

DOI: doi.org/10.21009/SPEKTRA.012.01

PEMANTAUAN ANOMALI TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) BERKAITAN DENGAN KEJADIAN GEMPABUMI DI SEKITAR WILAYAH JAWA TAHUN 2015

Bambang Sunardi^{*)}, Sulastri

Puslitbang BMKG, Jl. Angkasa 1 No. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat 10720

^{*)}Email: bambang.sunardi@bmgk.go.id

Abstrak

Penelitian tentang prekursor gempabumi yang terintegrasi melalui pengamatan parameter seismik, elektromagnetik, geokimia, geotmosferik serta parameter ionosfer telah dilakukan untuk mendapatkan tanda-tanda awal sebelum gempabumi kuat di Indonesia. Salah satu yang sedang dikembangkan saat ini adalah pemantauan parameter *Total Electron Content* (TEC) dari data *Global Ionosphere Map* (GIM). Makalah ini menyajikan hasil-hasil pemantauan anomali TEC yang berkaitan dengan gempabumi magnitude $M > 5$ di sekitar wilayah Jawa selama tahun 2015. Pemantauan TEC dilakukan dengan menerapkan metode korelasi data TEC GIM hingga diperoleh perbandingan simpangan koefisien korelasi (skk) dengan deviasi standar simpangan koefisien korelasi (dskk) di dekat episenter gempabumi. Ambang batas anomali TEC merujuk pada penelitian sebelumnya yaitu -1. Apabila nilai $skk/dskk < -1$ maka diklasifikasikan sebagai anomali TEC. Data *Disturbance storm time index* (Dst indeks) dipergunakan untuk mengevaluasi adanya kaitan aktivitas badai geomagnetik dengan anomali TEC. Hasil pemantauan menunjukkan munculnya anomali TEC pada sebagian besar kasus gempabumi yang menjadi obyek penelitian. Dengan hanya mempertimbangkan pengamatan parameter TEC dan indeks Dst, anomali-anomali tersebut dapat diklasifikasikan sebagai prekursor gempabumi terdeteksi dan prekursor gempabumi / efek badai geomagnet terdeteksi.

Kata kunci : TEC, GIM, indeks Dst, prekursor, gempabumi.

Abstract

Research on integrated earthquake precursors through observation of seismic, electromagnetic, geochemical, geotmospheric and ionospheric parameters has been conducted to obtain early signs before great earthquakes in Indonesia. One method being developed is Total Electron Content (TEC) monitoring from the Global Ionosphere Map (GIM). This paper presented TEC anomalies monitoring associated with earthquakes having magnitude $M > 5$ around Java during 2015. TEC monitoring was done by applying TEC GIM data correlation method to get ratio of correlation coefficient deviation (skk) to standard deviation of correlation coefficient deviation (dskk) near earthquake epicenters. TEC anomaly threshold referred to the previous study is - 1. If $skk/dskk$ values were $< - 1$, they can be classified as TEC anomalies. Disturbance storm time index (Dst index) data were used to evaluate links between geomagnetic storm activities and TEC anomalies. The monitoring results indicated appear of TEC anomalies in most earthquakes which became the objects of research. By only considering the observation of TEC parameters and Dst index, such anomalies can be classified as detected earthquake precursors and detected earthquake precursors / geomagnetic storm effects.

Keywords : TEC, GIM, Dst index, precursor, earthquake.

1. PENDAHULUAN

Berbagai macam fenomena / anomali yang diduga merupakan tanda-tanda sebelum kejadian gempabumi (prekursor) telah dilaporkan sejak empat puluh tahun lalu [1]. Fenomena-fenomena yang dapat dipertimbangkan sebagai prekursor tersebut antara lain fenomena elektromagnetik yang telah banyak diteliti di seluruh dunia, fenomena seismik, emisi gas radon, water level, suhu bawah permukaan dan belakangan yang banyak diteliti adalah fenomena anomali *Total Electron Content* (TEC) di ionosfer.

Ionosfer yang berisi ion-ion, elektron-elektron dan partikel bermuatan merupakan media dispersif untuk sinyal *Global Positioning System* (GPS), L1 dan L2. Ionosfer menyebabkan sinyal GPS mengalami penundaan sebanding dengan *Total Electron Content* (TEC), di sepanjang jalan dari satelit GPS ke penerima. Waktu tunda dapat diketahui dari kombinasi geometri bebas linier (L4) dari *pseudorange* GPS dengan frekuensi ganda atau dari pengukuran fase pembawa. TEC yang berkorelasi dengan waktu tunda memungkinkan untuk dihitung menggunakan persamaan matematika [2]. Nilai waktu tunda sejatinya merupakan jenis *bias* dalam penentuan posisi GPS, sedangkan nilai konversi TEC kemungkinan mengandung informasi yang sangat berguna bagi penelitian ionosfer.

Ionosfer dapat disederhanakan sebagai lapisan tunggal pada ketinggian 350 hingga 450 km diatas permukaan bumi. Dengan stasiun GPS dalam jumlah banyak dan terdistribusi secara global, peta TEC secara global (*Global Ionosphere Map*) menggunakan model lapisan tunggal seperti ditunjukkan Gambar 1 akan dapat dihasilkan [2].

TEC berkaitan erat dengan aktivitas matahari dan gangguan medan magnet bumi. Beberapa ilmuwan berpendapat bahwa variasi TEC di ionosfer juga berkaitan dengan fenomena gempabumi yang disebabkan oleh kopling seismo-ionosfer. Medan listrik vertikal yang kuat di permukaan bumi sebelum gempabumi dapat menembus hingga ionosfer dan memodifikasi distribusi dan dinamika kerapatan elektron. Kopling seismo-ionosfer terjadi ketika anomali medan listrik dari tanah tersebut menembus ionosfer [3, 4]. Baru-baru ini, para ilmuwan banyak mendeteksi anomali TEC di ionosfer beberapa hari sebelum gempabumi terjadi. Dalam kasus gempabumi Tohoku 11 Maret 2011 (Mw 9), Jaringan *Global Positioning System* (GPS) di Jepang mendeteksi secara jelas adanya anomali TEC di sekitar area gempabumi, mulai 40 menit sebelum gempabumi terjadi dan meningkat mendekati sepuluh persen dibandingkan nilai TEC biasanya [5].

Dalam penelitiannya, Romanovskaya dan Namgaladze (2014) menemukan 32 kejadian gempabumi yang didahului dengan kemunculan anomali TEC dari 43 kejadian gempabumi yang menjadi obyek penelitian [6]. Demikian juga penelitian dari Alcaay (2016) mendeteksi adanya peningkatan TEC tiga hari sebelum hingga dua hari setelah gempabumi Van (Turki) Mw 7.2 yang terjadi pada 23 Oktober 2011. Peningkatan TEC tersebut kemungkinan berkaitan dengan aktivitas gempabumi dan badai geomagnetik [7].

Krankowski dkk. (2015) mendeteksi perilaku anomali dTEC enam hari sebelum gempabumi Alaska 24 Juni 2014 Mw 7.9. Selama waktu tersebut variasi aktivitas geomagnetik tergolong lemah dengan indeks Kp 15 dan Dst tidak melebihi -32 nT. Anomali peningkatan TEC mencapai 25-30% relatif terhadap rata-rata TEC dalam sebulan sebelumnya [8].

Di Indonesia, penelitian tentang prekursor gempabumi yang terintegrasi melalui pengamatan parameter seismik, elektromagnetik, geokimia, geoatmosferik serta parameter ionosfer juga sedang dilakukan untuk mendapatkan fenomena / anomali yang dapat dipertimbangkan sebagai prekursor gempabumi di Indonesia [9]. Salah satu yang sedang dikembangkan saat ini adalah monitoring parameter TEC dari data *Global Ionosphere Map* (GIM) di dekat episenter gempabumi [10].

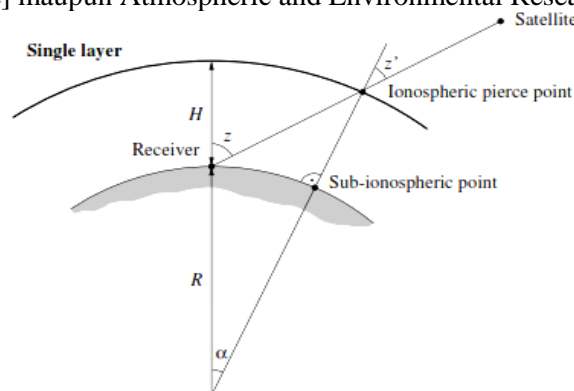
Penelitian anomali TEC sebelum gempabumi kuat di Indonesia tahun 2014 menunjukkan variasi anomali TEC yang muncul sebelum gempabumi Jawa 25 Januari 2014 (Mw 6.2), gempabumi Banda 6 Agustus 2014 (Mw 6.2), gempabumi Maluku 10 September 2014 (Mw 6.2), gempabumi Maluku Utara 15 November 2015 (Mw 7.2), Gempabumi Banda 6 Desember 2014 (Mw 6.1) serta gempabumi Maluku Utara 21 Desember 2014 (Mw 6.3) [11].

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan monitoring anomali TEC yang berkaitan dengan kejadian gempabumi di sekitar wilayah Jawa selama tahun 2015. Penelitian ini merupakan kelanjutan

sekali­gus pengembangan dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [10, 11]. Hasil penelitian diharapkan dapat menambah informasi yang berkaitan dengan prekursor gempa bumi dari parameter ionosfer sehingga dapat dikembangkan dan diintegrasikan dengan pengamatan parameter prekursor gempa bumi lainnya untuk mendukung upaya mitigasi gempa bumi.

2. METODE PENELITIAN

TEC didefinisikan sebagai jumlah total elektron yang terintegrasi di sepanjang jalan dari receiver ke satelit GPS. Dalam penelitian ini, data TEC yang dipergunakan untuk monitoring yang berkaitan dengan fenomena gempa bumi adalah data TEC dalam bentuk *Global Ionosphere Map* (GIM). Untuk mengevaluasi kaitan aktivitas badai geomagnetik dengan anomali TEC yang muncul dipergunakan data *Disturbance storm time index* (indeks Dst) yang dapat diperoleh melalui world data center for geomagnetism, Kyoto [12] maupun Atmospheric and Environmental Research [13].



Gambar 1. Model lapisan tunggal untuk Global Ionosphere Map (GIM) [14].

GIM dapat diperoleh setiap hari dari Pusat Penentuan Orbit di Eropa, Center for Orbit Determination in Europe (CODE) sejak 1996 menggunakan data dari semua stasiun IGS tahun 1995. TEC dimodelkan dalam kerangka referensi geomagnetik-matahari menggunakan ekspansi harmonik bola sampai derajat dan orde 15 [15]. GIM didasarkan pada model lapisan tunggal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Asumsi dari model GIM adalah semua elektron bebas terkonsentrasi di kulit bola yang berketebalan sangat tipis. Konversi dari TEC vertikal E_v ke *slant* TEC (E) dapat ditulis [14] :

$$E = F(z)E_v = \frac{1}{\cos z'} E_v \text{ dengan } \sin z' = \frac{R}{R_0 + H} \sin z \quad (1)$$

dengan $F(z) = 1/\cos z'$ menunjukkan fungsi pemetaan lapisan tunggal. Variabel z , z' masing-masing adalah jarak zenit di puncak stasiun dan lapisan tunggal (Gambar 1). R merupakan radius dengan stasiun yang dipertimbangkan. R_0 merupakan radius rata-rata bumi (~6.371 km) sedangkan H adalah ketinggian dari lapisan tunggal di atas permukaan rata-rata bumi. Ketinggian ideal lapisan H ini biasanya diatur dengan tinggi kerapatan elektron maksimum yang diharapkan, misalnya $H = 400$ km.

Model kerapatan elektron E , kepadatan lapisan permukaan yang mewakili distribusi TEC pada skala global dinyatakan sebagai berikut :

$$E = (\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\text{mak}}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos ms) + b_{nm} \sin ms \quad (2)$$

dengan E adalah vertikal *Total Electron Content* (TEC), β adalah lintang geosentris dari titik persimpangan garis receiver - satelit dengan lapisan ionosfer, $s = \lambda - \lambda_0$ adalah bujur tetap matahari dari titik tembus ionosfer atau titik sub ionosfer, n_{mak} merupakan tingkat maksimum ekspansi harmonik bola, $\tilde{P}_{nm} = A_{nm} P_{nm}$ adalah normalisasi fungsi *legendre* dengan derajat n dan urutan m

berdasarkan faktor normalisasi A_{nm} dan fungsi *legendre* klasik P_{nm} serta a_{nm} dan b_{nm} merupakan koefisien TEC fungsi bola. TEC (β, s) biasa dinyatakan dalam TECU (TEC Unit) dimana $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16}$ elektron/m².

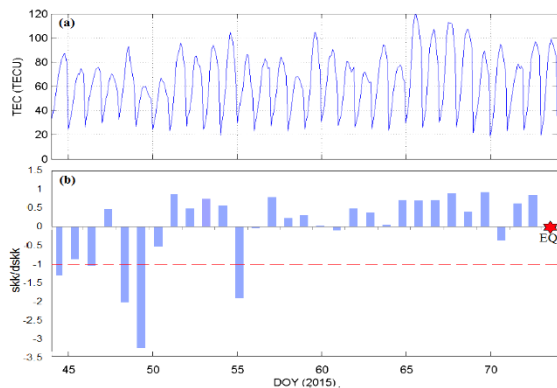
Kopling seismo-ionosfer dapat memodifikasi distribusi dan dinamika kerapatan elektron di ionosfer. Untuk pemantauan variasi TEC di ionosfer yang berkaitan dengan fenomena gempa bumi, dipergunakan data TEC GIM terdekat dengan area gempa bumi. Data TEC GIM yang diperlukan sekitar satu bulan ke belakang dari waktu pemantauan. Data TEC GIM dapat diperoleh dari <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE> [16]. Untuk keperluan monitoring *near real time* dapat mempergunakan model GIM cepat yang tersedia dengan keterlambatan satu hari dan prediksi GIM dua hari yang akan datang.

Data TEC GIM sekitar satu bulan yang telah diperoleh kemudian dihitung nilai rataan TEC pada jam tertentu selama satu bulan sehingga diperoleh variasi diurnal rata-rata bulanan TEC. Analisis korelasi dilakukan antara variasi diurnal TEC pada hari tertentu dengan variasi diurnal rataan bulanan TEC dan menghasilkan sekitar 31 koefisien korelasi. Perbandingan simpangan koefisien korelasi harian untuk satu bulan terhadap nilai rata-rata koefisien korelasi (*skk*) dibagi dengan deviasi standar koefisien korelasi (*dskk*) digunakan sebagai standar penentuan adanya anomali TEC [17].

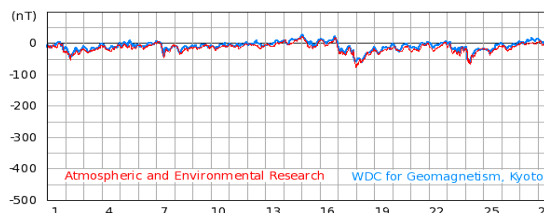
Adanya anomali TEC ditandai dengan nilai *skk/dskk* lebih kecil dari -1 [17]. Variasi TEC juga dipengaruhi oleh aktivitas badai geomagnetik [9]. Untuk itulah pemantauan variasi TEC senantiasa diikuti oleh pemantauan indeks Dst. Klasifikasi adanya badai geomagnetik adalah pada saat nilai indeks Dst lebih kecil dari -30 nT [18].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemantauan TEC untuk kejadian gempa bumi di wilayah Jawa tahun 2015 dibatasi untuk gempa bumi dengan magnitudo $M_w > 5$. Gempa bumi dengan kekuatan mb 5.3 terjadi di selatan Jawa pada *Day of Year* (DOY) 74 atau tanggal 15 Maret 2015. Hasil monitoring TEC harian serta *skk/dskk* sebelum gempa bumi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2, sedangkan Indeks Dst bulan Februari 2015 ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Monitoring TEC sebelum gempa bumi 15 Maret 2015 mb 5.3 (DOY 74). Variasi harian TEC (a) dan variasi *skk/dskk* (b).



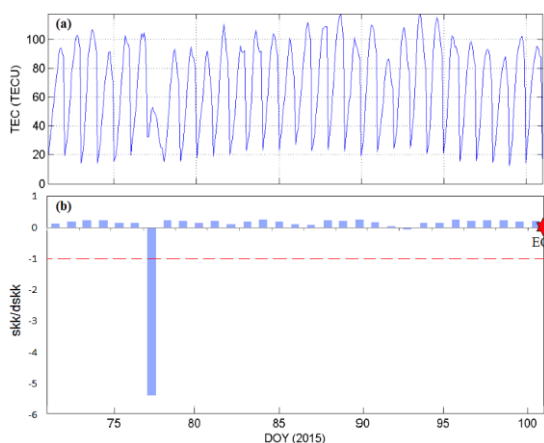
Gambar 3. Indeks Dst Februari 2015 [12, 13].

Variasi harian TEC (TECU) akan rendah pada pagi hari dan semakin meningkat pada siang hari hingga maksimal sekitar pukul 13:00 – 14:00 waktu lokal kemudian menurun kembali pada malam hari (Gambar 2 a). Nilai TEC pada siang hari meningkat dikarenakan adanya peningkatan intensitas radiasi matahari. Gambar 2(b) merupakan variasi nilai *skk/dskk* sebulan sebelum gempa bumi terjadi. Pada DOY ke 48, 49 dan 55 atau tanggal 17, 18 serta 24 Februari 2015 nilai *skk/dskk* mencapai -2.01, -3.24 serta -1.9 dibawah ambang batas normal (-1). Anomali TEC yang terjadi pada tanggal tersebut berkaitan dengan adanya badai geomagnetik, ditandai dengan nilai indeks Dst pada tanggal 17, 18 dan 24 Februari 2015 sekitar -31 nT, -42 nT dan -32 nT (Gambar 3), tergolong dalam badai geomagnetik lemah dan sedang [18]. Dengan mempertimbangkan indeks Dst, anomali TEC yang terjadi dapat dikelompokkan sebagai prekursor gempa bumi / efek badai geomagnetik terdeteksi.

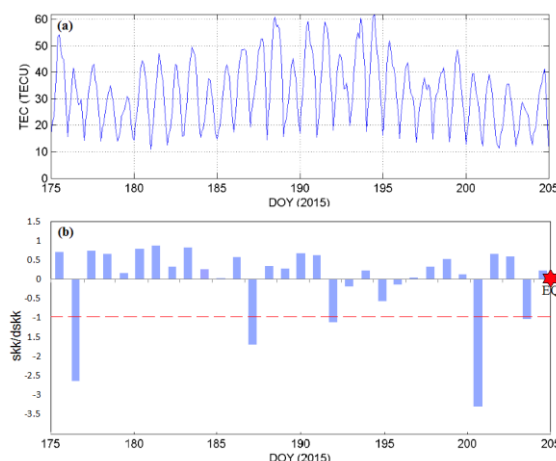
Pemantauan TEC sebelum gempabumi 11 April 2015 (mb 5.1) di selat Sunda (Gambar 4) memperlihatkan adanya anomali TEC pada DOY 77 atau tanggal 18 Maret 2015 ditandai nilai skk/dskk sekitar -5.37. Nilai indeks Dst pada tanggal tersebut < - 100 nT, tergolong dalam badai geomagnet kuat. Dengan mempertimbangkan indeks Dst, maka anomali TEC yang terjadi pada tanggal 18 Maret 2015 tersebut kita klasifikasikan sebagai prekursor gempabumi / efek badai geomagnet terdeteksi.

Sebelum gempabumi Jawa 24 Juli 2015 (Mw 5.4), dijumpai beberapa anomali TEC pada DOY 176, 187 dan 201 atau tanggal 25 Juni, 6 dan 20 Juli 2015 ditandai dengan nilai skk/dskk sekitar -2.6, -1.7 dan -3.3 (Gambar 5). Indeks Dst pada tanggal tersebut -60.5 nT, -34.3 nT dan -9.9 nT (Gambar 6). Anomali TEC pada 25 Juni dan 6 Juli 2015 kemungkinan berkaitan dengan efek badai geomagnetik yang terjadi sedangkan anomali TEC yang terjadi pada 20 Juli 2015 dapat diklasifikasikan sebagai prekursor gempabumi terdeteksi.

Variasi TEC sebelum gempabumi Jawa 4 September 2015 (Mw 5.4) menunjukkan beberapa anomali TEC yaitu pada DOY 225, 239, 241 dan 247 atau 13, 27, 29 Agustus 2015 dan 4 September 2015 dengan nilai skk/dskk -1.8, -2.1, -2.4 dan -1.8 (Gambar 7). Rata-rata nilai indeks Dst pada tanggal tersebut adalah -17.3 nT, -65.2 nT, -20.3 nT, -25.6 nT (Gambar 8 dan Gambar 10 a). Anomali TEC yang terjadi pada tanggal 13, 29 Agustus dan 4 September 2015 dapat dikelompokkan sebagai prekursor gempabumi terdeteksi.



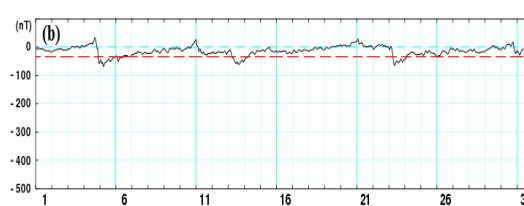
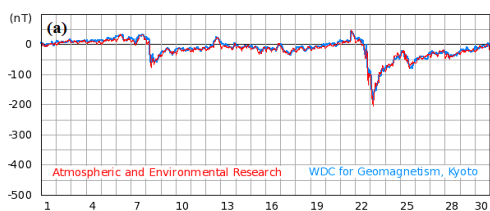
Gambar 4. Monitoring TEC sebelum gempabumi 11 April 2015 mb 5.1 (DOY 101). Variasi harian TEC (a) dan variasi skk/dskk (b)



Gambar 5. Monitoring TEC sebelum gempabumi 24 Juli 2015 Mw 5.4 (DOY 204). Variasi harian TEC (a) dan variasi skk/dskk (b).

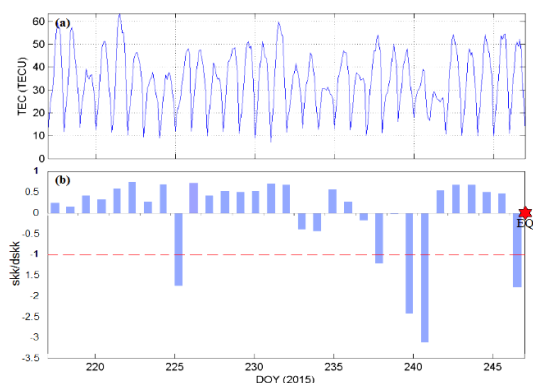
Pemantauan TEC sebelum gempabumi 10 Oktober 2015 (mb 5.2) memperlihatkan anomali TEC pada DOY 253, 257 dan 281 atau tanggal 10, 14 September dan 8 Oktober 2015, ditandai nilai skk/dskk -1.5, -2.4 serta -4.1 (Gambar 9). Rata-rata indeks Dst pada tanggal tersebut -30.1 nT, -22.1 nT serta -58 nT (Gambar 10). Anomali TEC pada tanggal 10 September dan 8 Oktober 2015 kemungkinan merupakan efek dari badai geomagnetik. Anomali TEC pada tanggal 14 September 2015 dapat dikategorikan sebagai sebagai prekursor gempabumi terdeteksi.

Variasi TEC sebelum gempabumi 3 November 2015 (Mw 5.9) menunjukkan adanya anomali pada DOY 281 (tanggal 8 Oktober 2015) dengan nilai skk/dskk sekitar -5.35 (Gambar 11). Indeks Dst pada tanggal yang sama rata-rata pada kisaran -58 nT, masuk dalam kategori badai menengah (Gambar 10 b). Anomali TEC yang terjadi dapat dikelompokkan sebagai prekursor gempabumi / efek badai geomagnet terdeteksi.

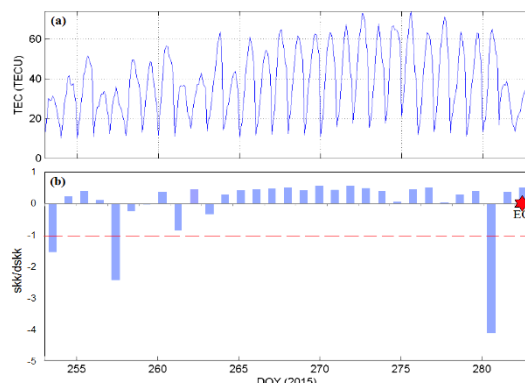


Gambar 6. Indeks Dst selama bulan Juni 2015 (a) dan bulan Juli 2015 (b) [12, 13].

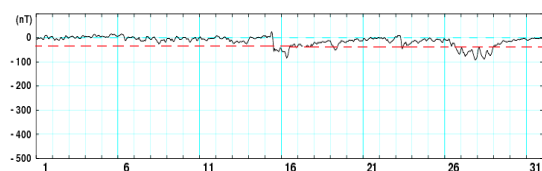
Anomali TEC ditemukan pada DOY 332, 333 dan 349 (28, 29 November dan 15 Desember 2015) sebelum gempa bumi 19 Desember 2015 (Mw 5.5) seperti ditunjukkan Gambar 12. Indeks Dst pada tanggal yang sama sekitar -1.8 nT, -5.9 dan -35,7 nT (Gambar 13). Anomali TEC tanggal 28 dan 29 November 2015 dikategorikan sebagai prekursor gempa bumi terdeteksi.



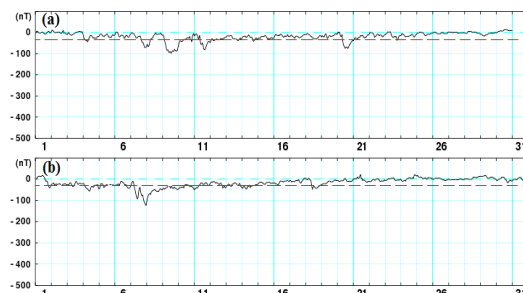
Gambar 7. Monitoring TEC sebelum gempa bumi 4 September 2015 (DOY 247). Variasi harian TEC (a) dan variasi ssk/dsck (b).



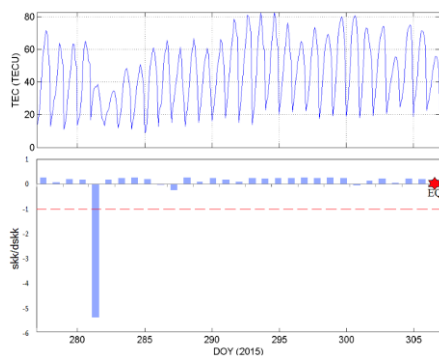
Gambar 8. Monitoring TEC sebelum gempa bumi 10 Oktober 2015 (DOY 283). Variasi harian TEC (a) dan variasi ssk/dsck (b).



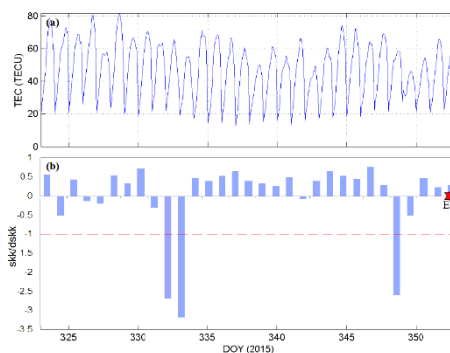
Gambar 9. Indeks Dst bulan Agustus 2015 [12].



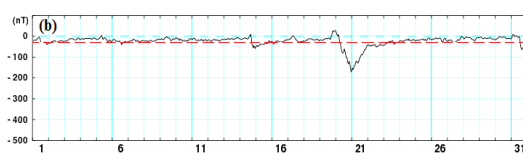
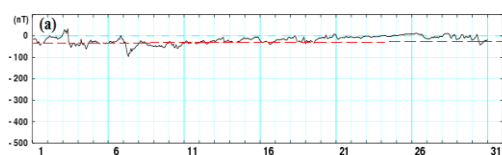
Gambar 10. Indeks Dst selama bulan September 2015 (a) dan bulan Oktober 2015 (b)[12].



Gambar 11. Monitoring TEC sebelum gempa bumi 3 November 2015 (DOY 307). Variasi harian TEC (a) dan variasi ssk/dsck (b).



Gambar 12. Monitoring TEC sebelum gempa bumi 19 Desember 2015 (DOY 353). Variasi harian TEC (a) dan variasi ssk/dsck (b).



Gambar 13. Indeks Dst selama bulan November 2015 (a) dan Desember 2015 (b) [12].

4. KESIMPULAN

Hasil pemantauan TEC menunjukkan adanya anomali yang mendahului tujuh kejadian gempabumi di wilayah Jawa sepanjang tahun 2015. Dari tujuh anomali TEC tersebut, empat diantaranya dapat diklasifikasikan sebagai prekursor gempabumi terdeteksi, yaitu anomali TEC sebelum gempabumi 24 Juli 2015 (Mw 5.4), gempabumi 4 September 2015 (Mw 5.4), gempabumi 10 Oktober 2015 (mb 5.2) serta anomali TEC sebelum gempabumi 19 Desember 2015 (Mw 5.5). Tiga anomali TEC sisanya dapat dikategorikan dalam prekursor gempabumi / efek badai geomagnet terdeteksi, yaitu anomali TEC sebelum gempabumi 15 Maret 2015 (mb 5.3), gempabumi 11 April 2015 (mb 5.1) serta anomali TEC sebelum gempabumi 3 November 2015 (Mw 5.9).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Buldan Muslim yang telah banyak memberikan masukan dan diskusi yang sangat berharga, juga kepada Dr. Supriyanto Rohadi, Kepala Bidang Litbang Geofisika atas arahan dan masukan bagi terselesaikannya makalah ini.

DAFTAR ACUAN

- [1] T. Rikitake, *Earthquake Prediction*, Elsevier, Amsterdam (1976).
- [2] G. Jiming, L. Hui, Investigation of ionosphere TEC distribution in China region by GIM model, *Geo-spatial Information Science*, 8 (3) (2005), pp 197-200.
- [3] V.P. Kim, V.V. Hegai, A possible presage of strong earthquakes in the night-time mid-latitude F2 region ionosphere, *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (1999).
- [4] S.A. Pulinet, K.A. Boyarchuk, V.V. Hegai, V.P Kim, A.M Lomonosov, Quasielectrostatic model of atmospherethermosphere-ionosphere coupling, *Adv Space Res* (2000).
- [5] K. Heki, Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Geophysical Research Letters* (2011), L17312.
- [6] Y. V. Romanovskaya, A. A. Namgaladze, *Seismo-Ionospheric Precursors Of Strong Earthquakes: Analysis Of Total Electron Content Observations*, Proceedings of the 10th Intl Conf. "Problems of Geocosmos, St. Petersburg, Russia (2014).
- [7] S. Alcay, Analysis Of Ionospheric Tec Variations Response To The Mw 7.2 Van Earthquake, *Acta Geodyn. Geomater.*, 13 (3) (2016), 257–262.
- [8] A. Krankowski, I. Shagimuratov, N. Tepenitzina, G. Yakimova, L. Koltunen, Ionospheric GPS TEC anomaly prior to Alaska earthquake on 24 June 2014, *Geophysical Research Abstracts*, 17 EGU2015-9600, 2015, 17 (2015).
- [9] B. Sunardi, B. Muslim, A.S. Prayogo, S. Pakpahan, D. Ngadmanto, J. Nugraha, S. Ahadi, A. A. Justicea, Arafah, Muhaimin, N. Efendi, W. Setyonegoro, S.D. Putri, Fachrizal, J. Efendi, Penelitian Tentang Prekursor Gempabumi II, *Prosiding Seminar Ilmiah Hasil-Hasil Penelitian dan Pengembangan Puslitbang BMKG Tahun 2014*, Jakarta (2015).
- [10] B. Sunardi, B. Muslim, D. Ngadmanto, P. Susilanto, J. Nugraha, S. Pakpahan, A.S. Prayogo, Sulastri, Ionoquake, Sistem Monitoring Data TEC-GPS Untuk Studi Prekursor Gempabumi Di Indonesia, *Prosiding Seminar Ilmiah Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, Yogyakarta (2015).
- [11] B. Sunardi, B. Muslim, S. Pakpahan, Anomali Total Electron Content (TEC) Sebelum Gempabumi Kuat di Indonesia Tahun 2014, *Prosiding Seminar Nasional Fisika* (2015).

- [12] Real-time (Quicklook) Dst index, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html, diakses 20 April 2016.
- [13] AER Dst Index, <http://www.aer.com/science-research/space/space-weather/space-weather-index>, diakses 28 April 2016.
- [14] S. Schaer, How to use CODE's Global Ionosphere Maps, Astronomical Institute, University of Berne (1997).
- [15] S. Schaer, Mapping and Prediction the Earth Ionosphere using the Global Positioning System, Doctoral Thesis, University of Bern (1999).
- [16] Global Ionosphere Maps Produced by CODE, <ftp://ftp.unibe.ch/>, diakses 12 April 2016.
- [17] B. Muslim, Pengujian Teknik Korelasi Untuk Deteksi Pengaruh Aktivitas Gempa Bumi Dari Data TEC Ionosfer, Prosiding Seminar Nasional Fisika HFI (2014).
- [18] W D. Gonzales, B T. Tsurutani, A L. Clua de Gonzales, Interplanetary origin of magnetic storms, *Space Sci. Rev.*, 88 (1999)