

ANALISIS VARIASI GPS – TEC YANG BERHUBUNGAN DENGAN GEMPABUMI BESAR DI SUMATERA

Hendri Subakti¹, Nanang T.Puspito², Djedi S.Widarto³

¹ BMG, ² FITB-ITB, ³ Pertamina-EPTC

Abstrak

Sinyal radio frekuensi-ganda yang dipancarkan dari satelit Global Positioning System (GPS) memungkinkan untuk pengukuran jumlah total elektron, disebut sebagai total electron content (TEC), di lapisan ionosfer sepanjang berkas sinyal antara satelit dan penerima GPS. Pengolahan diferensial TEC (dTEC) secara spasial dan slant TEC menggunakan data jaringan Sumatran GPS Array (SUGAR) dengan memakai perangkat lunak algoritma GAMIT (GPS Analysis at Massachusetts Institute Technology). Sedangkan variasi dan distribusi vertical TEC diolah dengan perangkat lunak matlab7. Hasil analisis menunjukkan adanya variasi nilai TEC baik itu penurunan maupun peningkatan jumlah elektron. Selama kurun waktu bulan Desember 2004 sampai April 2005 di Sumatera terjadi 10 kali gempabumi dengan kekuatan $M \geq 6.0$ dimana 9 gempabumi diantaranya muncul anomali TEC (penurunan nilai TEC dibawah nilai batas bawah) 1 sampai 6 hari sebelum gempabumi terjadi. Anomali TEC ini dapat dipandang sebagai pertanda (precursory signal) yang muncul sebelum terjadi gempabumi.

Kata kunci : GPS, TEC, GAMIT, SUGAR, sinyal precursor

Abstract

The double-frequency radio signal which is broadcasted by Global Positioning System (GPS) Satellite enables to measure the number of Total Electron Content (TEC). It exists along ionosphere between the signal beam and GPS receiver. The calculation of TEC differential (dTEC) and slant TEC use the Sumatra GPS Array (SUGAR) network data. It is done by utilizing the GAMIT (GPS Analysis at Massachusetts Institute of Technology) algorithm software. The distribution of variation and vertical TEC are processed by using Matlab 7 Software. The result of the analysis shows the existence of TEC value both the decrease and the increase of electrons number. From December 2004 until April 2005, ten earthquakes occurred in Sumatra with the magnitude $M > 6.0$. Nine of them appeared the TEC anomaly (the decrease of TEC value is below the lower bound) in 1 up to 6 days before the earthquakes stroke. The TEC anomaly is considered as the precursory signal that occurs before the earthquake strikes.

Keywords : GPS, TEC, GAMIT, SUGAR, precursory signal.

1. PENDAHULUAN

Latar belakang dilakukan penelitian GPS-TEC ini karena hingga saat ini belum ditemukan metoda yang akurat untuk memprediksi gempa bumi. Wilayah Indonesia termasuk wilayah rawan bencana gempabumi, data statistik menunjukkan rata-rata selama kurun waktu setahun bisa terjadi

dua kali gempabumi besar yang merusak dan menimbulkan korban harta dan jiwa yang tidak sedikit. Hal ini menambah motivasi penulis mengadakan penelitian tentang precursory signal gempabumi. Prediksi gempabumi menyangkut tiga hal yang pokok yaitu dimana gempabumi akan terjadi, berapa besar kekuatan gempabumi dan kapan gempabumi akan terjadi. Hingga saat ini

sudah banyak para ahli gempabumi yang bisa memprediksi lokasi dan kekuatan gempabumi yang akan terjadi, namun belum bisa memprediksi dengan akurat kapan saat gempabumi akan terjadi. Secara umum prediksi gempabumi dapat diklasifikasikan dalam tiga bagian yaitu prediksi jangka panjang (*long term*), menengah (*intermediate term*), dan jangka pendek (*short term*). Prediksi jangka pendek perlu mendapatkan beberapa fenomena alam yang dapat diamati sebagai tanda-tanda awal (*precursor*), yang berhubungan dengan kejadian gempabumi. Salah satunya adalah pengukuran variasi TEC dengan alat GPS. *Global Positioning System* (GPS) merupakan salah satu wahana untuk mempelajari fenomena yang terjadi di ionosfer, melalui suatu sinyal gelombang mikro yang menjalar dari satelit pemancar ke stasiun penerima GPS di permukaan atau dekat permukaan bumi. Stasiun penerima GPS dengan sinyal frekuensi ganda memungkinkan pengukuran jumlah elektron total, yang dikenal sebagai *Total Electron Content* (TEC), di sepanjang jalur perambatan sinyal antara kedua stasiun tersebut.

Di Indonesia belum banyak ahli yang meneliti tentang prediksi gempabumi. Saat ini yang sedang berkembang adalah prediksi gempabumi berdasarkan fenomena medan elektromagnetik (EM). Studi fenomena EM yang berhubungan dengan prediksi gempabumi terbagi dalam dua bagian utama. Pertama, untuk menemukan beberapa perubahan sifat-sifat bumi sebelum gempabumi (*pre seismic change*) seperti nilai tahanan jenis listrik dan magnetisasi. Kedua adalah untuk mendeteksi tanda-tanda sinyal EM sebelum gempabumi terjadi.

Prediksi gempabumi dengan metoda berdasarkan fenomena medan elektromagnetik (EM) pertama kali dilakukan di Yunani pada tahun 1980 dan dikenal dengan metoda VAN (*Varotsos-Alexopoulos-Nomikos*). Pada awal 1990 Fraser-Smit et. al. (1990), Kopytenko et. al. (1993), Hayakawa et. al. (2002) melaporkan bahwa ada perubahan medan EM beberapa hari sebelum terjadi gempabumi Kobe-Jepang pada tahun 1995. Kemudian Liu et. al. (2000 dan 2004)

Dengan monitoring *GPS-TEC* melaporkan bahwa ada gangguan ionosfera sebelum terjadi gempabumi yang berkekuatan $M \geq 6.0$ di daerah Chi-Chi dan Chia-Yi Taiwan antara tahun 1997 sampai 1999. Dari 20 gempabumi yang diteliti, 16 gempabumi diantaranya muncul precursor sebelum terjadi gempabumi. Gangguan atau anomali TEC ini dapat dijadikan pertanda awal (*precursory signal*) gempabumi. Diharapkan dengan mengetahui anomali distribusi spasial TEC dapat dijadikan precursor gempabumi dalam rangka prediksi gempabumi jangka pendek.

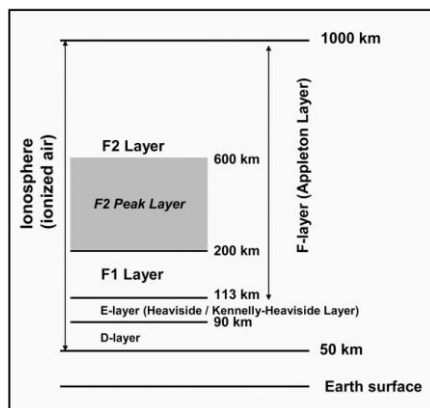
2. DASAR TEORI

2.1 Ionosfer

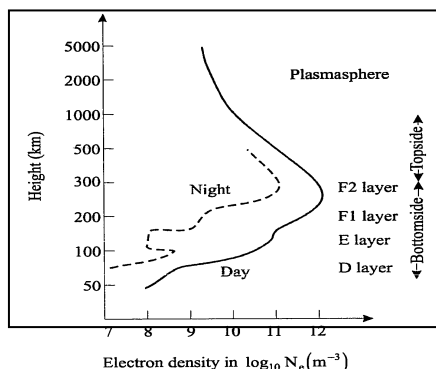
Beberapa laporan yang menjelaskan proses-proses fisika dan kimia yang terjadi di ionosfer secara rinci dapat ditemukan di antaranya dalam McNamara (1994) dan Davies (1990). Secara umum, ketinggian terendah ionosfer adalah sekitar 50 km sampai mencapai ketinggian sekitar 1000 km (Gambar 1). Dalam kenyataannya, batas atas ionosfer tidak dapat ditentukan dengan tepat karena diduga bahwa kerapatan elektron semakin menipis atau mengecil menuju plasmafer atau protonosfer dan sesudah itu adalah lapisan plasma antar planet (Langley, 1996). Plasmafer merupakan suatu lapisan di atas ketinggian sekitar 1000 km dimana kerapatan atmosfer netral sangat kecil dan ion positif berupa proton sangat besar jumlahnya, sehingga disebut juga sebagai lapisan protonosfer

Berdasarkan terdapatnya perbedaan molekul-molekul dan atom-atom di dalam atmosfer dan tingkat perbedaan mereka dalam kemampuan menyerap, maka lapisan ionosfer dapat dibagi ke dalam suatu deretan wilayah atau lapisan secara tegas. Lapisan itu diberi tanda dengan huruf-huruf D, E, F₁ dan F₂. Secara kasar, lapisan D berada lebih rendah dari 90 km, lapisan E memiliki puncak sekitar 105 km, F₁ berpuncak antara 160-180 km, dan lapisan F₂ berpuncak antara 200-600 km. Pada waktu malam hari, lapisan D dan E menghilang, sedangkan lapisan F₁ dan F₂ bergabung membentuk lapisan F. Kerapatan elektron maksimum terjadi pada lapisan F₂.

Secara umum seluruh lapisan tersebut secara kelompok disebut sebagai bagian bawah ionosfer (*bottomside*). Bagian dari ionosfer antara lapisan F₂ dengan batas atas ionosfer disebut sebagai bagian atas ionosfer (*topside*). Di dalam lapisan F₂ dimana umumnya kerapatan elektron maksimum terjadi sebagai konsekuensi dari penyerapan sinar ultra violet ekstrim (*extreme ultraviolet*, EUV) dan meningkatnya kerapatan atmosfer netral seiring menurunnya ketinggian



Gambar 1. Profil vertikal lapisan D,E,F1 dan F2(Davies, 1990)



Gambar 2. Profil lapisan D,E,F1,F2 pada siang dan malam hari (Davies, 1990).

2.2 GPS

Publikasi yang membahas masalah GPS dan aplikasinya telah banyak tersedia. Prinsip-prinsip dasar tentang GPS dijelaskan secara rinci, misalnya oleh Kleusberg dan Teunissen (1996), Parkinson et. al. (1996), Leick (1995), dan Hoffmann-Wellenhoff et. al. (1997). Teori dan informasi praktis tentang GPS dapat diakses melalui Langley (1997).

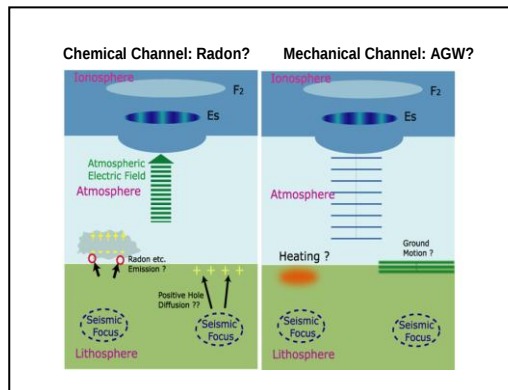
Satelit-satelit GPS memancarkan sinyal gelombang radio dengan frekuensi-ganda,

yakni $f_1=1575,42$ MHz dan $f_2=1227,60$ MHz. Sinyal pembawa (*carrier signals*) kemudian dimodulasikan fasanya ke dalam bentuk coarse/acquisition code (C/A-code) dan precise code (P-code) dengan siklus perulangan code adalah masing-masing sebesar 1,023 MHz (sekitar 1 msec=300 km) dan 10,23 MHz (sekitar 0,1 msec=30 km). C/A-code dimodulasikan hanya terhadap sinyal L1-carrier dan P-code dimodulasikan terhadap sinyal L1 dan L2. Informasi navigasi dengan tingkat cuplikan rendah, yakni 50 Hz, juga dimodulasikan terhadap L1 dan L2 yang dapat dilihat pada Gambar 4. Kedua sinyal, yakni pseudorange dan carrier phase, merupakan dua data dasar yang diamati oleh stasiun penerima GPS. Stasiun penerima GPS membuat replika dari kedua frekuensi L-band yang dipancarkan oleh satelit-satelit dan kemudian membedakan keduanya dengan sinyal tergeser Doppler (*Doppler shifted signals*) yang datang untuk menghasilkan sebuah frekuensi denyut (*a beat frequency*).

2.3 Mekanisme Fisis Anomali TEC

Sejauh ini belum ada teori yang pasti penyebab terjadinya anomali TEC sebelum terjadi gempa bumi. Namun ada beberapa pendapat yang dapat menjelaskan gambaran tentang mekanisme fisis anomali TEC yang dapat dilihat pada gambar 5. Menurut Kamogawa (2004) ada beberapa pendapat pada saat sebelum kejadian gempa bumi (*pre-earthquake*) di area yang akan terjadi gempa bumi (*area preparation earthquake*). Pendapat pertama diduga karena adanya emisi gas radon yang umumnya muncul di wilayah yang banyak mengandung air bawah tanah yang reservoirnya berupa batuan beku asam, seperti batuan granit. Emisi gas radon yang mengandung ion-ion positif ke ionosfer menyebabkan berkurangnya kandungan elektron. Pendapat ini digolongkan sebagai chemical effect. Pendapat kedua diduga ada fenomena *Positive Hole Difusion* yang mengeluarkan ion-ion positif sebagai penyebab berkurangnya jumlah elektron dilapisan ionosfer. Pendapat ini digolongkan proses *electrical effect*. Pendapat ketiga diduga karena adanya proses panas (*heating*) saat terjadi stress pada batuan sebelum gempa bumi terjadi. Pendapat ini digolongkan

sebagai chemical effect. Pendapat keempat menduga karena adanya gelombang gravitas akustik (Acoustic Gravity Waves) yang muncul sebelum terjadi gempa bumi. Pendapat ini digolongkan *mechanical effect*.



Gambar 3. Mekanisme fisis anomali TEC yang berhubungan dengan Gempabumi (Kamogawa, 2004)

2.4. Penentuan TEC

Lebih dari dua dekade terakhir ini, noise ionosfer (*ionospheric noise*) pada pengamatan GPS frekuensi-ganda telah digunakan untuk mendapatkan informasi tentang ionosfer dan sebagai bahan dalam penelitian lanjutan untuk mempelajari ionosfer. Dari perbedaan antara hasil pengukuran dalam dua frekuensi tersebut, nilai TEC sepanjang jalur sinyal antara satelit GPS dan stasiun penerima GPS di permukaan bumi dapat dihitung. TEC didefinisikan sebagai jumlah total elektron di dalam plasma terionisasi dalam bentuk tabung imajiner (dalam bentuk sayatan 1 m^2) antara satelit dan penerima GPS. Kerapatan plasma di ionosfer selalu berubah terhadap waktu dalam bentuk variasi harian, musim dan adanya aktivitas matahari. Karena itu, variasi TEC terhadap waktu mencerminkan dinamika antariksa dekat Bumi.

Diketahui persamaan nilai waktu pelambatan ionosfer (*ionospheric delay time*) $T_{ion}(f)$ (dalam detik) sebagai berikut :

$$T_{ion}(f) = t_g - t = \frac{40,28}{f^2} \int_s N ds = \frac{40,28}{f^2} \cdot TEC^* \quad (1)$$

dimana TEC^* (elektron/ m^2) adalah efek ionosfer dalam bentuk kandungan elektron total sepanjang garis penglihatan antara stasiun penerima dan satelit GPS.

Persamaan (1) di atas dikenal juga sebagai waktu pelambatan ionosfer hasil pendekatan orde pertama dari persamaan Appleton-Hartree. Dengan demikian, selisih waktu pelambatan untuk frekuensi L1 dan L2 dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} \Delta T_{ion} &= T_{ion}(f_{L2}) - T_{ion}(f_{L1}) \\ &= 40,28 \cdot TEC^* \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

atau disederhanakan menjadi :

$$STEC^* = \frac{1}{40,28} \cdot \left(\frac{f_{L1}^2 \cdot f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \right) \Delta T_{ion} \quad (3)$$

dimana $f_{L1}=1575,42 \text{ MHz}$, $f_{L2}=1227,6 \text{ MHz}$.

Jika $\cos z = \sin(A + E)$, maka:

$$\begin{aligned} \sin(A + E) &= \left\{ 1 - \cos^2(A + E) \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ 1 - \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \cos^2 E \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

Pada persamaan (4), nilai VTEC dapat ditentukan dari nilai STEC melalui persamaan berikut :

$$\begin{aligned} VTEC &= STEC \left\{ 1 - \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \cos^2 E \right\}^{1/2} \\ &= STEC \sqrt{1 - \frac{\cos^2 E}{(1+h/R)^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

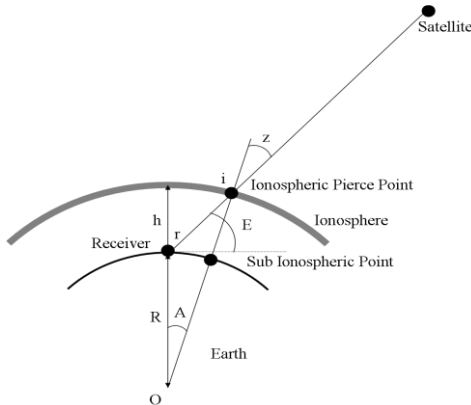
Nilai STEC pada persamaan (4) ditentukan berdasarkan perkalian antara nilai TEC^* pada persamaan (3) dengan fungsi slant $S(e)$:

$$S(e) = \frac{1}{h_1 - h_2} \left(\sqrt{R^2 \sin^2(e) - R^2 + (R+h_1)^2} - \sqrt{R^2 \sin^2(e) - R^2 + (R+h_2)^2} \right) \quad (6)$$

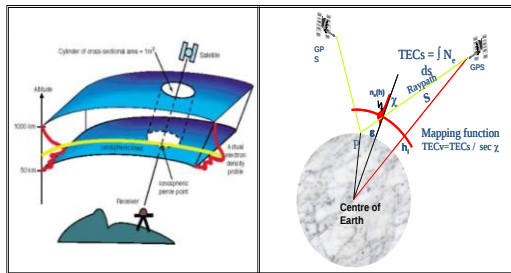
sehingga $STEC = TEC^* \cdot S(e)$. Jika jejari rerata Bumi $R=6378 \text{ km}$ dan ketinggian ionosfer Indonesia $h=350 \text{ km}$, maka nilai VTEC dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut :

$$VTEC = STEC \sqrt{1 - 0,89 \cos^2 E} \quad (7)$$

Satuan VTEC dinyatakan dalam TECU (atau TEC Unit) dimana 1 TECU = 1×10^{16} elektron/m².



Gambar 4. Perhitungan TEC



Gambar 5. Definisi Total Electron Content (Puspito, N.T., Barus, P.A., Widarto, D.S., 2007)

2.5 Indeks Dst

Sudah diketahui sejak lama bahwa komponen horizontal, H, dari medan geomagnetik menurun sewaktu terjadi gangguan magnetik besar dan bahwa proses kembalinya kepada tingkat rata-ratanya terjadi secara bertahap. (Broun, 1861 ; Adam, 1892 ; Moos, 1910). Analisa secara menyeluruh terhadap morfologi badai magnetik telah dilakukan oleh Chapman (1935, 1952), Vestine et.al (1947), Sugiura and Chapman (1960).

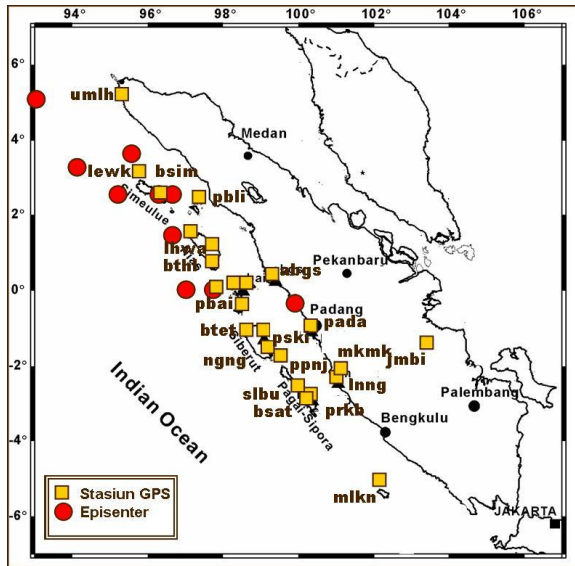
Kajian – kajian tersebut telah menunjukkan bahwa pada ekuator dan lintang menengah, penurunan H sewaktu terjadi badai magnetik diperkirakan dapat direpresentasikan oleh medan magnetik yang seragam yang parallel terhadap sumbu dari kutub geomagnetik dan mengarah ke selatan. Kekuatan dari medan gangguan yang simetris terhadap sumbu bervariasi seiring dengan waktu badai, dan didefinisikan sebagai waktu yang diukur sejak badai mulai terjadi. Permulaan dari

badai magnetik seringkali ditandai oleh kenaikan global H secara tiba-tiba, yang direferensikan sebagai permulaan mendadak badai atau *storm sudden commencement* dan disebut sebagai SSC. Komponen H biasanya tetap berada di atas level rata-ratanya untuk beberapa jam, fase ini disebut sebagai fase awal badai (*initial phase*). Kemudian penurunan besar-besaran secara global pada H dimulai, dan mengindikasikan pembentukan fase utama dari badai. Kekuatan dari penurunan H melambangkan tingkat keparahan gangguan. Meskipun deskripsi di atas memberikan gambaran rata-rata statistik dari badai magnetik, dalam kasus – kasus individual terlihat variasi yang sangat jauh berbeda antara badai satu dengan badai yang lain.

Kita menyebut Dst sebagai medan gangguan (*disturbance field*), yang simetris secara axial terhadap sumbu axis kutub, dan dilihat sebagai fungsi dari waktu badai. Jika index monitoring Dst dalam H diturunkan secara kontinyu sebagai fungsi dari UT, variasi akan sangat jelas mengindikasikan terjadinya badai magnetik dan tingkat keparahannya saat badai itu terjadi. Kemudian, meski dalam ketiadaan badai magnetik yang berbeda, indeks tersebut akan memonitor secara kontinyu gangguan – gangguan yang lebih kecil daripada gangguan yang biasa disebut sebagai badai magnetik, atau gangguan yang mulai secara bertahap tanpa permulaan yang jelas. Oleh karena itu, variasi Dst yang diturunkan akan memberikan pengukuran kuantitatif dari gangguan geomagnetik yang dapat berhubungan dengan parameter – parameter matahari dan geofisika lainnya.

3. DATA DAN METODA

Penelitian ini menggunakan data GPS-SUGAR (Sumatran GPS Array) yang terdiri dari jaringan stasiun receiver GPS di Sumatera. Lokasi Stasiun GPS dan episenter tersebut dapat dilihat pada Gambar 7 dibawah ini :



Gambar 6. Peta lokasi Stasiun GPS dan episenter

Data yang digunakan mulai bulan Desember 2004 sampai dengan bulan April 2005. Data gempa bumi yang digunakan adalah sebagai berikut :

EQ	YY	MM	DD	Hr-UTC	Min.	Sec.	LAT.	LONG.	DEPT Km.	MAG
1	2004	12	26	00	58	53,45	3,29	95,98	30	9,0
2	2005	01	01	06	25	44,8	5,09	92,30	12	6,7
3	2005	02	26	12	56	52,6	2,90	95,59	36	6,8
4	2005	03	28	16	09	36,5	2,08	97,10	30	8,6
5	2005	03	30	16	19	32,66	3,06	94,79	30	6,0
6	2005	04	03	00	59	15,1	-0,24	97,64	33	6,2
7	2005	04	08	05	48	36,0	-0,21	97,97	30	6,0
8	2005	04	10	10	29	11,2	-1,64	99,60	19	6,7
9	2005	04	16	16	37	43,47	1,54	96,82	20	6,1
10	2005	04	28	14	07	35,6	2,30	96,82	30	6,0

Tabel 1. Data Gempa tahun 2004 – 2005

Data magnetik yang digunakan dalam penelitian ini adalah data Dst bulan Desember 2004 sampai Bulan April 2005. Data Dst ini digunakan untuk menganalisis kejadian badai magnetik yang mempengaruhi nilai TEC.

Prinsip perhitungan TEC adalah sbb:

$$STEC = \frac{1}{40,28} \cdot \left(\frac{f_{L1}^2 \cdot f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \right) \Delta T_{ion}$$

dimana :

f_{L1} = 1575,42 MHz,

f_{L2} = 1227,6 MHz.

ΔT_{ion} = selisih waktu pelambatan untuk frekuensi $L1$ dan $L2$

Sedangkan,

$$VTEC = STEC \times \sqrt{1 - 0.90 \cos^2 E}$$

Untuk diferensial TEC (dTEC) dihitung dengan:

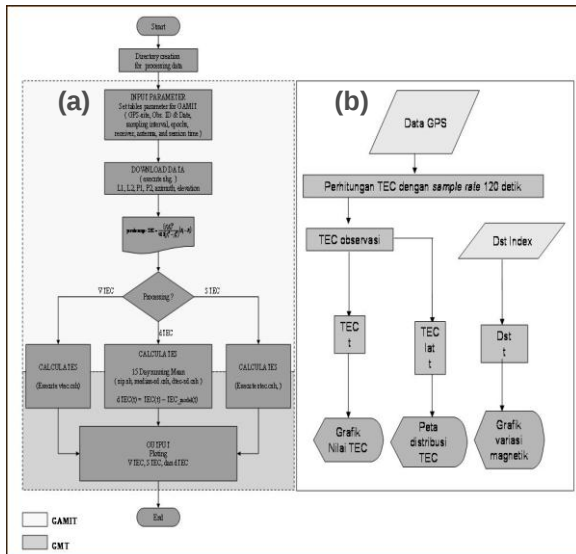
$$dTEC = TEC - TEC_{model}$$

Untuk mengidentifikasi signal abnormal yang berhubungan dengan gempabumi kita hitung nilai rata-rata TEC mundur selama 15 hari, dan standar deviasi $\sigma(t)$ sebagai referensi waktu spesifik. Kita turunkan harga normal TEC* sbb:

$$TEC^*(t) = \frac{TEC(t) - TEC_{mean}(t)}{\sigma(t)}$$

Batas atas dan batas bawah (*upper and lower bound*) diperoleh dari suatu perhitungan statistic. Batas atas adalah nilai rata-rata TEC normal ditambah sepertiga jangkauan, sedangkan batas bawah adalah nilai rata-rata TEC normal dikurangi sepertiga jangkauan. Bila kurva merah (nilai TEC observasi) berada diluar kurva batas atas (kurva hitam) dan kurva batas bawah (kurva hitam) maka dikatakan terjadi anomali.

Perhitungan nilai STEC dan dTEC menggunakan perangkat lunak GAMIT sedangkan pemetaan gambar dTEC menggunakan perangkat lunak GMT (Generic Map Tool).



Gambar 7. Diagram alir perhitungan STEC dan dTEC(a), Diagram alir perhitungan VTEC dan distribusi TEC (b).

Diagram alir perhitungan grafik nilai STEC dan dTEC serta VTEC berikut peta distribusi TEC per stasiun dapat dilihat pada Gambar 2 di atas.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 26 Desember 2004

Gempabumi tanggal 26 Desember dengan kekuatan 9,0 SR, kedalaman 30 km, episenter pada 3,29 LU – 95,98 BT merupakan gempabumi dahsyat di Sumatera dan menimbulkan tsunami yang menelan korban jiwa sekitar 400.000 orang. Dari hasil analisis peta dTEC terlihat terjadi anomali (penurunan TEC) pada tanggal 7 Desember 2004 atau 20 hari sebelum gempabumi utama terjadi, penurunan TEC berlanjut pada tanggal 8,9,dan 10 Desember 2004 atau 19, 18, 17 hari sebelum gempabumi terjadi, penurunan TEC ini disebabkan adanya gangguan badai magnetic pada tanggal 5 sampai 7 Desember 2004 dan dapat terlihat pada grafik Dst yang naik secara signifikan, kemudian menuju kondisi normal dan turun lagi menjelang 5 hari sebelum gempabumi terjadi. Penurunan nilai TEC 5 hari sebelum gempabumi terjadi dapat dipandang sebagai tanda awal (prequorsor) saat persiapan

gempabumi, penurunan TEC secara signifikan ini dapat terlihat pada grafik TEC tanggal 21 Desember 2004 yang terlihat turun dibawah harga rata-ratanya pada stasiun ABGS, BSAT, MKMK, LNNG, PBAI, PRKB dan PSKI.

4.2 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 26 Februari 2005

Dari hasil analisis peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) pada tanggal 21 dan 23 Februari 2005 atau 5 hari dan 3 hari sebelum gempa bumi Gempabumi tanggal 26 Februari dengan kekuatan 6,8 SR, kedalaman 36 km, episenter pada 2,90 LU – 95,59 BT. Penurunan nilai TEC ini terus berlanjut sampai 3 hari setelah gempabumi tanggal 26 februari 2005 terjadi. Anomali penurunan nilai TEC ini dapat dipandang sebagai tanda awal (prequorsor) saat persiapan gempabumi karena tidak ada gangguan badai magnetik pada tanggal tersebut yang terlihat pada grafik Dst (dalam keadaan tenang), penurunan TEC terlihat pada grafik TEC tanggal 21 Februari 2005 yang terlihat turun dibawah harga rata-ratanya pada stasiun BSAT dan PSKI.

4.3 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 28 Maret 2005

Pada tanggal 28 Maret 2005 terjadi gempabumi dengan kekuatan 8,6 SR, kedalaman 40 km, episenter pada 2,08 LS – 97,10 BT pusat gempabumi di laut. Dari hasil analisis peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) pada tanggal 24 Maret 2005 atau 4 hari sebelum gempabumi terjadi. Penurunan nilai TEC ini dapat dipandang sebagai tanda awal (prequorsor) saat persiapan gempabumi, penurunan grafik TEC pada tanggal 24 Maret 2005 terlihat di Stasiun PSKI dan BSAT. Dari hasil analisis Dst tidak menunjukkan adanya gangguan badai magnetic pada tanggal tersebut.

4.4 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 30 Maret 2005

Gempabumi yang kedua pada bulan Maret 2005 terjadi pada tanggal 30, dengan kekuatan 5,8 SR, kedalaman 30 km, episenter pada 3,06 LU – 94,79 BT pusat gempabumi

di laut. Dari hasil analisis peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) pada tanggal 27 dan 29 Maret 2005 atau 3 dan 1 hari sebelum gempabumi terjadi. Penurunan nilai TEC ini dapat dipandang sebagai tanda awal (precursor) saat persiapan gempabumi, penurunan grafik TEC terlihat dibawah harga rata-ratanya pada tanggal 27 dan 29 Maret 2005 di stasiun BSAT dan PSKI. Dari hasil analisis Dst terlihat dalam kondisi tenang atau tidak ada badai magnetic pada tanggal tersebut..

4.5 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 3 April 2005

Pada tanggal 3 April 2005 gempabumi dengan kekuatan 6,2 SR, kedalaman 33 km, episenter pada 0,24 LS LU – 97,64 BT pusat gempabumi di laut. Dari peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) 5 hari sebelum gempabumi terjadi Penurunan nilai TEC ini dapat dipandang sebagai tanda awal (precursor) saat persiapan gempabumi, penurunan terlihat pada grafik TEC pada tanggal 30 Maret 2005 di stasiun BSAT dan PSKI.

4.6 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 8 April 2005

Di bulan April 2005 gempabumi terjadi pada tanggal 8, dengan kekuatan 6,0 SR, kedalaman 30 km, episenter pada 0,21 LS – 97,97 BT pusat gempabumi di laut. Dari peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) 6 hari sebelum gempabumi terjadi Penurunan nilai TEC ini dapat dipandang sebagai tanda awal (precursor) saat persiapan gempabumi, penurunan grafik TEC terlihat pada tanggal 3 April 2005 di stasiun BSAT dan PSKI nilai TEC pada batas minimum rata-ratanya.

4.7 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 10 April 2005

Gempabumi kedua pada terjadi tanggal 10 April 2005 dengan kekuatan 6,7 SR, kedalaman 19 km, episenter pada 1,64 LS – 99,60 BT pusat gempabumi di laut. Dari peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) 6 hari sebelum gempabumi terjadi

,Penurunan nilai TEC ini dapat dipandang sebagai tanda awal (precursor) saat persiapan gempabumi, penurunan grafik TEC pada tanggal 4 April 2005 di stasiun BSAT dan PSKI

4.8 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 16 April 2005

Pada tanggal 16 terjadi gempabumi yang ketiga di bulan April 2005 dengan kekuatan 6,1 SR, kedalaman 20 km, episenter pada 1,54 LS – 96,82 BT pusat gempabumi di laut. Dari peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) 5 hari sebelum gempabumi terjadi Penurunan nilai TEC ini dapat dipandang sebagai tanda awal (precursor) saat persiapan gempabumi, penurunan grafik TEC pada tanggal 11 April 2005 di stasiun BSAT dan PSKI

4.9 Anomali TEC saat gempabumi tanggal 28 April 2005

Pada tanggal 28 April 2005 terjadi gempabumi dengan kekuatan 6,0 SR, kedalaman 30 km, episenter pada 2,30 LU – 95,60 BT pusat gempabumi di laut. Dari peta dTEC terlihat terjadi anomaly (penurunan TEC) pada tanggal 17,19 dan 21 yang disebabkan adanya gangguan badai magnetik. Sedangkan penurunan nilai TEC pada tanggal 26 dan 27 April 2008 atau dua hari dan sehari sebelum gempabumi terjadi dapat dipandang sebagai tanda awal (precursor) saat persiapan gempabumi karena kondisi indek Dst dalam keadaan tenang, penurunan grafik TEC terlihat pada tanggal 17,22,24,25,26 dan 27 April 2005 di stasiun BSAT dan PSKI.

4.10 Pembahasan TEC di Ionosphere wilayah Sumatera Desember 2004 sampai dengan April 2005

Dari hasil pengolahan data *GPS-TEC SUGAR* selama Desember 2004 sampai April 2005 menunjukkan bahwa adanya variasi harian TEC di wilayah Sumatera yang dapat dilihat pada Gambar 10. Nilai TEC mencapai puncaknya pada siang hari (± 60 TECu) antara pukul 06.00 – 07.00 UT atau pukul 13.00 – 14.00 WIB dan menurun pada malam

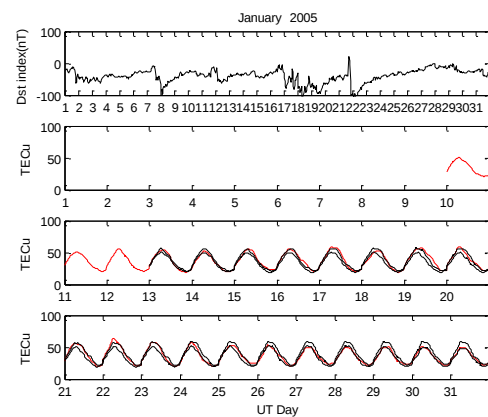
hari (± 20 TECu). Ini disebabkan karena pengaruh matahari dimana pada siang hari sinar ultra violet menyebabkan terjadinya reaksi ion yang meningkatkan konsentrasi elektron di ionosfera, sebaliknya pada malam hari konsentrasi elektron menurun. Variasi harian ini terlihat pada hasil pengolahan PS-TEC dan PG-TEC di semua stasiun GPS-SUGAR. Pada Gambar 10 di stasiun ABGS terlihat setiap satu potong kurva dengan warna yang sama merupakan rekaman TEC dari satu satelit. Setiap stasiun GPS dapat dilintasi 1 sampai 2 kali dalam sehari.

Pada Gambar 12 menunjukkan grafik variasi harian indeks Dst (*Disturbance storm index*) dan variasi TEC sebagai fungsi waktu dari stasiun ABGS dan juga di Stasiun BSAT, LNNG, MKMK, PBAI, PRKB, PSKI pada Desember 2004. Terlihat jelas pada semua stasiun tersebut terdapat anomali Dst sekitar tanggal 5-7 Desember 2004 dengan nilai ± 100 nT. Anomali Dst ini disebabkan adanya gangguan badai magnetik global. Sebagai akibatnya, terjadi penurunan nilai TEC pada tanggal 7, 8, 9 Desember 2004. Setelah itu distribusi nilai TEC normal kembali dan pada tanggal 21 Desember 2004 nilai TEC turun sampai dibawah nilai batas bawah (*lower bound*). Kurva hitam merupakan batas atas (*upper bound*) dan batas bawah, sedangkan kurva merah merupakan nilai TEC hasil observasi. Anomali TEC pada tanggal 21 Desember 2004 boleh jadi dapat dipandang sebagai pertanda awal (*precursory signal*) saat persiapan gempabumi dasyat tanggal 26 Desember 2004 di Aceh dengan magnitude 9,0 SR karena pada tanggal tersebut indeks Dst tidak menunjukkan adanya gangguan badai magnetik (anomali indeks Dst antara 50 – 300 nT dianggap sebagai gangguan badai magnetik). Stasiun MKMK yang berjarak 861 Km (Tabel.2) dari episenter gempabumi masih terlihat merekam anomali TEC, walaupun penurunannya kecil, sedangkan stasiun ABGS yang mempunyai jarak paling dekat dengan episenter gempabumi yaitu 508 km (Tabel 2) terlihat sangat jelas adanya anomali, TEC turun dengan signifikan ± 7 TECu diluar batas bawah atau sekitar 100% dari nilai TEC antara batas atas dan batas bawah.

Tabel 2. Jarak episenter (km) terhadap stasiun GPS

No.	Stasiun	Gempa									
		26-12-04	04-01-05	26-02-05	28-03-05	30-03-05	03-04-05	08-04-05	10-04-05	16-04-05	28-04-05
1	ABGS	508	953	479	341	599	200	163	208	320	371
2	BSAT	852	1267	791	691	914	429	408	175	640	716
3	LNNG	844	1278	799	677	922	451	421	186	641	705
4	MKMK	861	1292	813	695	936	460	432	193	656	722
5	PBAI	464	894	415	301	538	100	64	215	257	326
6	PRKB	849	1267	790	687	913	429	406	170	638	712
7	PSKI	689	1128	650	522	772	316	283	101	491	551

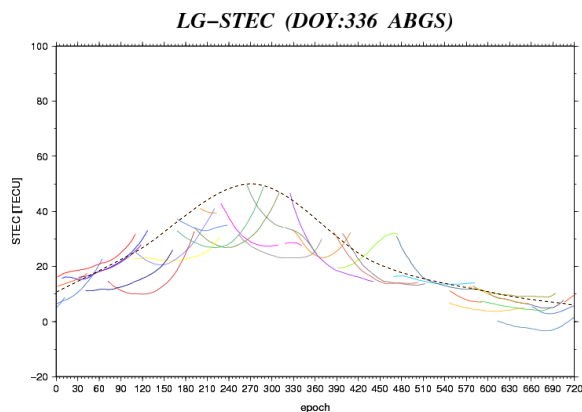
Selanjutnya pada tanggal 8 dan 22 Januari nilai Dst turun sampai – 100 nT disebabkan adanya gangguan badai magnetik.



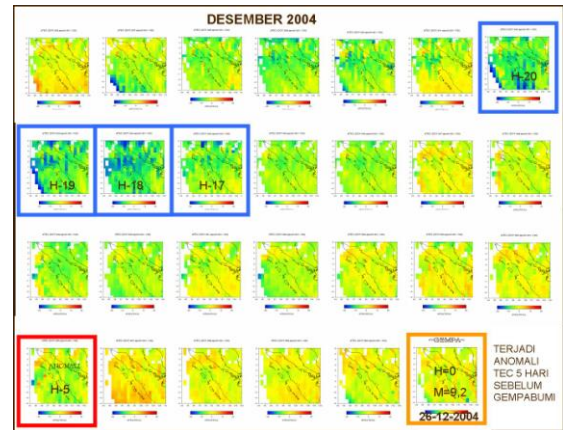
Gambar 8. Grafik TEC dan Dst Stasiun BSAT bulan Januari 2005

Tampak jelas pada stasiun BSAT (Gambar 9) nilai TEC pada tanggal 22 Januari naik melebihi nilai batas atasnya sekitar 100% dari nilai batas atas dan batas bawah. Tidak terlihat adanya penurunan TEC sebelum gempabumi tanggal 1 Januari 2005, kemungkinan hal ini disebabkan karena jarak episenter dengan stasiun GPS terlalu jauh. Jarak Episenter dengan stasiun GPS terdekat 894 Km dan terjauh 1267 Km (Tabel 2). Pada tanggal 15 – 18 Februari 2005 terlihat adanya badai magnetik dimana nilai indeks Dst turun sampai -100 nT. Gangguan badai magnetik ini menyebabkan nilai TEC naik signifikan pada tanggal 14, 15 dan 17 Februari 2004 di stasiun PSKI (Gambar 14). Selanjutnya pada tanggal 6 sampai 9 Maret dan 16 sampai 18 Maret 2005 juga terjadi gangguan magnetik hingga -90 nT yang menyebabkan nilai TEC melebihi batas atas di stasiun PSKI (Gambar 16), sedangkan pada bulan April terjadi dua kali gangguan badai magnetik yaitu tanggal 5 sampai 7 dan tanggal 10 April 2005 (Gambar 18). Gangguan magnetik ini menyebabkan nilai TEC naik diluar batas atas.

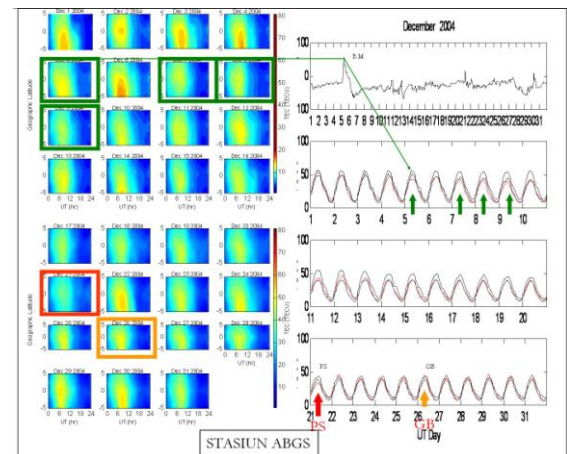
Pada periode tenang (tanpa gangguan magnetik) bulan Desember 2004 sampai April 2005 dapat diidentifikasi anomali TEC sebelum terjadi gempa bumi (. Dari 10 gempa bumi dengan $M \geq 6.0$ dapat diidentifikasi 9 gempa bumi atau 90 % ditandai munculnya anomali TEC (penurunan nilai TEC) 6 hari sampai 1 hari sebelum gempa bumi terjadi. Munculnya anomali TEC ini bisa dipandang sebagai pertanda awal (*precursory signal*) sebagai persiapan pelepasan energi akan terjadinya gempa bumi . Hasil penelitian ini hampir sama dengan yang dilakukan di Taiwan oleh Liu et. al (2004) dimana dari 20 gempa bumi dengan $M \geq 6.0$ yang mereka diteliti 16 gempa bumi diantaranya muncul anomali TEC atau 80%. Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa fenomena anomali TEC mempunyai peluang untuk digunakan sebagai salah satu parameter prediksi gempa bumi jangka pendek dimasa mendatang.



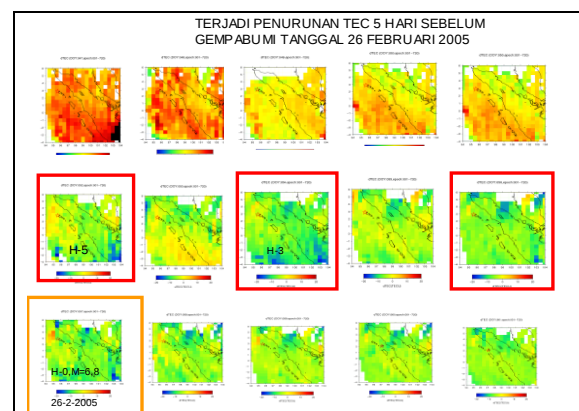
Gambar 9. Contoh Hasil Pengolahan LG-STECH hari ke 336 Tahun 2004 (tanggal 1 Desember 2004)



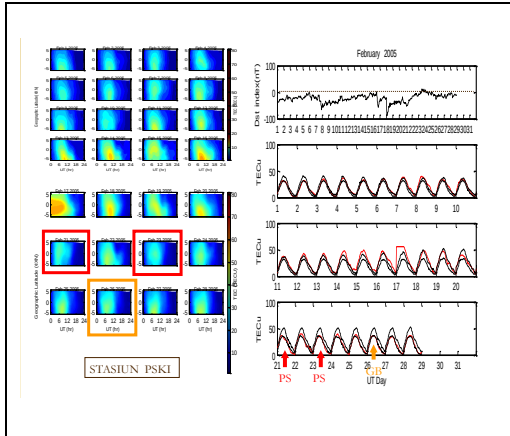
Gambar 10. Analisis spatial kondisi dTEC bulan Desember 2004



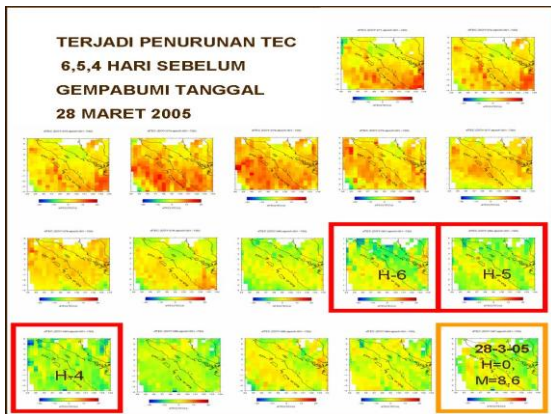
Gambar 11. Hasil Analisis TEC dan Dst Bulan Desember 2004 pada Stasiun ABGS



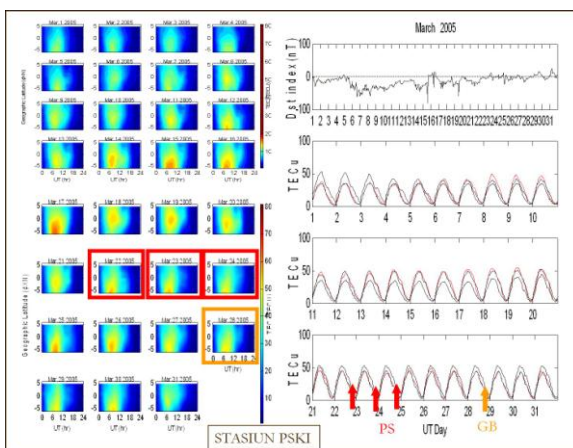
Gambar 12. Analisis spatial kondisi dTEC bulan Februari 2005



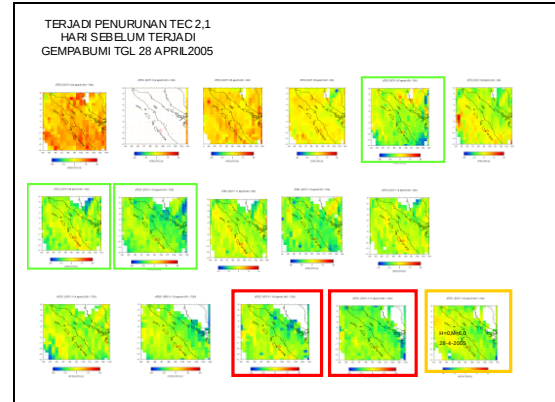
Gambar 13. Hasil Analisis TEC dan Dst Bulan Februari 2005 pada Stasiun PSKI



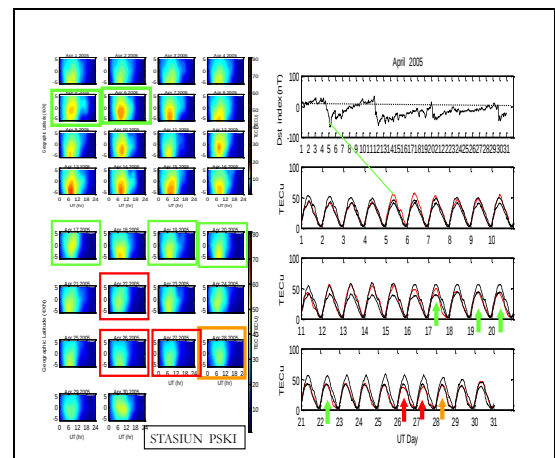
Gambar 14. Analisis spatial kondisi dTEC bulan Maret 2005



Gambar 15. Hasil Analisis TEC dan Dst Bulan Maret 2005 pada Stasiun PSKI



Gambar 16. Analisis spatial kondisi dTEC bulan April 2005



Gambar 17. Hasil Analisis TEC dan Dst Bulan April 2005 pada Stasiun PSKI

Hasil selengkapnya hasil pengolahan dapat dilihat pada table dibawah ini.

EQ	YY	MM	DD	HH-MIN-SEC (UTC)	EPIC	DEPT (KM)	MAG	P-EQ
1	2004	12	26	00 58 53,45	3,29 – 95,98	30	9,0	-5
2	2005	01	01	06 25 44,8	5,09 – 92,30	12	6,7	x
3	2005	02	26	12 56 52,6	2,90 – 95,59	36	6,8	-5,-3
4	2005	03	28	16 09 36,51	2,08 – 97,10	40	8,6	-6,-5,-4
5	2005	03	30	16 19 32,66	3,06 – 94,79	30	6,0	-3,-1
6	2005	04	03	00 59 15,1	-0,24-97,64	33	6,2	-3
7	2005	04	08	05 48 36,0	-0,21-97,97	30	6,0	-6,-5
8	2005	04	10	10 29 11,2	-1,64-99,60	19	6,7	-6
9	2005	04	16	16 37 43,47	1,54-96,82	20	6,1	-5
10	2005	04	28	14 07 35,6	2,30-96,82	30	6,0	-2,-1

5. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisis VTEC, STEC, dTEC, grafik TEC dan indeks Dst selama bulan Desember 2004 sampai bulan

April 2005 di wilayah Sumatera (SUGAR), maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Terjadi variasi TEC harian, dimana nilai TEC maksimum dicapai pada siang hari sekitar jam 13.00 LT dan nilai TEC minimum terjadi pada malam hari sekitar 05.00 LT.
2. Nilai TEC menurun atau bertambah (terjadi anomali) saat ada gangguan badai magnetic global. Badai magnetic global merambat melalui gelombang elektromagnetik dan pada saat melewati lapisan ionosfera maka nilai TEC akan terganggu.
3. Anomali (penurunan) TEC terjadi 1 sampai 6 hari sebelum terjadi gempa bumi,
4. Dari 10 gempa bumi dengan $M \geq 6,0$ SR yang terjadi di Sumatera selama bulan Desember 2004 sampai April 2005, terdapat 9 gempa bumi yang sebelum terjadinya ditandai dengan penurunan (anomali) TEC yang dapat dipandang sebagai pertanda awal (*prequorsory signal*) saat persiapan gempa.

6. PUSTAKA

- Bishop, G.J., Mazzella, A.J., Holland, E., and Rao, S., 1996. Algorithms that use the ionosphere to control GPS errors, in *Proceedings of the IEEE 1996 Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*, IEEE Press, Piscataway, N.J., pp. 145-152.
- Bishop, G.J., Coco, D.S., Lunt, N., Coker, C., Mazzella, A.J., and Kersley, L., 1997. Application of SCORE to extract protonospheric electron content from GPS/NNSS observations, in *Proceedings of ION GPS '97*, Inst. of Navig., Alexandria, Va., pp. 207-216.
- Chapman, S., The electric current-systems of magnetic storms, *Terr. Mag. Atmos. Phys.*, 40, 349, 1935.
- Chapman, S., The morphology of magnetic storms: an extension of the analysis of Ds, the disturbance local-time inequality, *Annali di Geofisica*, 5, 481, 1952.
- Coco, D. S., C. Coker, S. R. Dahlke, and J. R. Clynych, 1991. Variability of GPS satellite differential group delay biases, *IEEE Trans. Aeros. and Electr. Syst.*, AES-27, 931-938.
- Davies, K., 1990. *Ionospheric Radio*, Peter Peregrinus Ltd., 580pp.
- Hayakawa, M., O.A. Molchanov, N. Shima, A.V. Shvets and N. Yamamoto., 2002. Wavelet analysis of disturbances in subionospheric VLF propagation correlated with earthquakes, in "Seismo Electromagnetics (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling)", Ed. By M. Hayakawa and O.A. Molchanov, TERRAPUB, Tokyo, 223-228.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., 1997, *GPS - Theory and Practice*, 4th revised edition, Springer, Wien - New York.
- Kleusberg, A. and Teunissen, P. (eds), 1996. *GPS for Geodesy*, International School, Delft, The Netherlands, 26 March - 1 April 1995, Springer Verlag, New York.
- Komjathy, A., 1997. *Global Ionospheric Total Electron Mapping Using the Global Positioning System*, PhD Thesis, The Univ. of New Brunswick, 248 pp.
- Kopytenko, Y.A., Matishvili, T.G., Voronov, P.M., Kopytenko, E.A., and Molchanov, O.A., 1993. Detection of ultra-low frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on magnetic pulsations data at Dusheti.
- Langley, R.B., 1997. NAVSTAR GPS Internet Connections, <http://gauss.gge.unh.ca/gps.internet.services.html>.
- Lanyi, G.E. and Roth, T., 1988. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations, *Radio Sci.*, 23 (4), 483-492.
- Liu, J.Y., Chen, Y.I., Pulinets, S.A., Tsai, Y.B., and Chuo, Y.J., 2000. Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes, *Geoph. Res. Lett.*, 27(19), 3113-3116.
- Liu, J.Y., Chuo, Y.J., Shan, S.J., Tsai, Y.B., Chen, Y.I., Pulinets, S.A., and Yu, S.B., 2004. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, *Ann. Geoph.*, 22, 1585-1593.

- Mc. Namara, L.F., 1994. *Radio Amateurs Guide to the Ionosphere*, Krieger Publ. Comp., Malabar, FL.
- Rothacher, M., and Mervart, L. 1996. *Bernese GPS Software Ver. 4.0*, Astronomical Institute, University of Bern.
- Sardon, E., Rius, A., and Zarraoa, N., 1994. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations, *Radio Sci.*, 29 (3), 577-586.
- Sugiura, M., Hourly values of equatorial Dst for the IGY, *Ann. Int. Geophys. Year*, 35, 9, Pergamon Press, Oxford, 1964.
- Sugiura, M., Quiet time magnetospheric field depression at 2.3-3.6 Re, *J. Geophys. Res.*, 78, 3182, 1973.
- Sugiura, M., and S. Chapman, The average morphology of geomagnetic storms with sudden commencement, *Abandl. Akad. Wiss. Göttingen Math. Phys. Kl., Sonderheft Nr.4*, Göttingen, 1960.