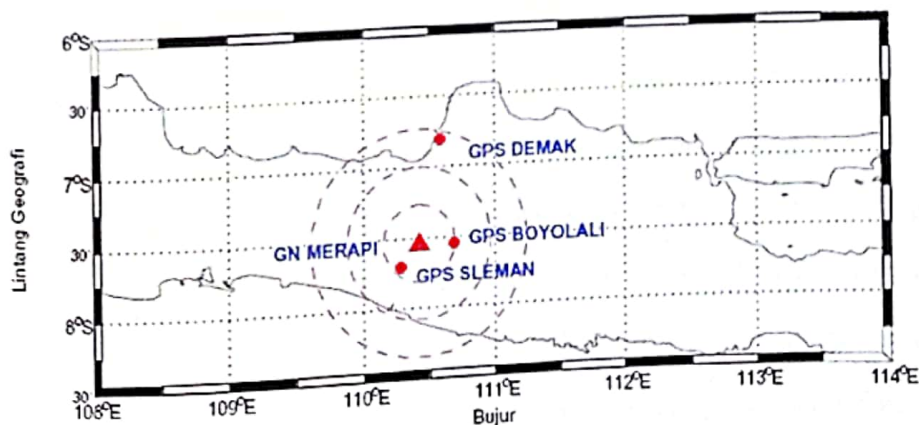
Ada berbagai sumber yang dapat membangkitkan gelombang gravity atmosfer dan telah diselidiki secara intensif termasuk diantaranya disebabkan oleh letusan gunung berapi [Press and Harkrider, 1962; Pierce and Posey, 1972; Bath, 1982; Watada and Kanamori, 2010]. Diketahui bahwa gelombang gravity atmosfer mempunyai periode menitan dan merambat dalam mode akustik dan mode gravitasi. Pada kondisi tertentu sering terjadi tumpang tindih antara gravitasi dan akustik. Gelombang dengan mode akustik perambatannya dikontrol oleh angin atmosfer dan profil temperatur dengan periode yang singkat, kurang dari 250 detik dengan kecepatan fasa sekitar 330 m/detik atau lebih. Sedangkan gelombang dengan mode gravitasi (GW, Gravity Wave) mempunyai periode skala menitan dengan kecepatan fasa dalam skala puluhan meter per detik. Energi panas yang disemburkan selama letusan dan gerak perpindahan medium atmosfer berpotensi menjadi sumber gelombang gravity atmosfer dan juga menjadi pemicu gelombang akustik-gravity yang merambat di atmosfer sehingga akan menghasilkan bermacam-macam efek bergantung pada ketinggian [Cheng and Huang, 1992; Igarashi et al., 1994]. Letusan gunung Pinatubo tahun 1990 telah menyebabkan osilasi di atmosfer pada frekuensi gelombang Rayleigh [Kanamori et al., 1994] dan pada ketinggian atmosfer yang lebih tinggi, efek letusan membangkitkan gelombang kejut [Lognonne, 2009]. Energi dan momentum yang masuk kedalam atmosfer secara tiba-tiba selama terjadinya letusan akan menyebabkan terjadinya tekanan fluktuatif pada lapisan troposfer yang berujung adanya gangguan pada frekuensi kritis (f_oF_2).

ketinggian virtual lapisan F (h'F) dan Total Elecktron Content, TEC ionosfer [A.H.C. de Ragone et al., 2004].

Gangguan ionosfer dari pengamatan variasi TEC telah berkontribusi dalam studi fisika matahari-bumi sebagai contoh penelitian tentang gangguan ionosfer bergerak [Tsugawa et al., 2004] dan penelitian terkait dengan gelombang Rayleigh dan gelombang atmosfer gravity internal saat terjadi tsunami [Artru et al., 2005]. Beberapa penerima GPS yang terletak di kawasan gunung Merapi digunakan untuk study efek letusan terhadap perubahan ionosfer dan pembangkitan gelombang gravity atmosfer di ketinggian ionosfer pada saat terjadi letusan gunung Merapi tanggal 25 Oktober 2010.

2. DATA DAN METODE

Gunung Merapi (-7.53 LS, 110.43 BT) meletus pada tanggal 25 Oktober 2010 dengan tiga kali letusan besar yaitu jam 14:04, 14:24 dan 15:15 waktu lokal yang menimbulkan 222 kejadian gempa vulkanik serta memuntahkan gas panas ke atmosfer [The Jakarta Post, 2010]. Data dengan resolusi 30 detik dari penerima GPS stasiun tetap BPN (Badan Pertanahan Nasional) (Gambar 1) yaitu Sleman (-7.706 LS, 110.3 BT), Boyolali (-7.54 LS,110.6 BT) dan Demak (-6.89 LS, 110.63 BT) telah diproses untuk mendapatkan nilai TEC. Jarak masing-masing stasiun terhadap gunung Merapi dapat dilihat pada table 1.



Gambar 1 : Lokasi Gn Merapi dan staion GPS yang digunakan

Tabel.1 Jarak stasiun GPS terhadap Gn Merapi

No	Stasiun GPS	Lat Geographi	Lon Geographi	Jarak (Km)
1	BPN Boyolali	-7.54 LS	110.6 BT	22.075
2	BPN Sleman	-7.70 LS	110.3 BT	21.882
3	BPN Demak	-6.89 LS	110.6 BT	74.508
4	Gn MERAPI	-7.53 LS	110.4 BT	-----

TEC ionosfer yang digunakan adalah TEC yang diturunkan dari kombinasi pengukuran data kode (P_1 dan P_2) dan data fasa (ϕ_1 dan ϕ_2) dari dua gelombang pembawa L_1 (~1.5 GHz) dan L_2 (~1.2 GHz) sinyal satelit GPS yang diterima di bumi [Buldan, 2009], yaitu TEC miring:

$$STEC = \frac{f_1^2(\lambda_1\phi_1 - \lambda_2\phi_2)}{40.3(1-\gamma)} + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{f_1^2[(P_1 - P_2) + (\lambda_1\phi_1 - \lambda_2\phi_2)]}{40.3(1-\gamma)} \right) + \frac{f_1^2(-b^s - B^s)}{40.3(1-\gamma)} \quad (1)$$

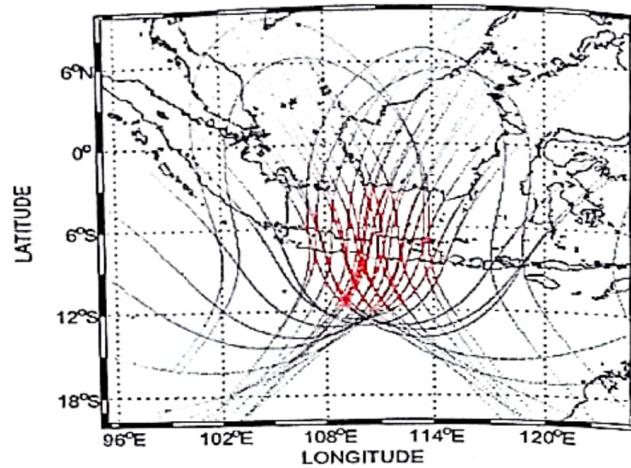
Dengan deviasi nilai TEC adalah

$$dTEC = \frac{f_1^2[(P_1 - P_2) - b_r - B^s + (\lambda_1\phi_1 - \lambda_2\phi_2)]}{40.3(1-\gamma)} + \frac{f_1^2[\lambda_1 m_1 - \lambda_2 m_2](-b_r - b^s)}{40.3(1-\gamma)} \quad (2)$$

dimana λ_1, λ_2 adalah panjang gelombang sinyal L_1, L_2 , b dan B masing-masing adalah waktu tunda pengukura fasa dan kode, dengan subskrip s untuk satelit, r untuk receiver. Selang waktu pengamatan adalah N dengan m jumlah siklus ambiguitas. Sedangkan γ adalah besarnya perbandingan frekuensi (f) sinyal L_1 dan L_2 . Hasil persamaan (1) dikonversi untuk mendapatkan TEC tegak dengan menggunakan model pendekatan yang disebut model lapisan tipis ionosfer yang menganggap ionosfer berada pada ketinggian 350 km [Klobuchar 1986].

$$\text{TEC tegak (VTEC)} = \text{STEC} \times \text{Cos}[\text{arc Sin}(R_e \text{ Cos } \theta / R_e + h_{\text{max}})] \quad (3)$$

dimana R_e adalah jejari bumi (6378 km), h_{max} adalah ketinggian lapisan ionosfer yaitu 350 km, dan θ adalah sudut kemiringan (elevasi) sinyal satelit terhadap penerima di bumi. Apabila mengacu pada persamaan 3, untuk mendapatkan informasi perubahan TEC saat terjadi letusan gunung Merapi, maka digunakan TEC pada titik silang antara sinyal satelit dengan jejari bumi dikenal sebagai IPP (*Ionospheric Pierce Point*). Untuk menghindari salah interpretasi gangguan akibat multipath maka data dipilih dengan sudut elevasi lebih dari 35° . Gambar 2 menunjukkan lintasan IPP satelit diatas penerima GPS BPN Boyolali dimana garis merah adalah data dengan sudut elavasi $>35^\circ$ dan garis hitam adalah data dengan elavasi $> 5^\circ$. Seleksi data dengan elevasi $>35^\circ$ merepresentasikan pengamatan diatas stasiun GPS seperti ditunjukkan dalam gambar 2. Aktivitas gangguan geomagnet pada saat letusan tanggal 25 Oktober 2010 adalah $K_p < 3$, Dst -22 nT dan aktivitas matahari yaitu bilangan bintik matahari adalah 47. Hal ini berarti bahwa aktivitas geoamgnet dan matahari pada saat tersebut adalah rendah sehingga gangguan TEC yang teramati adalah gangguan yang disebabkan oleh letusan. Data GPS BNP mempunyai resolusi waktu pengamatan tiap 30 detik, sehingga untuk data dengan elavasi $>35^\circ$ akan diperoleh series data sekitar 700 sampai 1000 titik data untuk satu satelit GPS yang melintas dalam waktu 4-5 jam pengamatan. Dari series data selanjutnya di analisis menggunakan persamaan 2 untuk menentukan gangguan akibat letusan gunung Merapi.



Gambar 2: Lintasan IPP satelit diatas penerima GPS BPN Boyolali, garis merah adalah data dengan elevasi >35°,

Untuk menentukan parameter gelombang AGW yang dibangkitkan oleh letusan Merapi di ketinggian ionosfer, maka dianggap bahwa kemunculan AGW di ionosfer akan menyebabkan perubahan TEC ($\delta VTEC$). Perubahan TEC yang teramati dari tiga stasiun GPS mempunyai sifat gelombang yang sesuai dengan mode AGW. Dengan menganggap bahwa perubahan gelombang tersebut merambat pada ketinggian yang sama pada ketiga stasiun pengamatan, maka studi hanya terfokus pada perubahan mendatar dari fasa gelombang. Gerak relatif satelit akan menyebabkan efek doppler, sehingga perlu dimasukkan dalam persamaan gelombang [Husin, A et al., 2011]

$$\delta VTEC(t, \mathbf{r}) = F(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_{IPP}) \quad (4)$$

dengan F adalah sembarang fungsi, ω adalah frekuensi sudut, \mathbf{k} adalah vektor perambatan dan \mathbf{r}_{IPP} adalah vektor jarak antar IPP. Syarat awal adalah dengan menganggap bahwa gelombang mempunyai amplitudo tetap. Dengan mendefinisikan vektor pelambatan $\mathbf{s} = \mathbf{k}/\omega$ maka

$$\delta VTEC(t, \mathbf{r}) = \omega F(t - \mathbf{s} \cdot \mathbf{r}_{IPP}) \quad (5)$$

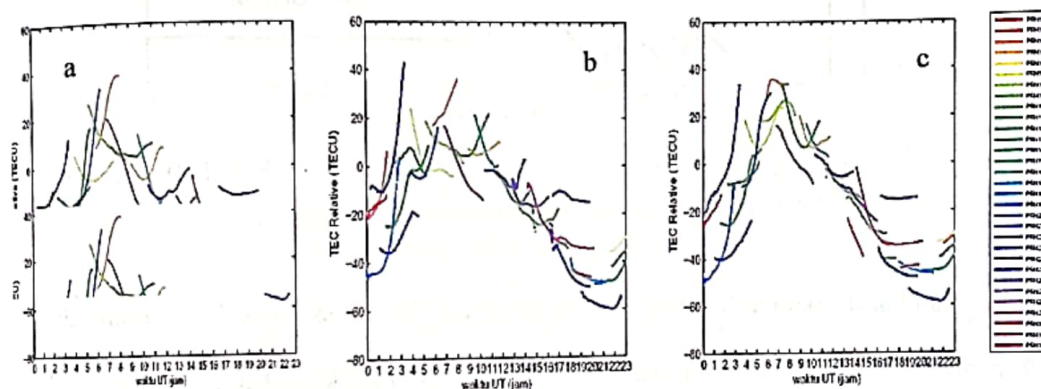
Dengan mengkorelasikan gangguan pada masing-masing stasiun pengamatan, maka korelasi maksimumnya (dt_{max}) dapat ditentukan dengan persamaan :

$$dt_{max} = (dt_{IPP} + dt_{max} \cdot v_{IPP} \cdot \mathbf{s}) \quad (6)$$

Dengan dr_{ipp} adalah vektor relatif antara titik ionosfer IPP dengan kecepatan v_{ipp} . Dengan menggunakan persamaan (6) pada tiga stasiun GPS BPN yang digunakan dalam studi ini maka akan diperoleh komponen s dalam gerak horizontal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

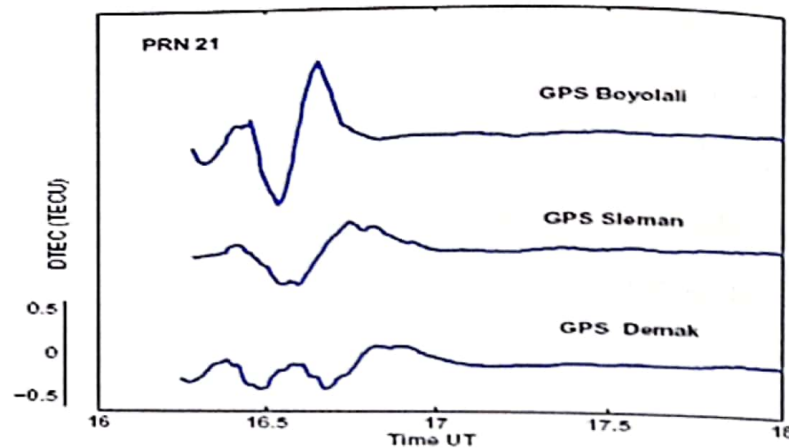
Dari perhitungan TEC tegak (VTEC) menggunakan persamaan 1, persamaan 2 dan persamaan 3 dari data raw (rinex) GPS diperoleh variasi VTEC harian, jam dan variasi untuk setiap satelit yang visible. Tiga stasiun GPS yang berada di dekat kawasan gunung Merapi (tabel 1) telah dianalisis selama tiga hari pengamatan yaitu pada saat terjadi letusan, sehari sebelum dan sehari setelah letusan masing-masing adalah tanggal 25, 24 dan 26 Oktober 2010.



Gambar 3: Variasi VTEC tanggal 24, 25 dan 26 Oktober 2010 dari GPS stasiun Sleman dengan elevasi $>35^\circ$ untuk semua satelit yang visible selama 24 jam

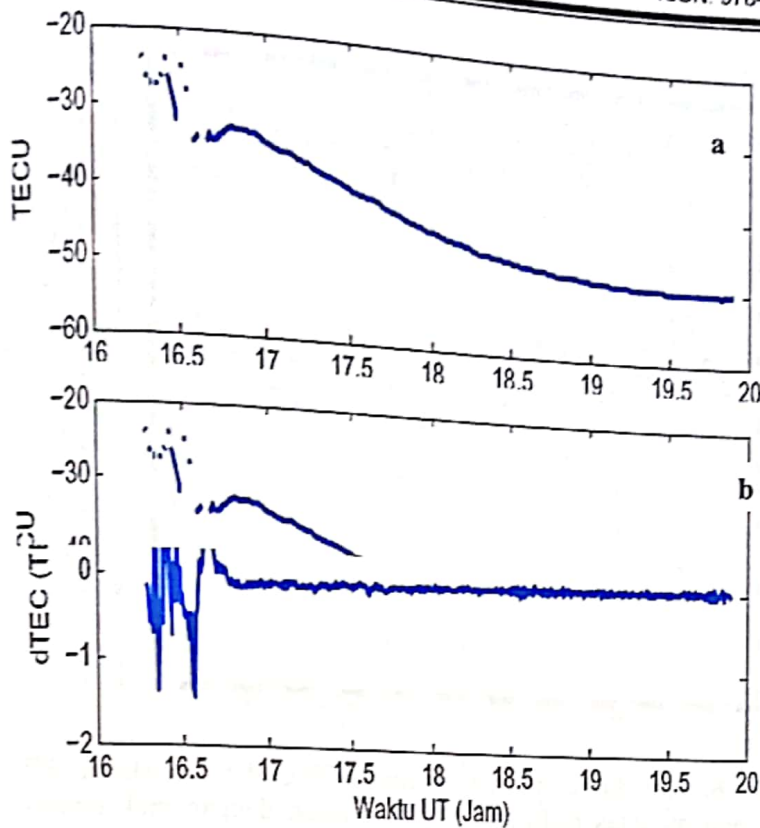
Gambar 3 adalah variasi 24 jam TEC tegak dari stasiun GPS BPN Boyolali yaitu tanggal 24, 25 dan 26 Oktober 2010 masing-masing gambar 3 a,b dan c. VTEC untuk setiap satelit yang visible dibedakan dengan warna. Gangguan saat terjadi letusan dapat dilihat pada gambar 3b, dimana secara umum perubahan VTEC untuk setiap satelit yang diwakili oleh warna terlihat lebih tinggi berbanding dengan sehari sebelum dan sehari setelah letusan (gambar 3a dan 3c). Namun demikian untuk lebih jelas dari perubahan VTEC saat terjadi letusan maka digunakan analisis Δ VTEC menggunakan persamaan 2.

Gambar 4 menunjukkan perubahan $\Delta VTEC$ dari satelit nomor 21 untuk ketiga stasiun GPS BPN Boyolali, Sleman dan Demak pada saat terjadi letusan yaitu tanggal 25 Oktober 2010 yaitu mulai jam 16:15 sampai jam 18:00 waktu universal atau sekitar jam 23:15 sampai jam 01:00 waktu lokal. Bila melihat waktu terjadinya letusan maka gangguan baru teramati 8 jam kemudian.



Gambar 4: . Deviasi TEC satelit 21 pada 25 Oktober 2010 dari tiga stasiun GPS

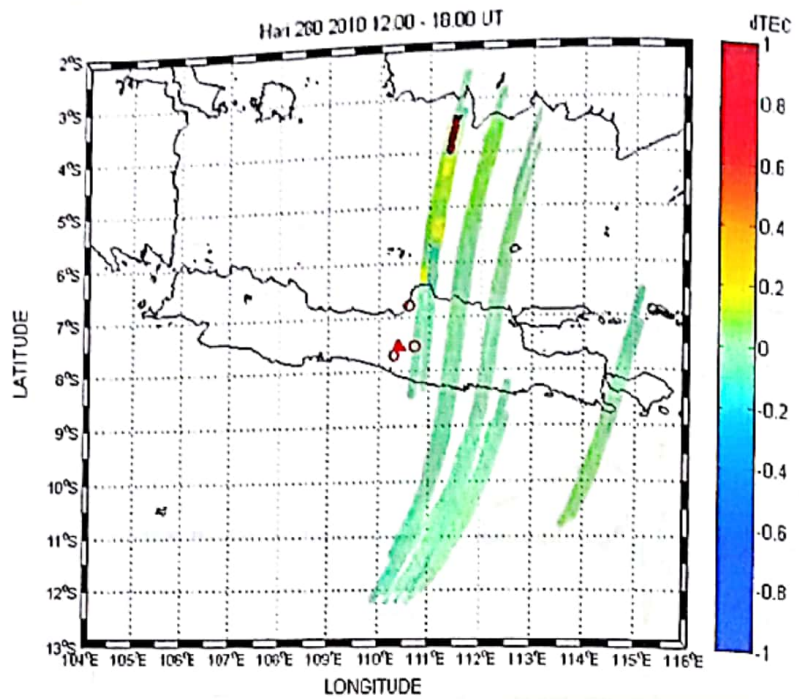
Gambar 4, memperlihatkan adanya gangguan dengan skala periode kurang dari 30 menit. Amplitudo gangguan maksimum (peak to peak) sekitar 1.5 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elektron/m}^2$) terjadi di GPS stasiun Boyolali. Amplitudo teramati melemah di GPS stasiun Demak. Dari amplitudo dan periode gangguan, maka diduga bahwa telah terjadi penetrasi gelombang gravity atmosfer sehingga terjadi gangguan di ionosfer yaitu gangguan ionosfer bergerak skala menengah (MSTID), karena TID adalah manifestasi dari gelombang atmosfer gravity di ketinggian ionosfer. Selain itu kemunculan MSTID juga ditunjukkan oleh adanya perubahan secara cepat (*rapid change*) dari satelit yang lain yaitu satelit nomor 19 yang memperlihatkan gangguan pada VTEC dan perubahan secara cepat pada $\Delta VTEC$ (Gambar 5)



Gambar 5. VTEC dan Δ VTEC satelit 19, gambar a adalah perubahan pada VTEC yang memperlihatkan ketidak kontinuan pada data VTEC, gambar b menunjukkan adanya perubahan secara cepat hasil proses Δ VTEC pada 25 Oktober 2010 stasiun GPS BPN

Untuk menentukan parameter kecepatan rambatan gangguan maka digunakan persamaan 6 dengan menentukan besarnya delay gangguan antara stasiun menggunakan analisis korelasi silang dari ketiga stasiun GPS.

Arah rambatan secara kasar dapat juga dilihat dengan menggunakan peta dua dimensi gangguan VTEC saat terjadi letusan dari trayektori IPP. Gambar 6 adalah peta dua dimensi VTEC dari trayektori IPP satelit yang melintas pada saat terjadi letusan. Dari maksimum - minimum yang terlihat sebagai gangguan Δ VTEC yang bergerak ke arah selatan. Maksimum besarnya gangguan VTEC adalah 1 TECU.



Gambar 6. Peta dua dimensi gangguan VTEC dari trayektori IPP satelit yang melintas pada saat terjadi letusan dengan maksimum-minimum gangguan VTEC bergerak ke arah selatan.

4. KESIMPULAN

Tiga stasiun GPS yang berada di dekat kawasan gunung Merapi telah dianalisis untuk studi pembangkitan gelombang gravity atmosfer pada saat terjadi letusan, sehari sebelum dan sehari setelah letusan masing-masing adalah tanggal 25,24 dan 26 Oktober 2010. Bila melihat waktu terjadinya letusan maka gangguan pada VTEC baru teramati 8 jam kemudian. Hasil analisis menunjukkan adanya gangguan dengan skala periode kurang dari 30 menit. Amplitudo gangguan maksimum (peak to peak) sekitar 1.5 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elektron/m}^2$) terjadi di GPS stasiun Boyolali. Amplitudo teramati melemah di GPS stasiun Demak. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada saat letusan telah terjadi penetrasi gelombang gravity atmosfer sehingga terjadi gangguan di ionosfer yaitu gangguan ionosfer bergerak skala menengah (MSTID), karena TID adalah manifestasi dari gelombang atmosfer gravity di ketinggian ionosfer. Arah rambatan secara kasar dapat dilihat dengan menggunakan peta dua dimensi gangguan VTEC saat

terjadi letusan dari trayektroi IPP. Dari maksimum - minimum yang terlihat sebagai gangguan $\Delta VTEC$ yang bergerak ke arah selatan dengan maksimum besarnya gangguan VTEC adalah 1 TECU.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Badan Pertanahan Nasional (BPN) daerah Sleman, Boyolali dan Demak yang telah mengizinkan penggunaan data GPS dan terimakasih juga kepada Pusat Sains Antariksa LAPAN yang telah memberikan support sehingga terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- A. Husin, M. Abdullah, and M. A. Momani (2011), Observation of medium scale traveling ionospheric disturbances over peninsular Malaysia based on IPP trajectories, *Radio Sci.* 46, RS2018, doi:10.1029/2010RS004408
- Argeli H.C. de Ragone, Amalia N.F de Manzano, Ana G. Elias and Marta Z. de Artigas, (2004), Ionospheric effects of volcanic eruptions. *Geofisica Internacional*, 43, 2, 187-192
- Artru, J., V. Ducic, H. Kanamori, P. Lognonne, and M. Murakami, (2005), Ionospheric detection of gravity waves induced by Tsunamis, *Geophys. J. Int.*, 160(3), 840-848.
- Bath, M. (1982), Atmospheric waves from Mount St. Helens, *Eos Trans. AGU*, 63, 193.
- Buldan, M. (2009), Pemodelan TEC Ionosfer diatas Sumatra dan Sekitarnya Mendekati Real Time Dari Data GPS NTUS, *Prosiding Seminar Nasional Revitalisasi Data dan Informasi Keruangan (Geospasial) Untuk Meningkatkan Efisiensi Pengolahan Potensi Sumber Daya Daerah*, Yogyakarta.
- Cheng, K. and Y. H. Huang, (1992), Ionospheric disturbances observed during the period of Mount Pinatubo eruptions in June 1991. *J. Geophys. Res.* 97, 16,995- 17,004.
- Igarashi K., S.Kainuma, I. Nishimuta, S. Okamoto, H. Kuroiwa, T. Tanaka and T. Ogawa (1994), Ionospheric and atmospheric disturbance around Japan caused by the eruption of Mount Pinatubo on June 15, 1991. *J. Atmos. Terr. Phys.* 56, 1227-1234.

- Kanamori, H., J. Mori, and D. G. Harkrider (1994), Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions, *J. Geophys. Res.*, 99, 21,947–21,961, doi:10.1029/94JB01475
- Klobuchar, J. (1986). Design and characteristics of the GPS ionospheric time-delay algorithm for single frequency users, in: *Proceedings of PLANS'86 – Position Location and Navigation Symposium*, Las Vegas, Nevada, p. 280–286, 4–7 November.
- Pierce, D. A., and J. W. Posey (1970), Theoretical prediction of acoustic-gravity pressure waveforms generated by large explosions in the atmosphere, final report, Air Force Cambridge Res. Lab., Bedford, Mass.
- Press, F., and D. G. Harkrider (1962), Properties of acoustic gravity waves in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 67, 3889–3908, doi:10.1029/JZ067i010p03889.
- Lognonné, P. (2009), Seismic waves from atmospheric sources and atmospheric/ionospheric signatures of seismic waves, in *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, edited by A. Le Pichon, pp. 281–304, Springer, New York
- The Jakarta Post. 25 October 2010. <http://www.thejakartapost.com/news/2010/10/25/merapi-spews-massive-lava-material.html>.
- Watada, S., and H. Kanamori (2010), Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption, *J. Geophys. Res.*, 115, B12319, doi:10.1029/2010JB007747.