

## ANALISA PERUBAHAN IONOSFER AKIBAT GEMPA MENTAWAI TAHUN 2010 BERDASARKAN KEDALAMAN DAN MAGNITUDE

(Studi Kasus : Kepulauan Mentawai, Sumatra Barat)

**Mokhamad Nur Cahyadi, Leni Septiningrum**

Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Kampus ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111

Email : cahyadi\_geod@yahoo.com;

### Abstrak

Gempa merupakan fenomena alam akibat aktifitas tektonik yang sering terjadi di Indonesia. Sepanjang pulau Sumatra merupakan pertumbukan antara lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia menjadikan Sumatra sebagai daerah paling aktif dengan aktifitas tektoniknya. Pada tahun 2010 tercatat tiga gempa besar yang terjadi, yaitu gempa berkekuatan 6,8 SR pada 5 Maret, disusul 6,5 SR pada 5 Mei dan terakhir 7,8 SR pada 25 Oktober 2010. Sebelumnya pada tahun 2009 juga terjadi gempa di padang dengan kekuatan 7,6 SR. Setiap gempa mempunyai kedalaman dan magnitude yang berbeda-beda.

*Post-earthquake* anomali merupakan fluktuasi TEC yang terjadi sesaat setelah terjadinya gempa, fenomena ini terjadi 3 menit hingga 1 jam setelah gempa terjadi. *Post-earthquake* anomali dapat digunakan sebagai *early warning* sebelum tsunami datang. Pengamatan TEC (*Total Electron Content*) dilakukan dengan menggunakan GPS. Satelit GPS akan secara kontinyu memancarkan sinyal gelombang *double frequency* pada L band. Pada saat terjadi gempa, sinyal yang dipancarkan oleh satelit GPS akan mengalami *delay* ketika melewati lapisan ionosfer kira-kira 300 km dari permukaan bumi. Variasi ionosfer diamati pada saat terjadi *time-delay* ini, sehingga didapat nilai TEC dimana 1 TECU sama dengan  $10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup>. Nilai tersebut yang akan menggambarkan besaran gangguan akibat adanya gempa.

Pada penelitian ini mengamati perubahan ionosfer pada saat gempa dengan kedalaman dan magnitude yang berbeda. Studi kasus pertama magnitude berbeda dengan kedalaman yang sama dan studi kasus kedua kedalaman yang sama dengan magnitude yang berbeda. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, disimpulkan bahwa perubahan ionosfer dipengaruhi oleh kedalaman dan magnitude gempa.

**Kata Kunci : Gempa, Total Electron Content, GPS**

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang terbentuk dari aktifitas tektonik berupa pergerakan dan penunjaman (subduksi) dari tiga buah lempeng utama dunia. Berdasarkan kondisi geologi tersebut mengakibatkan Indonesia mempunyai topografi yang bergunung serta rawan terjadinya gempa bumi (Mubyarto, 2008). Salah satu wilayah di Indonesia yang paling aktif dengan aktifitas tektoniknya adalah Sumatra. Sepanjang pulau Sumatra mengalami pertumbukan antara lempeng

Indo-Australia dan lempeng Eurasia dengan kecepatan 5 cm/tahun pada batas antar lempeng di sepanjang pantai barat Sumatra (Prawirodirdjo, et al. 2000)<sup>1</sup>. Pada tahun 2009 terjadi gempa di Padang dengan kekuatan 7,6 SR. Pada tahun 2010 Mentawai mengalami sejumlah gempa, yaitu gempa berkekuatan 6,8 SR pada 5 Maret 2010, disusul 6.5 SR pada 5 Mei 2010 dan terakhir gempa berkekuatan 7,8 SR pada 25 Oktober 2010.

Pada dasarnya perhitungan TEC akibat gempa dapat diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu *pre-earthquake* dan *post-earthquake*. Salah satu *precursor anomaly* yang terjadi sebelum gempa

didapatkan dari pengukuran variasi TEC menggunakan GPS (Subakti, 2008) fenomena ini biasa disebut dengan *pre-earthquake anomaly* (Xia, et al. 2011) dimana fenomena ini akan berlangsung 1-2 minggu sebelum terjadinya gempa sedangkan *post-earthquake* terjadi 3 menit hingga satu jam setelah gempa terjadi (Jin, et al. 2015). Fluktuasi pada *post-earthquake* dapat digunakan sebagai *early warning* sebelum tsunami datang, tsunami yang datang dari daerah cukup jauh akan lebih lemah daripada tsunami yang diakibatkan oleh gempa dengan episenter yang berada di laut (Lin, 2015). Pergerakan dari gelombang tsunami ini cukup lambat, sekitar 600-700 km/jam. Apabila gelombang tsunami ini dapat dideteksi di laut lepas, terdapat cukup waktu untuk dilakukan *evakuasi* menuju ke tempat yang lebih tinggi. Juni 2001 terjadi gangguan TEC secara periodik yang terjadi sebelum tsunami di Peru. Setelah perambatan gelombang *gravity* melewati Samudra Pasifik (sekitar 22 jam), gelombang tsunami terjadi di Jepang dan ini terekam oleh *Japanese GPS dense network* (GEONET) (Occhipinti, et al. 2008). Satelit GPS secara kontinyu akan memancarkan sinyal gelombang 2 frekuensi pada L band yang dinamakan L1 dan L2. Sinyal L1 berfrekuensi 1575,42 MHz dan sinyal L2 berfrekuensi 1227,60 MHz. Variasi TEC akan menyebar ke segala arah dari pusat episenter dengan jarak ratusan bahkan ribuan kilometer, gangguan ionosfer akan diikuti dengan gelombang *Acoustic* (0.3-1.5 km/s) dan gelombang *Rayleigh* (2-3 km/s) (Jin, et al. 2014). Besarnya gempa akan sebanding dengan kerapatan kedua gelombang hingga merambat mencapai lapisan ionosfer dengan kerapatan yang berbeda-beda (Cahyadi & Heki, 2013).

Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh satelit GPS akan mengalami *delay* ketika melewati ionosfer. Variasi ionosfer diamati pada saat *time-delay* ini, berdasarkan kuantitas *Total Electron Content* (TEC). Nilai TEC biasanya dinyatakan dalam TECU, dimana 1 TECU adalah sama dengan  $10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup>. Pada penelitian sebelumnya, (Subakti, 2008) menjelaskan bahwa terjadi variasi TEC harian, dimana anomali (penurunan) nilai TEC terjadi 1 sampai 6 hari sebelum terjadinya gempabumi. Dari 10 gempabumi dengan *magnitude* lebih dari 6,0 SR yang terjadi di Sumatra pada bulan Desember

2004 hingga April 2005, terdapat 9 gempabumi yang sebelum terjadinya gempa ditandai dengan penurunan (*anomaly*) TEC yang dapat dipandang sebagai pertanda awal (*precursor signal*) akan terjadinya gempabumi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Jin, et al. 2014) mengenai gempa Tohoku, variasi ionosfer terjadi 10 menit setelah *main shock*, dan tiba-tiba meningkat pada waktu sekitar 80-150 menit setelah *main shock* yang terjadi pada 11 Maret 2011 (Jin, et al. 2015). Pada 25 Oktober 2010 terjadi tsunami lokal di Kepulauan Mentawai yang mengakibatkan lebih dari 400 korban jiwa (Newman, et al. 2011). Dalam penelitian ini akan dibahas *post-earthquake* akibat gempa Mentawai 2010 dan Gempa Padang 2009.

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh besarnya gempa dengan *post-seismic disturbance* gempa tektonik Mentawai tahun 2010. Dan mengetahui hubungan antara kedalaman gempa, *magnitude* dan perubahan densitas elektron di lapisan ionosfer.

**METODOLOGI PENELITIAN**

**Data dan Peralatan**

**Data**

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- i. Data observasi rinex stasiun SUGAR (*Sumatran GPS Array*) pada saat sebelum dan sesudah Gempa Mentawai 2010. Penelitian akan menggunakan tujuh stasiun *receiver* di sekitar wilayah Kepulauan Mentawai. Stasiun yang digunakan adalah BSAT, LAIS, LNNG, MKMK, MLKN, MNNA dan PRKB, seperti yang dijelaskan pada tabel berikut:

Tabel 1. Informasi Stasiun yang Digunakan

No	Stasiun	Posisi					
		Latitude			Longitude		
		deg	min	sec	deg	min	sec
1	BSAT	-3	4	12	100	16	48
2	PRKB	-2	57	36	100	23	24
3	MLKN	-5	21	0	100	16	12
4	LNNG	-2	16	48	101	9	0
5	MLKN	-2	32	24	101	5	24
6	LAIS	-3	18	0	101	42	0
7	MNNA	-4	27	0	102	53	24

- ii. Data orbit satelit; IGS SP3 *ephemeris file* (igsWWWD.sp3)

- iii. Nilai jam satelit; file navigasi RINEX (brdcDDD0.Yyn)
- iv. Data sekunder (*tables*) yang dibutuhkan pada saat pengolahan GAMIT akan diunduh secara otomatis oleh perangkat lunak GAMIT
- v. Tiga file data tambahan pengolahan gamit, yaitu: file gelombang pasang surut, file atmosfer dan file pemodelan cuaca.

### Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua buah, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras yang digunakan antara lain: stasiun GPS *online* digunakan sebagai penyedia data GPS, *personal computer* digunakan sebagai alat pengolah data GPS

Perangkat lunak yang digunakan antara lain : Sistem Operasi Microsoft Windows 7 dan Linux Ubuntu 14.04; GAMIT; Matlab 2010; Microsoft Office 2010; GMT (*Generic Mapping Tools*), digunakan untuk plotting lokasi penelitian.

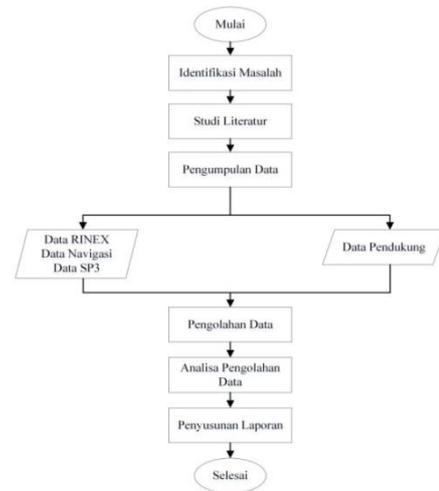
### Metode Penelitian

Adapun metode penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian ini menggunakan data *Sumatra Array GPS* (SUGAR) pada 18 Februari 2010 hingga 20 Maret 2010 atau 49 doy hingga 79 doy, 20 April 2010 hingga 20 Mei 2010 atau 110 doy hingga 140 doy, dan 10 Oktober 2010 hingga 9 November 2010 atau 283 doy hingga 313 doy. Dan data gempa 30 September 2009.
- b. Adapun stasiun yang diamati dalam penelitian ini adalah BSAT, LAIS, LNNG, MKMK, MLKN, MNNA, dan PRKB.
- c. Penelitian ini menjelaskan pengaruh gempa tektonik Mentawai 2010 terhadap variasi ionosfer setelah terjadinya gempa (*post-earthquake*).
- d. Dalam penelitian ini tidak mencari nilai kecepatan gelombang *accoustic, rayleigh*.

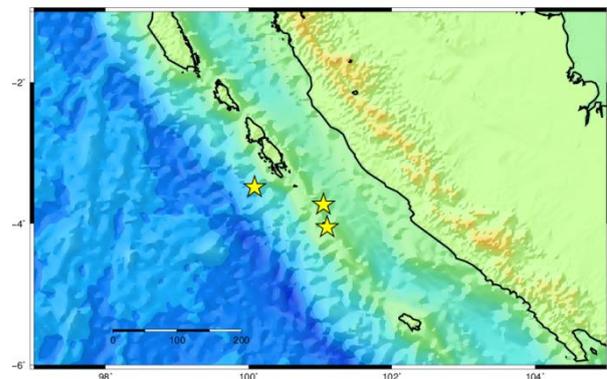
### Diagram Alir

Tahapan yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah :



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

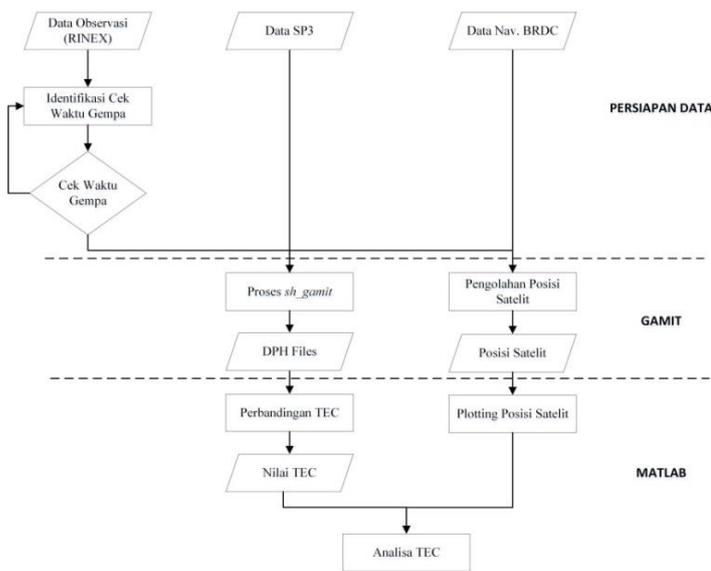
Lokasi penelitian ini dilakukan pada stasiun pengamatan SUGAR (*Sumatran GPS Array*) yang tersebar di sekitar Kepulauan Mentawai yang diambil dari SOPAC (*Scripps Orbit and Permanent Array Center*). Berdasarkan gempa yang diamati pada tahun 2010 di Kepulauan Mentawai.



Gambar 2. Lokasi Penelitian (Modifikasi, SOPAC)

### Pengolahan Data

Adapun untuk diagram alir pengolahan data adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Pengolahan Data

Berikut ini adalah penjelasannya :

- a. Identifikasi Masalah  
Masalah yang terdapat dalam penelitian ini adalah besarnya pengaruh gempa terhadap gangguan densitas elektron yang terdapat pada lapisan ionosfer. Dimana gangguan yang akan diteliti adalah *post-seismic disturbance* atau gangguan yang terjadi pada lapisan ionosfer setelah terjadinya gempa.
- b. Studi Literatur  
Studi literatur dilakukan untuk mengetahui bagaimana cara mengolah dan meentukan variasi *Total Electron Content* pada saat terjadinya gempa (*post-seismic disturbance*) yang diamati dari setiap GPS stasiun yang terletak di Pulau Sumatra.
- c. Pengumpulan Data  
Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah:
  - i. Data rinex observasi di Pulau Sumatra untuk mengetahui posisi stasiun.
  - ii. Data navigasi yang merupakan pembawa informasi ephimeris (orbit) satelit yang didalamnya juga terdapat informasi nilai jam satelit.
  - iii. Data SP3 merupakan koreksi untuk posisi orbit satelit (*precise IGS orbit*).
  - iv. Tables merupakan kumpulan file yang diperoleh pada saat pengolahan di GAMIT, diperoleh dengan melakukan

perintah `sh_setup -yr <YYYY> -apr <apr_file>`.

- v. Data pendukung untuk pengolahan GAMIT, yang terdiri dari:
  - a. Data pemodelan atmosfer (`atmdisp_cm.YYYY`)
  - b. Data pemodelan pasang-surut laut (`otIFES2004.grid`)
  - c. Data pemodelan cuaca (`vmfgrid.YYYY`)
- d. Pengolahan Data  
Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan sistem operasi Linux yang memanfaatkan software Gamit 10.4, maupun menggunakan sistem operasi Windows yang memanfaatkan Matlab dalam melakukan proses pengolahan data.
- e. Analisa Pengolahan Data  
Pada tahap analisa ini akan terlihat adanya variasi nilai TEC pada saat terjadinya gempa dan dikaitkan dengan GPS yang melintas pada saat gempa terjadi.
- f. Penyusunan Laporan  
Penyusunan laporan dilakukan sebagai tahap akhir dalam penelitian ini

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Pengolahan Data**

Dapat dilihat pada gambar 2 diatas bahwa ada 3 data pokok yang digunakan dalam studi penelitian ini. Data tersebut adalah data RINEX observasi, data SP3 dan data navigasi. Pada proses pengolahan menggunakan aplikasi GAMIT tujuan akhirnya adalah untuk mendapatkan nilai L1 dan L2 yang terdapat pada file `DPH.XXXX.PRNZZ` dan selanjutnya akan diolah pada Matlab. Hasil plotting dari file `DPH.XXXX.PRNZZ` akan diproses sehingga akan didapatkan hasil variasi time-series STEC pada rentang waktu tertentu. Dari hasil time-series tersebut, selanjutnya dipilah mana saja satelit yang merekam terjadinya gangguan di ionosfer. Jika ada catatan gangguan ionosfer, maka akan ada suatu anomali yang berbeda dengan yang lainnya. Anomali tersebut menunjukkan nilai gangguan yang terjadi. Pada penelitian ini tidak merekam adanya anomali yang terjadi di ionosfer, akan tetapi ditemukan

sejumlah fluktuasi yang bersifat acak pada beberapa satelit namun hal tersebut tidak dapat dikatakan sebagai gangguan pada ionosfer karena tidak bersifat teratur.

### Pengukuran Ionosfer dengan GPS

Kondisi geologi Indonesia yang terletak di antara tiga lempeng dunia, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik mengakibatkan terbentuknya zona-zona subduksi dan zona patahan di Indonesia, dimana zona tersebut merupakan sumber gempa bumi. Hal tersebut mengakibatkan Indonesia seringkali terjadi gempabumi, baik dalam skala kecil maupun skala besar. Gempa tersebar di seluruh wilayah Indonesia, kecuali di Pulau Kalimantan (Yusfania, 2008).

Kepulauan Mentawai terletak di Sumatra Barat. Sumatra merupakan zona subduksi aktif di Indonesia. Desakan lempeng samudra Indo-Australia mengakibatkan lempeng benua juga mengarah ke dalam bumi, sehingga pulau-pulau yang berada di atasnya ikut bergeser dan mendekati pulau Sumatra. Pergeseran ini terjadi selama puluhan hingga ratusan tahun, tekanan lempeng samudra Indo-Australia akan terus meningkat hingga kapasitas maksimal elastisitas batuan. Ketika batuan tidak lagi kuat menampung tekanan tersebut, maka batuan akan pecah dan mengakibatkan adanya gempabumi, sesuai dengan *elastic rebound theory*.

Gempa ini dapat menimbulkan dorongan energi gelombang *acoustic*, *gravity* dan *rayleigh* secara tiba-tiba selama gempa yang akan menghasilkan gangguan pada lapisan atmosfer dan dapat menyebabkan terjadinya fluktuasi serta variasi TEC pada lapisan ionosfer. Semakin besar gempa yang terjadi maka gangguan yang dihasilkan pada atmosfer akan besar juga. Hal ini disebabkan karena besarnya energi terbut dapat mengganggu densitas elektron yang ada di ionosfer hingga radius 300 km dari pusat gempa.

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

frekuensi, TEC dapat dihitung dengan rumus di bawah ini (Calais, et al. 1998):

$$sTEC = \frac{1}{40.308} \times \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \times ((L1 \times \lambda_1) - (L2 \times \lambda_2)) \quad (1)$$

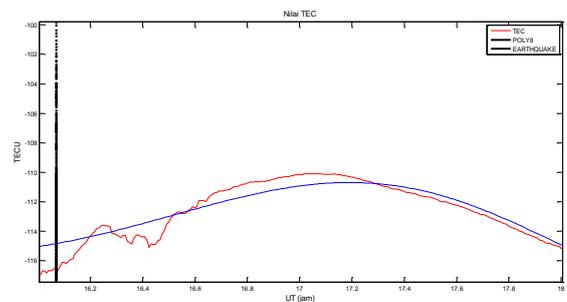
### Pembahasan

#### • Gempa Mentawai tahun 2010

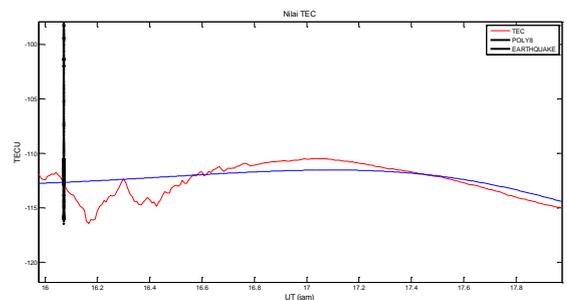
Analisa gempa dengan magnitude yang berbeda dan kedalaman yang sama. Ketiga gempa di bawah ini mempunyai karakteristik yang sama, yakni mempunyai kedalaman episenter 26-27 km (SOPAC).

##### i. Gempa Pertama

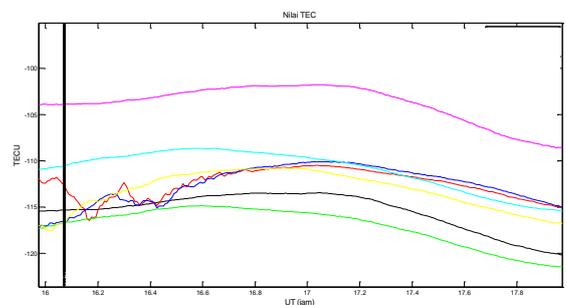
Pada gambar 4 dan 5 dibawah ini kita dapat melihat adanya fluktuasi TEC pada satelit 19 yang terekam sesaat setelah terjadinya gempa pertama pada 5 Maret 2010 pukul 16:07 UT.



Gambar 4. TEC stasiun MLKN PRN 19



Gambar 5. TEC stasiun MNNA PRN 19



Gambar 6. Nilai STEC PRN 19 pada stasiun pengamatan GPS, magenta stasiun BSAT, biru muda stasiun LNGG, kuning stasiun LAIS,

merah stasiun MNNA, biru stasiun MLKN,  
hitam stasiun PRKB dan hijau stasiun MKMK

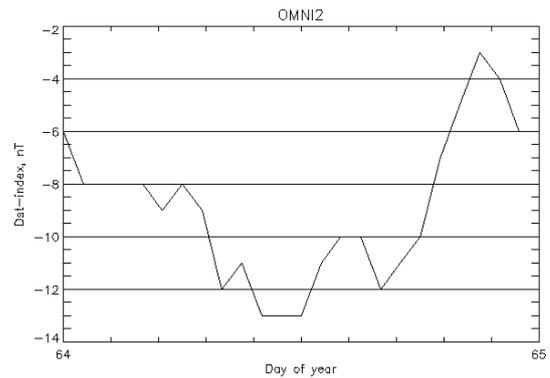
Pada gambar 6 terlihat nilai TEC dari semua stasiun pengamatan dengan gempa pertama yang terjadi pada 5 Maret 2010 pukul 16:07 UT (garis hitam vertikal). Gangguan ionosfer hanya terjadi pada stasiun MNNA dan MLKN, sedangkan stasiun lain merekam nilai TEC yang cenderung stabil. Perbedaan nilai TEC yang direkam disebabkan oleh beberapa faktor, faktor pertama adalah adanya *scintillation effect* di daerah ekuator sehingga mengakibatkan *irregularitas* densitas elektron di lapisan ionosfer. Variasi temporal tersebut bernilai maksimal satu jam setelah matahari terbenam hingga tengah malam<sup>[13]</sup> yang disebut dengan *plasma bubbles*. Berdasarkan<sup>[14]</sup> *scintillation* pada daerah ekuator berhubungan dengan fluktuasi densitas elektron dan kecepatan fase dalam melewati lapisan ionosfer. Perhitungan TEC dalam penelitian ini menggunakan fase untuk menghitung nilai TEC.

Faktor kedua adalah kedalaman dari gempa beserta magnitudenya, berdasarkan penelitian dari<sup>[15]</sup> menyebutkan bahwa pengklasifikasian gempa berdasarkan magnitude menyatakan bahwa gempa pertama bernilai relatif kecil dengan magnitude < 7. Sehingga mengakibatkan perambatan gelombang *acoustic* dan *rayleigh* akibat gempa tidak dapat dideteksi di lapisan ionosfer.

Efek ini terjadi di sepanjang garis ekuator, meliputi 30 derajat kedua sisi ekuator, dan bernilai maksimum satu jam setelah terbenamnya matahari sampai tengah malam<sup>[16]</sup>

**Dst-Index**

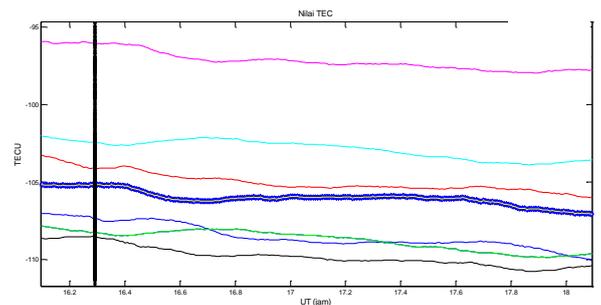
Dst Index adalah index yang menunjukkan adanya badai matahari. Gambar 6 di bawah ini menunjukkan tidak adanya fluktuasi nilai Dst-Index pada doy 064 (5 Maret 2010). Anomali Dst-Index dianggap sebagai gangguan badai matahari dengan nilai 50-300 nT.



**Gambar 7. Menunjukkan index badai matahari pada doy 064 (5 Maret 2010)**

ii. Gempa Kedua

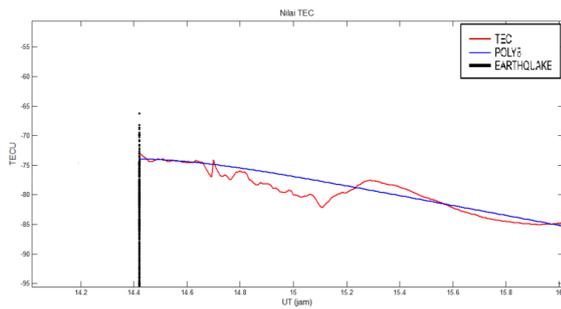
Pada gambar 5,6 dan 7 dibawah ini kita dapat melihat tidak ada fluktuasi TEC pada satelit 08 yang terekam sesaat setelah terjadinya gempa kedua pada 5 Mei 2010, pukul 16:29 UT.



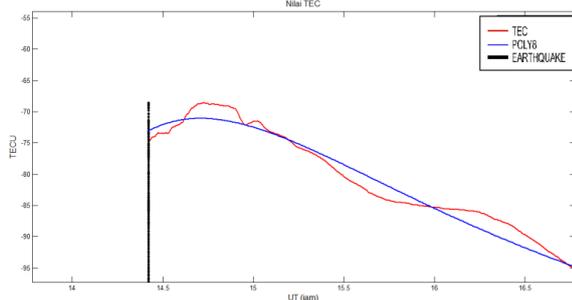
**Gambar 8. Nilai STEC PRN 08 pada stasiun pengamatan GPS, magenta stasiun BSAT, biru muda stasiun LNGG, kuning-biru stasiun LAIS, merah stasiun MNNA, biru stasiun MLKN, hitam stasiun PRKB dan hijau stasiun MKMK**

iii. Gempa Ketiga

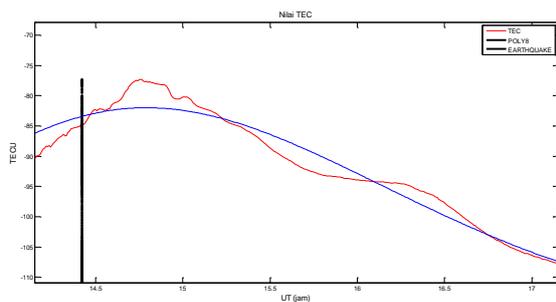
Pada gambar 9, 10 dan 11 dibawah ini kita dapat melihat adanya fluktuasi TEC pada satelit 14 yang terekam sesaat setelah terjadinya gempa pertama pada 25 Oktober 2010. Ada beberapa faktor yang menyebabkan adanya fluktuasi ini, pertama gempa yang terjadi pada bulan Oktober ini merupakan gempa yang terbesar sepanjang tahun dengan kekuatan 7,8 M dan kedalaman 27 km, dibandingkan dengan kedua gempa sebelumnya pada Maret dan Mei masing-masing berkekuatan 6.8M dan 6.5 M akan tetapi mempunyai kisaran kedalaman episenter yang sama antara 26 hingga 27 km.



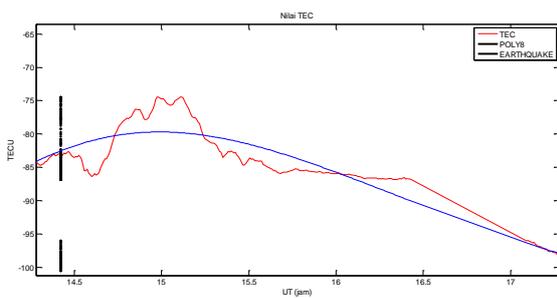
Gambar 9. TEC stasiun LAIS PRN 14



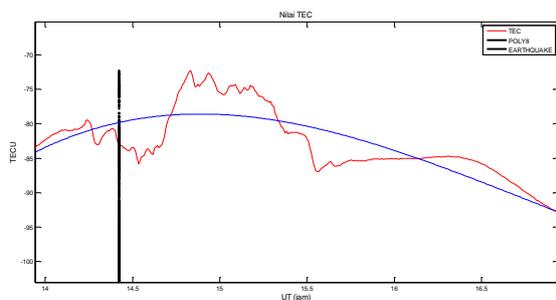
Gambar 10. TEC stasiun LAIS PRN 14



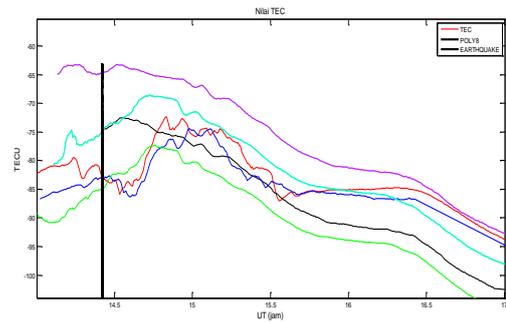
Gambar 11. TEC stasiun MKMK PRN 14



Gambar 12. TEC stasiun MLKN PRN 14



Gambar 13. TEC stasiun MNNA PRN 14

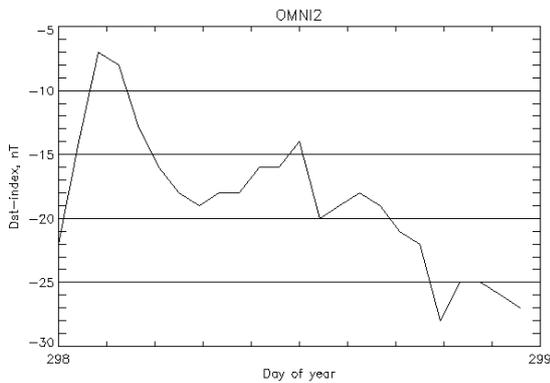


Gambar 14. Nilai STEC PRN 19 pada stasiun pengamatan GPS, magenta stasiun BSAT, biru muda stasiun LNNG, merah stasiun MNNA, biru stasiun MLKN, hitam stasiun PRKB dan hijau stasiun MKMK

Pada gambar 14 terjadi anomali STEC yang terekam hampir di seluruh stasiun, Nilai TEC pada stasiun LAIS mengalami penurunan tertinggi 5 TECU setelah 42 menit kemudian, pada stasiun LNNG Kenaikan nilai TEC sebesar 2 TECU 13 menit setelah gempa. Stasiun LNNG mempunyai fluktuasi yang mirip dengan stasiun MKMK, naikan nilai TEC MKMK sebesar 2 TECU 35 menit setelah gempa. Pada stasiun MLKN dan MNNA fluktuasi TEC terjadi campuran, terdapat kenaikan dan penurunan nilai TEC. Stasiun MLKN nilai TEC mengalami penurunan sebesar 5 TECU setelah 12 menit. Diikuti fluktuasi kedua sebesar 6 TECU setelah 45 menit gempa terjadi, sedangkan MNNA mengalami penurunan sebesar 6 TECU setelah 7 menit. Diikuti fluktuasi kedua sebesar 8 TECU setelah 35 menit gempa terjadi.

Terdapat fluktuasi pada beberapa stasiun pengamatan, akan tetapi fluktuasi tersebut tidak bersifat teratur (*irregular*). Ketidakteraturan tersebut terjadi karena posisi Indonesia yang berada di daerah ekuator, sehingga dipengaruhi oleh variasi temporal di lapisan ionosfer dan mengakibatkan adanya *irregularitas* pada fase sinyal. Variasi ionosfer yang bersifat temporal harian di daerah ekuatorial bernilai maksimum pada pukul 13:00 UT - 16:00 UT dan bernilai minimal pada 05:00 UT - 06:00 UT. Dan efek *scintillation* maksimal pada 22:00 UT - 06:00 UT [17]. Pada saat gempa terjadi variasi temporal harian TEC sedang berada pada fase tertinggi, dimana nilai TECU yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai TEC pada waktu variasi temporal terendah.

Dst Index adalah index yang menunjukkan adanya badai matahari. Gambar 15 di bawah ini menunjukkan tidak adanya fluktuasi nilai Dst-Index pada doy 298 (25 Oktober 2010). Anomali Dst-Index dianggap sebagai gangguan badai matahari dengan nilai 50-300 nT.

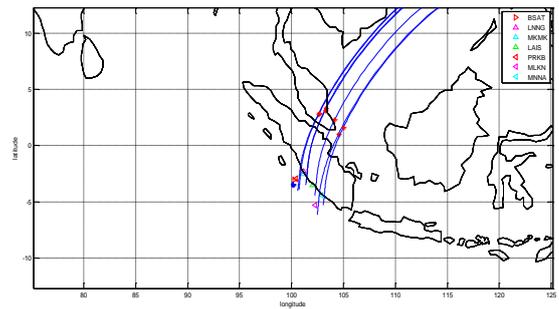


Gambar 15. Menunjukkan index badai matahari pada doy 298 (25 Oktober 2010)

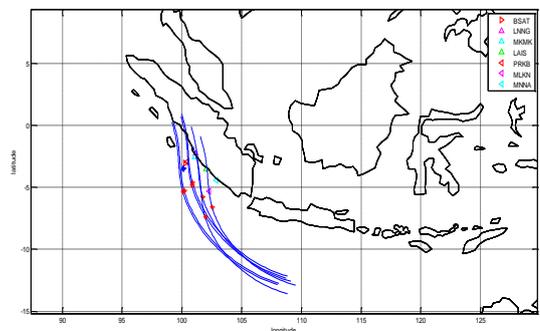
**A. Proyeksi Lintasan Satelit**

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).

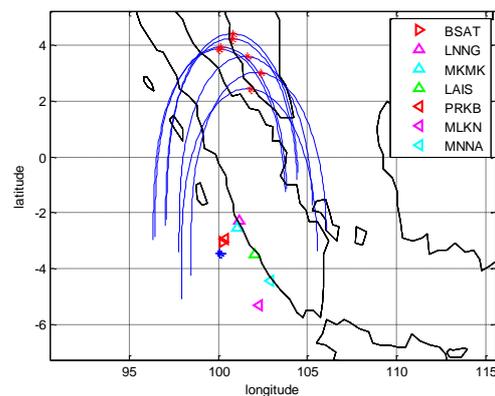
Garis biru merupakan alur proyeksi lintasan satelit, simbol bulat merah menunjukkan epicenter dan titik merah menandakan waktu gempa terjadi (IPP *point*). Simbol segitiga adalah stasiun SUGAR yang dijelaskan dalam legenda. Pada saat terjadi gempa satelit 19 melintas di utara Pulau Sumatra. IPP *point* harus berada sedekat mungkin dengan episenter gempa dan stasiun pengamat. Semakin dekat IPP *point* dengan stasiun, maka hasil perhitungan TEC akan semakin akurat.



Gambar 16. Gambar alur satelit 19 yang dipetakan melalui SIP dari berbagai stasiun. Garis biru menunjukkan alur proyeksi dan pada titik merah merupakan posisi IPP waktu dimana gempa terjadi. Simbol segitiga merupakan stasiun GPS pada legenda.



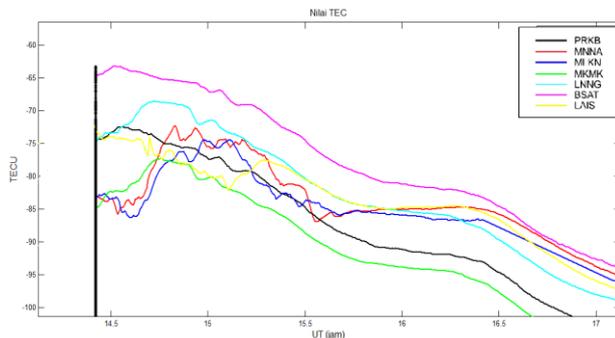
Gambar 17. Gambar alur satelit 08 yang dipetakan melalui SIP dari berbagai stasiun. Garis biru menunjukkan alur proyeksi dan pada titik merah merupakan posisi IPP waktu dimana gempa terjadi. Simbol segitiga merupakan stasiun GPS pada legenda.



Gambar 18. Gambar alur satelit 15 yang dipetakan melalui SIP dari berbagai stasiun. Garis biru menunjukkan alur proyeksi dan pada titik merah merupakan posisi IPP waktu dimana gempa terjadi. Simbol segitiga merupakan stasiun GPS pada legenda.

• **Gempa Mentawai tahun 2010 dan gempa Padang 2009**

Analisa gempa dengan magnitudo yang sama dan kedalaman yang berbeda. Gempa Padang yang terjadi pada tahun 2009 mempunyai kedalaman episenter 27 km, sama dengan Gempa Mentawai tahun 2010 yang mempunyai kedalaman 26 km.



**Gambar 19. 1** Pengamatan TEC satelit 14 yang diamati dari jam 13:30 UT sampai 17:00 UT pada gempa pertama 25 Oktober 2010.

Pada gambar 19 terlihat nilai TEC dari semua stasiun pengamatan dengan gempa ketiga yang terjadi pada 25 Oktober 2010 pukul 14:25 UT (garis hitam vertikal). Kedua lingkaran menunjukkan adanya fluktuasi yang terjadi. Fluktuasi terjadi hampir di semua stasiun kecuali BSAT dan PRKB. Terdapat fluktuasi pada beberapa stasiun pengamatan, akan tetapi fluktuasi tersebut tidak bersifat teratur (*irregular*). Ketidakteraturan tersebut terjadi karena posisi Indonesia yang berada di daerah ekuator, sehingga dipengaruhi oleh variasi temporal di lapisan ionosfer dan mengakibatkan adanya *irregularitas* pada fase sinyal. Variasi ionosfer yang bersifat temporal harian di daerah ekuatorial bernilai maksimum pada pukul 13:00 UT - 16:00 UT dan bernilai minimal pada 05:00 UT - 06:00 UT. Dan efek *scintillation* maksimal pada 22:00 UT - 06:00 UT (Rao, et al. 2006). Pada saat gempa terjadi variasi temporal harian TEC sedang berada pada fase tertinggi, dimana nilai TECU yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai TEC pada waktu variasi temporal terendah.

Deteksi *post-seismic disturbance* kemungkinan besar berhubungan dengan *aftershocks* yang besar (Akhoondzadeh 2016), pertanyaan tersebut diperkuat oleh penelitian (Cahyadi & Heki, 2014) yang membandingkan nilai *post-seismic disturbance* setelah *main shock* dan *after shock*

pada gempa Sumatra Utara 2012 dengan magnitudo 8,6 pada *main shock* dan *aftershock* magnitudo sebesar 8,2.

Gempa 25 Oktober 2010 dengan magnitudo 7,8 mengakibatkan adanya tsunami lokal dengan jumlah korban mencapai lebih dari 400 korban (Newman, et al. 2011), dengan perincian 286 korban jiwa dan 252 orang dinyatakan hilang. Selain kerugian korban juga mengakibatkan 536 bangunan rusak (Ibad dan Santosa 2014). Dengan ketinggian gelombang mencapai 3,6 m dan terendah 1,56 m.

*Post-seismic disturbance* dapat digunakan dalam mitigasi bencana tsunami. Dengan memanfaatkan besar kecepatan gelombang *acoustic* dan *gravity*. Variasi TEC akan menyebar ke segala arah dari pusat episenter dengan jarak ratusan bahkan ribuan kilometer, gangguan ionosfer akan diikuti dengan gelombang *Acoustic* (0.3-1.5 km/s) dan gelombang *Rayleigh* (2-3 km/s) (Jin, Jin dan Li 2014). Pernyataan tersebut didukung dengan pernyataan dari (Cahyadi dan Heki, Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes 2014) dengan meneliti gempa Sumatra Utara 8,6 M yang menghasilkan nilai gelombang *acoustic* sebesar 1 km/s. Pendeteksian tsunami dengan menggunakan sinyal di ionosfer sangat bergantung pada besarnya gempa yang terjadi dan propagasi gelombang *rayleigh*. Dimana nilai *internal gravity wave* (IGW) dan *acoustic* akan terdeteksi bersamaan dengan gelombang *rayleigh*. Penelitian penjalaran gelombang pertama yang terbukti adalah gempa Sumatra dengan magnitudo 9.1 pada Desember 2004, dimana penjalaran gelombang terdeteksi hingga ke India (Jin, Occhipiti dan Jin 2015). IGW inilah yang merupakan pratanda akan terjadinya bencana tsunami, diperlukan adanya metode tambahan guna mencari nilai propagasinya seperti *Navier-Stokes equation*.

Pergerakan dari gelombang tsunami ini cukup lambat, sekitar 600-700 km/jam. Apabila gelombang tsunami ini dapat dideteksi di laut lepas, terdapat cukup waktu untuk dilakukan *evakuasi* menuju ke tempat yang lebih tinggi. Pada Juni 2001 terjadi gangguan TEC secara periodik yang terjadi sebelum tsunami di Peru. Setelah perambatan gelombang *gravity* melewati

Samudra Pasifik (sekitar 22 jam), gelombang tsunami terjadi di Jepang dan ini terekam oleh *Japanese GPS dense network* (Occhipinti, Komjathy dan Lognonne 2008). Apabila dibandingkan kecepatan propagasi sinyal *rayleigh* dan *acoustic* lebih cepat dibandingkan dengan gelombang tsunami, sehingga bisa digunakan sebagai *early warning* tsunami.

Pada penelitian ini didapat 2 stasiun dengan fluktuasi yang hampir tidak terlihat, hal ini mengindikasikan lemahnya gelombang *acoustic shock wave*. Disisi lain, gelombang *acoustic* tidak hanya disebabkan oleh adanya gempa. Dapat juga disebabkan oleh adanya *non-earthquake effect* seperti perubahan tekanan (Lin, 2012).

## KESIMPULAN dan SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Nomor satelit yang berada di sekitar stasiun pengamatan dan merekam terjadinya *disturbance* di lapisan ionosfer adalah:
  - a. Gempa pertama : PRN 19
  - b. Gempa kedua : PRN 08
  - c. Gempa ketiga : PRN 14
2. Setelah gempa terjadi tidak terdapat *disturbance* yang terekam pada gempa kedua. Gangguan terekam pada gempa pertama dan kedua, dengan besar nilai TEC sebagai berikut:
  - a. Gempa pertama yang diamati oleh GPS nomor 19
    - MLKN : 1 TECU
    - MNNA : 3,5 TECU dan 2 TECU
  - b. Gempa ketiga yang diamati oleh GPS nomor 14
    - LAIS : 5 TECU
    - LNNG : 2 TECU
    - MKMK : 2 TECU
    - MLKN : 5 TECU dan 6 TECU
    - MNNA : 6 TECU dan 8 TECU

Gangguan tersebut terjadi dengan rentang waktu yang berbeda-beda. Berikut waktu yang diamati pada saat terjadi letusan:

- a. Gempa pertama yang diamati oleh GPS nomor 19
  - MLKN : 11 menit setelah gempa

- MNNA : 5 menit dan 20 menit setelah gempa
- b. Gempa ketiga yang diamati oleh GPS nomor 14
    - LAIS : 28 menit setelah gempa
    - LNNG : 13 menit setelah gempa
    - MKMK : 35 menit setelah gempa
    - MLKN : 15 menit dan 48 menit setelah gempa
    - MNNA : 15 menit dan 38 menit setelah gempa
3. Berdasarkan penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa perubahan ionosfer pada saat gempa terjadi dipengaruhi oleh kedalaman episenter dan besarnya magnitude gempa.

Dari penelitian ini tidak dapat disimpulkan bahwa fluktuasi yang terjadi akibat dari gempa Mentawai 2010, sebab fluktuasi bersifat *irregular*. Posisi Indonesia yang berada pada garis ekuator memungkinkan adanya *irregularitas* di lapisan ionosfer berkaitan dengan densitas elektron dan kecepatan fase sinyal.

### Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang diberikan yaitu sebagai berikut:

- a. Sebelum melakukan penelitian terkait dengan *disturbance* di lapisan ionosfer penting untuk diketahui pada gempa terjadi badai matahari atau tidak.
- b. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui kecepatan gelombang *acoustic*, *rayleigh* dan *gravity* akibat dari gempa Mentawai 2010.

### DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Hasanuddin Z. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Bandung: PT. Pradnya Paramita, 2006.
- Akhoondzadeh, Mehdi. "Decision tree, bagging and random forest methods detect TEC seismo-ionospheric anomalies around the time of the Chile, (Mw=8,8) earthquake of 27 February 2010." *Advances in Space Research*, 2016: 2646-2649.

- Cahyadi, Mochammad Nur, dan K Heki. *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, 2013: 1-11.
- Cahyadi, Mokhammad Nur, and Kosuke Heki. "Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes." *Geophysical Journal International*, 2014: 116-129.
- Deng, Baichang, Jiang Huang, Weifeng Liu, Jie Xu, and Lingfeng Huang. "GPS scintillation and TEC depletion near the northern crest of equatorial anomaly over South China." *Advance in Research Space*, 2012: 356-365.
- E.Calais, JB.Minster, M.A.Hofter, M.A.H.Hofter, M.A.H.Hedlin. *Ionospheric signatures of surface mine blasts from Global Positioning System measuement*. Geophysics.J.Int 1998:132,191-202
- Jin, Shuanggen, Giovanni Occhipiti, dan Rui Jin. *GNSS Ionospheric Seismology : Recent Observation Evidences and Characteristics*. Earth-Science Reviews, 2015: 54-56.
- Jin, Shuanggon, Rui Jin, dan J.H Li. *Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations*.Journal of Geophysical Research:Space Physics, 2014: 7914-7927.
- Lin, Jyh-Woei. "Possibility of tsunami early-warning from post-seismic ionospheric disturbance for 2 July, 2013, Mw=6,1 Indonesia'a Bireun earthquake:Twodimensioal principal component analysis." National Research Institute of Astronomy and Geophysics, 2014: 109-116.
- Mubyarto, Ferry. *Analisa Deformasi Interseismic Gempa Bengkulu dari Data GPS Kontinyu SUGAR*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2008.
- Newman, Andrew V., Gavin Hayes, Young Wei, dan Jaime Convers. "The 25 October 2010 Mentawai tsunami earthquake, from real-time discriminants, finite-fault rupture, and tsunami excitation." *Geophysical Research Letter*, 2011 : Vol.38 1-7
- Occhipinti, Giovanni, Attila Komjathy, dan Philippe Lognonne. "How Ionospheric Might Improve the Global Warning System." *Tsunami Detection by GPS*, February 2008: 50-57.
- Prawirodirdjo, L., Bock, Y., & Gemrich, J. (2000). *One Century of Tectonic Deformation Along the Sumatran Fault From Triangulation and Global Positioning System Surveys*. Journal of Geophysical Research volume 105, 28,343-28,361
- Rao, P.V.S. Rama, S. Gopi Khrisna, K. Niranjan, and D.S.V.V.D. Prasad. "Temporal and spatial variations in TEC using simulataneous measurement from the indian GPS network of receivers during the low solar activity period of 2004-2005." *Annales Geophysicae*, 2006: 3279-3292.
- Seeber, Gunter. *Satellite Geodesy, 2nd edition*. Berlin: Walter de Gruyter, 1993.
- Subakti, Hendri. *Analisis Variasi GPS-TEC yang Berhubungan dengan Gempabumi Besar di Sumatra*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2008.
- Yusfania, Meiriska. *Pemodelan Gempa Bengkulu 2007 Berdasarkan Data GPS*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2008.
- Xia, Chunliang, Shaomin Yang, Guirong Xu, Biqiang Zhao, dan Tao Yu. *Ionospheric Anomalies Observed by GPS TEC Prior to the Qianghai-Tibet Region Earthquakes*. Terr.Atmos.Ocean,Sci., Vol22,No.2, 2011: 177-185.