



PENGEMBANGAN DSS BERBASIS TEC GPS UNTUK MENDUKUNG SISTEM PERINGATAN DINI TSUNAMI DI INDONESIA

(Development of DSS based on TEC GPS for Supporting to the Tsunami Early Warning System in Indonesia)

Buldan Muslim 1), Edvin Aldrian²⁾, Bambang Sunardi²⁾, Joni Efendi³⁾ dan Arif Aditya³⁾

1) Pusat Sains Antariksa, LAPAN

Jl. Dr. Junjuran 133 Bandung 40173

2) Puslitbang BMKG

Jl. Angkasa, Kemayoran Jakarta Pusat

3) Badan Informasi Geospasial

Jl. Raya Jakarta-Bogor Km 46, Cibinong, Jawa Barat

Email: mbuldan@gmail.com, buldan.muslim@lapan.go.id

ABSTRAK

Riwayat Artikel:

Diterima: 19-11-2015

Direvisi: 16-10-2016

Disetujui: 19-10-2016

Diterbitkan: 24-10-2016

Kata kunci:

GPS, ionosfer, TEC, tsunami, peringatan dini, DSS

Keywords:

GPS, ionosphere, TEC, Tsunami, early warning, DSS

Ketika tsunami mulai terjadi di episenter gempa bumi, perpindahan air laut setinggi beberapa senti meter tetapi dengan panjang gelombang beberapa ratus kilometer dapat menimbulkan gelombang gravitasi akustik atmosfer. Gelombang gravitasi akustik tersebut dapat menjalar secara vertikal. Ketika mencapai lapisan ionosfer, gelombang tersebut menimbulkan fluktuasi kerapatan ionosfer melalui proses tumbukan antara partikel netral dan terionisasi. Fluktuasi kerapatan elektron ionosfer tersebut dapat dideteksi dari data total electron content (TEC) Global Positioning System (GPS). Oleh karena itu data TEC GPS berpotensi dapat digunakan untuk memperkuat sistem peringatan dini tsunami yang telah ada dalam hal klarifikasi prediksi tsunami. Sistem pendukung keputusan (decision support system, DSS) berbasis TEC GPS sebagai suatu penguatan sistem peringatan dini tsunami di Indonesia menggunakan data GPS telah dikembangkan dari data GPS Badan Informasi Geospasial (BIG). Untuk dapat digunakan sebagai bagian sistem peringatan dini tsunami, diperlukan akses data GPS real time. Akses data GPS dapat diperoleh dengan dua cara. Pertama akses data GPS berbasis file dalam format Receiver Independent Exchange Format (Rinex). Yang kedua akses data GPS berbasis streaming data dalam format Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) dengan teknologi Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip). Dari data GPS real time tersebut, TEC real time dapat diperoleh dan dapat diproses lebih lanjut untuk mendapatkan informasi gelombang ionosfer dalam skala periode gelombang gravitasi-akustik atmosfer untuk deteksi efek gempa bumi dan tsunami pada ionosfer. Status dan rencana pengembangan lanjut DSS tersebut dijelaskan dalam makalah ini.

ABSTRACT

When the tsunami began to occur in the earthquake epicenter, the displacement of sea water as high as a few centimeters but with wavelengths of several hundred kilometers can cause acoustic atmospheric gravity waves. The acoustic atmospheric gravity waves can propagate vertically. When it reaches the ionosphere, the waves cause fluctuations in the density of the ionosphere through the process collision between neutral and ionized particles. Ionospheric electron density fluctuations can be detected from the total electron content (TEC) data derived from Global Positioning System (GPS) observation. Therefore, the GPS data potentially could be used to strengthen the tsunami early warning system that already exists in terms of clarification tsunami prediction. Decision support systems (DSS) based on GPS TEC as a strengthening of the tsunami early warning system in Indonesia has been developed using GPS data from the GPS station network operated by Geospatial Information Agency of Indonesia (BIG). To be used as part of a tsunami early warning system, real-time GPS data access is required. The real time GPS data access can be obtained in two ways. The first is the file-based GPS data access files in Receiver independent Exchange Format (RINEX). The second is streaming-based GPS data in the format of Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM) technology Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). From the real-time GPS data, TEC real time can be obtained and can be further processed to obtain information of the ionospheric waves in scale period of atmospheric acoustic-gravity wave for detecting the earthquake and tsunami effect in the ionosphere. Status and plans for further development of the DSS described in this paper.

1. Pendahuluan

Ionosfer adalah bagian atmosfer atas yang terdiri dari ion-ion dan elektron dalam jumlah yang dapat mempengaruhi propagasi gelombang radio. Lapisan tersebut berada pada ketinggian antara 60 sampai 2000 km. Ionosfer berada dalam lingkungan atmosfer netral yang jauh lebih banyak dan berada dalam pengaruh medan magnet bumi dan medan listrik. Oleh karena itu ionosfer menjadi lapisan yang peka terhadap energi yang masuk dari atas (radiasi matahari) dan dari bawah seperti gelombang gravitasi akustik atmosfer, baik yang alami (petir, gempa bumi dll) dan buatan manusia seperti peluncuran roket. Pembahasan lebih rinci respon ionosfer terhadap sumber alami dan buatan manusia dijelaskan dalam makalah Afraimovich et.al. (2013). Sumber gangguan ionosfer yang berasal dari ledakan nuklir bawah tanah juga telah diidentifikasi berupa *traveling ionospheric disturbances* (TID) sebagaimana dilaporkan oleh Zhang dan Thang (2015).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan secara eksperimen dan teoritis bahwa ionosfer dapat memberikan respon

terhadap tsunami melalui kopling hidrosfer-atmosfer-ionosfer. Peltier dan Hines (1976) telah menunjukkan hasil kajian teoritis kemungkinan deteksi tsunami dengan monitoring ionosfer. Tetapi dalam jangka waktu yang lama tidak ada perkembangan penelitian efek tsunami pada ionosfer karena belum ada teknologi pengamatan ionosfer di atas lautan (Artru et al., 2005). Artru et al. (2005) menunjukkan bawah perpindahan air laut hanya dalam orde 1-2 cm dengan panjang gelombang lebih dari 200 km dapat menghasilkan gangguan di ionosfer sampai 1 TECU setelah tsunami Peru 23 Juni 2001. Tsunami Hawaii 29 September 2009 telah menimbulkan gelombang ionosfer yang dapat dideteksi dari data TEC GPS sekitar 1,5 - 2 jam setelah gempa bumi dan tsunami terjadi (Galvan et al., 2010). Muslim et al. (2014) telah mendeteksi adanya gelombang ionosfer setelah tsunami Aceh 26 Desember 2004, dengan periodisitas dan waktu propagasi sesuai dengan propagasi tsunami arah horisontal dan propagasi gelombang akustik gravitasi arah vertikal yang dihitung dari beberapa stasiun GPS di Cocos Island (COCO), India (IISC) dan Sampali Medan (SAMP). Dengan hasil

penelitian efek tsunami pada ionosfer maka Komjathy (2010) dan Occiphinti (2008) telah menyarankan penggunaan TEC GPS untuk peringatan dini tsunami dalam hal klarifikasi prediksi tsunami.

Berdasarkan analisis gangguan ionosfer setelah gempa bumi dan tsunami Tohoku pada tanggal 11 Maret 2011, Galvan et al. (2012) menyimpulkan bahwa telah terjadi TID sekitar 60 menit setelah gempa bumi dengan amplitudo sekitar 0,5 - 1,5 TEC yang setara dengan 5 % dari kondisi TEC normal.

Sistem peringatan dini tsunami di Indonesia yang di kenal dengan *Tsunami Early Warning System (TEWS)* telah dibangun dan dioperasikan oleh Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG), didukung oleh BPPT (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknomogi) dan lembaga terkait. Sebagai bagian sistem TEWS, *Buoy* yang dioperasikan oleh BPPT membutuhkan biaya operasional dan pemeliharaan yang besar untuk dapat mendukung opeasional TEWS. Pada makalah ini dijelaskan hasil kajian dan pengembangan *Decision Support System (DSS)* berbasis TEC GPS untuk memperkuat sistem peringatan dini tsunami di Indonesia sebagai salah satu alternatif klarifikasi peringatan dini tsunami di Indonesia.

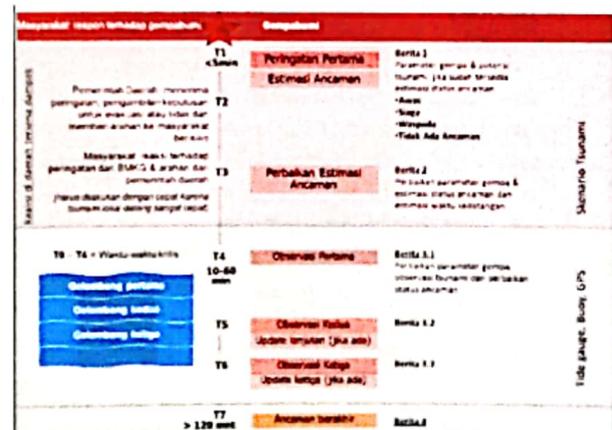
2. TEWS dan peluang pemanfaatan data TEC GPS

Tahap-tahap peringatan dini tsunami dijelaskan pada Gambar 2-1 (BMKG, 2012). Tahap pertama (T1) berupa berita parameter gempa dan potensi tsunami berupa estimasi status ancaman berupa *awas*, *siaga*, *waspada* dan *tidak ada ancaman*. Status ancaman tsunami berdasarkan kriteria gempa bumi yang terjadi seberapa besar dan lokasinya. Gempa bumi yang berpotensi tsunami adalah gempa bumi dengan kekuatan di atas 7 SR dan lokasi episenternya di laut dengan kedalaman kurang dari 100 km. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari jaringan seismometer tersebut, dilakukan prediksi tsunami menggunakan model interaksi litosfer-hidrosfer yang disebut Seiscom3. DSS tsunami mengeluarkan informasi status ancaman tsunami berupa potensi tsunami dengan ketinggian di atas 3 meter yang masuk dalam kategori status *awas*, potensi tsunami ketinggian antara 0.5 - 3 meter dalam kategori *siaga* dan potensi tsunami dengan ketinggian

kurang dari 0,5 meter masuk kategori status *waspada*.

Tetapi dengan adanya peringatan potensi tsunami tersebut belum tentu akan terjadi tsunami. Oleh karena itu ada sistem pendukung lainnya untuk konfirmasi peringatan dini tsunami berupa peralatan seperti *Buoy*, radar HF laut dan *tide gauge*. *Buoy* dioperasikan oleh BPPT, radar tsunami dioperasikan oleh BNPB dan *tide gauge* dioperasikan oleh BIG. Peralatan pengamatan tsunami *insitu* di laut lepas adalah *Buoy*, tetapi jaringan *Buoy* banyak mengalami kendala. Radar HF laut yang dioperasikan BNPB memang mampu mendeteksi arah arus laut dan tinggi gelombang laut menggunakan sinyal HF yang diarahkan ke laut. Untuk keperluan deteksi tsunami, radar HF laut BNPB masih perlu dilengkapi dengan software deteksi tsunami (Lipa et. Al., 2006). Selain itu sampai saat ini jumlah radar HF laut terbatas dan cakupan pengamatannya juga terbatas. *Tide gauge* sebagai alat pengamatan pasut laut terletak di pantai sehingga sebagai alat klarifikasi tsunami kurang cocok karena tsunami sudah sampai pantai sehingga peringatan bahwa tsunami benar-benar terjadi dengan *tide gauge* lebih sesuai untuk mitigasi tsunami yang telah sampai pantai.

Pada tahap pengamatan tsunami sebagai klarifikasi peringatan dini tsunami, LAPAN mempunyai peluang memberikan kontribusi pemantauan efek tsunami pada ionosfer menggunakan jaringan pengamatan GPS real time yang dioperasikan oleh BIG.

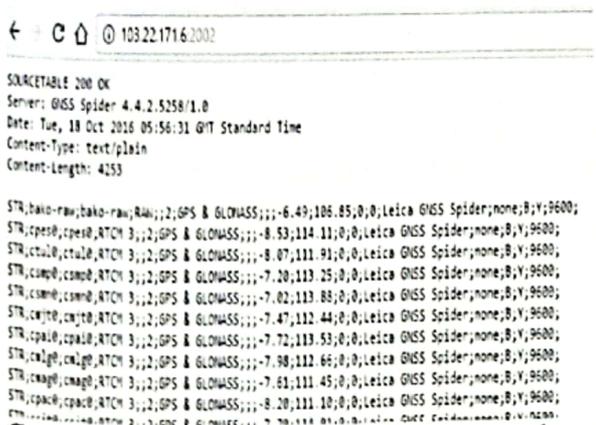


Gambar 2-1. Tahap-tahap peringatan dini tsunami TEWS (BMKG, 2012)

3. Streaming Data GPS dan metodologi pengolahannya

Data GPS format rinex dapat digunakan untuk komputasi TEC *near real time* (Muslim et al., 2014). Tetapi ada kelemahan data format rinex dalam hal waktu perolehannya untuk keperluan informasi *real time* karena data rinex berbasis file sehingga membutuhkan waktu akses untuk membaca dan mengolahnya menjadi data TEC. Untuk keperluan peringatan dini tsunami diperlukan pengamatan dari *streaming* data GPS. Data GPS untuk keperluan peringatan dini tsunami adalah format *Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)* yang dikirim melalui *streaming* data dengan *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)*. Setiap ada data sinyal GPS teramati oleh stasiun GPS maka segera dialirkan kembali melalui internet sehingga setiap pengguna dapat mengakses *streaming* data GPS format RTCM tersebut dari mana saja secara *real time*.

BIG telah mengoperasikan *Indonesian Continous Operating Reference System (INACORS)* sehingga pengguna dapat mengakses data GPS format RCTM secara real time untuk berbagai keperluan. Jaringan INACORS yang mulai operasional pada 16 Nopember 2015 dapat diketahui dari <http://103.22.171.6:2002/> seperti ditunjukkan pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1. Status data GPS yang dapat diakses secara *real time* adalah dengan *mountpoint* sebagaimana ditunjukkan pada kata ke dua setelah kata STR yang dipisahkan oleh tanda titik koma, yaitu *cjkt* (baris ke 8) dari tabel yang mengandung STR.

Data GPS yang dialirkan melalui internet (*streaming*) oleh BIG adalah dalam format RTCM versi 3 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3-1 pada kata yang ke 4. Data GPS format RTCM 3.X berisi kode pesan dan isinya sebagaimana pada Tabel 3-1 sebagai berikut

Tabel 3-1 Tipe pesan dan isi data format RTCM versi 3.X) referensi ...

Tipe pesan	Isi data
1003	Pengamatan fase gelombang pembawa dan jarak kode GPS
1011	Pengamatan fase gelombang pembawa dan jarak kode GLONASS

Data GPS format RTCM dipancarkan melalui internet dalam format data biner sehingga perlu diubah ke ASCII menggunakan software untuk proses perhitungan posisi, estimasi TEC dll. Kami menggunakan fungsi Matlab *rtcm3decoder.m* yang merupakan bagian *goGPS* (<http://www.gogps-project.org/>) yang diperoleh secara gratis dan dapat digunakan untuk keperluan ilmiah non komersial.

Setelah proses *decoder* RTCM, diperoleh informasi jumlah fase (siklus) gelombang pembawa pada frekuensi L1 dan L2 dan jarak kode satelit GPS dan GLONASS ke receiver pada frekuensi L1 dan L2. Mempertimbangkan bahwa data fase lebih presisi maka data GPS yang digunakan dalam penelitian ini adalah data fase yaitu jumlah siklus gelombang radio yang diterima receiver pada frekuensi L1 dan L2. Huruf L menunjukkan band L karena frekuensi yang digunakan oleh GPS berada dalam band L. Ada dua frekuensi sinyal GPS yang dapat diterima oleh stasiun IGS yaitu frekuensi 1.575,42 MHz (dikenal dengan frekuensi L1) dan frekuensi 1.227,60 MHz (dikenal dengan frekuensi L2). Jarak fase

satelit ke receiver GPS dapat diperoleh dari data jumlah siklus yang teramati pada gelombang pembawa L1 dan L2 menggunakan persamaan

$$\Phi_{1,2} = \lambda_1 L_1 - \lambda_2 L_2 \quad (3-1)$$

Pada persamaan (3-1), λ_1 dan λ_2 masing-masing adalah panjang gelombang pada frekuensi L1 dan L2, L_1 adalah pengamatan jumlah siklus yang diterima receiver pada frekuensi pertama (1.575,42 MHz), dan L_2 adalah jumlah siklus yang teramati pada frekuensi L2 (1.227,60 MHz). Nilai TEC dari data jarak fase GPS dapat diestimasi dengan

$$STEC_L = \frac{f_1^2 [(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - b_L - B_L]}{40,3(1-\gamma)} \quad (3-2)$$

Differential STECL (DSTECL) dapat diperoleh dari pengurangan data STECL(t) dengan STECL(t-1) sehingga dapat diperoleh DSTECL yang dapat disusun kembali menjadi

$$DSTECL = \frac{f_1^2 [(\lambda_1 \Phi_1(t) - \lambda_2 \Phi_2(t)) - (\lambda_1 \Phi_1(t-1) - \lambda_2 \Phi_2(t-1))]}{40,3(1-\gamma)} \quad (3-3)$$

Pada persamaan (3-3) bias receiver (b_L), bias satelit (B_L), dan jumlah siklus ambiguitas (N) telah dapat dieliminir. Oleh karena itu data DSTECL telah siap digunakan untuk deteksi anomali ionosfer yang disebabkan masuknya energi dari atas (matahari) dan dari bawah (gempa bumi dan tsunami).

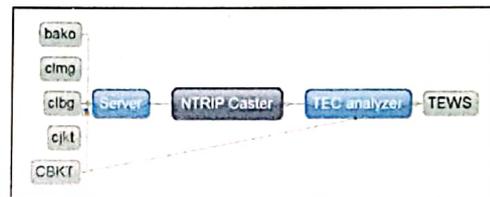
Untuk gangguan ionosfer yang bersumber dari tsunami telah diidentifikasi periode fluktuasi ionosfer dalam skala periode gelombang gravitasi atmosfer (belasan menit sampai beberapa puluh menit) dan gelombang akustik (kurang dari 9 menit sampai beberapa menit). Oleh karena itu data DSTECL hasil persamaan (3-3) perlu difilter agar dapat digunakan dalam deteksi efek tsunami pada ionosfer. Untuk memfilter periode panjang yang lebih besar dari 60 menit dapat dilakukan dengan memotong data setiap 60 menit. Data DSTECL setiap 60 menit diestimasi periode panjangnya dengan polinom orde tinggi ($>$ orde 3). Kemudian selisih DSTECL dari estimasi polinom orde 3 atau lebih dianalisis dengan metode spektrum untuk memunculkan periodisitas perubahan DSTECL ionosfer yang bersumber dari bawah.

Karena panjang data selama 60 menit dengan resolusi pengamatan 1 Hz adalah 3600

data yang diproses untuk analisis spektrum membutuhkan waktu yang lama maka telah dilakukan beberapa pilihan panjang data yang digunakan untuk analisis spektrum yang bergeser setiap detik. Pada penelitian ini telah dicoba beberapa pilihan panjang data mulai 2 menit, 5 menit 10 menit, 30 menit dan 60 menit.

4. Status DSS berbasis TEC GPS untuk peringatan dini tsunami

Pengembangan DSS berbasis TEC GPS untuk memperkuat sistem peringatan dini tsunami sampai tahap terwujudnya GOTECSUN (nama singkat dari "Jalankan komputasi TEC real time untuk pemantauan tsunami") yang strukturnya ditunjukkan pada Gambar 4-1.

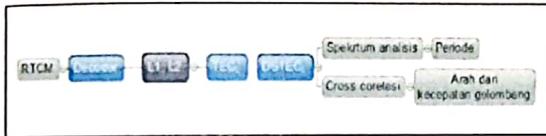


Gambar 4-1. GOTECSUN sebagai sistem pendukung peringatan dini tsunami terdiri dari stasiun GPS (bako, clmg, clbg, cjkt, CBKT dll.), server data GPS, NTRIP caster, dan TEC analyzer

GOTECSUN sebagai sistem penguat peringatan dini tsunami TEWS berperan memberikan dukungan pada tahap 3 dan 4 (T3 dan T4 Gambar 2-1). Pada tahap 3 dalam waktu antara 5 sampai 10 menit GOTECSUN memberikan informasi gelombang ionosfer yang terkait tsunami dengan kriteria bahwa gangguan ionosfer berupa gelombang konsentrik yang berpusat di episenter gempa dan tsunami. Gelombang konsentrik yang dideteksi memiliki periode dalam skala periode gelombang gravitasi akustik atmosfer (kurang dari 60 menit) yang bergerak secara radial dengan kecepatan dalam orde kecepatan tsunami di laut lepas yang tergantung pada kedalaman laut di episenter gempa dan tsunami.

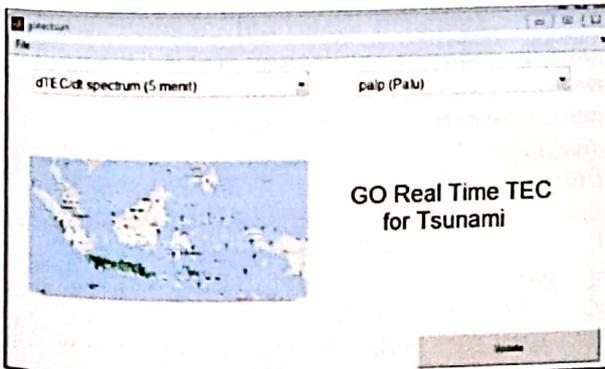
Informasi gelombang ionosfer terkait tsunami atau tidak, diberikan oleh TEC

analyzer yang terdiri dari dua analisis utama yaitu analisis spektrum dan analisis korelasi. Analisis spektrum memberikan informasi periode fluktuasi ionosfer di sekitar gempa bumi yang berpotensi tsunami untuk beberapa satelit GPS yang teramati di receiver terdekat dengan gempa bumi penyebab tsunami. Analisis korelasi memberikan informasi pergeseran gelombang ionosfer dalam arah dan kecepatannya. Jika gelombang ionosfer merupakan respon tsunami maka gelombang tersebut akan menjalar dalam arah radial (konsentrik) dan dengan kecepatan setara kecepatan tsunami. Prosedur TEC analyzer dijelaskan pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2. TEC analyzer memproses data GPS dari streaming data dalam format RTCM yang diterima melalui internet sampai pada analisis spektrum dan korelasi silang.

Gambar 4-3 menampilkan menu awal saat GOTECSUN dijalankan sebelum akses data GPS real time. Ada pop menu kanan dan kiri yang dapat dipilih untuk keperluan monitor gelombang ionosfer dengan 5 pilihan sebelah kanan; gelombang ionosfer periode 1 - 5 menit (paling atas), periode 1 - 10 menit (pilihan no 2), periode 1 - 30 menit (no 3), periode 1 - 60 menit (no 4) dan stasiun GPS yang dipilih dari pop menu sebelah kanan atas meliputi sekitar 30 stasiun dalam jaringan INACORS.

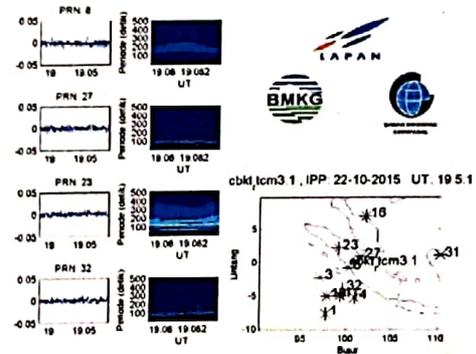


Gambar 4-3. Tampilan awal GOTECSUN sebelum perintah update.

Hasil percobaan GOTECSUN dengan klik update setelah menentukan periode terpanjang (5 atau 10 atau 30 atau 60 menit)

dan memilih stasiun GPS menunjukkan bahwa sistem telah dapat berjalan dengan memberikan informasi periodisitas gelombang ionosfer dalam orde maksimal 5 menit secara real time dengan delay hanya 1 detik.

Gambar 4-4 menampilkan keluaran GOTECSUN untuk stasiun CKTB (Kototabang). Pada Gambar 4-4 grafik paling kanan memperlihatkan variasi DSTEK untuk 4 satelit yang terlihat dengan sudut elevasi terbesar. Pada grafik kolom 2 dari kanan ditampilkan informasi periodisitas DSTEK untuk 4 satelit dengan elevasi terbesar. Diketahui bahwa fluktuasi DSTEK dengan periode 100 - 200 detik merupakan periode dominan pada rentang waktu pengamatan sekitar 19:00:01 - 19:05:01 UT atau sekitar pukul 02:05:01 LT. Tetapi sistem GOTECSUN belum mampu memberikan informasi periodisitas gelombang ionosfer dalam periode beberapa puluh menit dengan panjang data yang diproses > 30 menit karena proses pembuatan contour hasil analisis spektrum yang lama. Pada kasus ini delay waktu untuk pembuatan kontur bisa mencapai lebih dari 10 detik untuk panjang data selama 30 menit



Gambar 4-4. Keluaran GOTECSUN yang menampilkan DSTEK (grafik plaiing kiri), informasi periodisitas DSTEK (grafik kolom ke dua dari kiri) dan titik pengamatan ionosfer dari stasiun Kototabang

4.Rencana Pengembangan Lanjut GOTECSUN

Agar sistem informasi periodisitas gelombang ionosfer dapat diberikan secara real time, GOTECSUN masih perlu diperbaiki dalam proses analisis spektrum beserta penampilannya dalam gambar. Hal ini bisa dilakukan dengan cara melakukan perata-rataan data tiap detik menjadi data tiap menit.

Setelah dapat TEC menjadi setiap menit proses analisis spektrum baru dilakukan. Sehingga GOTECTSUN dapat memberikan display kontur periodisitas gelombang ionosfer secara real time dengan delay tidak lebih dari 1 detik. Selain itu analisis korelasi juga belum dapat diterapkan karena akan menambah waktu keterlambatan dalam menampilkan informasi gelombang ionosfer secara real time.

Jumlah stasiun GPS yang digunakan dalam GOTECTSUN juga masih terbatas pada satu stasiun GPS. Jika digabungkan dengan stasiun GPS lainnya akan dapat menghasilkan informasi gelombang ionosfer yang lebih tinggi resolusi spasialnya. Tetapi akan menambah waktu keterlambatan informasi.

GOTECTSUN dengan kemampuan memberikan informasi gelombang ionosfer dan hasil analisis korelasi untuk perkiraan kecepatan pergeseran gangguan terkait dengan tsunami secara real time dengan delay 1 detik akan dituntaskan dan diujicobakan pada tahun 2016 di Puslitbang BMKG.

5. Kesimpulan

Streaming data GPS melalui jaringan pengamatan GPS *Indonesian Continous Operating Reference System* (INACORS) telah digunakan untuk pengembangan *Decision support system* (DSS) berbasis TEC yang dapat digunakan untuk memperkuat sistem peringatan dini tsunami di Indonesia. Penguatan sistem peringatan dini tsunami berbasis TEC GPS memenuhi kebutuhan layanan peringatan dini tsunami tahap 3 dan 4 sekitar 7 menit setelah gempa bumi. Peran DSS berbasis TEC GPS tersebut terletak dalam memberikan informasi pengamatan tsunami secara tidak langsung melalui gelombang ionosfer yang disebabkan oleh tsunami dengan adanya kopling hidrosfer-atmosfer-ionosfer. Peristiwa kopling tersebut dipicu oleh kompresi atmosfer oleh tsunami yang menimbulkan gelombang akustik yang menjalar secara vertikal sampai ketinggian ionosfer. DSS berbasis TEC ini baru terbatas pada pembuatan metode dan software pemunculan gelombang ionosfer real time dari satu stasiun GPS. Sistem tersebut perlu dikembangkan lebih lanjut agar dapat digunakan untuk estimasi besar dan arah kecepatan gelombang ionosfer yang bersumber dari tsunami dari data GPS secara simultan meliputi 30 stasiun INACORS.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) yang telah memberikan layanan akses data GPS real time dalam format RTCM, sehingga Gotectsun dapat operasional.

Daftar rujukan:

- Afraimovich, E. L., E. I. Astafyeva, V. V. Demyanov, I. K. Edemskiy, N. S. Gavriluk, A. B. Ishin, E. A. Kosogorov, L. A. Leonovich, O. S. Lesyuta, K. S. Palamartchouk, N. P. Perevalova, A. S. Polyakova, G. Y. Smolkov, S. V. Voeykov, Y. V. Yasyukevich and I. V. Zhivetiev, 2013, A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena, *J. Space Weather Space Clim.* 3, A27.
- Artru, J., V. Ducic, H. Kanamori, P. Lognonn'e, dan M. Murakami, 2005, Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis. *Geophys. J. Int.* 160, 840–848.
- Galvan, D., A. Komjathy, M. P. Hickey, and A. J. Mannucci, 2010, The 2009 Samoa and 2010 Chile Tsunamis as Observed in the Ionosphere Using GPS Total Electron Content, *J. Geophys. Res.*, 116, A06318, doi:10.1029/2010JA016204.
- Galvan, D. A., A. Komjathy, M. P. Hickey, P. Stephens, J. Snively, Y. T. Song, M. D. Butala, and A. J. Mannucci, 2012, Ionospheric signatures of Tohoku-Oki tsunami of March 11, 2011: Model comparisons near the epicenter, *RADIO SCIENCE*, VOL. 47, RS4003, doi: 10.1029/2012RS005023.
- Komjathy, A., B. Wilson, X. Pi, V. Akopian, M. Dumett, B. Iijima, O. Verkhoglyadova, and A. J. Mannucci, 2010, On the impact of using COSMIC and ground-based GPS measurements to estimate ionospheric parameters, *J. Geophys. Res.*, 115, A02307.
- Lipa et al., 2012, Belinda Lipa, B., D. Barrick, S. Diposaptono, J. Isaacson, B. K. Jena, B. Nyden, K. Rajesh, dan T. S. Kumar, High Frequency (HF) Radar Detection of the Weak 2012 Indonesian Tsunamis, *Remote Sens.* 2012, 4, 2944-2956; doi:10.3390/rs4102944.
- Muslim, B., J. Effendi, E. Aldrian, Fakhrizal, B. Sunardi, Angga, 2014, Pengembangan Sistem Monitoring Gelombang Ionosfer Terkait Gempa Bumi Menggunakan Data

- GPS (GPSIONOQUAKE), *Proseding Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa*, Auditorium LAPAN Bandung, 25 November 2014. Pusat Sains Antariksa dan Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, LAPAN.
- Oppichinti, 2008, Tsunami Detection by GPS, How Ionospheric Observations Innovation Might Improve the Global Warning System, *GPS World, INNOVATION*, Design and Test.
- 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.
- Zhang, X., dan L. Thang, 2015, Traveling ionospheric disturbances triggered by the 2009 North Korean underground nuclear explosion, *Ann. Geophys.*, 33, 137-142.
- BMKG, 2012, Pedoman Pelayanan Peringatan Dini Tsunami, <http://www.gogps-project.org>, akses 2 November 2015
- <http://bpptbuoy.info/pdbi/metocean/>. Akses 15 November 2015