



TUGAS AKHIR - RG 141536

**ANALISA PERUBAHAN IONOSFER
AKIBAT GEMPA BUMI SUMATRA BARAT
TANGGAL 2 MARET 2016**

**FEBRIAN ADI SAPUTRA
NRP 3513 100 020**

**Dosen Pembimbing
Mokhamad Nur Cahyadi, S.T, M.Sc, Ph.D.**

**PROGRAM STUDI TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

“Halaman ini Sengaja Dikosongkan”



FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

**ANALYSIS OF IONOSPHERIC CHANGES
DUE TO WEST SUMATRA EARTHQUAKE
ON MARCH, 2nd 2016**

**FEBRIAN ADI SAPUTRA
NRP 3513 100 020**

**Supervisor
Mokhamad Nur Cahyadi, S.T, M.Sc, Ph.D**

**GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil Engineering and Planning
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017**

“Halaman ini Sengaja Dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PERUBAHAN IONOSFER AKIBAT GEMPA BUMI SUMATRA BARAT TANGGAL 2 MARET 2016

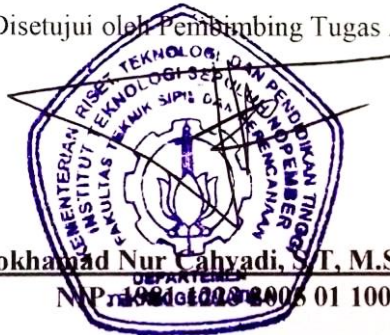
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

FEBRIAN ADI SAPUTRA
NRP. 3513 100 20

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :



Mokhammad Nur Cahyadi, S.T, M.Sc, Ph.D.

NIP. 196102019005 01 1002

SURABAYA, JULI 2017

“Halaman ini Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'aalamiin. Puja dan puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan nikmat iman, kesehatan dan kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Analisa Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Bumi Sumatra Barat Tanggal 2 Maret 2016”**. Sholawat serta salam tidak lupa penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW yang kita nantikan syafa'atnya di hari akhir kelak.

Terselesainya Tugas Akhir ini, tidak terlepas dari bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan yang berbahagia ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, yang selalu memberikan support berupa moral, material, dan doa tanpa henti-hentinya.
2. Keluarga Besar Bapak & Ibu yang memberikan bantuan baik moril maupun materil dalam melaksanakan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Mokhamad Nur Cahyadi, S.T, M.Sc, Ph.D selaku dosen pembimbing, atas kebaikan dan dedikasinya dalam memberikan bimbingan hingga dapat terselesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Gunawan dan segenap petugas dari instansi Badan Informasi Geospasial (BIG) yang telah memberikan ijin penulis dalam bantuan berupa data sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
5. Teman-teman Geomatika Angkatan 2013 yang senantiasa memberikan motivasi, doa dan nasihatnya untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini, serta bantuannya disaat penulis membutuhkan bantuan.
6. Seluruh civitas akademik Departemen Teknik Geomatika FTSP-ITS. Mudah-mudahan Allah SWT berkenan membalas semua kebaikan, dukungan dan bantuan yang telah diberikan.

Dengan segala keterbatasan, Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun

sangat penulis harapkan untuk pengembangan di masa yang akan datang. Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

**ANALISA PERUBAHAN IONOSFER
AKIBAT GEMPA BUMI SUMATRA BARAT
TANGGAL 2 MARET 2016**

Nama Mahasiswa : Febrian Adi Saputra
NRP : 3513 100 020
Departemen : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Dosen Pembimbing: Mokhamad Nur Cahyadi, S.T, M.Sc, Ph.D.

ABSTRAK

Pada saat gempa bumi terjadi, ada tiga jenis gelombang yang dihasilkan, yaitu : (1) Gelombang Acoustic (kecepatan 1 km/s) yang dihasilkan dekat dari pusat gempa bumi, gelombang tersebut menyebar dan naik 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 yang besar, dan (3) Gelombang Rayleigh (kecepatan 4 km/s) yang dihasilkan dari gelombang permukaan dan merambat menjauh mengelilingi bumi dari pusat gempa bumi. Gelombang Acoustic yang dihasilkan secara tegak lurus dari kerak bumi selama gempa merambat ke ionosfer, lalu membuat penyimpangan kerapatan elektron. Fenomena ini terdeteksi sebagai CIDs (Coseismic Ionosphere Disturbances), yaitu fluktuasi TEC yang terjadi 15 menit hingga 1 jam setelah gempa terjadi. Akibat dari penyimpangan tersebut, gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh satelit GNSS akan mengalami delay ketika melewati ionosfer kira-kira 300km dari permukaan bumi. Variasi ionosfer diamati pada saat time-delay ini berdasarkan kuantitas Total Electron Content (TEC). Nilai TEC dinyatakan dalam TECU, dimana 1 TECU sama dengan 10^{16} elektron/m². Nilai anomali TEC tersebut akan menggambarkan besaran gangguan akibat adanya gempa.

Indonesia sebagai negara yang sering terjadi gempa, perlu dilakukan pemantauan untuk mengetahui perubahan atmosfer akibat gempa, salah satunya yaitu dengan analisa TEC pada lapisan ionosfer. Dalam penelitian ini dilakukan pengamatan perubahan TEC dua hari sebelum, saat, dan dua hari sesudah terjadinya gempa bumi di Sumatra Barat pada tanggal 2 Maret 2016 dengan metode pengolahan data GNSS dari stasiun CORS milik Badan Informasi Geospasial (BIG) yang berada di daerah Sumatra, yaitu stasiun CAIR, CBKT, CPAR, CPDG, dan CSEL. Hasil dari pengolahan data menunjukkan anomali TEC muncul pada waktu 11 – 15 menit setelah gempa dengan besar anomali 2 – 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.

ANALYSIS OF IONOSPHERIC CHANGES DUE TO WEST SUMATRA EARTHQUAKE ON MARCH, 2nd 2016

Student Name : Febrian Adi Saputra
NRP : 3513 100 020
Department : Geomatics Engineering
Supervisor : Mokhamad Nur Cahyadi, S.T, M.Sc, Ph.D.

ABSTRACT

When earthquake occurred, there are three types of waves that generated: (1) Acoustic wave (speed 1 km / s) produced close to the epicenter, it propagates upward and reach elevation of the F layer's ionosphere within 10 minutes or more. (2) Gravity wave (speed 0.3 km/s), generated from tsunami wave resulted from large earthquakes, and (3) Rayleigh wave (speed 4 km / s) resulted from surface wave and propagate away from the epicenter. Acoustic waves generated perpendicularly from the earth's crust during an earthquake propagate to the ionosphere, then create electron density aberrations. This phenomenon detected as CIDs (Coseismic Ionosphere Disturbances), it is TEC fluctuations that occur 15 minutes to 1 hour after the earthquake occurs. As a result of its deviations, the electromagnetic waves emitted by GNSS satellites will be delayed as they pass through the ionosphere approximately 300km from the earth's surface. The ionospheric variation is observed at this time-delay based on the quantity of Total Electron Content (TEC). The TEC value is expressed in TECU, where 1 TECU equals 10^{16} electrons / m^2 . The TEC anomaly value will illustrate the magnitude of the disturbance caused by the earthquake.

Indonesia as a frequent earthquake country, monitoring needs to be done to determine the atmospheric changes caused by the

earthquake, one of them is by TEC analysis on the ionosphere layer. In this research, we observe the change of TEC two days before, when and two days after the earthquake in West Sumatra on March 2nd, 2016 with GNSS data processing method from CORS station owned by Geospatial Information Agency (BIG) located in Sumatera area, CAIR, CBKT, CPAR, CPDG, and CSEL stations. Results from data processing showed TEC anomalies appearing at 11 to 15 minutes after an earthquake with anomalous magnitude anomaly 2 – 3.5 TECU recorded by GPS satellites number 17 and 0.5 – 1.7 TECU recorded by Glonass satellite number 14.

Keywords : Earthquake, GNSS, Ionosfer, Total Electron Content.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Tugas Akhir.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tektonik Lempeng.....	5
2.2 Gempa Bumi dan Pengaruhnya Terhadap Ionosfer....	6
2.3 GNSS.....	7
2.3.1. GPS.....	9
2.3.2. Sinyal GPS.....	10
2.4 Ionosfer.....	14
2.4.1.Kombinasi Bebas Ionofer.....	17
2.4.2.Kombinasi Bebas Geometry.....	17
2.4.3.Refraksi Ionosfer.....	19
2.5 TEC (Total Electron Content).....	20
2.6 Penelitian Terdahulu.....	21
BAB III METODOLOGI.....	23
3.1 Lokasi Penelitian.....	23
3.2 Data dan Peralatan.....	24
3.2.1 Data.....	24

3.2.2 Peralatan	24
3.3 Tahapan Pelaksanaan.....	25
3.4 Tahapan Pengolahan Data	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Hasil Pengolahan Data dengan Fortran	31
4.2 Lintasan Satelit	32
4.3 Plotting Anomali TEC	36
4.3.1 Anomali TEC Satelit GPS.....	36
4.3.2 Anomali TEC Satelit Glonass	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Arah pergerakan lempeng tektonik.....	5
Gambar 2. 2 Segmen Utama GPS	10
Gambar 2. 3 Format Pesan Navigasi GPS.....	12
Gambar 2. 4 Data Dan Informasi Yang Dibawa Oleh Gelombang Pembawa L1 Dan L2.	13
Gambar 2. 5 Struktur frekuensi dan parameter dasar komponen sinyal GPS.....	13
Gambar 2. 6 Perjalanan Sinyal GNSS di lapisan atmosfer	14
Gambar 2. 7 Profil Vertical Ionosfer	15
Gambar 2. 8 Perbedaan IPP (Ionospheric Pierce Point) dan SIP (Sub-ionospheric Point).....	18
Gambar 2. 9 STEC (Slant TEC) dan VTEC (Vertical TEC).....	20
Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian CORS-GPS	23
Gambar 3. 2 Diagram Alir Tahapan Pelaksanaan	25
Gambar 3. 3 Diagram Alir Tahapan Pengolahan Data.....	28
Gambar 4. 1 Hasil Pengolahan Data Observasi.....	31
Gambar 4. 2 Hasil Pengolahan Data Navigasi	32
Gambar 4. 3 Orbit Satelit Saat Gempa pada Tanggal 2 Maret 2016 Pukul 11.00-14.00UT.....	34
Gambar 4. 4 Plotting Orbit Satelit Nomor 17 Yang Dipetakan Melalui SIP di Semua Stasiun Pukul 11.00- 14.00UT.	35
Gambar 4. 5 STEC satelit GPS nomor 17 di semua stasiun pengamatan pada tanggal 2 Maret 2016.....	36
Gambar 4. 6 STEC dan polinomialnya di stasiun CAIR.....	38
Gambar 4. 7 STEC dan polinomialnya di stasiun CBKT.....	38

Gambar 4. 8	STEC dan polinomialnya di stasiun CPAR	39
Gambar 4. 9	STEC dan polinomialnya di stasiun CPDG	40
Gambar 4. 10	STEC dan polinomialnya di stasiun CSEL	41
Gambar 4. 11	VTEC satelit GPS nomor 17 di semua stasiun pada saat gempa tanggal 2 Maret 2016.	42
Gambar 4. 12	STEC satelit Glonass nomor 14 di semua stasiun pengamatan pada tanggal 2 Maret 2016..	43
Gambar 4. 13	STEC satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CAIR	44
Gambar 4. 14	STEC satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CBKT	45
Gambar 4. 15	STEC Satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CPDG	46
Gambar 4. 16	STEC satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CSEL	47
Gambar 4. 17	VTEC satelit Glonass Nomor 14 di Semua Stasiun pada saat Gempa Tanggal 2 Maret 2016.	48

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Posisi Stasiun CORS-GPS BIG untuk Penelitian.....24

“Halaman ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Contoh Data Rinex Observasi.....	53
Lampiran 2: Contoh Data Rinex Navigasi	54
Lampiran 3: Script Program rdrnx.f Untuk Mengolah Data Observasi	55
Lampiran 4: Script Program rdeph.f Untuk Pengolahan Data Navigasi.....	63
Lampiran 5: Contoh Hasil Pengolahan Data Observasi	68
Lampiran 6: Contoh Hasil Pengolahan Data Navigasi.....	69
Lampiran 7: Contoh Program Plotting STEC di Matlab	70
Lampiran 8: Program Untuk Plotting IPP dan SIP	71
Lampiran 9: Contoh Script Perhitungan nilai STEC dan Polinomial Pangkat Enam.....	77
Lampiran 10: Contoh Script Plotting Nilai VTEC	78
Lampiran 11: Contoh Grafik STEC Hari Sebelum Gempa	78
Lampiran 12: Contoh Grafik STEC Hari Sesudah Gempa	80

“Halaman ini Sengaja Dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

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 7cm/tahun. Akibat dari pergerakan lempeng tersebut maka Indonesia sering disebut berada pada daerah *Ring of Fire*, yaitu daerah yang sering mengalami gempa bumi dan letusan gunung berapi. Pergesekan lempeng yang menunjam menyebabkan aktivitas tektonik sepanjang Pulau Sumatra muncul sebagai deretan daerah gempa bumi (Handayani et al, 2012).

Untuk memantau perkembangan gempa, studi teknik geodesi/geomatika sangat berperan, yaitu teknologi GNSS yang digunakan untuk monitoring pergerakan lempeng bumi dan efek yang terjadi di lapisan ionosfer dengan memanfaatkan satelit GNSS. Salah satu *precursor anomaly* yang terjadi sebelum gempa didapatkan dari pengukuran variasi *Total Electron Content* (TEC) menggunakan data *Global Positioning System* (GPS) (Subakti, 2008). 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 satu jam setelah gempa terjadi. Fluktuasi pada *CID* dapat digunakan sebagai *early warning* sebelum tsunami datang. 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 (Cahyadi & Heki, 2013).

Gempa bumi akan membentuk dan merambatkan tiga energi gelombang, yaitu : *Acoustik*, *Gravity*, dan *Reyligh*. Gelombang *Acoustic* (kecepatan 1 km/s) dihasilkan dekat dari pusat gempa bumi, lalu menyebar ke atas dan mencapai ditinggikan lapisan F ionosfer dalam waktu 10 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) dihasilkan dari gelombang permukaan yang merambat menjauh dari pusat gempa. Gelombang *Acoustic* yang dihasilkan secara tegak lurus dari kerak bumi selama gempa merambat ke ionosfer membuat penyimpangan dari kerapatan elektron terdeteksi sebagai CID. Akibatnya, gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh satelit GNSS akan mengalami *delay* ketika melewati ionosfer kira-kira 300km dari permukaan bumi. Variasi ionosfer diamati pada saat *time-delay* ini, berdasarkan kuantitas *Total Electron 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 dapat mengganggu densitas elektron yang ada di ionosfer hingga radius 400 km dari pusat gempa (Cahyadi, 2014).

Dalam penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan (Septiningrum, 2016) yaitu mengamati variasi perubahan ionosfer setelah terjadinya gempa akibat gempa di Mentawai menggunakan data *Sumatra GPS Array* (SUGAR), sedangkan dalam penelitian yang akan dilakukan ini adalah mengamati perubahan ionosfer, yakni *Coseismic Ionospheric Disturbance* (CID) anomali TEC ketika terjadi gempa bumi di Sumatra Barat pada tanggal 2 Maret 2016 yang magnitudenya sebesar 8,3SR dengan pengolahan data GNSS dari stasiun

milik Badan Informasi Geospasial (BIG) yang berada di daerah Sumatra.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah:

- a. Bagaimana perubahan ionosfer akibat gempa bumi Sumatra Barat pada tanggal 2 Maret 2016?
- b. Berapa besar perubahan TEC yang di rekam oleh satelit GNSS pada saat gempa bumi?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari Tugas Akhir ini adalah :

- a. Penelitian ini menjelaskan perubahan ionosfer akibat dari gempa tektonik Sumatra Barat pada tanggal 2 Maret 2016.
- b. Penelitian ini menggunakan data pengamatan GPS dari Badan Informasi Geospasial (BIG) pada tanggal 29 Februari 2016, 1-4 Maret 2016, atau 60 doy hingga 64 doy pada stasiun receiver di daerah Sumatra, yaitu CAIR, CPAR, CBKT, CPAR, dan CSEL.
- c. Penelitian ini menentukan berapa besar perubahan TEC akibat dari gempa Sumatra Barat pada tanggal 2 Maret 2016.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Untuk mengetahui perubahan yang terjadi di ionosfer akibat gempa bumi Sumatra Barat pada tanggal 2 Maret 2016
- b. Untuk mendapatkan besar perubahan TEC yang direkam satelit GNSS pada saat gempa bumi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan ionosfer khususnya TEC ketika terjadi gempa bumi Sumatra Barat pada tanggal 2 Maret Tahun 2016

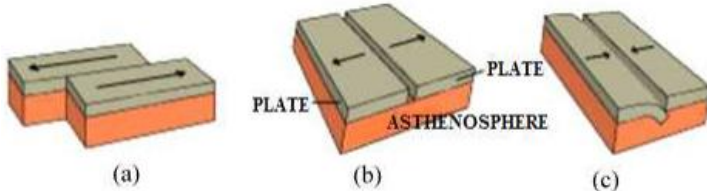
“Halaman ini Sengaja Dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tektonik Lempeng

Lempeng merupakan materi penyusun bumi dengan ketebalan kira-kira 100 km dan terletak pada bagian paling atas bumi. Sekitar 225 juta tahun yang lalu, lempeng-lempeng bergabung dalam satu benua besar bernama Pangea. Menurut teori pergerakan benua (*continental drift*), yang dibuat oleh Wegener, Pangea pecah menjadi dua benua besar bernama Eurasia di bagian utara dan Gondwanaland di bagian selatan.

Lempeng tektonik yang merupakan bagian dari litosfir padat dan terapung di atas mantel ikut bergerak satu sama lainnya. Ada tiga kemungkinan pergerakan satu lempeng tektonik relatif terhadap lempeng lainnya seperti yang nampak pada gambar 2.1, yaitu kedua lempeng saling menjauhi (*spreading*), saling mendekati (*collision*) dan saling geser (*transform*) (Novianta, 2012). Lempeng tektonik adalah model kulit bumi terluar yang sangat tipis yang terbagi menjadi beberapa, lempeng bumi bergerak relatif terhadap satu sama lainnya. Kecepatan relatif dari pergerakan lempeng sampai beberapa puluh millimeter pertahun. Sebuah peristiwa besar seperti gempa bumi, letusan gunung berapi biasanya terjadi pada batas-batas lempeng.



Gambar 2. 1 Arah pergerakan lempeng tektonik
(a). Lempeng Transform, (b). Lempeng Divergen, (c).
Lempeng Konvergen
(sumber: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic>).

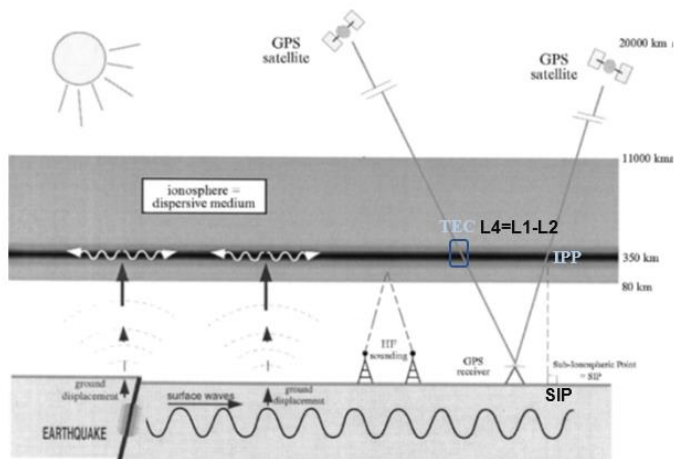
Lempeng-lempeng tektonik yang terbentuk sekarang ini, tanpa kita sadari bergerak terus secara konstan. Akibat pergerakan tersebut terbentuklah daerah-daerah batas antar lempeng. Terdapat tiga jenis pergerakan lempeng tektonik relatif terhadap lempeng lain, yaitu bersubduksi, saling menjauh dan saling geser. Lempeng-lempeng tersebut ketika bertemu di dalam sebuah akan membentuk zona subduksi. Lempeng-lempeng akan saling bergesekan, dan mengakibatkan adanya akumulasi energi di daerah gerakan tersebut. Ketika lempeng tidak dapat menampung lagi besarnya energi, maka lempeng akan patah. Hal ini dinamakan dengan istilah *elastic rebound theory* (Mubyarto, 2008).

2.2 Gempa Bumi dan Pengaruhnya Terhadap Ionosfer

Gempa bumi didefinisikan sebagai getaran sesaat, bersifat tidak menerus, akibat terjadinya *sudden slip* (pergeseran secara tiba-tiba) pada kerak bumi. *Sudden slip* terjadi karena adanya sumber (*force*) sebagai penyebabnya. Para peneliti kebumiharian berkesimpulan bahwa penyebab utama terjadinya gempa bumi adalah akibat adanya energi di dalam interior bumi yang menekan kerak bumi (*crust*) yang bersifat rapuh, sehingga ketika kerak bumi tidak kuat menahan respon gaya gerak energi dari dalam bumi tersebut maka akan terjadi batuan terpecahkan secara tiba-tiba (*rock to break suddenly*) dan menghasilkan gempa bumi. Sumatra tercatat sebagai zona subduksi aktif di Indonesia. Desakan lempeng samudra Indo-Australia mengakibatkan lempeng benua tersebut 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. (Andreas et al, 2006).

Ketika batuan tidak lagi kuat menampung tekanan tersebut, maka batuan akan pecah dan mengakibatkan adanya gempa bumi, sesuai dengan *Elastic Rebound Theory* (Scholz,

2004). 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 gempa (Cahyadi & Heki, 2014). Pengaruh gempa bumi terhadap ionosfer dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Gempa dan Pengaruhnya Terhadap Ionosfer

2.3 GNSS

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) merupakan suatu istilah yang digunakan untuk mencakup seluruh sistem satelit navigasi global yang sudah beroperasi ataupun sedang dalam perencanaan. Sistem satelit navigasi GPS (*Global Positioning System*) milik negara Amerika Serikat merupakan yang paling terkenal dan saat telah beroperasi penuh. Satelit GPS pertama kali diluncurkan pada tahun 1978 dan konfigurasi selesai pada tahun 1994. Sampai dengan bulan Mei 2012 ada 31 satelit GPS yang mengorbit dan dalam kondisi baik. Walaupun demikian, sinyal-sinyal yang

ditransmisikan oleh satelit GNSS tersebut masih memiliki kesalahan dan tidak selalu sesuai dengan kenyetaan yang ada. Sehingga harus dilakukan monitoring dari akurasi, ketersediaan, kontinuitas, dan integritas dari sinyal-sinyal tersebut menggunakan titik-titik referensi yang terdapat di permukaan bumi.

Sistem satelit navigasi lainnya yang cukup menjajikan untuk digunakan adalah sistem milik Rusia yang bernama GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya sistema). Seperti halnya GPS, GLONASS pun didesain untuk dapat memberikan posisi, kecepatan, dan waktu, dimana saja permukaan bumi ini pada setiap saat dan waktu tanpa bergantung cuaca. Prinsip penentuan posisi menggunakan sistem-sistem ini juga pada dasarnya sama, yaitu dengan mengukur jarak ke beberapa satelit sekaligus.

Sistem GLONASS ini mulai dibangun sejak tahun 1970-an, meskipun secara resmi baru diumumkan oleh Uni Soviet pada Februari 1982. Satelit GLONASS yang pertama diluncurkan pada 12 Oktober 1982, dan sampai dengan Agustus 2000, ada 9 satelit GLONASS yang operasional secara penuh dan 4 satelit dinyatakan tidak sehat. Seperti halnya GPS, sistem GLONASS ini didesain untuk operasional dengan 24 satelit

Pada saat konstelasi satelit GLONASS lengkap, maka kita akan mempunyai 48 satelit navigasi di angkasa kita (24 satelit GPS dan 24 satelit GLONASS). Dengan 48 satelit ini, jumlah satelit yang dapat teramati akan menjadi lebih banyak, geometri satelit akan menjadi lebih baik dan lebih kuat, dan ketelitian dari parameter yang diestimasi (baik itu posisi, kecepatan, percepatan, maupun waktu) akan menjadi lebih baik. Dengan kata lain, navigasi dan penentuan posisi yang bersifat global, andal, dan akurat akan menjadi lebih mudah untuk direalisasi.

Teknologi GNSS ini dapat digunakan untuk berbagai macam aplikasi seperti penentuan posisi akurat, survey &

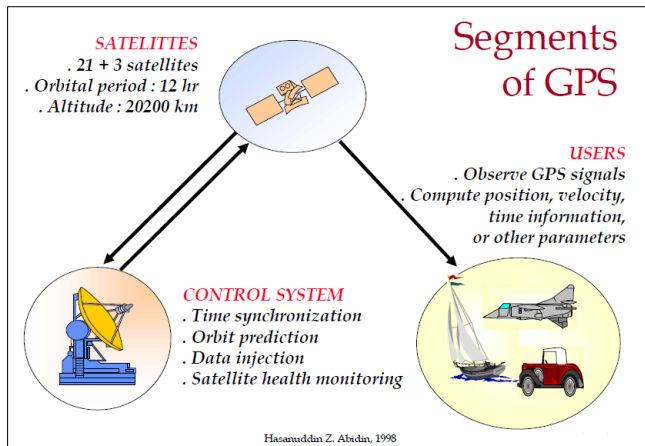
pemetaan, dan berbagai macam aplikasi lainnya. Industri survey dan pemetaan telah mengalami revolusi dengan penggunaan GNSS yang menggunakan teknologi satelit, dimana sebagai referensi dalam pengukuran, digunakan receiver GNSS yang dapat mendukung berbagai macam aplikasi penentuan posisi baik itu untuk ketelitian tinggi seperti pemantauan lempeng tektonik, survey deformasi, pemantauan gempa bumi, pemodelan ionosfer dan troposfer maupun aplikasi – aplikasi praktis seperti navigasi. Banyaknya berbagai macam aplikasi penentuan posisi yang menggunakan receiver GNSS sebagai referensi membuat stasiun referensi permanen atau disebut CORS (*Continuously Operating Reference Station*). Sistem CORS ini digunakan untuk berbagai macam aplikasi berbasis GNSS seperti *Network RTK*, *Differential GPS* maupun *post-processing positioning*.

2.3.1. GPS

Global Positioning System (GPS) adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi menggunakan satelit. Nama formalnya adalah NAVSTAR GPS kependekan dari “*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*”. GPS merupakan tanggungjawab dari *Joint Program Office* (JPO), bagian dari *Space Missie* di El Segundo, California. Pada 1973 JPO didirikan oleh *Department of Defense* (DoD), U.S. untuk mendirikan, membangun percobaan, memperoleh dan menyebarkan posisi ruang angkasa. (Holfmann-Wellenfof & Collins, 2001).

GPS menyediakan penentuan posisi secara terus-menerus dan informasi waktu, dimana saja di dunia dan di bawah semua kondisi cuaca. Karena, hal itu berfungsi pada pengguna dengan jumlah tidak terbatas serta digunakan untuk alasan keamanan, GPS adalah sistem *one-way-ranging* (pasif). Dalam hal ini, pengguna hanya dapat menerima sistem, komponen, dan ide dasar.

Pada dasarnya GPS terdiri atas tiga segmen utama, yaitu segmen angkasa yang terdiri dari satelit-satelit GPS, segmen system control yang terdiri dari stasiun-stasiun pemonitor dan pengontrol satelit, dan segmen pengguna yang terdiri dari pengguna GPS termasuk alat-alat penerima dan pengolah sinyal dan data GPS. Untuk lebih jelasnya, Struktur segmen GPS akan ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Segmen Utama GPS
(Sumber: Abidin, 2006)

2.3.2. Sinyal GPS

Untuk memberikan informasi, GPS memberikan sinyal-sinyal tentang posisi satelit maupun si pengamat, waktu, jarak melalui transmisinya ke bumi. Sinyal GPS juga digunakan untuk menginformasikan kelayakgunaan (kesehatan) satelit kepada si pengamat, serta informasi pendukung lainnya seperti parameter untuk perhitungan koreksi jam satelit, parameter model ionosfer satu frekuensi (model *Klobuchar*), transformasi waktu GPS ke UTC (*Universal Time Coordinate*), dan status konstelasi satelit (Abidin, 2006).

Pada dasarnya sinyal GPS dapat dibagi menjadi tiga komponen, yaitu:

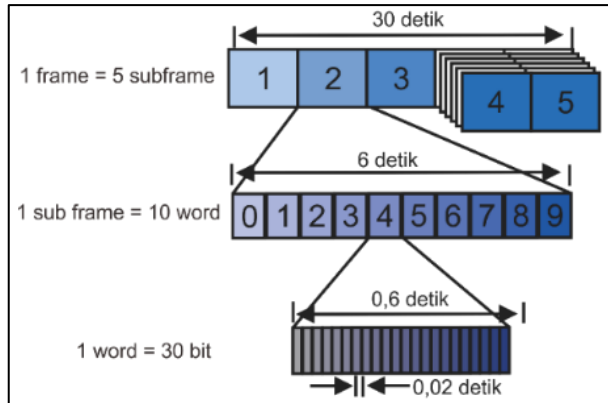
a. Penginformasian jarak (kode)

Ada dua kode *pseudo-random noise* (PRN) yang dikirimkan oleh satelit GPS dan digunakan sebagai penginformasian jarak, yaitu kode-P ($P = \textit{Precise}$ atau $\textit{Private}$) dan kode-C/A ($C/A = \textit{Coarse Aquisition}$ atau $\textit{Clear Access}$).

Kode - C/A merupakan rangkaian dari 1023 bilangan biner yang berulang setiap satu milidetik ($msec$) dan sekitar 300 meter dalam unit jarak. Pada kode C/A hanya dimodulasikan pada gelombang pembawa L1. Kode -P merupakan rangkaian bilangan biner yang sangat panjang, yaitu $2,3547 \times 10^{14}$. Kode -P tersebut dibentuk dengan kecepatan 10 kali lebih cepat dibandingkan dengan kode C/A, yaitu 10,23 juta chips per detik. Sehingga untuk kode -P mempunyai panjang gelombang sekitar 30 meter. Kode -P dimodulasikan pada kedua gelombang pembawa L1 dan L2. Prinsip pengukuran jarak yang digunakan adalah dengan membandingkan kode yang diterima dari satelit dengan kode replika yang diformulasikan di dalam receiver, seperti yang digambarkan berikut ini.

b. Penginformasian posisi satelit (*navigation message*)

Pesan navigasi (*navigation message*) berisi tentang koefisien koreksi jam satelit parameter orbit, almanak satelit, UTC, parameter koreksi ionosfer, serta informasi special lainnya seperti status konstelasi dan kesehatan satelit. Pesan navigasi tersebut ditentukan oleh segmen system control dan dikirimkan (*broadcast*) ke pengguna menggunakan satelit GPS. Salah satu informasi yang terkandung dalam pesan navigasi GPS adalah ephemeris (orbit) satelit yang biasa disebut *broadcast ephemeris*. Struktur pesan navigasi GPS dapat dijelaskan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Format Pesan Navigasi GPS

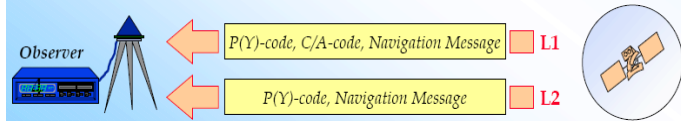
(Sumber: Abidin, 2006)

Broadcast ephemeris ditentukan oleh sistem kontrol GPS dalam dua tahap (Seeber, 1993). Pada tahap pertama, *ephemeris* referensi ditentukan berdasarkan data pengamatan GPS (*Pseudorange* dan fase) selama 7 hari dari semua stasiun monitor (proses *off-line*), dengan menggunakan program perhitungan orbit. Pada tahap kedua yang merupakan proses *on-line*, perbedaan-perbedaan antara hasil pengamatan yang terbaru dari stasiun monitor dengan *ephemeris* referensi diturunkan, dan kemudian diproses dengan menggunakan kode *kalman filtering* untuk memprediksi besarnya koreksi-koreksi bagi *ephemeris* referensi.

c. Gelombang pembawa (*carrier wave*)

Gelombang pembawa yang digunakan oleh GPS yaitu L1 dan L2. Gelombang L1 membawa kode-kode P(Y) dan C/A beserta pesan navigasi, sedangkan gelombang L2 membawa kode P(Y) dan pesan navigasi. Proses pemodulasian sinyal GPS melalui dua tahap yaitu *binary-to binary modification of codes* dan tahap *binary biphas modulation*. Pada tahap pertama, *navigation message* ditumpangkan ke kode-P(Y) dan kode C/A. sedangkan

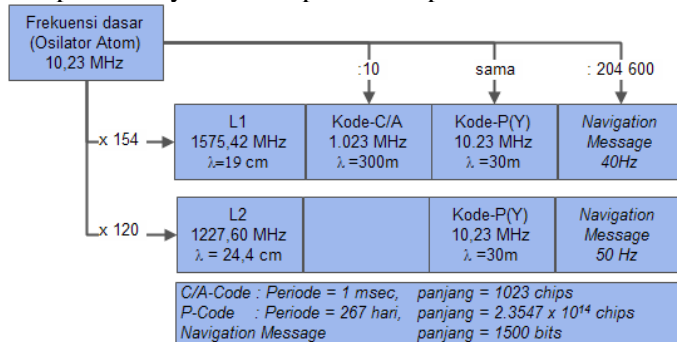
pada tahap kedua, masing-masing kode yang telah ‘membawa’ *navigation message* ditumpangkan ke gelombang pembawa L1 dan L2.



Gambar 2. 5 Data Dan Informasi Yang Dibawa Oleh Gelombang Pembawa L1 Dan L2. (Sumber: Abidin, 2006)

Untuk mendapatkan posisi yang akurat, dilakukan penghilangan atau penghapusan penundaan ionosfer (*ionospheric delay*) melalui pengkombinasian *ionospheric-free linear combination* dari dua fase gelombang pembawa (L3). Sinyal GPS memancarkan gelombang ketiga (L3) yang dimodulasikan oleh kode C/A dan mempunyai frekuensi $1381,05 \text{ MHz} = 135 \times 10,23 \text{ MHz}$ (Spilker, 1996). Sinyal ini sangat baik untuk penentuan posisi dan lain-lain yang mengabaikan kesalahan-kesalahan yang ada di atmosfer bumi, misalnya perhitungan untuk perubahan ionosfer saat terjadi gempabumi.

Struktur frekuensi dan karakteristik dasar dari ketiga komponen sinyal GPS dapat dilihat pada Gambar 2.6.

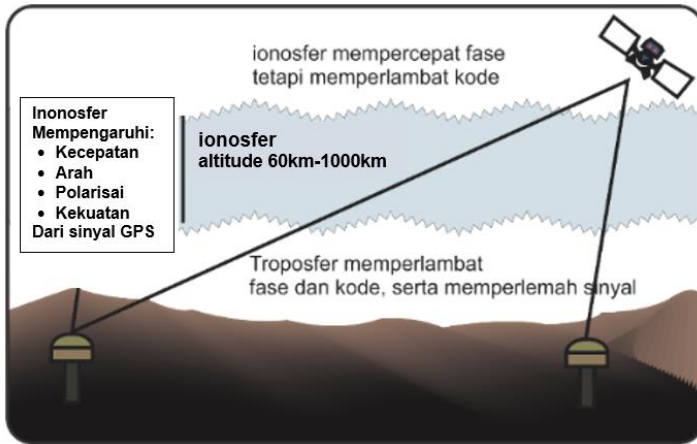


Gambar 2. 6 Struktur frekuensi dan parameter dasar komponen sinyal GPS. (Sumber: Abidin, 2006)

2.4 Ionosfer

Ionosfer adalah bagian dari atmosfer dimana terdapat sejumlah elektron dan ion bebas yang mempengaruhi perambatan gelombang radio. Lapisan ionosfer terletak kira-kira antara 60 sampai 1000 km di atas permukaan bumi. Jumlah elektron dan ion bebas pada lapisan ion-ion ini bergantung pada besarnya intensitas radiasi matahari serta densitas pada lapisan tersebut (Davies,1990).

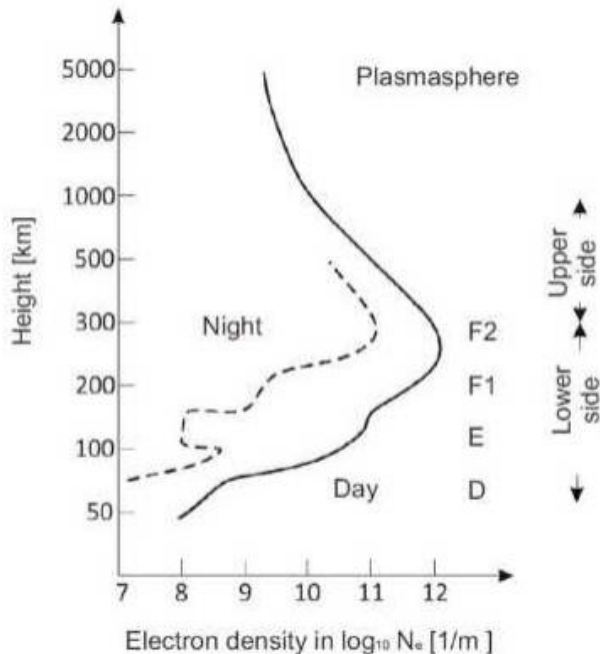
Sinyal yang dipancarkan dari satelit harus melewati lapisan tipis ionosfer dalam perjalanannya ke bumi. Elektron bebas, sebagai partikel yang paling besar di lapisan ionosfer mempengaruhi propagasi sinyal, mengubah kecepatan, arah, polarisasi, dan kekuatan dari sinyal GPS yang melaluinya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Kesalahan posisi yang terjadi karena efek ini disebut *delay* ionosfer.



Gambar 2. 7 Perjalanan Sinyal GNSS di lapisan atmosfer
(Sumber: Abidin, 2006)

Lapisan ionosfer terbentuk akibat sinar ultraviolet dari matahari mengenai atom-atom netral di lapisan atas atmosfer bumi. Energi dari ultraviolet ekstrim ini cukup untuk mengionisasi atom-atom netral tersebut, sehingga terbentuklah ion-ion (Taufiqurrahman, 2010). Suhu naik

diketinggian 400 km. Batas atas tidak jelas, karena pada ketinggian lebih dari 1000 km dari kerapatan elektron secara bertahap menurun, sehingga sulit untuk menentukan dengan tepat transisi dari ionosfer ke plasmasphere tersebut. Pada siang hari, ionosfer terdiri dari empat lapisan. Pada setiap lapisan terdiri dari ion yang berbeda-beda. Dengan semakin bertambahnya ketinggian, bertambah pula jumlah ionnya. Lapisan-lapisan tersebut yaitu :



Gambar 2. 8 Profil Vertikal Ionosfer

(Sumber: <http://www.met.nps.edu>)

a. Lapisan D

Lapisan ionosfer yang paling bawah terentang antara ketinggian 60 km sampai 90 km, dan karena jaraknya relatif yang paling jauh dari matahari, maka ionisasi pada lapisan ini adalah yang terkecil dibandingkan lapisan-lapisan lainnya. Densitas elektron tertinggi terjadi di sekitar siang

hari ditemukan diketinggian 60-70 km. Pada ketinggian tersebut, penyebab ionisasi utama adalah radiasi kosmik yang dipengaruhi oleh medan magnet bumi. Karena itu konsentrasi elektron di lapisan ini bertambah besar ke arah kutub. Pada malam hari, elektron bergabung dengan molekul sehingga jumlah elektron bebas menjadi sangat kecil. Karena itu lapisan ini ada di siang hari dan menghilang pada malam hari.

b. Lapisan E

Lapisan E yang kadang dinamakan lapisan *Kennely – Heaviside*, yang terentang pada ketinggian 85 km sampai 140 km. Dengan densitas elektron maksimum diketinggian sekitar 100 km yang dibentuk oleh ionisasi atom oksigen disebabkan radiasi ultra violet matahari, dengan densitas elektron maksimum terjadi di siang hari.

c. Lapisan F1

Lapisan tertinggi ionosfer adalah lapisan F yang berada pada ketinggian 140 km sampai 200 km menunjukkan variasi yang berbeda dibandingkan bagian di atasnya, sehingga lapisan ini dibagi menjadi lapisan F1 dan F2 (di atas 200 km). Densitas lapisan F1 mencapai maksimum pada ketinggian 160 km sampai 180 km terjadi satu jam setelah siang hari. Pada malam hari F1 dan F2 bergabung menjadi lapisan F.

d. Lapisan F2

Lapisan F2 merupakan lapisan tertinggi sehingga pengaruh matahari pada lapisan ini adalah yang terbesar dan terkuat dibandingkan terhadap lapisan–lapisan lainnya. Densitas elektron pada lapisan mencapai maksimum pada ketinggian 250 km sampai 500 km atau lebih yang terjadi setelah siang hari dan kadang-kadang sore hari. Hal ini disebabkan oleh letaknya yang cukup tinggi dan tetap menerima radiasi matahari selama beberapa jam setelah matahari terbenam.

2.4.1. Kombinasi Bebas Ionofor

Satelit GPS terletak diatas permukaan bumi setinggi ~ 20.000 km yang mengirimkan sinyal gelombang mikro dengan dua gelombang pembawa (L1 dan L2), dan gelombang tersebut datang melalui ionosfer sebelum sampai di receiver (Abidin, 2006). Untuk mendapatkan posisi yang akurat, dilakukan penghilangan atau penghapusan penundaan ionosfer (*ionospheric delay*) melalui pengkombinasian *ionospheric-free linear combination* dari dua fase gelombang pembawa (L3) (Cahyadi & Heki, 2013):

$$L_3 = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)L_1} - \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)L_2} \quad (2.1)$$

f_1, f_2 adalah frekuensi sinyal panjang gelombang L_1 dan L_2 , berurutan.

Data kombinasi bebas ionosfer umumnya digunakan untuk aplikasi GPS yang jarak antar stasiunnya relative besar, yaitu dalam orde ratusan km atau lebih, dimana efek bias ionosfer umumnya relative besar. Dapat diketahui bahwa yang dieliminasi dengan pengkombinasian kedua data tersebut adalah efek ionosfer orde pertama, yang merupakan komponen bias ionosfer yang paling besar dalam data GPS.

Kombinasi bebas ionosfer tidak mengubah amplitude dari kesalahan dan bias yang besarnya tidak bergantung pada frekuensi, seperti kesalahan orbit dan bias troposfer. Magnitude dari kesalahan dan bias yang besarnya bergantung pada frekuensi sinyal, seperti multipath, bias ionosfer dan noise akan berubah sesudah pengkombinasian.

2.4.2. Kombinasi Bebas Geometry

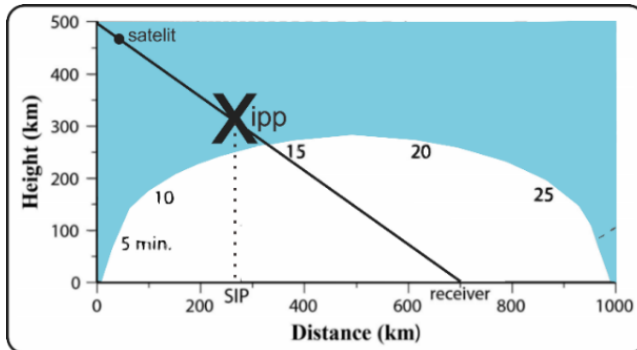
Untuk studi ionosfer, fase berbeda dari dua frekuensi (L_4) yang sering dikenal kombinasi linear ionosfer atau *ionospheric linear combination*. Untuk mendapatkan L_4 , L_1 dan L_2 dikonversi dari radian ke panjang dengan

mengalikan setiap panjang gelombang pembawa. Perbedaan antara L_1 dan L_2 ditentukan untuk mendapatkan L_4 . TEC didapatkan dari L_4 dengan mengalikan dengan faktor skala.

$$\Delta L_4 = L_1 - L_2 \quad (2.2)$$

$$\Delta \text{TEC} = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2) \Delta L_4} \quad (2.3)$$

Kombinasi linear ionosfer sering lebih jauh digunakan untuk mendapatkan TEC dengan menghilangkan ambiguitas (dan *cycle-slips*) dan frekuensi bias dalam data fase (Abidin, 2006). Sinyal gelombang mikro mengalami ketergantungan dalam penundaan frekuensi di ionosfer. Dengan membawa perbedaan antara L_1 dan L_2 fase (L_4), dapat di perhatikan perubahan temporal TEC selama jarak antara satelit GPS ke receiver atau *Line Of Sight* (disebut *Slant TEC*). Perpotongan LOS dan ionosfer disebut *Ionospheric Pierce Point* (IPP), dan proyeksi dari IPP ke atas permukaan tanah disebut *Sub-ionospheric Point* (SIP), seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Perbedaan IPP (Ionospheric Pierce Point) dan SIP (Sub-ionospheric Point)

2.4.3. Refraksi Ionosfer

Ionosfer, perluasan dari beberapa lapis dari sekitar 50 km ke 1000 km diatas permukaan bumi, adalah media dispersi dengan pengaruh kepada sinyal radio GPS. Menurut (Seeber, 1993) dalam (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Collins, 2001), serinya :

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.4)$$

Perkiraan dari indeks refraksi koefisien c_1 , c_2 , c_3 tidak bergantung pada frekuensi tetapi banyaknya N_e menunjukkan jumlah eketron per meter kubik, densitas elektron sepanjang bagian perambatan. Sehingga dapat disimpulkan dari persamaan diatas bahwa deviasi indeks refraksi grup dan fase from unit dengan tanda keberbalikan. Dengan estimasi untuk c_2 (Seeber 1993) dalam (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Collins, 2001)

$$c_2 = -40.3 N_e [\text{Hz}^2] \quad (2.5)$$

Berdasarkan prinsip Fermat, pengukuran jarak ditentukan oleh,

$$s = \int n ds \quad (2.6)$$

Diturunkan sedemikian rupa dengan sehingga hasilnya dapat juga ditulis sebagai,

$$\Delta_{ph}^{iono} = \int \frac{40,3}{f^2} \int N_e ds_0$$

$$\Delta_{gr}^{iono} = \frac{40,3}{f^2} \int N_e ds_0 \quad (2.7)$$

Dimana (2.7) telah disubsitusikan. Menentukan *Total electron Content* (TEC) dengan

$$\text{TEC} = \int N_e ds_0 \quad (2.8)$$

Dan disubtitusi TEC kedalam (2.16)

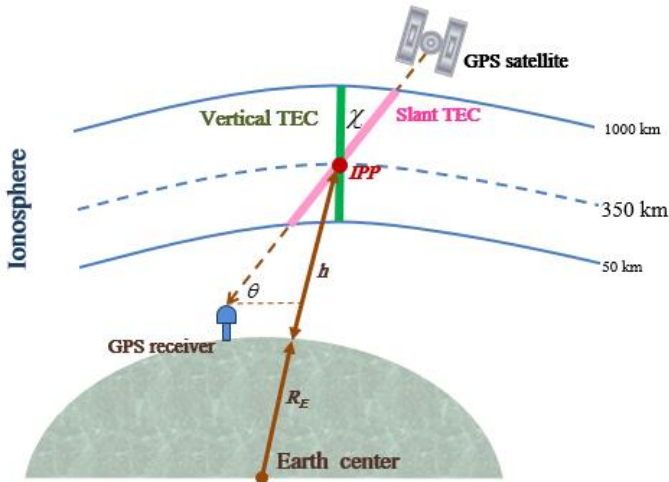
$$\Delta_{ph}^{iono} = \int \frac{40,3}{f^2} \text{TEC}, \Delta_{gr}^{iono} = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (2.9)$$

Biasanya, TEC diberikan dalam TEC unit (TECU) dimana,

$$1\text{TECU} = 10^{16} \text{ elektron/m}^2 \quad (2.10)$$

2.5 TEC (Total Electron Content)

TEC adalah jumlah elektron dalam kolom vertikal (silinder) berpenampang seluas 1 m^2 sepanjang lintasan sinyal dalam lapisan ionosfer, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. TEC per definisi secara lebih spesifik dinamakan *Slant TEC* (STEC). Disamping STEC, dikenal juga istilah *Vertikal TEC* (VTEC), yang merepresentasikan TEC dalam arah vertikal. Nilai TEC biasanya dinyatakan dalam TECU, dimana 1 TECU adalah sama dengan 10^{16} elektron/ m^2 . Nilai TEC ionosfer pada umumnya berkisar antara 1 sampai 200 TECU (Abidin, 2006).



Gambar 2. 10 STEC (*Slant TEC*) dan VTEC (*Vertical TEC*) (http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=243)

Kecepatan perambatan gelombang pada titik-titik di ionosfer adalah ditentukan oleh densitas elektron di titik-titik

tersebut. Makin besar densitas elektron makin tinggi kecepatan perambatannya. Densitas elektron diukur dengan menghitung jumlah elektron di suatu kolom vertikal maupun slant setinggi 1m di ionosfer dengan penampang melintang seluas 1 m^2 . Jumlah densitas elektron di suatu kolom vertikal maupun slant sepanjang lintasan sinyal dari pembangkit sinyal dengan penampang melintang seluas 1 m^2 atau sebagai integral vertikal dari densitas elektron Ne .

Pemodelan TEC banyak dilakukan dengan beberapa teknik, diantaranya adalah *spherical harmonics*, *broadcasting ionospheric model* dan *polynomial*. Berdasarkan penelitian (Heki, 2011) menjelaskan bahwa anomali TEC dapat dilihat dari *fitting line* pada perhitungan TEC, grafik naik dan turun yang tidak beraturan merupakan nilai fluktuasi TEC. Sedangkan menurut (Muslim, 2009) Anomali ionosfer dapat diukur dari simpangannya terhadap nilai TEC kondisi normal. Kondisi normal sebagai referensi dapat ditentukan dari nilai median 27 hari pada tiap jam nilai TEC. Ukuran gangguan ini dapat dihitung dari simpangan TEC pada hari dan jam tertentu terhadap nilai median TEC tersebut, kemudian dijadikan dalam persen dengan membaginya dengan nilai mediannya. Kondisi ionosfer dapat dikelompokkan menjadi 4 kondisi: tenang, moderat, badai, dan badai intensif. Pengelompokan ini bisa diukur dengan nilai logaritma perbandingan TEC dengan nilai mediannya.

2.6 Penelitian Terdahulu

Pada peneletian sebelumnya, (Denaro, 2015) dengan judul “Analisis Perubahan Ionosfer Dan Posisi Stasiun GPS-CORS Pada Saat Letusan Besar Gunung Berapi 2010” dengan menggunakan data GPS milik BIG dan *SUGAR* menerangkan bahwa pengukuran gangguan ionosfer pada letusan Gunung Merapi 2010 berkaitan dengan nilai perubahan posisi stasiun GPS-CORS yang berada pada pulau Sumatra dan Jawa. Untuk itu, perlu adanya data pengamatan stasiun GPS-CORS yang

lebih banyak yang terletak di lokasi Gunung Merapi untuk menentukan hubungan nilai perubahan posisi dan gangguan ionosfer. Lokasi stasiun yang letaknya tidak berada di sekitar Gunung Merapi sangat memungkinkan bahwa faktor perubahan posisi stasiun tidak disebabkan oleh letusan itu sendiri melainkan dari faktor lain seperti pergerakan lempeng dll.

Septiningrum (2016) juga melakukan penelitian dengan judul “Analisis Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Mentawai Tahun 2010” dengan menggunakan data GPS *SUGAR*. Penelitian ini mengamati tiga kali gempa yang terjadi di Kepulauan Mentawai pada tahun 2010. Dari hasil yang didapatkan menunjukkan adanya anomali di lapisan ionosfer bergantung pada besarnya gempa dan kedalaman episenter. Hanya ada satu satelit yang dapat merekam gangguan lapisan ionosfer di setiap gempa, dengan nilai TEC sebesar 1-8 TECU yang terjadi pada rentang waktu antara 11-48 menit setelah gempa terjadi.

BAB III METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan pada stasiun pengamatan CORS-GPS milik BIG yang dekat lokasi gempa dengan epicenter $5^{\circ} 9' 36''$ Lintang Selatan dan $94^{\circ} 3'$ Bujur Timur. Stasiun pengamatan tersebut adalah CAIR, CBKT, CPAR, CPDG, dan CSEL dengan detail posisi yang dijelaskan pada gambar 3.1 dan Tabel 3.1. Pengamatan dilakukan dua hari sebelum, saat terjadi, dan dua hari setelah gempa bumi pada tanggal 2 Maret 2016.



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian CORS-GPS
(<http://inacors.big.go.id/spiderweb/frmIndex.aspx>)

Tabel 3. 1 Posisi Stasiun CORS-GPS BIG untuk Penelitian
(<http://inacors.big.go.id/spiderweb/frmIndex.aspx>)

No.	Nama Stasiun CORS-GPS	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

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah :

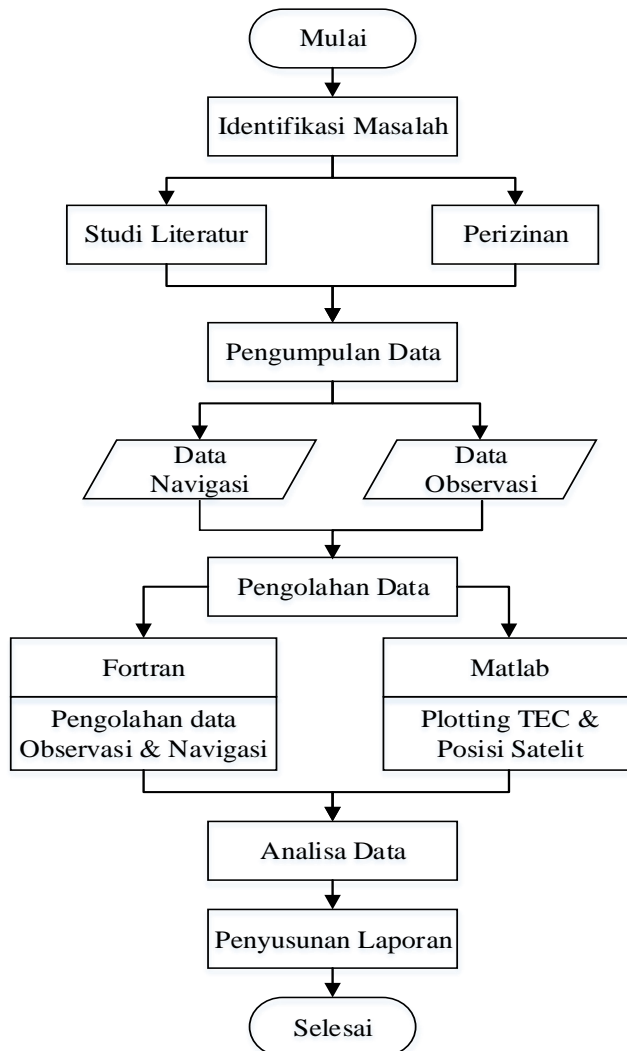
- a. Data *rinex observasi* (pada tanggal 29 Februari 2016, 1-4 Maret 2016, atau 60 doy hingga 64 doy) dari stasiun GPS yang diperoleh dari BIG
- b. Data Navigasi Satelit, diunduh dari:
(<http://garner.ucsd.edu/pub/nav>)
- c. Data program *rdrnx.f* dan *rdeph.f*, diunduh dari:
(<https://ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>)

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a. Perangkat Keras (Hardware)
 - Stasiun GPS Online
 - *Personal Computer (PC) / Laptop*
- b. Perangkat Lunak (*Software*)
 - Sistem Operasi *Windows 10* dan *Linux Ubuntu*.
 - Bahasa Pemrograman Fortran.
 - MATLAB R2014a
 - Microsoft Office (Ms. Word, Ms. Excel, dan Ms. Visio).

3.3 Tahapan Pelaksanaan



Gambar 3. 2 Diagram Alir Tahapan Pelaksanaan

Berikut adalah penjelasan diagram alir tahapan pelaksanaan penelitian :

1. Tahap Persiapan

- **Identifikasi Masalah**
Kegiatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi penelitian yang akan dilakukan, yaitu untuk menentukan perubahan *TEC* yang diamati dari beberapa stasiun CORS-GPS milik BIG yang berada di wilayah Sumatera akibat dari Gempa Sumatera pada tanggal 2 Maret 2016.

- **Studi Literatur**
Kegiatan ini bertujuan untuk memperoleh referensi yang akan digunakan dalam penelitian sehingga penulis memahami materi dari bidang yang akan diteliti. Yaitu meliputi: gempa bumi, tektonik lempeng, *GNSS*, ionosfer, *TEC*, software untuk mengolah data, analisa hasil pengolahan data dan juga hal-hal yang berkaitan dengan pelaksanaan penelitian ini.

- **Perizinan**
Kegiatan ini bertujuan untuk mendapatkan izin menggunakan data dari instansi terkait, yaitu Badan Informasi Spasial (BIG) sehingga data yang digunakan bersifat resmi dan penelitian dapat berjalan dengan lancar

- **Pengumpulan Data**
Kegiatan pengumpulan data ini dilaksanakan setelah perizinan disetujui, data yang diperlukan yaitu: data rinx observasi CORS-GPS di Pulau Sumatera yang di dapatkan dari BIG, data navigasi untuk mengetahui orbit satelit, dan data parameter lain untuk koreksi satelit dalam penentuan posisi.

2. Tahap Pengolahan dan Analisa

- Pengolahan Data

Pada tahap ini dilakukan pengolahan dari data yang telah didapat saat pengumpulan data sehingga mendapatkan hasil sesuai dengan penelitian yang diinginkan. Pengolahan data ini nantinya akan menggunakan fortran pada sistem operasi Linux-Ubuntu dan aplikasi Matlab pada sistem operasi Windows. Tahapan pengolahan akan dijelaskan lebih lanjut pada Gambar 3.3.

- Analisa Data

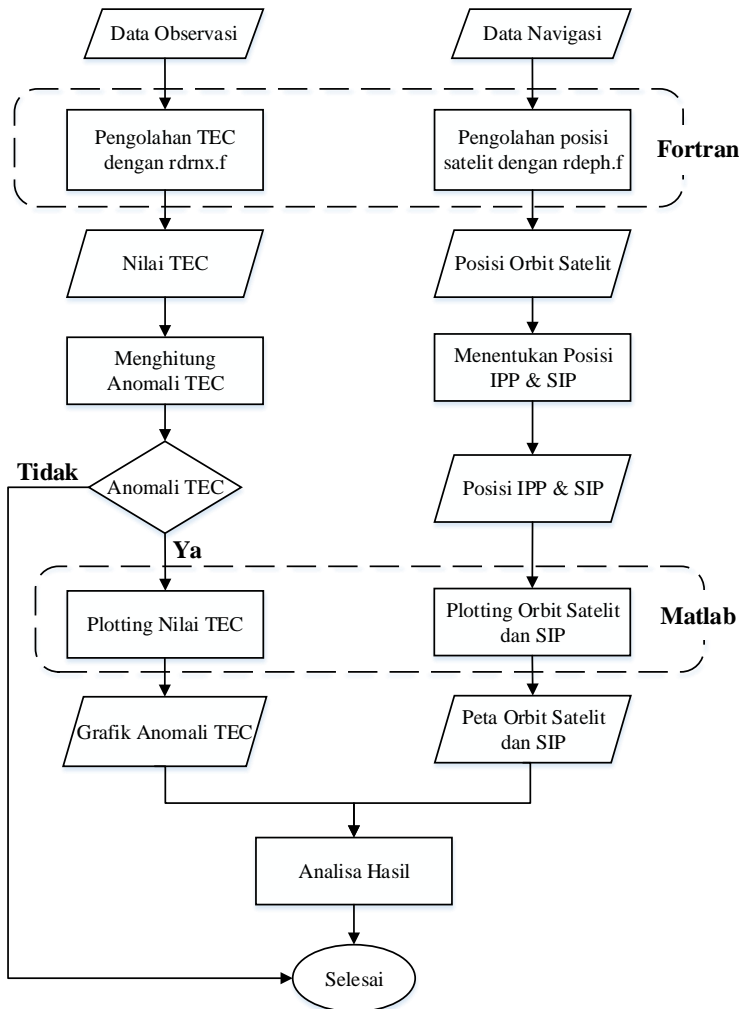
Data yang telah diolah kemudian dianalisa sedemikian rupa sehingga diperoleh hasil berupa gangguan ionosfer yang dinyatakan dalam bentuk anomali *TEC (Total Electron Contain)* akibat dari gempa bumi yang nantinya ditampilkan pada bab selanjutnya dalam laporan tugas akhir ini.

3. Tahap Akhir

- Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan merupakan kegiatan atau tahap akhir dari tugas akhir ini, dimana laporan ini mencakup seluruh hasil dari proses awal hingga akhir penelitian ini.

3.4 Tahapan Pengolahan Data



Gambar 3. 3 Diagram Alir Tahapan Pengolahan Data

Berikut adalah penjelasan diagram alir tahapan pengolahan data :

a. Data

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* (<http://garner.ucsd.edu/pub/nav>) dengan 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.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengolahan Data dengan Fortran

Data Observasi didapatkan dari BIG dalam bentuk RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), kemudian diolah menggunakan program `rdnrx.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 nilai STEC untuk satelit yang direkam oleh setiap stasiun.

```
> sat# 2 #data:1053 site:cair bias: -103.9571
15.225      0.0000
15.233      0.2352
15.242      0.4768
15.250      0.7102
15.258      0.9482
15.267      1.0895
15.275      1.2692
15.283      1.3599
15.292      1.4914
....
....
> sat#20 #data: 661 site:cair bias: -8.2525
18.492      0.0000
18.500      0.0463
18.508      0.0859
18.517      0.1730
18.525      0.2497
18.533      0.2796
....
....
```

Gambar 4. 1 Hasil Pengolahan Data Observasi

Gambar diatas menunjukkan data hasil pengolahan data observasi stasiun CAIR untuk mendapatkan nilai STEC dengan interval waktu 30 detik pada setiap satelit yang terekam.

Sedangkan hasil pengolahan data navigasi(*.n) adalah waktu (UTC) dengan interval 3 menit dan posisi orbit satelit.

0.00	1	0.10323642353D+08	--.20466290935D+08	--.13297311885D+08
0.00	2	--.21642625341D+08	0.12816705571D+08	--.74228891276D+07
0.00	3	0.104885057257D+07	--.15625988652D+08	--.21450546166D+08
0.00	5	--.20746938249D+08	0.50823659197D+07	0.15840121587D+08
0.00	6	--.19494660944D+08	0.36166579458D+06	--.18021557777D+08
0.00	7	--.51085319498D+07	--.14858306451D+08	0.21489175122D+08
0.00	8	0.73163423199D+07	--.20320477695D+08	0.15502641410D+08
0.00	9	--.82658571658D+07	--.24667282081D+08	0.53019939937D+07
0.00	10	0.24184008715D+08	0.10736421865D+08	0.26479913027D+07
0.00	11	0.97411693136D+07	--.24394315426D+08	--.42841935208D+07
0.00	12	--.55778988910D+07	0.13511105062D+08	--.22295755062D+08
0.00	13	--.12687948301D+08	0.12028750095D+08	0.19884762897D+08
0.00	14	0.14052293872D+08	0.13414278687D+08	--.17929169662D+08
0.00	15	--.37430094309D+07	0.23171718890D+08	0.11971515404D+08
0.00	16	0.20644676295D+08	--.26869537986D+07	0.16632794095D+08
0.00	17	--.13794846308D+08	--.14087222863D+08	--.17559666262D+08
0.00	18	0.16607870751D+08	0.16104352140D+08	0.13806077947D+08
0.00	19	--.15191310389D+08	--.33696561398D+07	--.21700772825D+08
0.00	20	--.54075506325D+07	0.14975995739D+08	0.21104654696D+08
0.00	21	0.96787980143D+07	0.12907978408D+08	0.21834400357D+08
0.00	22	0.21050042158D+08	--.51339700469D+07	--.15259270654D+08
0.00	23	--.41055734966D+06	--.25692673439D+08	--.55630509536D+07
0.00	24	--.12787553410D+08	0.21012660643D+08	--.98159865879D+07
0.00	25	0.74661037333D+07	0.16531985193D+08	--.19575498769D+08
0.00	26	0.25242734798D+08	0.34317409073D+07	0.75978556882D+08
0.00	27	0.12648532671D+08	--.10422432048D+08	0.20845237722D+08
0.00	28	--.23139614116D+08	--.12827434776D+08	0.32181771197D+07
0.00	29	0.47479275761D+07	0.26098942852D+08	0.17539788759D+07
0.00	30	--.14833083415D+08	--.74569557500D+07	0.20739913088D+08
0.00	31	0.20996630628D+08	--.23556647221D+07	--.16207897724D+08

Gambar 4. 2 Hasil Pengolahan Data Navigasi

4.2 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" Lintang Selatan dan 94° 3' Bujur Timur dengan magnitudo sebesar 8,3SR pada kedalaman sekitar 10km (BMKG).

Pada masa-masa gempa tersebut dilakukan pengamatan 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.

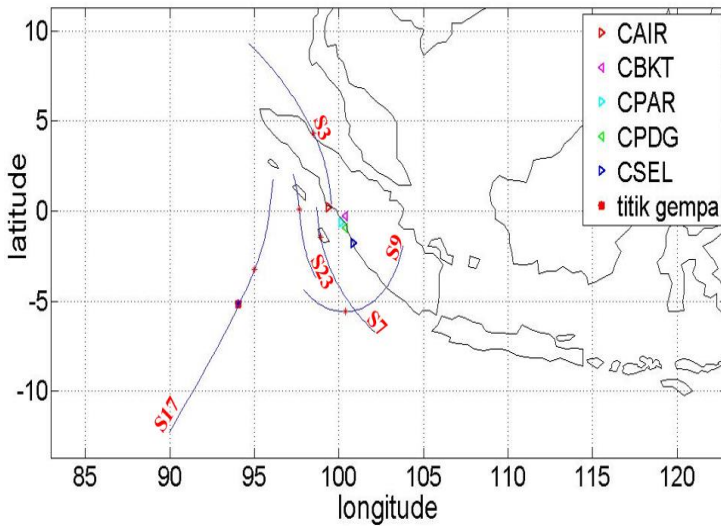
Gempa dapat menimbulkan dorongan energi gelombang *acoustic*, *gravity* dan *rayleigh*, serta momentum secara tiba – tiba yang akan menghasilkan gangguan pada lapisan atmosfer yang dapat menyebabkan terjadinya fluktuasi atau variasi TEC pada lapisan ionosfer. Semakin besar tekanan yang terjadi maka gangguan 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, $f_1=1575.42$ MHz and $f_2=1227.6$ 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 epoch yang berurutan.

Hasil dari pengamatan di lima stasiun yang berada di sekitar gempa menggunakan satelit GNSS selama dua hari sebelum gempa, saat terjadinya gempa, dan dua hari sesudah gempa didapatkan bahwa anomali TEC yang signifikan terdapat pada hari saat terjadinya gempa. Untuk mengetahui nomor satelit yang melintas dan merekam anomali TEC saat gempa, maka dilakukan pengolahan data navigasi untuk mendapatkan lintasan orbit satelit dan dilanjutkan plotting lintasan orbit tersebut menggunakan Matlab, hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.3.



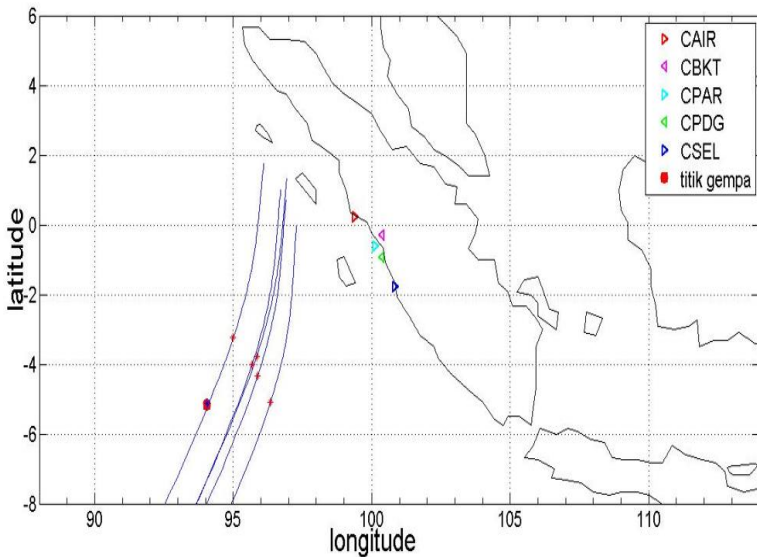
Gambar 4. 3 Orbit Satelit Saat Gempa pada Tanggal 2 Maret 2016 Pukul 11.00-14.00UT.

Gambar diatas adalah hasil dari plotting 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 sateli nomor 17. Data anomali TEC tersebut 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 bumi disebut *Sub-Ionospheric Point* (SIP). SIP tersebut yang menunjukkan proyeksi perpotongan sinyal satelit dengan ionosfer ketika terjadi gempa.

Setelah didapatkan nomor satelit yang merekam perubahan TEC, selanjutnya dilakukan plotting lintasan satelit menggunakan IPP melalui proyeksinya ke permukaan bumi, yaitu SIP. Dari hasil pengolahan data rinex observasi telah didapatkan bahwa satelit yang merekam perubahan TEC adalah satelit GPS nomor 17, maka satelit nomor tersebut dilakukan pengolahan plotting lintasannya menggunakan aplikasi Matlab yang hasilnya ditampilkan pada gambar 4.4. berikut.



Gambar 4. 4 Plotting Orbit Satelit Nomor 17 Yang Dipetakan Melalui SIP di Semua Stasiun Pukul 11.00-14.00UT.

Garis biru pada gambar 4.4. merupakan alur lintasan satelit, simbol lingkaran merah menunjukkan epicenter gempa dan titik merah menandakan posisi satelit nomor 17 yang

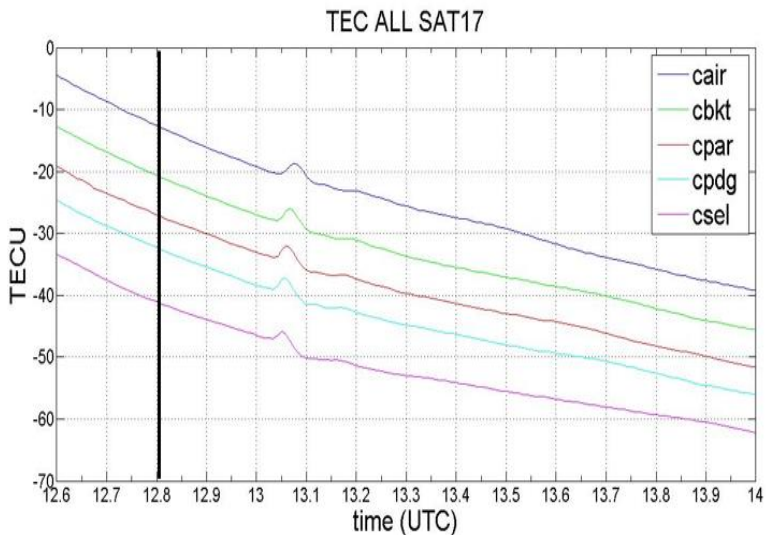
dipetakan melalui *Sub-Ionosphere Point (SIP)* di semua stasiun pengamatan pada waktu gempa terjadi. Simbol segitiga adalah stasiun CORS-GPS milik BIG yang masing – masing dijelaskan dalam legenda. Pada saat terjadi gempa, satelit nomor 17 melintas di sebelah barat Pulau Sumatra.

4.3 Plotting Anomali TEC

Data TEC didapatkan dari pengolahan rinex observasi menggunakan program *rdmrx.f* yang hasilnya berupa waktu dan nilai STEC, kemudian dilakukan plotting menggunakan aplikasi Matlab. Hasil plotting anomali TEC dari satelit GPS adalah sebagai berikut:

4.3.1 Anomali TEC Satelit GPS

A. STEC satelit GPS nomor 17 di semua stasiun pengamatan



Gambar 4. 5 STEC satelit GPS nomor 17 di semua stasiun pengamatan pada tanggal 2 Maret 2016

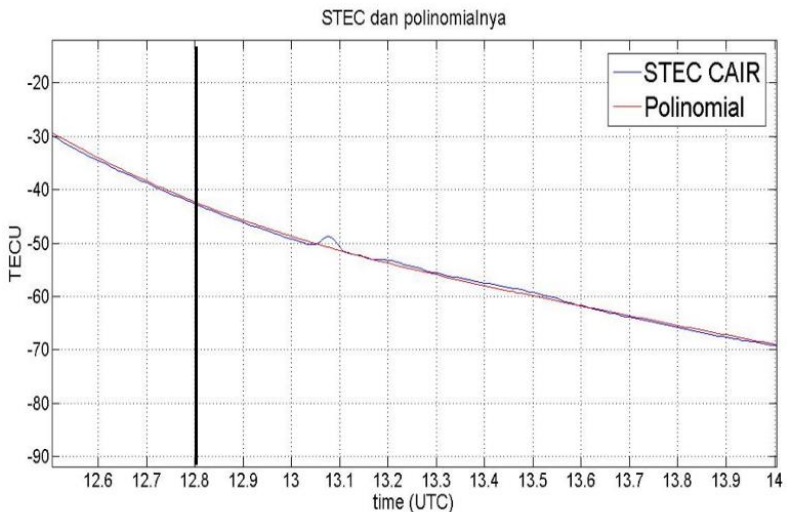
Gambar 4.5 diatas adalah hasil plotting STEC dari satelit GPS nomor 17 yang terdapat di semua stasiun pengamatan.

Garis hitam vertikal pada gambar 4.5. menunjukkan waktu terjadinya gempa, yaitu pukul 12:49 UT yang dalam grafik dinyatakan dalam satuan desimal. Berdasarkan grafik tersebut nampak adanya fluktuasi TEC yang signifikan setelah pukul 13.00 UT, yang merupakan indikator adanya gangguan di lapisan ionosfer. Fluktuasi tersebut muncul di semua data stasiun pengamatan sehingga bisa dilanjutkan untuk menganalisa besar perubahan TEC dan waktu munculnya perubahan tersebut.

Setelah diketahui nomor satelit yang dapat menampilkan fluktuasi saat terjadinya gempa, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai VTEC, yaitu dengan mengurangkan nilai STEC yang telah didapat dengan perataannya/polynomial pangkat enam.

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

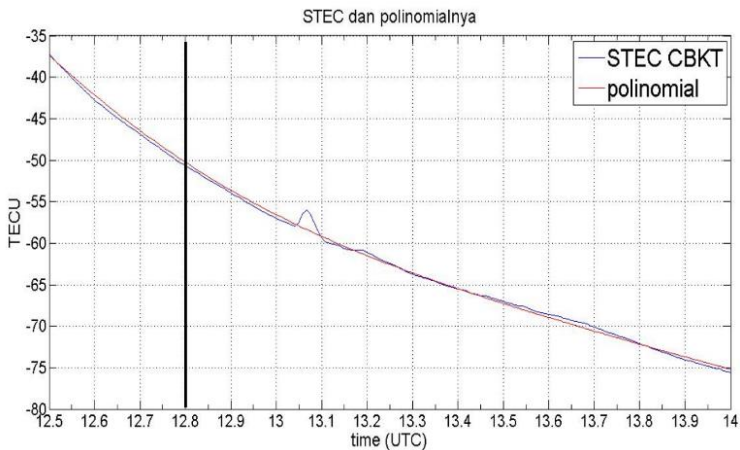
B. STEC satelit GPS nomor 17 di stasiun CAIR



Gambar 4. 6 STEC dan polinomialnya di stasiun CAIR

Gambar 4.6 adalah hasil plotting STEC dari satelit GPS nomor 17 yang direkam oleh stasiun CAIR. Pada gambar 4.6. diperlihatkan bahwa gempa yang digambarkan dengan garis hitam vertikal terjadi pada pukul 12:49 UT. Nilai STEC yang digambarkan dengan garis warna biru pada stasiun CAIR cenderung stabil, namun pada pukul 13.06 UT muncul anomali yang menunjukkan adanya gangguan pada lapisan ionosfer. Besar anomali dapat dilihat dari perbedaan fitting nilai TEC dengan polinomial pangkat enam (garis warna merah). Jika dihitung dari waktu terjadinya gempa, maka anomali TEC di stasiun CAIR muncul sekitar 15 menit setelah gempa.

C. STEC satelit GPS nomor 17 di stasiun CBKT

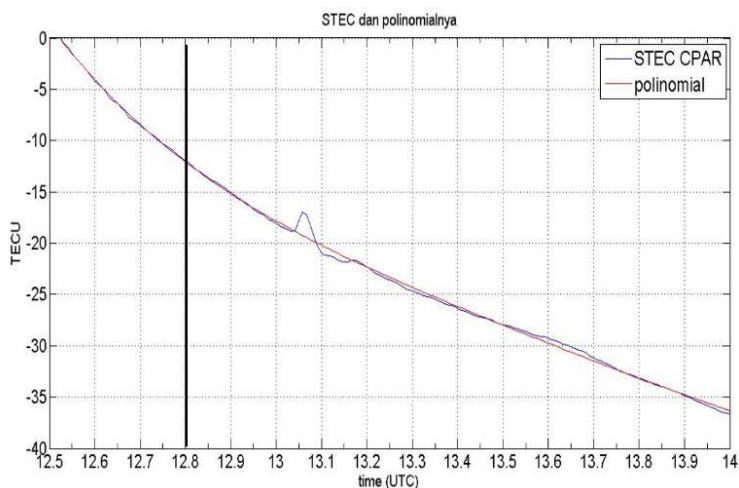


Gambar 4. 7 STEC dan polinomialnya di stasiun CBKT

Gambar 4.7 adalah hasil plotting STEC dari satelit GPS nomor 17 yang direkam oleh stasiun CBKT. Pada gambar 4.7. diatas diperlihatkan bahwa gempa terjadi pada pukul 12:49 UT (garis hitam vertikal). Nilai STEC pada stasiun CBKT

menurun dan cenderung stabil, namun pada pukul 13.03 muncul anomali yang menunjukkan adanya gangguan pada lapisan ionosfer. Besar anomali TEC dapat dilihat dari perbedaan fitting nilai TEC dengan polinomial pangkat enam (garis warna merah). Jika dihitung dari waktu terjadinya gempa, maka anomali TEC di stasiun CBKT muncul sekitar 14 menit setelah gempa.

D. STEC satelit GPS nomor 17 di stasiun CPAR

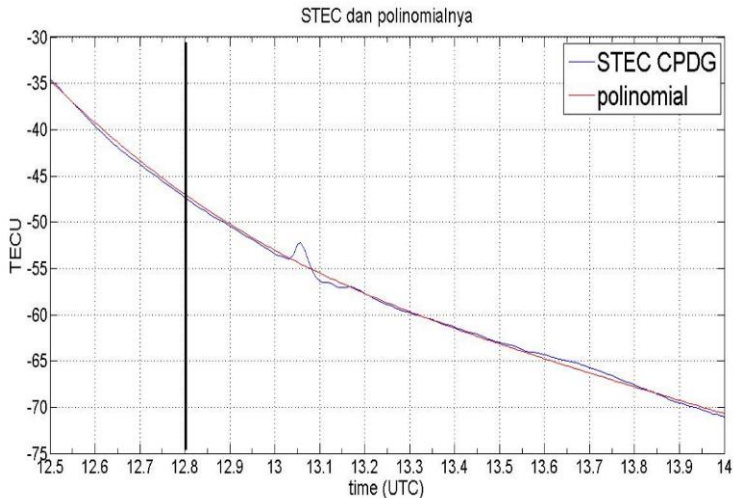


Gambar 4. 8 STEC dan polinomialnya di stasiun CPAR

Gambar 4.8 adalah hasil plotting STEC dari satelit GPS nomor 17 yang direkam oleh stasiun CPAR. Pada gambar 4.8. diatas dapat dilihat nilai STEC pada stasiun CPAR menurun dan cenderung stabil, namun pada pukul 13.02 UT muncul anomali yang menunjukkan adanya gangguan di lapisan ionosfer. Besar anomali TEC dapat dihitung dari perbedaan fitting nilai TEC dengan polinomial pangkat enam yang digambarkan dengan garis warna merah. Jika dihitung dari

waktu terjadinya gempa, maka anomali TEC di stasiun CPAR muncul sekitar 13 menit setelah gempa.

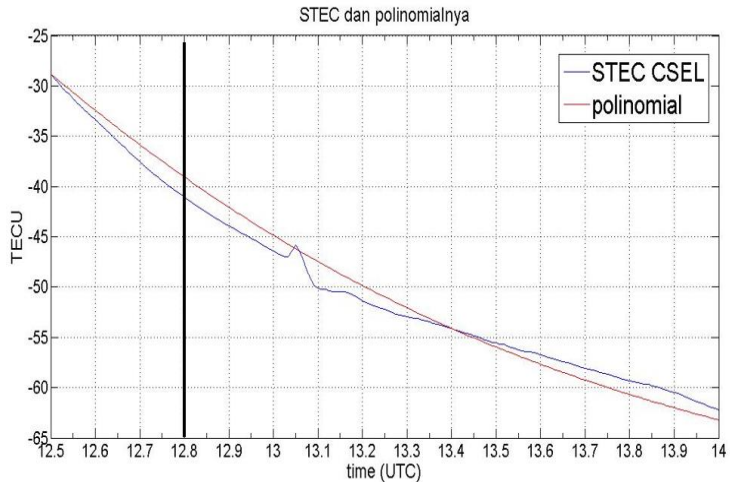
E. STEC satelit GPS nomor 17 di stasiun CPDG



Gambar 4. 9 STEC dan polinomialnya di stasiun CPDG

Gambar 4.9 adalah hasil plotting STEC dari satelit GPS nomor 17 yang direkam oleh stasiun CPDG. Pada gambar tersebut diperlihatkan bahwa gempa yang digambarkan dengan garis hitam vertikal terjadi pada pukul 12:49 UT. Nilai STEC yang digambarkan dengan garis warna biru pada stasiun CPDG cenderung stabil dan menurun, akan tetapi pada pukul 13.03 UT muncul anomali yang menunjukkan adanya gangguan pada lapisan ionosfer. Besar anomali nantinya dapat dihitung dari perbedaan fitting nilai TEC dengan polinomial pangkat enam (garis warna merah). Dihitung dari waktu terjadinya gempa, anomali TEC di stasiun CPDG muncul sekitar 14 menit setelah gempa.

F. STEC satelit GPS nomor 17 di stasiun CSEL

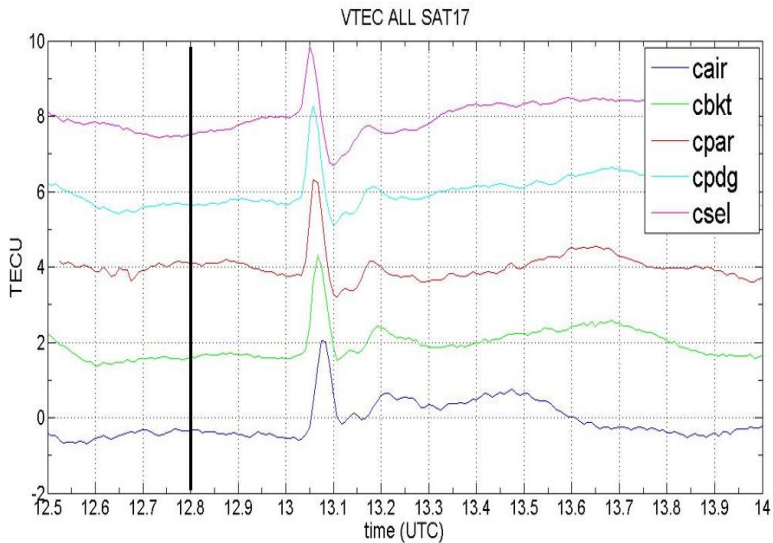


Gambar 4. 10 STEC dan polinomialnya di stasiun CSEL

Gambar 4.10 diatas adalah hasil plotting STEC dari satelit GPS nomor 17 yang direkam oleh stasiun CSEL. Pada gambar tersebut dapat dilihat nilai STEC pada stasiun CPAR menurun drastis dari waktu gempa terjadi sampai pukul 13. 00 UT. Kemudian pada pukul 13.04 UT muncul fluktuasi yang ditandai dengan kenaikan lalu turun secara drastis. Hal ini dapat disimpulkan bahwa telah ada gangguan di lapisan ionosfer. Setelah pukul 13.06 UT, grafik TEC kembali normal dan menurun secara perlahan. Jika dihitung dari waktu terjadinya gempa, maka anomali TEC di stasiun CPAR muncul sekitar 15 menit setelah gempa.

G. VTEC Satelit GPS No. 17 di Semua Stasiun Pengamatan

Berikut adalah hasil plotting VTEC satelit GPS nomor 17 di semua stasiun pengamatan:



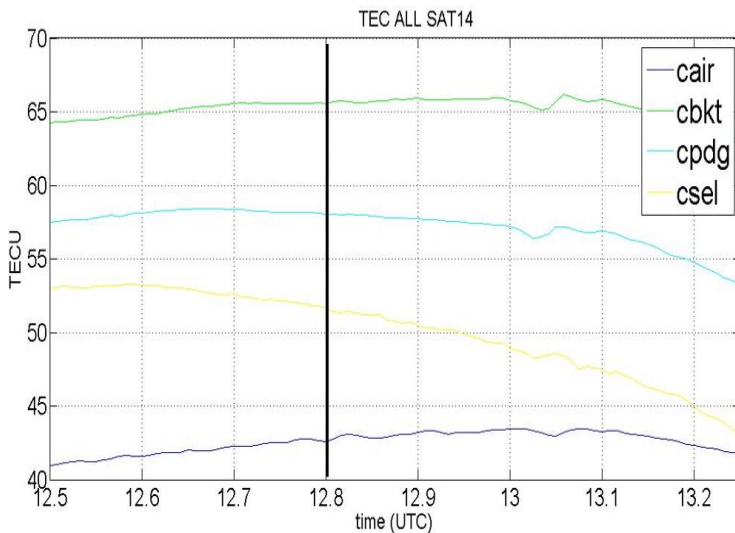
Gambar 4. 11 VTEC satelit GPS nomor 17 di semua stasiun pada saat gempa tanggal 2 Maret 2016.

Dari gambar 4.11 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 reciver yang terletak lebih dekat dengan lokasi gempa, yaitu stasiun CSEL yang mencapai 3,5TECU.

4.3.2 Anomali TEC Satelit Glonass

Dalam penelitian ini juga dihitung nilai anomali TEC satelit Glonass, hasil dari pengolahan data rinex observasi menunjukkan bahwa satelit Glonass yang dapat merekam anomali saat gempa terjadi adalah satelit nomor 14. Kemudian dilakukan plotting anomali TEC dari satelit tersebut pada semua stasiun pengamatan, hasilnya dapat dilihat pada gambar berikut:

A. STEC Satelit Glonass Nomor 14 di Semua Stasiun Pengamatan



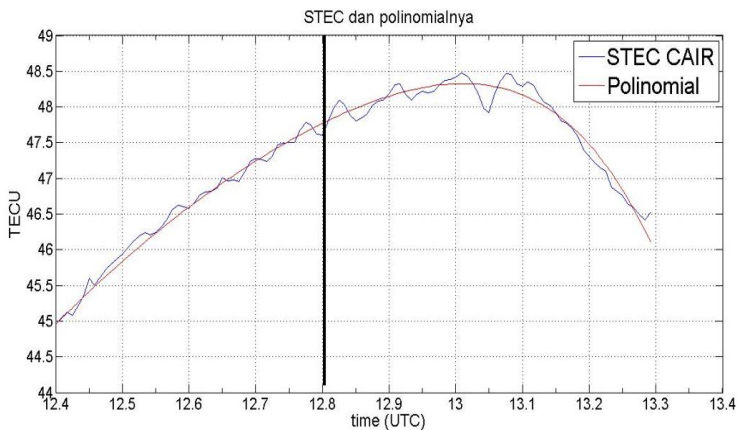
Gambar 4. 12 STEC satelit Glonass nomor 14 di semua stasiun pengamatan pada tanggal 2 Maret 2016

Gambar 4.12 diatas adalah hasil plotting STEC dari satelit Glonass nomor 14 yang direkam oleh semua stasiun pengamatan. Gambar tersebut menunjukkan bahwa fluktuasi TEC muncul pada angka 13 dalam satuan waktu desimal yang sama dengan pukul 13.00 UT, dimana waktu tersebut mulai terjadi 11 menit setelah gempa, hampir sama seperti fluktuasi

TEC yang terdapat pada pengamatan menggunakan satelit GPS. Dari perhitungan data yang telah diolah, fluktuasi TEC direkam oleh empat stasiun pengamatan, yaitu: CAIR, CBKT, CPDG, CSEL. Langkah selanjutnya adalah menghitung perubahan TEC dan waktu munculnya perubahan tersebut, yaitu dengan mengurangkan nilai STEC yang telah didapat dengan perataannya/polynomial pangkat enam.

Berikut ini adalah hasil plotting perhitungan nilai perataan polinomial pangkat enam dari STEC di setiap stasiun pengamatan.

B. STEC Satelit Glonass Nomor 14 di Stasiun CAIR

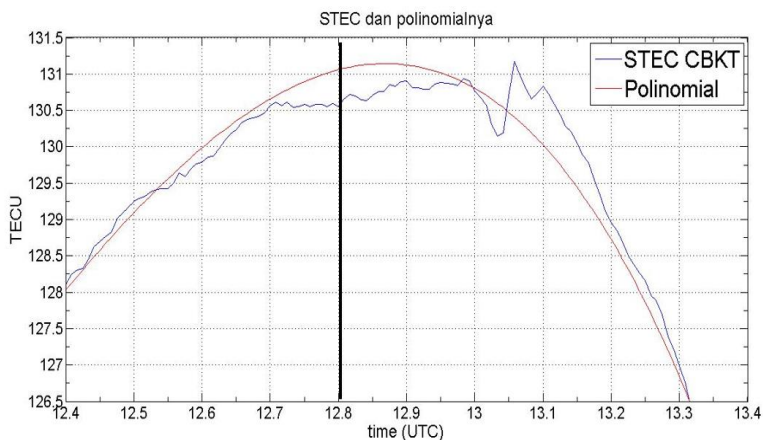


Gambar 4. 13 STEC satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CAIR

Pada gambar 4.13. diatas diperlihatkan bahwa gempa yang digambarkan dengan garis hitam vertikal terjadi pada pukul 12:49 UT. Nilai STEC yang digambarkan dengan garis warna biru pada stasiun CAIR semakin meningkat dan sampai pukul 13:00 UT mengalami perubahan secara signifikan sebesar 1,5 TECU. Kemudian pada pukul 13:06 UT, STEC

kembali normal dan nilainya menurun dengan stabil. Fluktuasi STEC secara signifikan tersebut menunjukkan adanya gangguan di lapisan ionosfer yang besarnya dapat dihitung dari perbedaan fitting nilai STEC dengan polinomialnya (garis warna merah). Jika dihitung dari waktu terjadinya gempa, maka anomali TEC satelit Glonass di stasiun CAIR muncul sekitar 13 menit setelah gempa.

C. STEC Satelit Glonass Nomor 14 di Stasiun CBKT

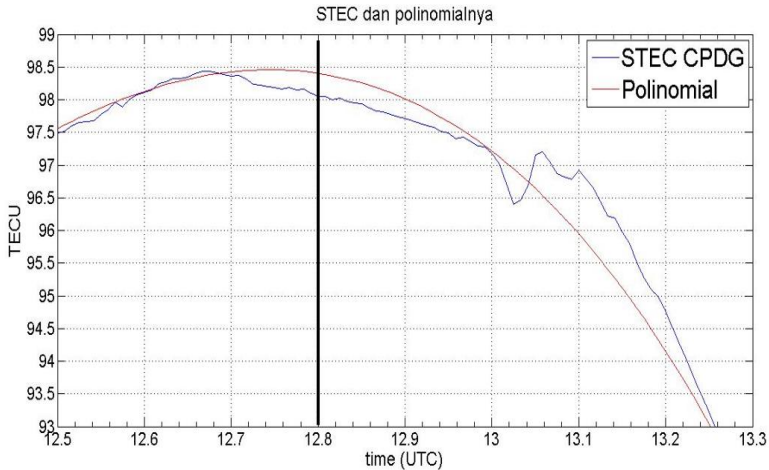


Gambar 4. 14 STEC satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CBKT

Gambar 4.14 adalah hasil plotting STEC dari satelit Glonass nomor 14 yang direkam oleh stasiun CBKT. Pada gambar 4.14 diperlihatkan bahwa gempa digambarkan dengan garis hitam vertikal yang terjadi pada pukul 12:49 UT. Nilai STEC yang digambarkan dengan garis warna biru pada stasiun CBKT naik dengan stabil, namun pada pukul 13.00 UT muncul anomali signifikan yang menunjukkan adanya gangguan pada lapisan ionosfer. Besar anomali tersebut dapat dihitung dari perbedaan fitting nilai STEC dengan

polinomialnya (garis warna merah). Dihitung dari waktu terjadinya gempa, anomali TEC satelit Glonass di stasiun CBKT muncul 11 menit setelah gempa.

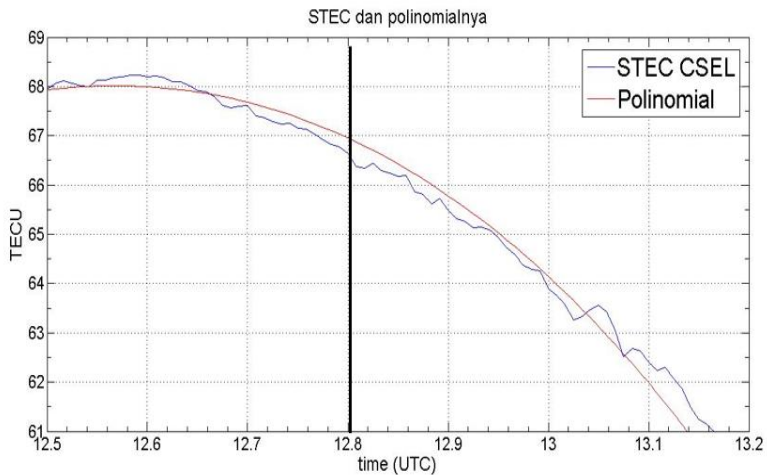
D. STEC Satelit Glonass Nomor 14 di Stasiun CPDG



Gambar 4. 15 STEC Satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CPDG

Pada gambar 4.15 diatas dapat dilihat bahwa gempa yang digambarkan dengan garis hitam vertikal terjadi pada pukul 12:49 UT. Nilai STEC yang digambarkan dengan garis warna biru pada stasiun CPDG cenderung bergerak stabil, kemudian pada pukul 13.00 UT mengalami fluktuasi STEC secara signifikan yang menunjukkan adanya gangguan di lapisan ionosfer. Besarnya fluktuasi TEC dapat dihitung dari perbedaan fitting nilai STEC dengan polinomialnya (garis warna merah). Jika dihitung dari waktu terjadinya gempa, anomali TEC satelit Glonass di stasiun CPDG muncul sekitar 11 menit setelah gempa.

E. STEC Satelit Glonass Nomor 14 di Stasiun CSEL

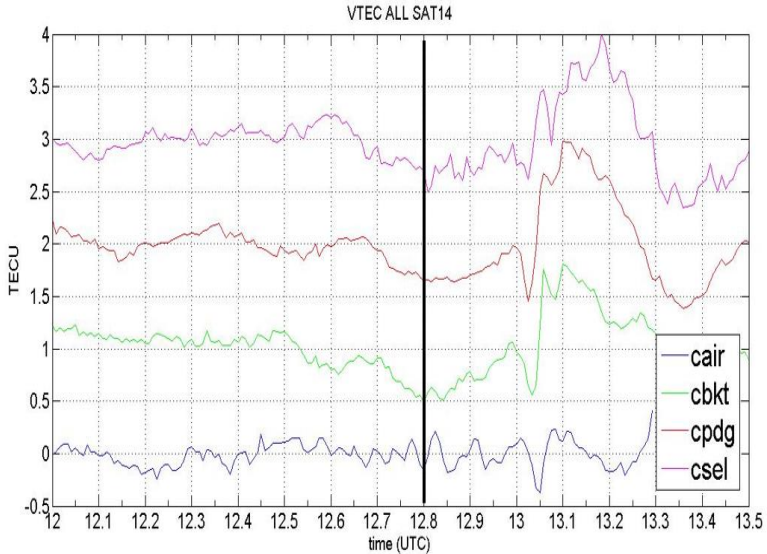


Gambar 4. 16 STEC satelit Glonass dan polinomialnya di stasiun CSEL

Pada gambar 4.16 diatas diperlihatkan bahwa gempa yang digambarkan dengan garis hitam vertikal terjadi pada pukul 12:49 UT. Nilai STEC yang digambarkan dengan garis warna biru pada stasiun CSEL bergerak turun dan cenderung stabil, namun pada pukul 13:03 UT muncul anomali signifikan yang menunjukkan adanya gangguan di lapisan ionosfer. Besarnya anomali TEC nantinya dihitung dari perbedaan fitting nilai STEC dengan polinomialnya yang digambarkan dengan garis warna merah. Jika dihitung dari waktu terjadinya gempa, maka anomali TEC satelit Glonass di stasiun CSEL muncul sekitar 14 menit setelah gempa.

F. VTEC Satelit Glonass Nomor 14 di Semua Stasiun

Setelah dilakukan perhitungan, berikut adalah hasil plotting anomali TEC dari data satelit Glonass:



Gambar 4. 17 VTEC satelit Glonass Nomor 14 di Semua Stasiun pada saat Gempa Tanggal 2 Maret 2016.

Dari gambar 4.17 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 reciver yang terletak lebih dekat dengan lokasi gempa, yaitu stasiun CSEL.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisa data yang telah dilakukan dari penelitian perubahan ionosfer akibat gempa bumi Sumatra Barat tanggal 2 Maret 2016, didapatkan kesimpulan 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

5.2 Saran

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

- a. Untuk mengetahui adanya *pre-seismic anomaly*, sebaiknya pengambilan data dilakukan minimal 1-2 minggu sebelum terjadinya gempa.
- b. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan nilai TEC dari data satelit GNSS selain GPS dan Glonass.
- c. Untuk mendapatkan pola hubungan antara besar magnitudo gempa dengan gangguan di lapisan ionosfer, perlu adanya penelitian yang kontinu dan berkala dalam satu lokasi pengamatan.
- d. Dari pengolahan data Glonass yang grafik *TEC*-nya menurun setelah terjadi gempa, diperkirakan adanya penurunan lempeng pada rupture area sehingga perlu dilakukan perhitungan untuk mengukur penurunan lempeng tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z. (2006). *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Bandung: PT. Pradnya Paramita.
- Andreas H., et al (2006), *Implikasi Co-Seismic dan Post-seismic Horizontal Displacement Gempa Aceh 2004 terhadap status Geometrik Data Spasial wilayah Aceh dan Sekitarnya*, Departemen Teknik Geodesi ITB, Bandung Indonesia.
- Badan Informasi Geospasial. (2017). *Inacors BIG*. <<http://inacors.big.go.id/spiderweb/firmIndex.aspx>>. Dikunjungi pada tanggal 30 Januari 2017, jam 20.00
- Cahyadi, M. N. (2014). *Near-Field Coseismic Ionospheric Disturbances of Earthquakes In and Around Indonesia*. Hokkaido: Dept. Natural History Sciences, Hokkaido University, 2014.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2013). *Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network*. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 118.
- Davis, K. (1990). *Ionospheric Radio*. IEE Electromagnetic Waves Series 31, Peter Peregrinus, London.
- Denaro, Lino Garda. (2015). *Analisis perubahan ionosfer dan posisi stasiun GPS-CORS pada saat letusan besar gunung berapi 2010*. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Geomatika- Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 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
- Heki, Kosuke. (2011). *"Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake."* Geophysical Research Letter, Hal: 17-38.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2001). *Global Positioning System*. Graz, Austria: Novographic Druck G.m.b.H..A1230 Wien.

- Mubyarto, Feri. (2008). *Analisa Deformasi Interseismic Gempa Bengkulu dari Data GPS Kontinyu SUGAR*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Muslim, B. (2009), *Pemodelan TEC Ionosfer Di Atas Sumatra Dan Sekitarnya Mendekati Real Time Dari Data GPS NTUS*, Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa, LAPAN, Bandung.
- Mutia, Nuning. (2016). *Analisis Deformasi Dan Gangguan Di Lapisan Ionosfer Akibat Gempa Bumi Menggunakan Data SuGAR (Sumatran Gps Array)*. Surabaya: Tesis Jurusan Teknik Geomatika - Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Novianta, M.A. (2012). *Sistem Deteksi Dini Gempa Dengan Piezo Elektrik Berbasis Mikrokontroler AT89C51*. Yogyakarta: Simposium Nasional RAPI XI FT UMS, Hal: 96–103.
- Scholz, Christopher. (2004). *The Mekanism of Earthquake and Faulting*. UK: Edisi Kedua, Cambridge University Press.
- Seeber, Gunter. (1993). *Satellite Geodesy, 2nd edition*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Septiningrum, Leni. (2016). *Analisis Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Mentawai Tahun 2010*. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Geomatika - Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Subakti, Hendri. (2008). *Analisis Variasi GPS-TEC yang Berhubungan dengan Gempabumi Besar di Sumatra*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Taufiqurrahman, E. (2010). *Analisis Korelasi Frekuensi Kritis Lapisan F Ionosfer (F Of2) Dengan Gempa di Sumatra Barat (Studi Kaus Gempa tanggal 6 Maret 2007 dan 30 September 2009)*. Padang: Universitas Andalas.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Contoh Data Rinex Observasi

```

2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
teqc 2015Jun23 dita 20161013 13:42:27UTCPGM / RUN BY / DATE
Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|=+ COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
cair MARKER NAME
geodinamika Badan Informasi Geospasial (BIG) OBSERVER / AGENCY
618-00488 TPS NET-G3A 4.1 May,31,2013 REC # / TYPE / VERS
-Unknown- -Unknown- ANT # / TYPE
-1041109.4315 6292545.1830 22999.1531 APPROX POSITION XYZ
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
7 L1 L2 C1 P1 P2 S1 S2 # / TYPES OF OBSERV
30.0000 INTERVAL
17 LEAP SECONDS
Forced Modulo Decimation to 30 seconds COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT
teqc windowed: start @ 2016 Mar 2 00:00:00.000 COMMENT
teqc windowed: end @ 2016 Mar 2 23:59:30.000 COMMENT
pseudorange smoothing corrections not applied COMMENT
rx board ID: KPZT01N6IV4 COMMENT
2016 3 2 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
16 3 2 0 0 0.0000000 0 21G02R20G21G13R21R06G20R19R10G12G24G29
G32G25R07G15G05G18R09G14R08
118732748.629 7 92519014.27544 22594072.248 22594071.334 22594069.837
44.000 29.0004
103668936.723 7 80631380.859 8 19386595.907 19386595.204 19386593.468
47.000 48.000
132825032.578 5 103500031.20442 25275764.600 25275762.919 25275763.962
34.000 13.0004
124459588.233 6 96981489.02143 23683872.000 23683871.077 23683869.725
41.000 19.0004
108757882.318 8 84589449.284 7 20324007.288 20324007.663 20324005.082
51.000 45.000
121153351.933 7 94230435.784 5 22704101.395 22704100.271 22704096.096
46.000 32.000
121356523.749 7 94563522.13144 23093376.832 23093376.093 23093375.420
42.000 24.0004
121635048.966 7 94604761.475 6 22738298.299 22738297.412 22738292.921
46.000 39.000
129028523.085 5 24205427.097 24205427.362
35.000
125060848.802 6 97450002.71044 23798286.756 23798286.561 23798284.251
41.000 25.0004
111667991.924 8 87014026.38346 21249708.968 21249708.627 21249709.796
49.000 40.0004
107772004.711 8 83978197.48947 20508325.346 20508324.712 20508323.204
49.000 43.0004

```

Lampiran 2: Contoh Data Rinex Navigasi (*.n)

```

2.10 NAVIGATION DATA RINEX VERSION / TYPE
SPIDER V4,4,2,5258 2016 03 06 01:20 PGM / RUN BY / DATE
1.5832D-08 0.0000D+00 -1.1921D-07 0.0000D+00 ION ALPHA
1.1264D+05 -1.6384D+04 -2.6214D+05 6.5536D+04 ION BETA
2.793967723846D-09 6.217248937901D-15 589824 1886 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
17 LEAP SECONDS
END OF HEADER

1 16 03 01 16 00 0.0 1.315912231803D-05 1.023181539495D-12 0.000000000000D+00
7.400000000000D+01-1.796875000000D+01 4.609120640708D-09 1.001542068419D+00
-1.035630702972D-06 5.096079898067D-03 7.500872015953D-06 5.153651109695D+03
2.304000000000D+05 4.470348358154D-08-6.551891589612D-01 3.352761268616D-08
9.639598858271D-01 2.367500000000D+02 4.597175167141D-01-8.129981132754D-09
2.303667395731D-10 1.000000000000D+00 1.886000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 5.122274160385D-09 7.400000000000D+01
2.231400000000D+05 0.000000000000D+00

2 16 03 02 00 0.0 5.994066596031D-04-2.273736754432D-13 0.000000000000D+00
6.000000000000D+01-8.312500000000D+00 5.164857874718D-09-6.277571891553D-01
-2.738088369370D-07 1.551523245871D-02 7.592141628265D-06 5.153727529526D+03
2.592000000000D+05 1.303851604462D-08-6.990515991279D-01 2.924352884293D-07
9.426779431659D-01 2.270000000000D+02-2.156415826941D+00-8.594286171615D-09
1.953652795095D-10 1.000000000000D+00 1.886000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-2.048909664154D-08 6.000000000000D+01
2.519400000000D+05 0.000000000000D+00

3 16 03 01 18 00 0.0-3.098556771874D-05-4.547473508865D-12 0.000000000000D+00
9.300000000000D+01-1.321875000000D+01 4.777341633400D-09-1.784785483685D+00
-9.499490261078D-07 2.587191993371D-04 7.947906851768D-06 5.153752410889D+03
2.376000000000D+05 5.587935447693D-08 3.856257747700D-01-1.862645149231D-09
9.595932128747D-01 2.265312500000D+02-3.067586053478D+00-8.103194559794D-09
-6.928860263322D-11 1.000000000000D+00 1.886000000000D+03 0.000000000000D+00
2.800000000000D+00 0.000000000000D+00 1.862645149231D-09 9.300000000000D+01
2.303400000000D+05 0.000000000000D+00

5 16 03 02 00 0.0-1.413393765688D-04 3.410605131648D-12 0.000000000000D+00
4.600000000000D+01-1.096875000000D+01 4.978421674906D-09 1.839491316963D+00
-5.569308996201D-07 4.578442196362D-03 7.642433047295D-06 5.153737476349D+03
2.592000000000D+05-5.401670932770D-08 3.747050591240D-01 2.235174179077D-08
9.466989900186D-01 2.261875000000D+02 4.778805604549D-01-8.228199455118D-09
-1.064330082401D-10 1.000000000000D+00 1.886000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-1.071020960808D-08 4.600000000000D+01
2.519400000000D+05 0.000000000000D+00

6 16 03 02 00 0.0 1.538358628750D-04 5.911715561524D-12 0.000000000000D+00
1.700000000000D+01-1.056250000000D+01 4.510902318344D-09-2.911108713534D-01
-5.215406417847D-07 3.562862984836D-04 7.743015885353D-06 5.153643278122D+03
2.592000000000D+05 3.725290298462D-09-6.638665072876D-01 1.061707735062D-07
9.638068572814D-01 2.338750000000D+02-1.877856463551D+00-8.025334174988D-09
2.103659052510D-10 1.000000000000D+00 1.886000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 4.190951585779D-01 1.700000000000D+01
2.519400000000D+05 0.000000000000D+00

7 16 03 01 18 00 0.0 4.672794602811D-04-1.818989403546D-12 0.000000000000D+00
4.600000000000D+01 5.900000000000D+01 4.584119306372D-09 1.335901717989D+00

```

Lampiran 3: Script Program rdrrnx.f Untuk Mengolah Data Observasi

```

c program rdrrnx
c
c   a program to read rinex file and output phase
difference between
c   L1 and L2 for different satellite
c
c   parameter (maxsat=70,
maxepch=17280,maxslip=10,maxtype=9)    ! 5 sec
sampling
    implicit real*4 (a-h,o-z)
c
c   real*8 dphase(2),dcode(2),pdif(maxepch,maxsat)
1       ,vel_light,f_l1,f_l2,array(2,maxepch),pval
2       ,sum,cdif(maxepch,maxsat),ddata(maxtype)
dimension
jsat(maxsat),time(maxepch),jslip(maxslip)
1
,numsat(maxsat),itable(maxsat),jleng(maxslip+1)
2       ,numepch(maxsat)
character lhead*60,lmark*4,lscr*1, lbuf*80,
lcmt*20,lfile*64
1       ,ltype(maxtype)*2,ltypsat(maxsat)*1
logical lfirst,lsameday,lonemore
data vel_light/299792458d0/
data f_l1/1575420000.d0/
data f_l2/1227600000.d0/
c
fact_meter2tec= 6.05/(-0.65)
c
lfirst=.true.
lsameday=.true.
c
do isat=1,maxsat
do iepch=1,maxepch
pdif(iepch,isat)=0.0d0
enddo
enddo
c
tstart=0.0
tend=24.0
c

```

```

c-----reading header
c
      jcl=0
      jpl=0
1111 continue
      read(5,100)lhead,lcmt
100  format(a60,a20)
      if(lcmt(1:13).eq.'# / TYPES OF ') then
          backspace 5
          read(5,105)nctype,(ltype(itype),itype=1,nctype)
105  format(i6,9(4x,a2))
          do itype=1,nctype
              if(ltype(itype).eq.'L1') jl1=itype
              if(ltype(itype).eq.'L2') jl2=itype
              if(ltype(itype).eq.'C1') jcl=itype
              if(ltype(itype).eq.'P1') jpl=itype
              if(ltype(itype).eq.'P2') jp2=itype
          enddo
      endif
c
      if(jpl.eq.0.and.jcl.ne.0) jpl=jcl
c
      if(lcmt(1:11).eq.'MARKER NAME') lmark=lhead(1:4)
      if(lcmt(1:13).ne.'END OF HEADER') goto 1111
c
c-----reading data
c
      iepch=1
2222 read(5,110,end=9999)lbuf
110  format(a80)
      if(lbuf(29:29).eq.'4') then          ! comment
          read(lbuf,120)ncomment
120  format(29x,i3)
          do icomment=1,ncomment
c              read(1,110)lbuf
              read(5,110)lbuf
          enddo
          goto 2222
      else                                  ! regular
record
read(lbuf,130)ih,im,sec,nsat,(ltypsat(k),numsat(k),k=1
,12)
130  format(9x,2i3,f11.7,3x,i3,12(a1,i2))

```

```

        if(nsat.gt.12) then
            read(5,110)lbuf

read(lbuf,135) (ltypsat(k), numsat(k), k=13, nsat)
    135     format(32x, 12(a1, i2))
        endif
        time(iepch)=real(ih)+real(im)/60.0 +
sec/3600.0
        if(lfirst) then
            lfirst=.false.
            ksat=0
            do isat=1, nsat
                if(ltypsat(isat).eq.'G') then
                    ksat=ksat+1
                    jsat(ksat)=numsat(isat)
                    itable(isat)=isat
                else
                    ! ignore GLONASS
                    itable(isat)=0
                endif
            enddo
            msat=ksat
        else
            do 3333 isat=1, nsat
                if(ltypsat(isat).ne.'G') then
                    ! ignore
GLONASS
                    itable(isat)=0
                    goto 3333
                endif
                do k=1, msat
                    if(numsat(isat).eq.jsat(k)) then
                        itable(isat)=k
                        goto 3333
                    endif
                enddo
                msat=msat+1
                jsat(msat)=numsat(isat)
                itable(isat)=msat
            3333 continue
        c
        if(lsameday) then
            if(time(iepch).lt.timeb4) then
                lsameday=.false.
                time(iepch)=time(iepch)+24.0
            endif

```

```

        else
            time(iepch)=time(iepch)+24.0
        endif
c
        endif
        do 1000 isat=1,nsat
            read(5,110)lbuf
            kazu=5
            if(ntype.lt.5) kazu=ntype

read(lbuf,140,err=7777,end=7777) (ddata(k),k=1,kazu)
    140    format(5(f14.3,2x))
            if(ntype.gt.5) then                ! continuation
line for the case ntype>5
                read(5,110)lbuf

read(lbuf,140,err=7777,end=7777) (ddata(k),k=6,ntype)
        endif
        dphase(1)=ddata(jl1)
        dphase(2)=ddata(jl2)
        dcode(1)=ddata(jp1)
        dcode(2)=ddata(jp2)
        if(dcode(1).eq.0.0) dcode(1)=ddata(jc1)
        if(dphase(1).eq.0.0.or.dphase(2).eq.0.0)
goto 7777
        if(dcode(1).eq.0.0.or.dcode(2).eq.0.0) goto
7777
            goto 8888
        7777    continue
            goto 1000
        8888    continue
            idsat=itable(isat)
            if(idsat.eq.0) goto 1000        ! ignore
GLONASS
        pdif(iepch,idsat)=
    1          (vel_light/f_l2)*dphase(2)-
(vel_light/f_l1)*dphase(1)
            cdif(iepch,idsat)=dcode(1)-dcode(2)
        1000    continue
            timeb4=time(iepch)
            iepch=iepch+1
            goto 2222
        endif
c

```

```

c-----end of file
c
  9999 nepch=iepch-1
c
c-----data screening
c
      do 2000 isat=1,msat
c
      lonemore=.false.
c
c (1) time window
c
      jepch=1
      do iepch=1,nepch

if(time(iepch).gt.tstart.and.time(iepch).lt.tend) then
      if(pdif(iepch,isat).ne.0.0) then
          array(1,jepch)=pdif(iepch,isat)
          array(2,jepch)=cdif(iepch,isat)
          jepch=jepch+1
      endif
      endif
      enddo
      mepch=jepch-1
c
c (2) cycle-slip detection
c
      islip=1
      do iepch=1,mepch
          if(iepch.eq.1) then
              pval=array(1,iepch)
          else
              if(dabs(array(1,iepch)-pval).gt.5.0d-1) then
                  if(islip.le.maxslip) jslip(islip)=iepch
                  islip=islip+1
              endif
              pval=array(1,iepch)
          endif
      enddo
      nslip=islip-1
      if(nslip.gt.maxslip) goto 2000
c
c (3) longest arc detection
c

```

```

if(nslip.eq.0) then
  istart=1
  iend=mepch
else if(nslip.eq.1) then
  ileng1=jslip(1)-1
  ileng2=mepch-jslip(1)+1
  if(ileng1.gt.ileng2) then
    istart=1
    iend=jslip(1)-1
    if(ileng2.ge.120) then
      lonemore=.true.
      istart2=jslip(1)
      iend2=mepch
    endif
  endif
else
  istart=jslip(1)
  iend=mepch
  if(ileng1.ge.120) then
    lonemore=.true.
    istart2=1
    iend2=jslip(1)-1
  endif
endif
else
  jleng(1)=jslip(1)
  istart=1
  iend=jslip(1)-1
  maxleng=jleng(1)
  do islip=1,nslip-1
    jleng(islip+1)=jslip(islip+1)-jslip(islip)
    if(jleng(islip+1).gt.maxleng) then
      istart=jslip(islip)
      iend=jslip(islip+1)-1
      maxleng=jleng(islip+1)
    endif
  enddo
  jleng(nslip+1)=mepch-jslip(nslip)+1
  if(jleng(nslip+1).gt.maxleng) then
    istart=jslip(nslip)
    iend=mepch
  endif
endif
endif
c
numepch(isat)=iend-istart+1

```



```

        if(lonemore) numepch2=iend2-istart2+1
c
c-----output data
c
        if(numepch(isat).le.10) goto 2000
c
        kepch=0
        lfirst=.true.
        do iepch=1,nepch

if(time(iepch).gt.tstart.and.time(iepch).lt.tend) then
        if(pdif(iepch,isat).ne.0.0) then
            kepch=kepch+1
            pval=pdif(iepch,isat)
            if(kepch.ge.istart.and.kepch.le.iend) then
                if(lfirst) then
                    bias=fact_meter2tec*pdif(iepch,isat)
                    write(6,150)
jsat(isat),numepch(isat),lmark,bias
    150         format('> sat#',i2,' #data:',i4,'
site:',a4,' bias:',f15.4)
                    lfirst=.false.
                    endif
write(6,160)time(iepch),fact_meter2tec*pdif(iepch,isat)
)-bias
    160         format(f7.3,f12.4)
                    endif
                endif
            endif
        enddo
c
        if(.not.lonemore) goto 2000
c
c-----output second longest arc
c
        if(numepch2.le.10) goto 2000
c
        kepch=0
        lfirst=.true.
        do iepch=1,nepch

if(time(iepch).gt.tstart.and.time(iepch).lt.tend) then
        if(pdif(iepch,isat).ne.0.0) then

```

```
        kepch=kepch+1
        pval=pdif(iepch,isat)
        if(kepch.ge.istart2.and.kepch.le.iend2) then
            if(lfirst) then
                bias=fact_meter2tec*pdif(iepch,isat)
                write(6,150)
            jsat(isat),numepch2,lmark,bias
                lfirst=.false.
            endif
        endif

write(6,160)time(iepch),fact_meter2tec*pdif(iepch,isat)
)-bias
        endif
        endif
        endif
    enddo
c
c
    2000 continue
c
        stop
        end
```

Lampiran 4: Script Program rdeph.f Untuk Pengolahan Data Navigasi

```

program rdeph
c
c   a program to read rinex ephsmeris file and
satellite position in Earth-fixed
c   coordinates
c
c   1:IODE  2:Crs  3:delta-n  4:m0
c   5:Cuc   6:e    7:Cus    8:root-a
c   9:Toe   10:Cic 11:Omega  12:Cis
c   13:i0   14:Crc 15:omega  16:OmegaDot
c   17:iDot 18-28: not used
c
c   parameter (maxsat=40, maxepch=30, maxrec=400)
implicit real*4 (a-h,o-z)
c
c   real*8 dxyz,oel
dimension
oel(28,maxrec),idsat(maxrec),tiempo(maxrec)
1      ,ilstsat(maxsat),dxyz(3)
character lscr*1, lbuf*80, lcmt*20,lfile*64
c
c   tstep=0.05      ! output every 3 minutes
c
c   tstart=0.0
c   tend=24.0
c
c-----reading header
c
1111 continue
      read(5,100)lcmt
100  format(60x,a20)
c
      if(lcmt(1:13).ne.'END OF HEADER') goto 1111
c
c-----reading data
c
      krec=1
2222 read(5,110,end=3333)lbuf
110  format(a80)

read(lbuf,130)idsat(krec),iy,imon,iday,ih,imin,sec

```

```

130 format (i2,5i3,f5.1)
    tiempo(krec)=real(ih)+real(imin)/60.0 +
sec/3600.0
    do irec=1,7
        ii=(irec-1)*4
        if(irec.ne.7) then
            read(5,140) (oel(k,krec),k=ii+1,ii+4)
        else
            read(5,140) (oel(k,krec),k=ii+1,ii+1)
            do k=ii+2,ii+4
                oel(k,krec)=0.0
            enddo
        endif
140 format (3x,4(d19.12))
    enddo
    krec=krec+1
    goto 2222
3333 close(1)
    mrec=krec-1
c
c-----finding 1st appearance of satellites
c
    do isat=1,maxsat
        ilstsat(isat)=0
    enddo
c
    do krec=1,mrec
        if(ilstsat(idsat(krec)).eq.0)
ilstsat(idsat(krec))=krec
    enddo
c
c-----calculating satellite positions
c
    time=0.0
c
4444 continue
c
    if(time.ge.tstart) then
        do isat=1,maxsat
            jrec=ilstsat(isat)
            if(jrec.ne.0) then
                time0=tiempo(jrec)
                call gtxyz(time,time0,oel(1,jrec),dxyz)
                write(6,150) time,isat,(dxyz(k),k=1,3)
            endif
        enddo
    endif

```

```

150         format(f8.2,i3,3(1x,d17.11))
           endif
           enddo
           endif
c
           time=time+tstep
           if(time.gt.tend) goto 9999
           goto 4444
c
9999 continue
c
           stop
           end
c
c-----
c-----
c
           subroutine gtxyz(time,time0,ele,dxyz)
c
           implicit real*8 (a-h,o-z)
           real*4 time,time0
c
           dimension dxyz(3),ele(28)
           data GM/3986005.d8/
           data omega_dot_e/7292115.d-11/
c
           1:IODE  2:Crs  3:delta-n  4:m0
           5:Cuc   6:e    7:Cus     8:root-a
           9:Toe   10:Cic 11:Omega  12:Cis
           13:i0   14:Crc 15:omega  16:OmegaDot
           17:iDot 18-28: not used
c
c (1)
           a=ele(8)**2
c
c (2)
           dnzero=dsqrt(GM/a**3)
c
c (3)
           tk=dblE(time-time0)*60.*60.
c
c (4)
           dn=dnzero+ele(3)
c

```

```

c (5)
    dmk=ele(4)+dn*tk
c
c (6)
    call kepler(dmk,ele(6),ek)
c
c (7)
    cosvk=(dcos(ek)-ele(6))/(1.0-ele(6)*dcos(ek))
    sinvk=dsqrt(1.0-ele(6)**2)*dsin(ek)/(1.0-
ele(6)*dcos(ek))
    vk=datan2(sinvk,cosvk)
c
c (8)
    phik=vk+ele(15)
c
c (9)

delta_uk=ele(7)*dsin(2.0*phik)+ele(5)*dcos(2.0*phik)
    uk=phik+delta_uk
c
c (10)

delta_rk=ele(2)*dsin(2.0*phik)+ele(14)*dcos(2.0*phik)
    rk=a*(1.0-ele(6)*dcos(ek))+delta_rk
c
c (11)

delta_dik=ele(12)*dsin(2.0*phik)+ele(10)*dcos(2.0*phik
)
    dik=ele(13)+delta_dik+ele(17)*tk
c
c (12)
    xdashk=rk*dcos(uk)
    ydashk=rk*dsin(uk)
c
c (13)
    omegak=ele(11)+(ele(16)-omega_dot_e)*tk-
ele(9)*omega_dot_e
c
c (14)
    dxyz(1)=xdashk*dcos(omegak)-
ydashk*dcos(dik)*dsin(omegak)

```

```

dxyz(2)=xdashk*dsin(omegak)+ydashk*dcos(dik)*dcos(omeg
ak)
      dxyz(3)=ydashk*dsin(dik)
c
      return
      end
c
c-----
-----
c
      subroutine kepler(dmk,e,ek)
c
      implicit real*8 (a-h,o-z)
      logical lfirst
      data thres/1.e-14/
c
      ek=dmk
      lfirst=.true.
      i=1
c
      1000 continue
c
      diff=ek+e*dsin(ek)-dmk
      if(dabs(diff).lt.thres) goto 9999
      partial=1-e*dcos(ek)
      ek=ek-diff/partial
      i=i+1
      goto 1000
c
      9999 niteration=i-1
c
      return
      end

```

Lampiran 5: Contoh Hasil Pengolahan Data Observasi

```

> sat# 2 #data:1053 site:cair bias: -103.9571
Time (UT)  STEC (TECU)
15.225      0.0000
15.233      0.2352
15.242      0.4768
15.250      0.7102
15.258      0.9482
15.267      1.0895
15.275      1.2692
15.283      1.3599
15.292      1.4914
.....
> sat#20 #data: 661 site:cair bias: -8.2525
18.492      0.0000
18.500      0.0463
18.508      0.0859
18.517      0.1730
18.525      0.2497
18.533      0.2796
.....
> sat#12 #data: 559 site:cair bias: 21.5093
0.008       0.0000
0.017       0.1803
0.025       0.2653
0.033       0.4248
0.042       0.6083
0.050       0.7827
0.058       1.0354
0.067       1.2330
.....
> sat#24 #data: 412 site:cair bias: -15.1608
0.008       0.0000
0.017       0.0419
0.025       0.1023
0.033       0.1725
0.042       0.2456
0.050       0.3125
.....

```


Lampiran 6: Contoh Hasil Pengolahan Data Navigasi

Time	no.sat	X	Y	Z
0.00	1	0.10323642353D+08	- .20466290935D+08	- .13297311885D+08
0.00	2	- .21642625341D+08	0.12816705571D+08	- .74228891276D+07
0.00	3	0.10485057257D+07	- .15625988652D+08	- .21450546166D+08
0.00	5	- .20746938249D+08	0.50823659197D+07	0.15840121587D+08
0.00	6	- .19494660944D+08	0.36166579458D+06	- .18021557777D+08
0.00	7	- .51085319498D+07	- .14858306451D+08	0.21489175122D+08
0.00	8	0.73163423199D+07	- .20320477695D+08	0.15502641410D+08
0.00	9	- .82658571658D+07	- .24667282081D+08	0.53019939937D+07
0.00	10	0.24184008715D+08	0.10736421865D+08	0.26479913027D+07
0.00	11	0.97411693136D+07	- .24394315426D+08	- .42841935208D+07
0.00	12	- .55778988910D+07	0.13511105062D+08	- .22295755062D+08
0.00	13	- .12687948301D+08	0.12028750095D+08	0.19884762897D+08
0.00	14	0.14052793872D+08	0.13414278687D+08	- .17929169662D+08
0.00	15	- .37430094309D+07	0.23171718890D+08	0.11971515404D+08
0.00	16	0.20644676295D+08	- .26869537986D+07	0.16632794095D+08
0.00	17	- .13794846308D+08	- .14087222863D+08	- .17595966626D+08
0.00	18	0.16607870751D+08	0.16104352140D+08	0.13806077947D+08
0.00	19	- .15191310389D+08	- .33696561398D+07	- .21700772825D+08
0.00	20	- .54075506325D+07	0.14975995739D+08	0.21104654696D+08
0.00	21	0.96787980143D+07	0.12907978408D+08	0.21834400357D+08
0.00	22	0.21050042158D+08	- .51339700469D+07	- .15259270654D+08
0.00	23	- .410527934966D+06	- .25692673439D+08	- .55630509536D+07
0.00	24	- .12787553410D+08	0.21012660643D+08	- .98159865879D+07
0.00	25	0.74661037333D+07	0.16531985193D+08	- .19575498769D+08
0.00	26	0.25242734798D+08	0.34317409073D+07	0.75978556882D+07
0.00	27	0.12648532671D+08	- .10422432048D+08	0.20845237722D+08
0.00	28	- .23139614116D+08	- .12827434776D+08	0.32181771197D+07
0.00	29	0.47479275761D+07	0.26098942852D+08	0.17539788759D+07
0.00	30	- .14833083415D+08	- .74569557500D+07	0.20739913088D+08
0.00	31	0.20996630628D+08	- .23556647221D+07	- .16207897724D+08
0.05	1	0.10576676762D+08	- .20625199734D+08	- .12838747599D+08
0.05	2	- .21548314807D+08	0.12651949131D+08	- .79403599482D+07
0.05	3	0.15135278032D+07	- .15467234371D+08	- .21537871078D+08
0.05	5	- .21077232255D+08	0.49328711252D+07	0.15451749340D+08
0.05	6	- .19200777595D+08	0.66777287843D+05	- .18337683223D+08
0.05	7	- .47200555576D+07	- .15154027205D+08	0.21363501430D+08
0.05	8	0.74168501036D+07	- .19974955054D+08	0.159003659266D+08
0.05	9	- .82355514250D+07	- .24790293014D+08	0.47484337943D+07
0.05	10	0.24103915181D+08	0.10762072498D+08	0.32146726188D+07
....
24.00	18	0.16165938696D+08	0.16052650385D+08	0.14394166349D+08
24.00	19	- .15244093387D+08	- .40501294182D+07	- .21535673181D+08
24.00	20	- .60437603622D+07	0.14812077989D+08	0.21049375438D+08
24.00	21	0.91610576306D+07	0.13356522093D+08	0.21778986949D+08
24.00	22	0.21333640685D+08	- .50928518666D+07	- .14883074774D+08
24.00	23	- .30666860051D+06	- .25523804888D+08	- .62883533059D+07
24.00	24	- .13055730538D+08	0.21158631614D+08	- .91162607667D+07
24.00	25	0.68537004338D+07	0.16357029132D+08	- .19940323513D+08
24.00	26	0.25432849504D+08	0.35617812642D+07	0.68700388602D+07
24.00	27	0.12788964397D+08	- .97808195572D+07	0.21072728082D+08
24.00	28	- .23031681559D+08	- .12836316285D+08	0.40140093376D+07
24.00	29	0.46908340102D+07	0.26150066355D+08	0.95898316225D+06
24.00	30	- .14315350301D+08	- .78638998933D+07	0.20950230383D+08

Lampiran 7: Contoh Program Plotting STEC di Matlab

```

t2=sat2(:,1); tec2=sat2(:,2);
subplot(4,5,1); plot(t2,tec2);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S2');

t21=sat21(:,1); tec21=sat21(:,2);
subplot(4,5,2); plot(t21,tec21);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S21');

t20=sat20(:,1); tec20=sat20(:,2);
subplot(4,5,3); plot(t20,tec20);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S20');

t12=sat12(:,1); tec12=sat12(:,2);
subplot(4,5,4); plot(t12,tec12);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S12');

t24=sat24(:,1); tec24=sat24(:,2);
subplot(4,5,5); plot(t24,tec24);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S24');

t32=sat32(:,1); tec32=sat32(:,2);
subplot(4,5,6); plot(t32,tec32);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S32');

t15=sat15(:,1); tec15=sat15(:,2);
subplot(4,5,7); plot(t15,tec15);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S15');

t14=sat14(:,1); tec14=sat14(:,2);
subplot(4,5,8); plot(t14,tec14);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S14');

t31=sat31(:,1); tec31=sat31(:,2);
subplot(4,5,9); plot(t31,tec31);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S31');

t10=sat10(:,1); tec10=sat10(:,2);
subplot(4,5,10); plot(t10,tec10);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S10');

t4=sat4(:,1); tec4=sat4(:,2);
subplot(4,5,11); plot(t4,tec4);
xlabel('time'), ylabel('TEC'); title('TEC CAIR S4');

```

Lampiran 8: Program Untuk Plotting IPP dan SIP

8.1. Rumus Dasar Plotting IPP

```
function [lamda,theta] = map1(orbako62,Xo,Yo,Zo,o)
load coast.mat; % untuk memperlihatkan peta dunia
hold on;
A=6377397.155; % adalah jari jari bumi
E2=(0.0066743722); % adalah nilai eksentrisitas atau
penggepengan
%koord gempa
B0=-(5+9/60+36/3600)*pi/180 % bujur
L=(94+3/60+0/3600)*pi/180 % lintang

sinB02=(sin(B0))^2; % hasil dari sin bujur
cosB02=(cos(B0))^2; % hasil dari cos bujur
h=0;
N=A/sqrt(1-(E2)*sinB02); % rumus untuk mencari nilai N
x=(N+h)*cos(B0)*cos(L); % sumbu x koordinat bumi
y=(N+h)*cos(B0)*sin(L); % sumbu y
z=(N*(1-E2)+h)*sin(B0); % sumbu z
%plot untuk lokasi gempa
[LAMBDA2,THETA2,R2] = cart2sph(x,y,z); % ini adalah
proses merubah koordinat
% dengan sumbu x y z diubah ke dalam lintang bujur
sesuai dengan peta "load coast.mat"
plot(LAMBDA2*180/pi,THETA2*180/pi,'*'); % penggambaran
titik gempa dalam peta

datasat=orbako62; % data navigasi dipanggil disini
UT_time=orbako62(:,1);
num_sat=orbako62(:,2);
X_sate=orbako62(:,3);
Y_sate=orbako62(:,4);
Z_sate=orbako62(:,5);
h=0;
vv=0;
for i=1:max(num_sat);
%=====
    k=i;
    l=0;
    b=0;
    for j=1:length(UT_time)
```

```

if k==num_sat(j)
    if k==0
        vv=k;
        l=l+1
        X_sat(l)=X_sate(j);
        Y_sat(l)=Y_sate(j);
        Z_sat(l)=Z_sate(j);
        UT_time1(l)=UT_time(j)
        m(l)=j;
        b=b+1;
    end
end
end
if k==vv;%-----
-----

h=h+1;
hold on;

plot(long,lat,'black')

Xh=X_sat;
Yh=Y_sat;
Zh=Z_sat;
for n=1:length(Xh)
    % fungsi d adalah untuk menentukan
jarak (satelit ke stasiun)
    d(n)=sqrt ((Xo-Xh(n))^2+(Yo-
Yh(n))^2+(Zo-Zh(n))^2);
end
% rav adalah jari - jari bumi
Rav=6371000.000;
% D adalah stasiun tertentu(yang telah
ditentukan) ke pusat bumi
D=sqrt(Xo^2+Yo^2+Zo^2);
% S adalah jarak satelit menurut perjalanan
waktu (jam 00.00-2400) ke pusat bumi
S=sqrt(Xh.^2+Yh.^2+Zh.^2);
disp(Xo);
for n=1:length(Xh) % pada saat posisi
satelit tertentu terhadap waktu (jam 00.00-2400)

    % sudut ZP adalah sudut yang dibentuk
antara (jarak pusat

```

```

                                % bumi ke stasiun) dan (jarak stasiun
ke satelit)
                                ZP(n)=(D^2+d(n)^2-S(n)^2)/(2*D*d(n));
                                % zan adalah pi - sudutZP
                                Zan(n) =pi-acos(ZP(n));
                                end

                                % zan adalah sudut E(elevation angel pada
stasiun)
                                Zan=(pi/2)-Zan;
                                % fungsi rec_ipp untuk menentukan jarak IPP
terhadap jarak pandang
                                % satelit ke pusat bumi
                                rec_ipp=abs(-
Rav.*sin(Zan)+sqrt(Rav^2.*((sin(Zan)).^2)-(Rav^2-
(Rav+300000)^2)));
                                % untuk menentukan jarak
                                un_vek=[((Xo-Xh)./d)' ((Yo-Yh)./d)' ((Zo-
Zh)./d)'];
                                % untuk menentukan lokasi IPP di ionosfer
                                dis_rec_x=rec_ipp'.*[un_vek(:,1)];
                                dis_rec_y=rec_ipp'.*[un_vek(:,2)];
                                dis_rec_z=rec_ipp'.*[un_vek(:,3)];
                                % penyusunan dalam matriks x y z
                                dis_rec=[dis_rec_x dis_rec_y dis_rec_z];
                                % untuk menentukan lokasi SIP di permukaan
bumi
                                ipp_x=Xo-dis_rec_x;
                                ipp_y=Yo-dis_rec_y;
                                ipp_z=Zo-dis_rec_z;

                                % untuk mengubah koordinat kartesian(xyz)
menjadi geographic
                                [LAMBDA1,THETA1,R1] =
cart2sph(ipp_x,ipp_y,ipp_z);
                                hold on

                                % plot alur satelit dari waktu a hingga b
                                a=200;
                                b=290;
                                % C={'k';'b';'r';'g';'y';'c';'m';'w'}
                                plot(LAMBDA1(a:b)*180/pi,THETA1(a:b)*180/pi,'-
b')

```

```
lamda=LAMBDA1(251)*180/pi;
theta=THETA1(251)*180/pi;
% penentuan IPP
plot(lamda,theta,'*r')
%
%   sat_plot(h)=vv; 371
%   sat_title=num2str(vv);
xlabel('longitude');
ylabel('latitude');
zlabel('m');
end %-----
end
grid on
hold on
```

8.2. Script Plotting SIP

```

%TUGAS AKHIR
%FEBRIAN ADI SAPUTRA
%3513100020
%Plotting SIP
%=====
clc,clear
load 'orbako62.mat'
%titik stasiun
%CAIR
x21 = [-1041109.4315  6292545.1830    22999.1531];
[lo,la,h] = cart2sph(x21(1,1),x21(1,2),x21(1,3));
plot((lo*180/pi),(la*180/pi),'>r','Linewidth',2);
hold on
%CBKT
x22 = [-1148362.7334  6274759.8243   -34164.5796];
[lo,la,h] = cart2sph(x22(1,1),x22(1,2),x22(1,3));
plot((lo*180/pi),(la*180/pi),'<m','Linewidth',2);
%CPAR
x23 = [-1121954.1928  6278300.5936   -69121.2701];
[lo,la,h] = cart2sph(x23(1,1),x23(1,2),x23(1,3));
plot((lo*180/pi),(la*180/pi),'>c','Linewidth',2);
%CPDG
x24 = [-1147179.6117  6273234.8315  -105480.7387];
[lo,la,h] = cart2sph(x24(1,1),x24(1,2),x24(1,3));
plot((lo*180/pi),(la*180/pi),'<g','Linewidth',2);
%CSEL
x25 = [-1198842.7097  6261305.6721  -198796.5257];
[lo,la,h] = cart2sph(x25(1,1),x25(1,2),x25(1,3));
plot((lo*180/pi),(la*180/pi),'>b','Linewidth',2);

%Earthquake
x = (-5.16);
y = (94.05);
plot(y,x,'*r','LineWidth',8);
%legend ('titik gempa');

%legenda untuk stasiun
legend('CAIR','CBKT','CPAR','CPDG','CSEL','titik
gempa');
hold on

```

```
% Nomor SATELIT
% CAIR
[lamda1,theta1] =
map1(orbako62,x21(1),x21(2),x21(3),17);
J=[lamda1 theta1];
% CBKT
[lamda1,theta1] =
map1(orbako62,x22(1),x22(2),x22(3),17);
K=[lamda1 theta1];
% CPAR
[lamda1,theta1] =
map1(orbako62,x23(1),x23(2),x23(3),17);
L=[lamda1 theta1];
% CPDG
[lamda1,theta1] =
map1(orbako62,x24(1),x24(2),x24(3),17);
M=[lamda1 theta1];
% CSEL
[lamda1,theta1] =
map1(orbako62,x25(1),x25(2),x25(3),17);
N=[lamda1 theta1];
```


Lampiran 9: Contoh Script Perhitungan nilai STEC dan Polinomial Pangkat Enam

```

%TUGAS AKHIR
%FEBRIAN ADI SAPUTRA
%3513100020
%Perhitungan Nilai STEC dan Polinomial Pangkat 6
%=====

t=s17(:,1);      %t=time
y=s17(:,2);      %y=tec
%plot(tec1)

p=polyfit(t,y,6); %membuat persamaan
polinomial
y1=polyval(p,t); %menghitung hasil polinomial

plot(t,y,'b-'); %untuk ngeplot stec &
polinomial
xlabel('time (UTC)'), ylabel('TECU');
title('STEC dan polinomialnya');
grid on; hold on
plot(t,y1,'r-');
hold off

legend('stec cbkt','polinomial');
%VTEC=STEC-Polinomial
vtec=y-y1; %untuk ngeplot vtec
%plot(t,vtec); xlabel('time (UTC)'),
ylabel('TECU'); title('VTEC CBKT S17'); grid on;

vtec_cbkt17=[t vtec]; %plot waktu & vtecnya

```

Lampiran 10: Contoh Script Plotting Nilai VTEC

```

%TUGAS AKHIR
%FEBRIAN ADI SAPUTRA
%3513100020
%Plotting Nilai VTEC
%=====

load 'vtec_cair17.mat';
load 'vtec_cbkt17.mat';
load 'vtec_cpar17.mat';
load 'vtec_cpdg17.mat';
load 'vtec_csel17.mat';

t1=vtec_cair17(:,1); v1=vtec_cair17(:,2);
plot(t1,v1,'b-');

xlabel('time (UTC)'), ylabel('TECU');
title('VTEC ALL SAT17');
grid on,hold on

t2=vtec_cbkt17(:,1); v2=(vtec_cbkt17(:,2)+2);
plot(t2,v2,'g-');

t3=vtec_cpar17(:,1); v3=(vtec_cpar17(:,2)+4);
plot(t3,v3,'r-');

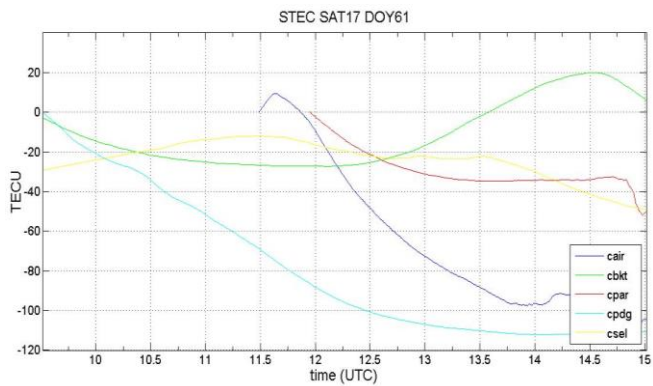
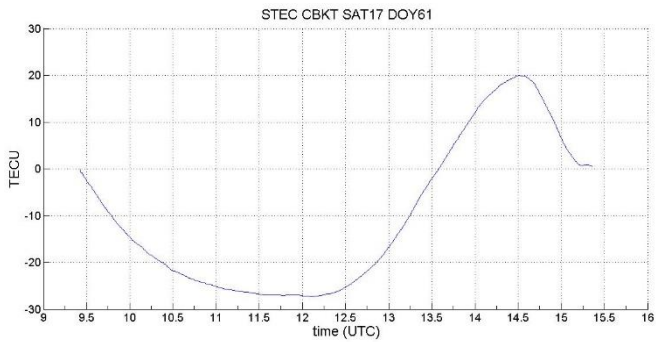
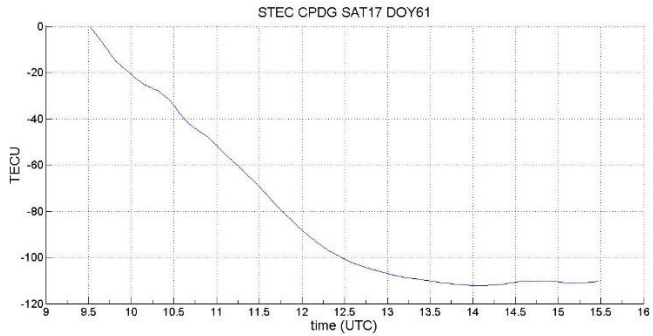
t4=vtec_cpdg17(:,1); v4=(vtec_cpdg17(:,2)+6);
plot(t4,v4,'c-');

t5=vtec_csel17(:,1); v5=(vtec_csel17(:,2)+8);
plot(t5,v5,'m-');

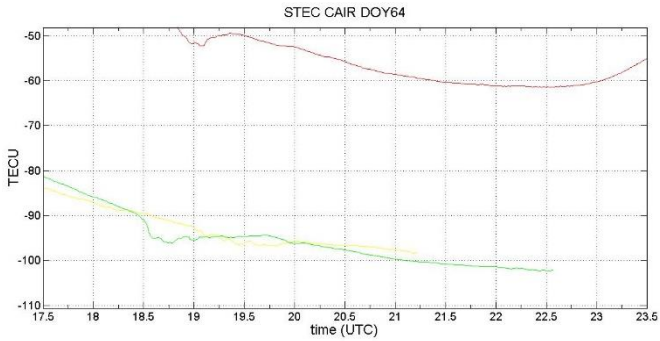
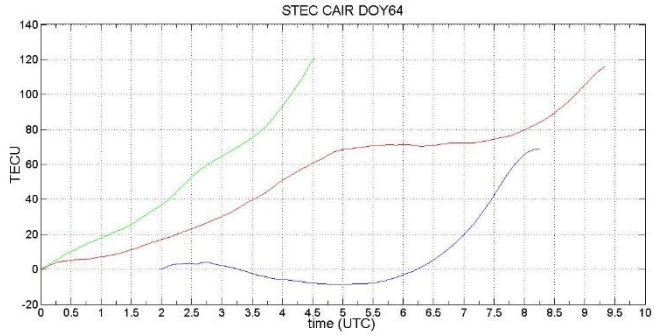
%legenda untuk stasiun
legend('cair','cbkt','cpar','cpdg','csel');

```

Lampiran 11: Contoh Grafik STEC Hari Sebelum Gempa



Lampiran 12: Contoh Grafik STEC Hari Sesudah Gempa



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Rembang, 20 Februari 1996, merupakan anak pertama dari lima bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa Tengah, yaitu TK Tejorini (1999-2001), SD N 2 Jolotundo (2001-2003), SD N 2 Selopuro (2003-2007), SMP N 1 Lasem (2007-2010), SMA N 1 Rembang (2010-2013). Pada tahun 2013, penulis mengikuti tes Seleksi Nasioanl Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan akhirnya masuk di Jurusan Teknik Geomatika – ITS yang terdaftar dengan Nomor Registrasi Peserta (NRP) 3513100020. Selama menjalani perkuliahan, penulis mengikuti kegiatan perkuliahan seperti mahasiswa pada umumnya dan aktif di beberapa kegiatan organisasi mahasiswa, yaitu menjabat sebagai Staff Komisi D FSLDK Jamaah Masjid Manarul Ilmi (JMMI) ITS (2014-2015), Ketua UKM Persaudaraan Setia Hati Terate (PSHT) ITS (2015-2016). Penulis pernah mengikuti program kreativitas mahasiswa yang diselenggarakan oleh Menristek DIKTI, dan lolos didanai pada tahun 2017 dengan judul penelitian “Pengamatan Potensi *Land Subsidence* Wilayah Terdampak Lumpur Lapindo Sidoarjo Menggunakan Metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR)* Tahun 2015-2016”. Pada tahun ketiga penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Seascope Survey dan pada tahun keempat untuk memperoleh gelar sarjana teknik, penulis memilih bidang kajian geodinamika dengan judul Tugas Akhir yaitu “Analisa Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Bumi Sumatra Barat Tanggal 2 Maret 2016”.