
**PERBANDINGAN PERUBAHAN TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) IONOSFER
AKIBAT GEMPA BUMI DAN LETUSAN GUNUNG API
(Studi Kasus : Gempa Bumi 2 Maret 2016 dan Gunung Merapi 2010)**

Mokhamad Nur Cahyadi¹, Febrian Adi Saputra

¹Departemen Teknik Geomatika FTSP-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111
e-mail : cahyadi@geodesy.its.ac.id¹

Abstrak

Pada saat gempa bumi atau letusan gunung api terjadi, ada tiga jenis gelombang yang dihasilkan, yaitu: (1) Gelombang *Acoustic* (kecepatan 1 km/s) yang dihasilkan dekat dari pusat gempa bumi, gelombang tersebut bergerak naik ke arah vertikal hingga ketinggian lapisan F di ionosfer dalam waktu 10 menit atau lebih. (2) Gelombang *gravity* (kecepatan 0.3 km/s) yang dihasilkan dari gelombang tsunami akibat dari gempa bumi, dan (3) Gelombang *Rayleigh* (kecepatan 4 km/s) yang dihasilkan dari epicenter dan bergerak secara bersamaan baik horisontal-vertikal, gelombang ini merambat menjauh mengelilingi bumi dari pusat gempa bumi. Gelombang-gelombang ini membuat gangguan di lapisan ionosfer yaitu pada kerapatan elektron. Kerapatan elektron pada lapisan ionosfer ini disebut dengan Total Elektron Content (TEC). Fenomena ini terdeteksi sebagai CIDs (*Coseismic Ionosphere Disturbances*), yaitu fluktuasi TEC yang terjadi 15 menit hingga 30 menit setelah gempa terjadi. Di sisi lain, satelit GNSS beredar pada ketinggian 20.000 km dari permukaan bumi dengan memancarkan sinyal melewati lapisan ionosfer pada ketinggian 350 km. Sinyal tersebut mengalami *delay* ketika melewati lapisan ionosfer, berupa arah, kecepatan, dan kekuatan. Di sisi lain, dengan mengamati *delay* ini maka gangguan ionosfer yang disebabkan oleh gelombang *acoustic* dapat dianalisa dan diamati. Gangguan TEC yang disebabkan oleh gunung api dan gempa bumi mempunyai karakter yang berbeda, perbedaan karakteristik gangguan ionosfer terletak pada besaran amplitude, frekwensi gelombang dan lama gangguan setelah terjadinya letusan gunung merapi maupun gempa bumi. Amplitude pada letusan gunung api sebesardan gempa bumi sebesar...., demikian pula durasi terjadinya gangguan pada letusan gunung api terjadi pada....menit setelah meletus, sedangkan pada gempa bumi terjadi pada ...menit setelah terjadinya gempa bumi. Dalam penelitian ini dilakukan pengamatan perubahan menggunakan data GNSS dari stasiun CORS milik Badan Informasi Geospasial (BIG) yang berada di daerah Sumatra, yaitu stasiun CAIR, CBKT, CPAR, CPDG, dan CSEL. Dan di daerah Jawa Tengah yaitu....., juga beberapa stasiun Sumatra GPS Array yang dimiliki oleh LIPI dan ...Hasil dari pengolahan data menunjukkan anomali TEC muncul pada waktu 11 – 15 menit setelah gempa dengan besar anomali 1,5 – 3,5 TECU yang direkam oleh satelit GPS nomor 17 dan 0,5 – 1,7 TECU yang direkam oleh satelit Glonass nomor 14.

Kata kunci — Gempa bumi, GNSS, Ionosfer, *Total Electron Content*

PENDAHULUAN

Kepulauan di Indonesia terletak pada tiga batas lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Indo-Australia, Pasifik, dan Eurasia, membentang dari Sumatera bagian barat sampai Papua bagian timur. Lajur subduksi Sumatra merupakan lajur tempat Lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah Lempeng Eurasia. Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dengan kecepatan relatif terhadap lempeng Eurasia sebesar 7 cm/tahun. Akibat dari pergerakan lempeng tersebut maka Indonesia sberada pada daerah *Ring of Fire*, yaitu daerah cincin api atau yang sering mengalami

gempa bumi dan letusan gunung berapi. Pergesekan pada lajur Benioff pada lempeng yang menunjam menyebabkan aktivitas pergerakan lempeng sepanjang Pulau Sumatra yang muncul sebagai deretan daerah gempa bumi dan gunung api.

Untuk memantau letusan gunung api dan gempa bumi ini, studi teknik geodesi/geomatika dilakukan dengan menggunakan teknologi GNSS yang digunakan untuk monitoring pergerakan lempeng bumi dan efek yang terjadi di lapisan ionosfer dengan memanfaatkan satelit GNSS, dengan memanfaatkan TEC. Pada dasarnya perhitungan TEC akibat gempa dapat

diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu *pre-seismic* dan *Coseismic Ionospheric Disturbance (CID)*. Fenomena *pre-seismic anomaly* ini berlangsung 1-2 minggu hingga 1 jam sebelum terjadinya gempa sedangkan CID terjadi 15 menit hingga 30 menit setelah gempa/gunung api terjadi.

Gempa bumi dan letusan gunung api memancarkan tiga gelombang, yaitu : *Acoustic*, *Gravity*, dan *Reyligh wave*. Gelombang *Acoustic* (kecepatan 1 km/s) dihasilkan dari pusat gempa bumi, kemudian bergerak ke arah vertikal di ketinggian lapisan F ionosfer dalam waktu 15 menit atau lebih. Gelombang *Gravity* (kecepatan 0.3 km/s) dihasilkan dari gelombang tsunami akibat dari gempa bumi yang besar, dan Gelombang *Rayleigh* (kecepatan 4 km/s) yang bergerak secara horisontal dan vertikal secara bersamaan. Gelombang *Acoustic* yang dihasilkan secara tegak lurus dari kerak bumi selama gempa merambat ke ionosfer dan menyebabkan adanya fluktuasi pada elektron yang disebut dengan CIDs (*Coseismic Ionosphere Disturbances*). Kerapatan ionosfer pada lapisan ionosfer ini disebut dengan Total Elektron Content (TEC). Nilai TEC biasanya dinyatakan dalam TECU, dimana 1 TECU sama dengan 10^{16} elektron/m². Semakin besar magnitudo gempa yang terjadi maka gangguan yang akan dihasilkan pada atmosfer akan besar juga. Hal ini disebabkan karena besarnya energi tersebut, yang kemudian membuat densitas elektron yang ada di ionosfer berubah

Penelitian ionosfer pada umumnya hanya meneliti gangguan ionosfer pada gempa bumi maupun letusan gunung api, namun belum pernah dilakukan analisa secara simultan baik gunung api maupun dengan pengolahan data GNSS dari stasiun milik Badan Informasi Geospasial (BIG) yang berada di daerah Sumatra.

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan pada stasiun pengamatan CORS-GPS milik BIG yang dekat lokasi gempa dengan epicenter 5° 9' 36" Lintang Selatan dan 94° 3' Bujur Timur. Stasiun pengamatan tersebut adalah CAIR, CBKT, CPAR, CPDG, dan CSEL dengan detail posisi yang dijelaskan pada gambar 1

dan Tabel 1. Pengamatan dilakukan dua hari sebelum, saat terjadi, dan dua hari setelah gempa bumi pada tanggal 2 Maret 2016.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Tabel 1. Stasiun CORS-GPS untuk Penelitian

No.	Nama Stasiun	Posisi
1	CAIR	0° 12' 28.79123" N, 99° 23' 40.38657" E
2	CPAR	0° 37' 30.45553" S, 100° 7' 55.23985" E
3	CBKT	0° 18' 32.21234" S, 100° 22' 15.93776" E
4	CPDG	0° 57' 14.33568" S, 100° 21' 47.20308" E
5	CSEL	1° 47' 53.27004" S, 100° 50' 20.93676" E

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Data *rinex observasi* (pada tanggal 29 Februari 2016, 1-4 Maret 2016, atau 60 doy hingga 64 doy) dari stasiun GPS yang diperoleh dari BIG
- Data Navigasi Satelit, diunduh dari: (<http://garner.ucsd.edu/pub/nav>)
- Data program *rdnx.f* dan *rdph.f*, diunduh dari: (<https://ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>)

Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yakni:

- Perangkat Keras (Hardware), terdiri dari Laptop Lenovo B40-45 dengan spesifikasi sistem 64-bit, prosesor AMD A8-6410 APU with AMD Radeon R5 Graphics, dan RAM 6GB.
- Perangkat Lunak (Software)
 - Sistem Operasi *Windows 10* dan *Linux Ubuntu 14.04 LTS*.
 - Bahasa Pemrograman Fortran.

- MATLAB R2014a
- Microsoft Office (Ms. Word, Ms. Excel, dan Ms. Visio).

Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dalam penelitian ini adalah:

a. Pengolahan Data Rinex

Data Observasi GNSS didapatkan data dari instansi Badan Informasi Geospasial (BIG) dalam bentuk RINEX yaitu data pada tanggal 29 Februari, 1 – 4 Maret 2016 (atau 60 doy hingga 64 doy). Sedangkan untuk data navigasi didapatkan dari website *Sopac*, dengan alamat <http://garner.ucsd.edu/pub/nav> lalu mendownload data doy yang sama dengan data observasinya. Data navigasi yang didownload adalah broadcast ephemeris orbit satelit (".n" untuk GPS dan ".g" untuk Glonass). Data ini digunakan untuk menentukan posisi orbit satelit dengan menggunakan elemen-elemen keplerian yang akan diproyeksikan ke bumi.

b. Pengolahan Data GNSS

Melakukan pengolahan data *RINEX* Observasi menggunakan program *rdrnx.f* untuk mendapatkan waktu dan besar nilai STEC di setiap stasiun pengamatan dan data *RINEX* Navigasi diolah menggunakan program *rdeph.f* untuk mendapatkan posisi orbit satelit yang melintas pada hari pengamatan. Pengolahan data ini dijalankan pada aplikasi Fortran pada sistem operasi Ubuntu 14.04 LTS

c. Perhitungan Anomali TEC

Setelah didapatkan nilai STEC, kemudian dilakukan perhitungan untuk mengetahui perubahan nilai (VTEC) *Vertical Total Electron Content* secara relative, yaitu dengan mengurangkan nilai STEC yang telah didapat dengan perataannya/polynomial pangkat enam. Anomali TEC didapatkan bila ada simpangan dari data satu periode bernilai lebih besar dari median-nya. Jika data tersebut terdapat anomali TEC maka dinyatakan ada gangguan pada lapisan ionosfer, sehingga dilanjutkan dengan pengeplotan hasil anomali tersebut pada aplikasi Matlab untuk menampilkan visualisasi grafik perubahan TEC tersebut.

d. Penentuan Posisi IPPP dan SIP

Posisi orbit satelit yang telah didapatkan dari pengolahan menggunakan program *rdeph.f*

pada aplikasi Fortran kemudian dilanjutkan pengolahan menentukan posisi *Ionospheric Pierce Point* (IPP) dan *Sub-Ionospheric Point* (SIP) untuk mengetahui posisi orbit satelit yang merekam TEC saat gempa terjadi. Pengolahan ini dilakukan menggunakan aplikasi Matlab yang hasilnya adalah plotting posisi SIP di permukaan bumi.

e. Pengeplotan pada Matlab

Pengeplotan ini adalah untuk memvisualisasikan hasil pengolahan data, yang pertama yaitu nilai anomali TEC di setiap stasiun pengamatan, dan yang kedua adalah posisi orbit satelit GNSS yang melintas saat gempa terjadi serta SIP di permukaan bumi. Pengeplotan ini dilakukan menggunakan aplikasi Matlab R2014A yang bekerja pada sistem operasi Windows. Setelah didapatkan gambar hasil pengeplotan, kemudian dilanjutkan analisa besar nilai anomali TEC pada ionosfer dan dihubungkan dengan posisi SIP satelit yang melintas pada saat gempa terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengolahan Rinex GPS dengan Fortran

Data Observasi didapatkan dari BIG dalam bentuk RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), kemudian diolah menggunakan program *rdrnx.f*, sedangkan data Navigasi didapatkan dari <ftp://garner.ucsd.edu/pub/products> kemudian diolah menggunakan program *rdeph.f* yang dijalankan dengan software Fortran pada Sistem Operasi Linux Ubuntu.

Hasil pengolahan data observasi adalah data waktu (UTC) dan STEC (TECU) dengan interval waktu 30 detik pada satelit yang terekam di setiap stasiun pengamatan. Sedangkan hasil pengolahan data navigasi (*broadcast ephemeris*) adalah waktu (UTC) dengan interval 3 menit dan posisi orbit satelit.

B. Lintasan Satelit

Gempa di Sumatra Barat terjadi pada tanggal 2 Maret 2016 pukul 19.49 WIB atau 12.49 UT dimana pusat gempa berada di sekitar 682km barat daya Mentawai tepatnya pada koordinat 5° 9' 36" LS dan 94° 3' BT dengan magnitudo sebesar 8,3SR pada kedalaman sekitar 10km.

Pada masa-masa gempa tersebut, kami mengamati gangguan ionosfer menggunakan data

Observasi GPS-CORS dari BIG (Badan Informasi Geospasial) yang berada di Pulau Sumatra dan dekat dengan lokasi gempa. Pengamatan ini dilakukan selama kurun waktu lima hari yaitu dua hari sebelum gempa, saat terjadinya gempa, dan dua hari setelah terjadinya gempa. Tujuan dari pengamatan di beberapa stasiun GPS-CORS tersebut dilakukan untuk mendapatkan nilai perubahan TEC yang diakibatkan dari gempa.

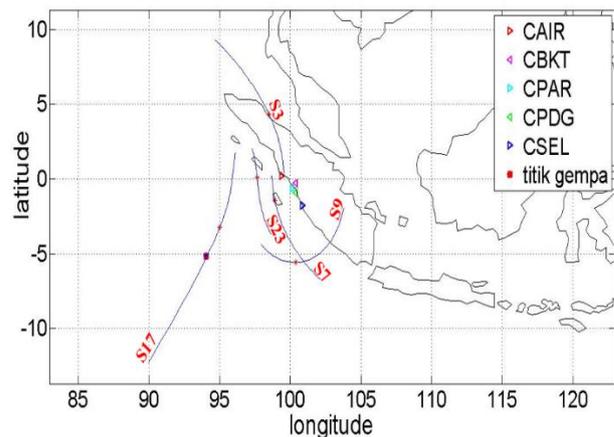
Gempa bumi dapat menimbulkan dorongan energi gelombang *acoustic*, *gravity* dan *rayleigh*, serta momentum secara tiba – tiba yang akan menghasilkan gangguan pada lapisan atmosfer yang dapat menyebabkan terjadinya fluktuasi atau variasi TEC pada lapisan ionosfer. Semakin besar tekanan yang terjadi maka gangguan yang akan dihasilkan pada atmosfer akan besar juga. Hal ini disebabkan karena besarnya energi tersebut dapat mengganggu densitas elektron yang ada di ionosfer hingga radius 400 km dari pusat letusan.

Waktu delay pada saat di lapisan ionosfer dapat dihitung dengan mengkombinasikan dua frekuensi *reciver GNSS*, untuk memperoleh nilai *Total Electron Content* (TEC). Dengan menghitung modulasi sinyal pada gelombang pembawa, $f_1 = 1575.42\text{MHz}$ dan $f_2 = 1227.6\text{MHz}$. Setelah mengkombinasikan nilai *pseudorange* dan *carrier phase* dual frekuensi, TEC dapat dihitung dengan rumus berikut ini:

$$\delta\text{STEC} = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40.28 \cdot (f_2^2 - f_1^2)} \cdot (\delta L_1 - \delta L_2)$$

Dimana δSTEC , δL_1 , δL_2 adalah selisih nilai STEC, jarak fase L_1 dan L_2 antara dua epok yang berurutan.

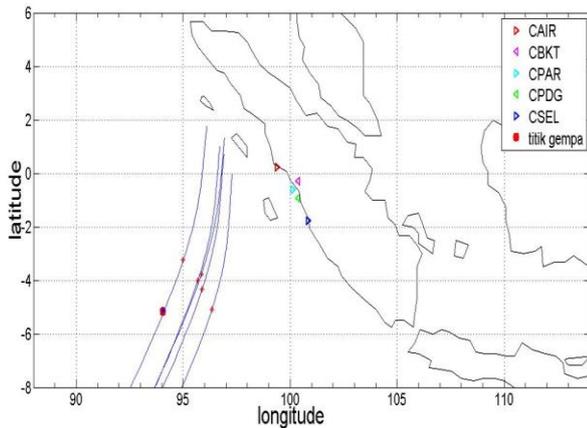
Dari pengamatan di lima stasiun yang berada di sekitar gempa bumi menggunakan satelit GPS selama dua hari sebelum, saat terjadi, dan dua hari sesudah terjadinya gempa dihasilkan bahwa anomali TEC terdapat pada hari saat terjadinya gempa. Hal ini bisa dilihat dengan visualisasi orbit satelit yang melintas di daerah sekitar gempa yang akan ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Orbit Satelit Saat Gempa Terjadi Pada Tanggal 2 Maret 2016 Pukul 11.00-14.00UT.

Gambar 2 diatas adalah hasil dari proyeksi lintasan satelit GPS saat terjadinya gempa, dapat dilihat bahwa satelit yang mengorbit saat gempa terjadi adalah satelit nomor 3, 7, 9, 17, dan 23. Tetapi hasil dari perhitungan nilai anomali TEC menunjukkan bahwa sinyal satelit yang dapat merekam fluktuasi TEC di lapisan ionosfer adalah satelit nomor 17, hal ini dikarenakan orbit satelit yang paling dekat dengan pusat gempa adalah satelit nomor 17. Data anomali TEC tersebut juga muncul di semua stasiun pengamatan, yaitu stasiun CAIR, CBKT, CPAR, CPDG, dan CSEL yang merupakan stasiun CORS-GPS milik BIG.

Perambatan sinyal satelit GPS dengan ketinggian ~ 20.000 km dari permukaan bumi disebut dengan *line of sight*. Perpotongan LOS dengan ionosfer pada keadaan data (300 km) disebut dengan IPP (*Ionospheric Pierce Point*). Ketinggian tersebut termasuk dalam lapisan F-layer, dimana arah pergerakan satelit dapat digambarkan. Dan proyeksi IPP ke atas permukaan tanah disebut *Sub-Ionospheric Point* (SIP). SIP ini sangatlah penting dianalisa ketika akan melakukan perhitungan TEC.

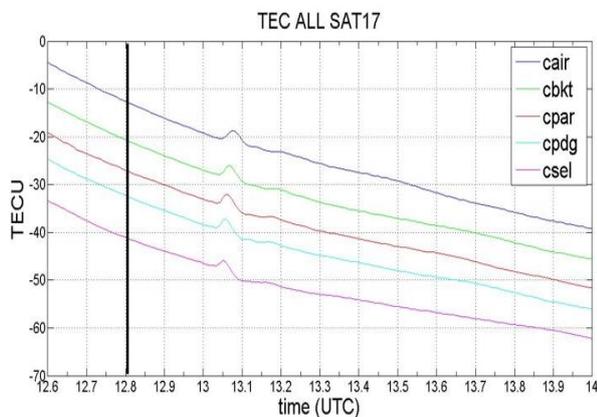


Gambar 3. Orbit Satelit GPS Nomor 17 yang Dipetakan Melalui SIP di Semua Stasiun Pukul 11.00-14.00UT.

Garis biru merupakan alur proyeksi lintasan satelit, simbol bulat merah menunjukkan epicenter dan titik merah menandakan waktu gempa terjadi (IPP *point*). Simbol segitiga adalah stasiun CORS-GPS milik BIG yang dijelaskan dalam legenda. Pada saat terjadi gempa satelit nomor 17 melintas di sebelah barat Pulau Sumatra.

C. Plotting Perubahan TEC

Hasil plotting anomali TEC adalah sebagai berikut:



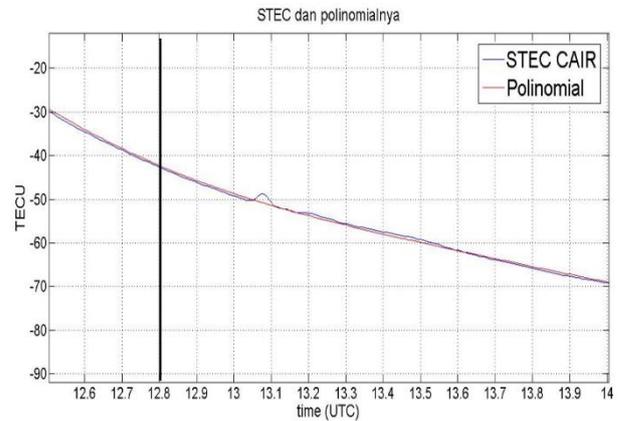
Gambar 4. STEC Satelit GPS Nomor 17 di Semua Stasiun Pengamatan pada Tanggal 2 Maret 2016

Pada gambar 5 diatas menunjukkan bahwa gempa terjadi pada pukul 12:49 UT (garis hitam vertikal). Berdasarkan grafik diatas nampak adanya fluktuasi di lapisan ionosfer di semua stasiun pengamatan dari sinyal yang dibawa oleh satelit nomor 17. Fluktuasi tersebut muncul sekitar 15 menit setelah gempa terjadi.

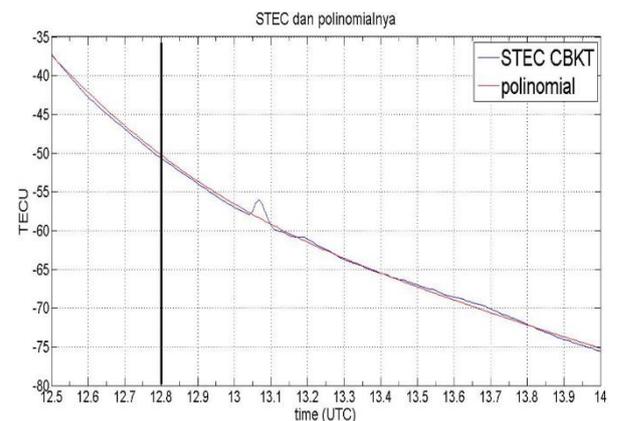
Setelah diketahui nomor satelit yang dapat menampilkan fluktuasi saat terjadinya gempa, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai VTEC, yaitu dengan mengurangi nilai STEC yang telah

didapat dengan perataannya/polynomial pangkat enam.

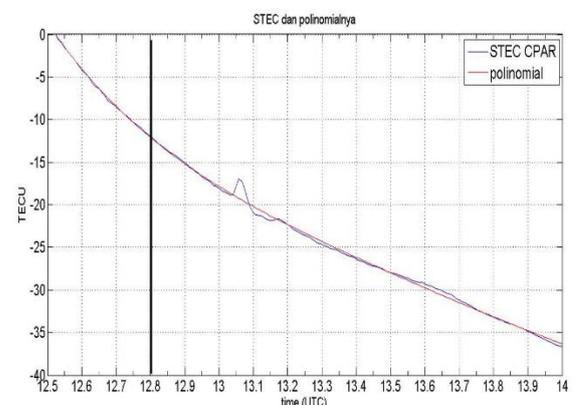
Berikut ini adalah hasil plotting dari perhitungan perataan polinomial pangkat enam dari STEC di semua stasiun.



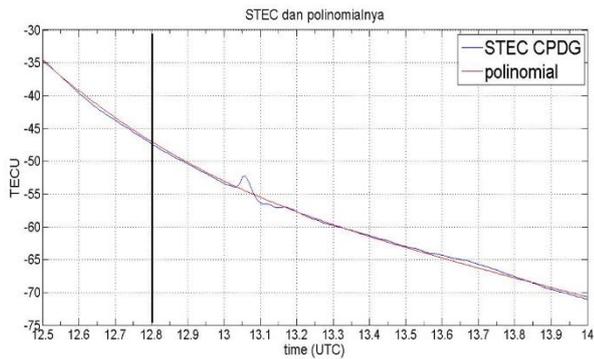
Gambar 5. STEC dengan Polinomial Pangkat Enam di Stasiun CAIR



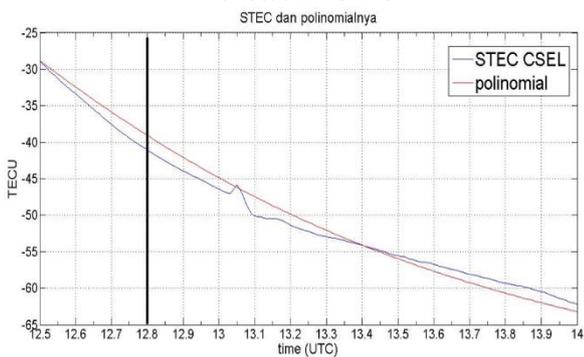
Gambar 6. STEC dengan Polinomial Pangkat Enam di Stasiun CBKT



Gambar 7. STEC dengan Polinomial Pangkat Enam di Stasiun CPAR



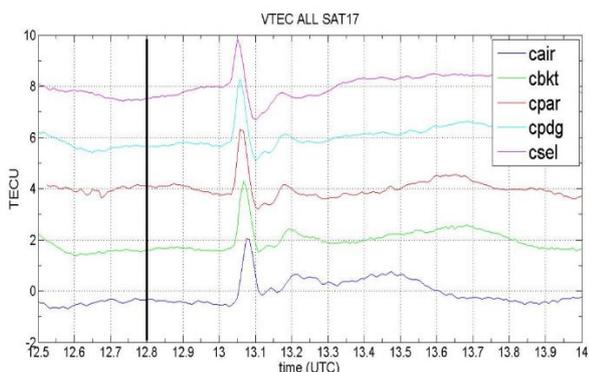
Gambar 8. STEC dengan Polinomial Pangkat Enam di Stasiun CPDG



Gambar 9. STEC dengan Polinomial Pangkat Enam di Stasiun CSEL

Gambar 5 s/d 9 adalah hasil plotting nilai STEC dari satelit GPS nomor 17 dengan data polinomial pangkat enamnya yang terdapat di setiap stasiun pengamatan. Garis hitam vertikal menunjukkan waktu terjadinya gempa, yaitu pukul 12:49 UT yang dalam grafik dinyatakan dalam satuan desimal. Nilai STEC digambarkan dengan garis warna merah, dan untuk nilai polinomial pangkat enam digambarkan dengan garis warna biru. Selisih antara nilai STEC dan polinomial pangkat enam tersebut nantinya digunakan untuk menghitung nilai VTEC yang ada di ionosfer.

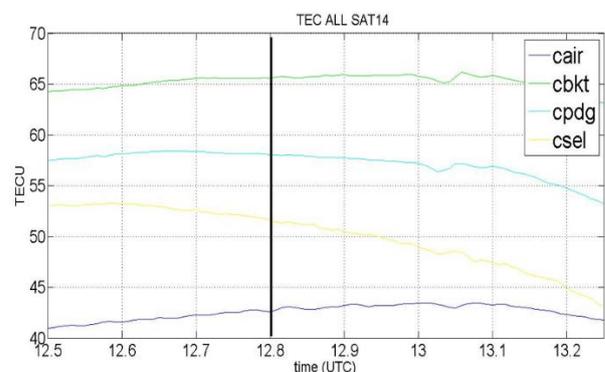
Berikut adalah hasil plotting VTEC dari semua stasiun:



Gambar 10. Nilai VTEC Satelit GPS Nomor 17 di Semua Stasiun Saat Gempa Tanggal 2 Maret 2016.

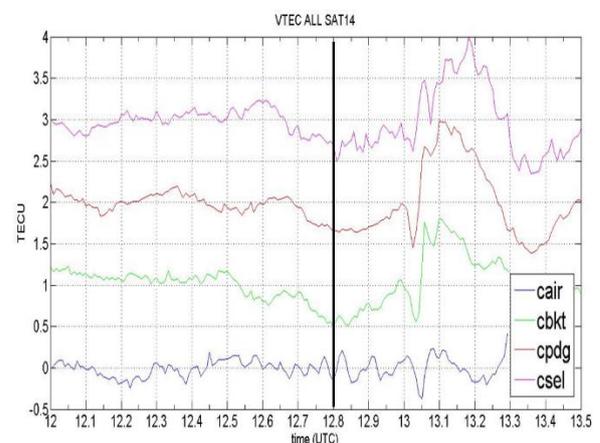
Dari gambar 11 dapat dilihat nilai anomali TEC satelit GPS di setiap stasiun pengamatan, nilai anomali tersebut berkisar antara 2 – 3,5 TECU. Dengan nilai di masing-masing stasiun pengamatan yaitu, CAIR: 2 TECU; CBKT: 2,3 TECU; CPAR: 2,5 TECU; CPDG: 3 TECU; CSEL: 3,5 TECU. Perbedaan besarnya anomali TEC yang terekam tersebut bergantung pada lokasi receiver CORS-GPS. Nilai yang menunjukkan anomali TEC terbesar adalah pada stasiun receiver yang terletak lebih dekat dengan lokasi gempa, yaitu stasiun CSEL yang mencapai 3,5TECU.

Dalam penelitian ini juga dihitung nilai anomali TEC satelit Glonass, hasilnya adalah sebagai berikut:



Gambar 11. STEC Satelit Glonass Nomor 14 di Semua Stasiun Pengamatan pada Tanggal 2 Maret 2016

Gambar 11 diatas menunjukkan bahwa fluktuasi TEC terjadi mulai 11 menit setelah gempa, sama seperti fluktuasi TEC yang terdapat pada pengamatan menggunakan satelit GPS. Kemudian dilanjutkan menghitung nilai anomali TEC.



Gambar12. Nilai VTEC Satelit Glonass Nomor 14 di Semua Stasiun Saat Gempa Tanggal 2 Maret 2016.

Dari gambar 13 dapat dilihat nilai anomali TEC satelit Glonass di setiap stasiun pengamatan, nilai anomali tersebut berkisar antara 0,5 – 1,7 TECU. Dengan nilai di masing-masing stasiun pengamatan yaitu, CAIR: 0,5TECU; CBKT: 1,5 TECU; CPDG: 1,5 TECU; CSEL: 1,7 TECU. Perbedaan besarnya anomali TEC yang terekam tersebut bergantung pada lokasi receiver. Nilai yang menunjukkan anomali TEC terbesar adalah di stasiun receiver yang terletak lebih dekat dengan lokasi gempa, yaitu stasiun CSEL yang mencapai 1,7TECU.

PENUTUP

Berdasarkan pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan, kesimpulan yang penulis dapatkan adalah sebagai berikut:

1. Perubahan yang terjadi di ionosfer akibat gempa bumi Sumatra Barat tanggal 2 Maret 2016 adalah terdapat anomali TEC dari pengolahan data satelit GPS dan Glonass, dimana anomali tersebut muncul 11 sampai 15 menit setelah gempa.
2. Besar perubahan TEC yang di rekam satelit GNSS di setiap stasiun pengamatan pada saat gempa bumi adalah:
 - A. Dari satelit GPS Nomor 17
 - CAIR : 2 TECU
 - CBKT : 2,3 TECU
 - CPAR : 2,5 TECU
 - CPDG : 3 TECU
 - CSEL : 3,5 TECU
 - B. Dari satelit Glonass Nomor 14
 - CAIR : 0,5 TECU
 - CBKT : 1,5 TECU
 - CPDG : 1,5 TECU
 - CSEL : 1,7 TECU

DAFTAR PUSTAKA

- Handayani, L., Permana, H., & Gaffar, E. Z. 2012, Segmentasi Tektonik Aktif pada Lempeng Mikro Sumatra Bagian Utara (Aceh) Ditinjau dari Sebaran Episenter Gempa Bumi. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Vol.3. No.2:71-77
- Subakti, Hendri. 2008. Analisis Variasi GPS-TEC yang Berhubungan dengan Gempabumi Besar di Sumatra. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Cahyadi, M. Nur, & K. Heki. 2013. Ionospheric Disturbance of The 2007 Bengkulu and the 2005 Nias Earthquake, Sumatra, observed with a Regional GPS Network. *Journal of Geophysical Research:Space Physics* Vol 118: 1-11.
- Cahyadi, M. Nur. 2014. Near-Field Coseismic Ionospheric Disturbances of Earthquakes In and Around Indonesia. Hokkaido: Dept. Natural History Sciences, Hokkaido University.
- Septiningrum, Leni. 2016. Analisis Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Mentawai Tahun 2010. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Geomatika - Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Badan Informasi Geospasial. 2017. *Inacors BIG*. <<http://inacors.big.go.id/spiderweb/frmlIndex.aspx>>.