



TUGAS AKHIR - RG091536

**ANALISIS DEFORMASI AKIBAT GEMPA BUMI
KEPULAUAN MENTAWAI MENGGUNAKAN
PENGAMATAN GPS KONTINU
(STUDI KASUS: GEMPA MENTAWAI TAHUN
2008)**

IHSAN NAUFAL MUAFIRY
NRP 3511 100 064

Dosen Pembimbing
M. Nur Cahyadi, ST, M.Sc, Ph.D

JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

Halaman ini sengaja dikosongkan.



FINAL ASSIGNMENT - RG091536

**DEFORMATION ANALYSIS OF MENTAWAI
ISLAND EARTHQUAKE USING GPS
CONTINUOUSLY METHOD (AREA OF STUDY:
2008 MENTAWAI EARTHQUAKE)**

IHSAN NAUFAL MUAFIRY
NRP 3511 100 064

Supervisor
M. Nur Cahyadi, ST, M.Sc, Ph.D

DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

Halaman ini sengaja dikosongkan.

LEMBAR PENGESAHAN

Analisa Deformasi Akibat Gempa Bumi Kepulauan Mentawai Menggunakan Pengamatan GPS Kontinu (Studi Kasus: Gempa Mentawai Tahun 2008)

TUGAS AKHIR

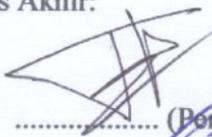
**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**IHSAN NAUFAL MUAFIRY
NRP. 3511 100 64**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

M. Nur Cahyadi, ST, MSc, PhD.
NIP. 1981 1223 2005 01 1002



(Pembimbing)

SURABAYA, JULI 2015



**ANALISIS DEFORMASI AKIBAT GEMPA BUMI
KEPULAUAN MENTAWAI MENGGUNAKAN
PENGAMATAN GPS KONTINU
(STUDI KASUS: GEMPA MENTAWAI TAHUN 2008)**

Student Name : Ihsan Naufal Muafiry
NRP : 3511100064
Department : Teknik Geomatika FTSP – ITS
Student Lecturer : M. Nur Cahyadi, ST, M.Sc, Ph.D

ABSTRAK

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Hindia-Australia, dan Lempeng Pasifik. Akibatnya gempa bumi dan letusan gunung api akan sering terjadi tidak jauh dari batas-batas lempeng tersebut. Tanggal 25 Februari 2008, di sekitar Mentawai, pada lokasi $100,018^{\circ}$ BT; $2,353^{\circ}$ LS, terjadi gempa berkekuatan 7,2 Mw. Sebagai salah satu bentuk langkah dalam mitigasi bencana bagi masyarakat di zona gempa, pengamatan aktivitas geodinamika saat ini dibutuhkan untuk pembuatan model potensi gempa bumi. Dengan adanya teknologi *Global Positioning System* (GPS), studi geodinamika menjadi lebih mudah dikerjakan. Melalui pemantauan GPS kontinu dapat diketahui pergerakan deformasi yang terjadi sebelum (*interseismic*) dan sesudah (*postseismic*) akibat gempa (*coseismic*). Untuk itu dalam penelitian ini dilakukan pengamatan fase gempa *interseismic*, *postseismic* dan *coseismic* dari Gempa Mentawai 2008 dengan metode kontinu pada jaring stasiun GPS *Sumatra GPS Array* (SuGAR). Dari hasil analisa didapatkan deformasi stasiun terbesar akibat Gempa Mentawai terjadi pada stasiun SuGAR SLBU dengan besar deformasi 0,2220 m pada sumbu horisontal (*easting, northing*) dan 0,1415 m pada sumbu vertikal (*up*). Adapun arah vektor pergerakan stasiun GPS pada fase *interseismic* didapatkan mengarah pada arah mata angin *south-west*

dengan kecepatan horizontalnya 0,0331 m untuk stasiun GPS SLBU, 0,1179 m untuk stasiun BSAT, 0,0806 m untuk stasiun PRKB dan 0,1108 m untuk stasiun LNNG. Sedangkan untuk stasiun PPNJ mengarah ke *south-east* dengan kecepatan horizontalnya 0,0236 m. Demikian pula arah vektor pergerakan stasiun GPS pada fase *postseismic* memiliki arah pergerakan yang mirip dengan fase *interseismic*.

Kata kunci : Gempa, GPS, Deformasi, Vektor Pergerakan.

***DEFORMATION ANALYSIS OF MENTAWAI ISLAND
EARTHQUAKE USING GPS CONTINUOUSLY METHOD
(AREA OF STUDY: 2008 MENTAWAI EARTHQUAKE)***

Student Name : Ihsan Naufal M
NRP : 3511100064
Department : Geomatics Engineering FTSP – ITS
Student Lecturer : M. Nur Cahyadi, ST, M.Sc, Ph.D

ABSTRACT

Indonesia is located among three tectonic plates, which are Eurasia, Hindia-Australia and Pacific Plate. It is then affected some tectonic activities such as earthquake and volcano eruption at nearest tectonic zone area. February 25th 2008 around Mentawai Island, located at 100.018°East; 2.353°West, occurred an earthquake with a magnitude of 7.2 Mw. As one of disaster mitigation action in the earthquake zone societies, geodynamic analysis nowadays is needed in modelling an earthquake probability. With a new Global Positioning System (GPS) technology, geodynamic study is easier to be completed. By using continued GPS method, it can analyse a deformation at the earthquake phases which are before an earthquake phase (interseismic), after an earthquake phase (postseismic) and at the its earthquake phase (coseismic). In this research will examine all Mentawai 2008 Earthquake phases using GPS method in Sumatra GPS Array (SuGAR) network. The results obtained SLBU, one of SuGAR network, as a biggest deformation value of Mentawai 2008 earthquake in coseismic phase with the amount of 0.2220 at the horizontal axis (easting and northing) and 0.1415 m at the vertical axis (up). In addition, the vector movement direction of GPS stations at the interseismic phase obtained headed to the south-west direction with the horizontal velocity for SLBU station is 0.0331 m, 0.1179 m for BSAT, 0.1108 m for LNNG, and 0.0806 m for PRKB. Exception for PPNJ has difference direction between

other four GPS stations, which is headed to the south-east direction with the vector displacement amount is 0.0236 m for PPNJ.

Keyword: Earthquake, GPS, Deformation, Vector Displacement

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'aalamiin. Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan nikmat, dan rahmat-Nya berupa keimanan, kemudahan dan pertolongan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "**Analisa Deformasi Akibat Gempa Bumi Kepulauan Mentawai Menggunakan Pengamatan GPS Kontinu (Studi Kasus: Gempa Mentawai Tahun 2008)**".

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 orangtua tercinta, Bapak Sofyan Halim M.Ak dan Ibu Lilis Suryani S.Pd yang selama ini dengan tulus ikhlas telah mendidik, memberikan doa dan kasih sayangnya setiap saat. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan keselamatan dan kebahagiaan dunia akhirat.
2. Seluruh Bapak dan Ibu dosen serta staff dan karyawan Teknik Geomatika ITS yang selama ini telah membimbing penulis sejak awal hingga akhir perkuliahan.
3. Bapak Dr. Ir. Muhammad Taufik selaku Ketua Program Studi Teknik Geomatika - FTSP ITS.
4. Bapak Lalu Muhammad Jaelani ST, M.Sc, PhD selaku koordinator Tugas Akhir, terima kasih atas semua bantuan dan kesempatan yang telah di berikan.
5. Bapak Mokhammad Nur Cahyadi ST, M.Sc, PhD selaku dosen pembimbing, atas kebaikan dan dedikasinya dalam memberikan bimbingan hingga dapat terselesaikan Tugas Akhir ini.

6. Bapak Akbar Kurniawan ST, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberi waktu dan materi terkait deformasi dan GAMIT/GLOBK.
7. Ibu Meiriska Yusfania, ST, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu dan materi terkait analisa deformasi akibat gempa bumi.
8. Seluruh saudara angkatan **G13 (Geomatics 2011)** yang telah menemani dalam mengerjakan tugas akhir, terima kasih banyak atas bantuan dan dukungannya.
9. Seluruh teman-teman yang telah memberikan semangat dan doanya dan penghuni Kos Qur'an-7 yang telah berjuang bersama-sama dalam merasakan indahny kebersamaan dalam istiqamah dan jamaah.
10. Semua teman-teman senior (Mas Fikri Bamahri ST dan Mas Budi Joko P. ST) dan junior 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 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, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kerak Bumi.....	5
2.2 Deformasi.....	6
2.2.1 Metode Analisis Deformasi	9
2.3 Gempa Bumi	10
2.4 Aktivitas Kerak Bumi Pulau Sumatera	13
2.5 Gempa Mentawai 2008.....	15
2.6 Pengamatan <i>Global Positioning System</i> (GPS).....	16

2.6.1 Sinyal dan Penentuan Jarak GPS	16
2.6.2 Penentuan Posisi dengan GPS.....	17
2.6.3 Kesalahan dan Bias pada GPS	21
2.6.4 Ketelitian Pengolahan GPS	25
2.6.5 Pengolahan Data GPS dengan <i>Software</i> GAMIT...25	
2.7 Pemantauan Kerak Bumi dengan GPS.....	28
2.8 Mencari Kecepatan Vektor Pergeseran.....	30
2.9 Uji Statistik	33
2.10 Penelitian Terdahulu	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	37
3.1 Lokasi Penelitian.....	37
3.1.1 Data	37
3.1.2 Peralatan.....	41
3.2 Tahapan Penelitian.....	43
3.3 Tahapan Pengolahan Data.....	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Hasil Pengolahan GAMIT	55
4.1.1 Nilai <i>Normalised Root Mean Square (nrms)</i>	55
4.1.2 Nilai <i>Wide Lane</i> dan <i>Narrow Lane</i>	56
4.2 Hasil Pengolahan GLOBK.....	58
4.2.1 Deret Waktu Seluruh Fase	59
4.2.2 Uji Kualitas Data GPS Pada Fase <i>Interseismic</i> ...	62
4.2.2 Uji Kualitas Data GPS Pada Fase <i>Postseismic</i> ...	63

4.2.3 Analisa Vektor Pergeseran Horizontal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008	64
4.2.4 Analisa Pergeseran Sumbu Vertikal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008	69
4.3 Hasil Pengolahan GMT.....	71
4.4 Analisa Hasil.....	76
4.4.1 Vektor Pergeseran Pada Sumbu Horizontal	76
4.4.2 Pergeseran Pada Sumbu Vertikal	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Metode Penentuan Posisi dengan GPS	18
Tabel 3.1 Lokasi <i>receiver</i> Pengamatan GPS SuGAR.....	38
Tabel 3.2 Lokasi Stasiun Titik Ikat GPS IGS.....	40
Tabel 4.1 RMS Data GPS <i>Interseismic</i> Sebelum <i>Removing</i> <i>Outlier</i>	62
Tabel 4.2 RMS Data GPS <i>Interseismic</i> Setelah <i>Removing</i> <i>Outlier</i>	63
Tabel 4.3 RMS Data GPS <i>Postseismic</i> Sebelum <i>Removing</i> <i>Outlier</i>	64
Tabel 4.4 RMS Data GPS <i>Postseismic</i> Setelah <i>Removing</i> <i>Outlier</i>	64
Tabel 4.5 Kecepatan Blok Sunda Pada Stasiun GPS yang Diamati	65
Tabel 4.6 Pergeseran Horisontal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008 (<i>coseismic</i>)	66
Tabel 4.7 Besar Vektor Pergeseran Stasiun GPS Sebelum (<i>Interseismic</i>) Gempa Mentawai 2008.....	67
Tabel 4.8 Besar Vektor Pergeseran Setelah Gempa Mentawai 2008 (<i>postseismic</i>)	68
Tabel 4.9 Arah Pergerakan Stasiun GPS Fase <i>Interseismic</i> dan <i>Postseismic</i>	68
Tabel 4.10 Arah Pergerakan Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008 (<i>coseismic</i>).....	69
Tabel 4.11 Pergeseran Vertikal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008 (<i>coseismic</i>).....	70
Tabel 4. 12 Pergeseran Vertikal Stasiun GPS Sebelum (<i>interseismic</i>) Gempa Mentawai 2008.....	70
Tabel 4. 13 Pergeseran Vertikal Stasiun GPS Setelah Gempa Mentawai 2008 (<i>postseismic</i>).....	71

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Dalam Bumi.	5
Gambar 2.2 Translasi materi.	8
Gambar 2.3 Rotasi materi.	8
Gambar 2.4 Regangan Normal.	8
Gambar 2.5 Regangan Geser.	9
Gambar 2.6 Ilustrasi Konveksi Mantel.	11
Gambar 2.7 Jalur Gempa Bumi Dunia.	12
Gambar 2.8 Ilustrasi Siklus Gempa pada Zona Subduksi.	13
Gambar 2.9 Pola Tektonik Pulau Sumatera.	14
Gambar 2.10 Ilustrasi Patahan <i>Thrust Faulting</i>	15
Gambar 2.11 Prinsip dasar penentuan posisi GPS.	19
Gambar 2.12 Ilustrasi pengamatan GPS diferensial.	20
Gambar 2.13 Prinsip estimasi deformasi <i>coseismic</i> dan <i>postseismic</i> dengan GPS.	29
Gambar 2.14 Kuadran Arah Vektor Pergeseran.	32
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian.	37
Gambar 3.2 Lokasi Pengamatan Stasiun GPS Kontinu SuGAR yang Digunakan	39
Gambar 3.3 Lokasi Pengamatan Stasiun Titik Ikat GPS IGS	40
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian.	45
Gambar 3.5 Diagram Alir Pengolahan Data.	46
Gambar 4.1 Nilai <i>nrms</i> Solusi Harian Pengolahan GAMIT.	56
Gambar 4.2 Resolusi Fase Ambiguitas <i>Wide Lane</i> Sepanjang Hari Pengamatan	57
Gambar 4.3 Resolusi Fase Ambiguitas <i>Narrow Lane</i> Sepanjang Hari Pengamatan	58
Gambar 4.4 Deret Waktu Pengamatan GPS Stasiun SLBU Pada DoY 002-150 dan Fase Gempa Mentawai 2008	60

Gambar 4.5 Besar dan Arah Vektor Pergeseran Horizontal Sebelum Gempa Mentawai 2008 (<i>interseismic</i>).....	72
Gambar 4.6 Besar dan Arah Vektor Pergeseran Horizontal Setelah Gempa Mentawai 2008 (<i>postseismic</i>).....	73
Gambar 4.7 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Horizontal Akibat Gempa Mentawai 2008 (<i>coseismic</i>).....	73
Gambar 4.8 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Vertikal Akibat Gempa Mentawai 2008 (<i>coseismic</i>).....	74
Gambar 4.9 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Vertikal Sebelum Gempa Mentawai 2008 (<i>interseismic</i>).....	75
Gambar 4.10 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Vertikal Setelah Gempa Mentawai 2008 (<i>postseismic</i>).....	75

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia terletak pada pertemuan 3 lempeng tektonik, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Hindia-Australia, dan Lempeng Pasifik. Pada daerah sekitar batas lempeng tersebut umumnya aktifitas tektonik utama berlangsung, seperti misalnya subduksi, tumbukan (*collision*), pemekaran punggung tengah samudra, dan sesar *transform* (Sule, 2007). Akibatnya gempa bumi dan letusan gunung api akan sering terjadi tidak jauh dari batas-batas lempeng tersebut.

Pulau Sumatera termasuk salah satu pulau terbesar di Indonesia. Pulau ini merupakan salah satu wilayah dengan aktifitas tektonik paling aktif di dunia. Pulau Sumatera mengakomodasi tumbukan Lempeng Indo-Australia yang mensubduksi Lempeng Eurasia dengan kecepatan 5-6 cm/tahun (Kristanto, 1991). Hal ini mengakibatkan Pulau Sumatera rawan terjadi gempa tektonik yang di sebabkan dari pergerakan lempeng tersebut. Salah satu gempa besar yang terjadi di pulau ini adalah gempa Kepulauan Mentawai pada tahun 2008 dengan *magnitude* gempa 7,2 Mw pada lokasi koordinat 100,018° BT; 2,353° LS dan kedalaman 35 km.

Kabupaten Kepulauan Mentawai merupakan kabupaten kepulauan yang terletak memanjang di bagian paling barat Pulau Sumatera dan dikelilingi oleh Samudera Hindia. Kepulauan Mentawai merupakan bagian dari serangkaian pulau non-vulkanik dan gugus kepulauan itu merupakan puncak-puncak dari suatu punggung pegunungan bawah laut. Kabupaten Kepulauan Mentawai juga terletak di jalur lempeng tektonik sehingga sering terjadi gempa tektonik. Seperti yang sudah dijelaskan diatas gempa yang terjadi pada

tahun 2008 tersebut merupakan salah satu gempa dengan kategori signifikan yang terjadi di Kepulauan Mentawai.

Meskipun gempa ini dirasakan hingga seluruh pulau Sumatera, Malaysia dan Singapura, baiknya adalah kerugian yang diakibatkan oleh gempa ini tidak terlalu besar dibandingkan gempa bumi yang terjadi di wilayah Pulau Sumatera sebelumnya. Namun prinsipnya, gempa bumi biasanya akan menyebabkan kerak bumi disekitarnya terdeformasi baik dalam arah vertikal dan horisontal. Oleh sebab itu, kemungkinan besar gempa Mentawai tahun 2008 juga menyebabkan aktivitas deformasi kerak bumi.

Seiring dengan perkembangan teknologi, kini pemantauan deformasi kerak bumi dapat menggunakan teknologi *Global Positioning System* (GPS). Melalui pemantauan GPS dapat diketahui pergerakan deformasi yang terjadi sebelum dan sesudah gempa. Salah satu metode dalam pemantauan deformasi dengan GPS adalah pemantauan secara kontinu. Prinsip pemantauan ini adalah pemantauan terhadap perubahan koordinat beberapa titik yang mewakili suatu wilayah dari waktu ke waktu. Metode ini, menggunakan beberapa alat penerima sinyal (*receiver*) GPS yang ditempatkan pada beberapa titik pantau pada lokasi yang tepat untuk pengamatan pergerakan kerak bumi dan pada suatu tempat lainnya terdapat pusat pemantau (stasiun referensi) yang merupakan pusat pemroses data.

Salah satu penyedia data GPS di kawasan Pulau Sumatera adalah *Sumatra GPS Array* (SuGAR). SuGAR adalah sekumpulan jaring stasiun GPS yang terpasang dan terinstal disepanjang Pulau Sumatera dan pulau-pulau sekitar batas lempeng samudera. Jaringan yang didesain, dibangun dan dioperasikan oleh *Tectonics Observatory California Technology* dan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) ini terdiri dari 49 titik pengamatan stasiun GPS yang dapat

digunakan untuk memantau pergerakan lempeng Pulau Sumatera.

Dengan adanya pengamatan GPS di Pulau Sumatera menggunakan data SuGAR, studi deformasi sebelum (*interseismic*) dan sesudah (*postseismic*) gempa Mentawai tahun 2008 dapat dilakukan, guna pembuatan model potensi bencana gempa bumi berikutnya sebagai salah satu bentuk langkah dalam mitigasi bencana bagi masyarakat Sumatera dan sekitarnya.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan permasalahan dalam penelitian ini adalah, bagaimana menentukan arah dan besar vektor pergeseran deformasi pada saat sebelum (*interseismic*) dan sesudah (*postseismic*) Gempa Mentawai tahun 2008 (*coseismic*) ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Wilayah studi berada di Kepulauan Mentawai dan sekitarnya.
- b. Penelitian mengenai analisa deformasi akibat gempa bumi kepulauan mentawai tahun 2008 menggunakan data GPS secara kontinu.
- c. Data GPS yang digunakan adalah data stasiun GPS SuGAR pada Bulan Januari 2008 hingga Mei 2008.
- d. Pengolahan data GPS menggunakan perangkat lunak pengolah data GPS ilmiah GAMIT/GLOBK.
- e. Analisis vektor deformasi yang dilakukan pada gempa Mentawai tahun 2008 yaitu besar dan arah pergerakannya.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang pada penelitian ini adalah :

- a. Mengetahui arah pergeseran deformasi pada saat sebelum (*interseismic*) dan sesudah (*postseismic*) gempa Mentawai tahun 2008 (*coseismic*).
- b. Menentukan besar vektor pergeseran deformasi pada saat sebelum (*interseismic*) dan sesudah (*postseismic*) gempa Mentawai tahun 2008 (*coseismic*).

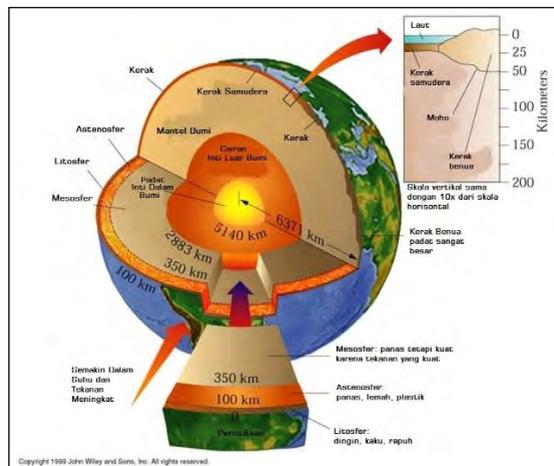
1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah salah satu bentuk aksi mitigasi bencana gempa bumi yakni sebagai informasi dalam pembuatan model potensi gempa bumi dikemudian hari, khususnya di wilayah Pulau Sumatera dan sekitarnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kerak Bumi

Struktur bumi, berdasarkan pembagian komposisinya terdiri atas tiga bagian, yakni kerak (*crust*), mantel (*mantle*) dan inti (*core*). Sedangkan pembagian berdasarkan sifat fisisnya, terdiri dari litosfir, astenosfir, mesosfir, inti luar (bersifat cair) dan inti dalam (bersifat padat).



Gambar 2. 1 Struktur Dalam Bumi (Willey dalam Anjasmara, 2014).

Adapun kerak bumi atau biasa dikenal pula dengan istilah *earth crust* adalah lapisan terluar bumi (perukaan bumi) yang memiliki ketebalan mencapai 70 km dan tersusun atas batuan-batuan basa dan masam. Lapisan ini terdiri menjadi dua bagian, yaitu bagian pertama adalah kerak samudra (*oceanic crust*) dan yang kedua adalah kerak benua (*continental crust*) (Anjasmara, 2014).

Batuan yang menyusun kerak samudera adalah batuan yang bersifat basa atau mafik. Kerak samudera mempunyai ketebalan berkisar antara 5-15 km. Kedalaman lapisan ini rata-rata sekitar 4000 meter dari permukaan air laut, meskipun pada beberapa palung laut kedalamannya ada yang mencapai lebih dari 10 km. Bagian atas dari kerak samudera memiliki ketebalan sekitar 1,5 km, dengan susunan batuan yang bersifat basa atau basaltik. Sedangkan bagian bawahnya disusun oleh batuan metamorf dan batuan beku gabro. Permukaan kerak samudera ditutupi oleh endapan sedimen dengan ketebalan rata-rata sekitar 500 meter.

Batuan yang menyusun kerak benua pada umumnya adalah batuan granitik atau yang bersifat asam. Ketebalan kerak benua berkisar antara 30-35 km dengan ketebalan rata-rata 35 km. Kerak benua ini menyusun sekitar 79% dari volume kerak Bumi. Ketinggian permukaan dari kerak benua rata-rata sekitar 800 meter dari permukaan laut, meskipun ada daerah yang ketinggiannya mencapai lebih dari 8000 meter. Bagian atas dari kerak benua ini disusun oleh batuan beku, batuan metamorf dan batuan endapan. Dengan pembagian jumlah untuk batuan beku dan batuan metamorf menyusun sekitar 95%, sisanya 5% merupakan batuan endapan.

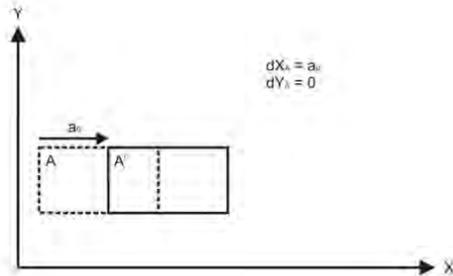
Adapun aktivitas tektonik pada bumi merupakan gerakan dari kerak bumi yang menyebabkan lekukan, lipatan, retakan, patahan sehingga permukaan bumi memiliki bentang alam yang berbentuk tinggi atau relatif.

2.2 Deformasi

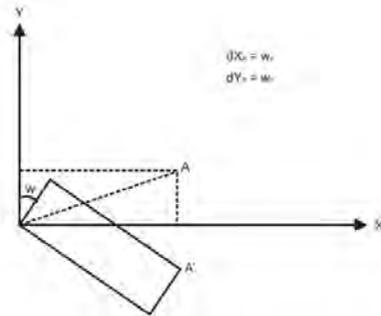
Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Secara umum juga dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Pergerakan secara absolut adalah gerakan

pada suatu sistem referensi tertentu yang dilihat dari titik itu sendiri, sedangkan pergerakan secara relatif adalah gerakan pada suatu sistem referensi tertentu yang dilihat dari titik lain. Perubahan bentuk pada bahan/logam dapat dibedakan menjadi dua yaitu deformasi elastis (*non-rigid*) dan plastis (*rigid*). Efek-efek dari penyebab deformasi atau pergeseran pada suatu materi akan menciptakan reaksi yang sebanding dengan sifat geometrik dan jenis material dari materi yang terdeformasi tersebut. Beban atau gaya berat materi merupakan gaya penyebab deformasi. Bekerjanya gaya berat pada suatu materi yang disertai pengaruh gaya berat dari materi disekitarnya dalam suatu selang waktu akan mempengaruhi bentuk geometri materi tersebut. Berdasarkan jenisnya deformasi yang terjadi pada suatu benda dapat dikelompokkan ke dalam empat jenis, yaitu:

- a. Translasi materi yang bersifat kaku. Perpindahan posisi materi ini tanpa mengalami perubahan bentuk, sesuai dengan acuan. Ilustrasi translasi materi digambarkan pada Gambar 2.2.
- b. Rotasi, yaitu perubahan posisi materi tanpa mengalami perubahan bentuk yang membentuk perubahan sudut (w) terhadap koordinat acuan. Ilustrasi rotasi ini digambarkan pada Gambar 2.3.

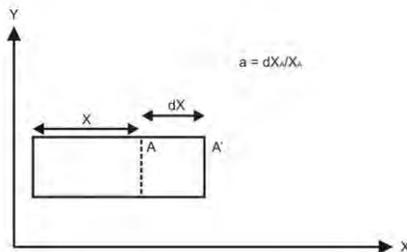


Gambar 2. 2 Translasi materi (Andriyani, 2012).



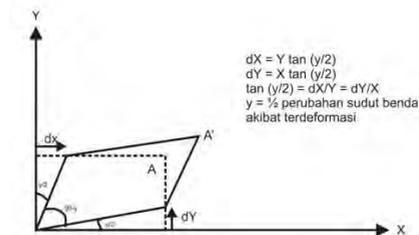
Gambar 2. 3 Rotasi materi (Andriyani, 2012).

- c. Regangan normal, merupakan perbandingan perubahan panjang (dx) terhadap panjang asalnya (X).



Gambar 2. 4 Regangan Normal (Andriyani, 2012).

- d. Regangan geser atau regangan menyilang, merupakan perubahan sudut dalam benda padat ketika terdeformasi.



Gambar 2. 5 Regangan Geser (Andriyani, 2012).

2.2.1 Metode Analisis Deformasi

Analisis deformasi bertujuan untuk menentukan kuantitas pergeseran dan penentuan parameter deformasi yang mempunyai karakteristik dalam ruang dan waktu dengan jalan mentransformasikan perubahan posisi ke dalam bentuk parameter-parameter deformasi meliputi pergeseran dan regangan (Chrzanowski, 1986) Secara garis besar, tahapan-tahapan yang dilakukan dalam analisis deformasi yaitu:

- a. Penyelenggaraan kerangka dasar serta penentuan metode pengukuran yang tepat
- b. Pengolahan serta analisis data
- c. Analisis nilai pergeseran yang terjadi pada benda terdeformasi
- d. Penentuan model deformasi yang sesuai

Analisis geometrik pada pengamatan deformasi dilakukan jika hanya dalam pengamatan ukuran dan dimensi dari objek terdeformasi. Dengan menggunakan data hasil pengamatan geodetik terhadap edek-efek respon suatu materi terhadap gaya yang bekerja padanya, dapat

dihasilkan suatu model matematik yang mewakili jenis deformasi. Analisis geometrik ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu:

- a. Pergeseran, merupakan analisis yang menunjukkan perubahan posisi suatu benda dengan menggunakan data perbedaan posisi yang didapat dari perataan data pengamatan pada kala berbeda.
- b. Regangan, merupakan analisis yang menunjukkan perubahan posisi, bentuk dan ukuran suatu benda dengan menggunakan data pengamatan geodetik langsung atau menggunakan data regangan yang diperoleh dari data pengamatan geodetik perubahan posisi.

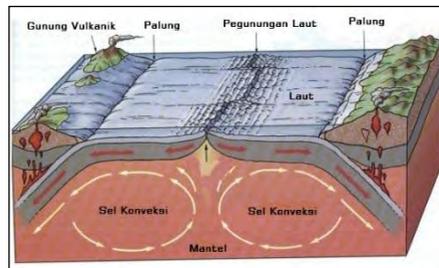
Untuk melakukan survei deformasi, ada beberapa metode dalam pelaksanaannya. Misalnya dengan menggunakan alat ukur *total station* ataupun bisa juga dengan metode sipat datar. Dengan adanya perkembangan teknologi, survei deformasi dan geodinamika juga dapat dilakukan dengan menggunakan satelit, seperti dengan menggunakan GPS.

2.3 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempabumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan dipancarkan kesegala arah berupa gelombang gempabumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi (BMKG, 2010).

Menurut teori lempeng tektonik yang muncul di awal tahun 1960-an menyatakan bahwa litosfer (bagian

atas bumi) terpecah atas beberapa buah lempeng yang bergerak relatif satu terhadap lainnya di atas lapisan astenosfir (mantel bumi) yang panas dan plastis. 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, yaitu apabila kedua lempeng saling menjauhi (*spreading*), saling mendekati (*collision*) dan saling geser (*transform*).

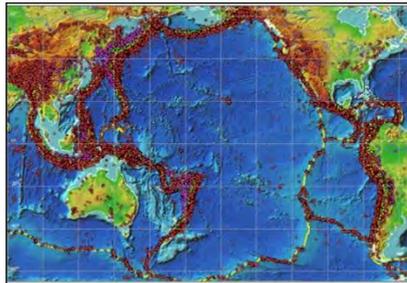


Gambar 2. 6 Ilustrasi Konveksi Mantel (Willey dalam Anjasmara, 2014).

Pergerakan lempeng tersebut pada prinsipnya bergerak lambat dan tidak dapat dirasakan oleh manusia namun terukur sebesar 0-15 cm per tahun. Namun pada kondisi yang lain, pergerakan lempeng akibat konveksi mantel macet dan saling mengunci, maka terjadilah pengumpulan energi yang berlangsung terus-menerus sampai pada suatu saat batuan pada lempeng tektonik tersebut tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut sehingga terjadi pelepasan mendadak yang kita kenal sebagai gempa bumi.

Karakteristik gempa bumi pada dasarnya adalah, berlangsung dalam waktu yang singkat, terjadi pada lokasi kejadian tertentu, memiliki potensi terulang kembali

(*earthquake cycle*), tidak dapat diprediksi, menimbulkan bencana dan tidak dapat dicegah namun akibat yang ditimbulkan dapat dikurangi. Adapun parameter dari gempa bumi adalah waktu terjadinya gempa bumi (dalam *origin time* – OT), lokasi pusat gempa bumi (episenter), kedalaman pusat gempa bumi (*depth*) dan kekuatan gempa bumi (BMKG, 2010).

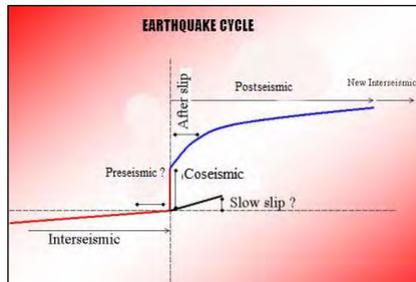


Gambar 2. 7 Jalur Gempa Bumi Dunia (BMKG, 2010).

Berdasarkan salah satu karakteristik gempa, yaitu memiliki potensi terulang kembali, secara garis besar di dalam satu siklus gempa bumi terdapat beberapa tahapan mekanisme terjadinya gempa bumi yang disertai dengan terjadinya deformasi pada kerak bumi, antara lain adalah melalui tiga fase berikut: *interseismic*, *coseismic*, dan *postseismic*.

Tahapan *interseismic* merupakan tahapan awal dari suatu siklus gempa bumi. Pada tahap ini, arus konveksi di lapisan dalam bumi menyebabkan pergerakan lempeng sehingga menimbulkan akumulasi energi di tempat batas antara dua lempeng, tempat biasanya terjadi gempa bumi. Tahapan *coseismic* merupakan tahapan ketika terjadinya gempabumi dimana energi yang telah

terakumulasi dari tahapan *interseismic* dilepaskan secara tiba-tiba. Sedangkan tahapan *postseismic* merupakan tahapan ketika sisa-sisa energi gempa bumi terlepas secara perlahan dalam kurun waktu tertentu sampai kembali ke tahap kesetimbangan awal yang baru (Andreas, 2007).



Gambar 2. 8 Ilustrasi Siklus Gempa pada Zona Subduksi (Andreas, 2007).

2.4 Aktivitas Kerak Bumi Pulau Sumatera

Pulau Sumatera adalah pulau keenam terbesar di dunia yang terletak di Indonesia, dengan luas 443.065,8 km². Penduduk pulau ini sekitar 52.210.926 jiwa. Pulau Sumatera terletak di bagian barat gugusan kepulauan Nusantara. Di sebelah utara berbatasan dengan Teluk Benggala, di timur dengan Selat Malaka, di sebelah selatan dengan Selat Sunda, dan di sebelah barat dengan Samudera Hindia.

Secara geologi Pulau Sumatera dicirikan oleh tiga sistem tektonik. Berurutan dari barat ke timur adalah sebagai berikut: zona subduksi oblik dengan sudut penunjaman yang landai, sesar Mentawai dan zona sesar besar Sumatera. Zona subduksi di Pulau Sumatera, yang sering sekali menimbulkan gempa tektonik, memanjang membentang sampai ke Selat Sunda dan berlanjut hingga selatan Pulau Jawa. Subsuksi ini mendesak Lempeng Eurasia di bawah Samudera Hindia ke

arah barat laut di Sumatera dan frontal ke utara terhadap Pulau Jawa, dengan kecepatan pergerakan yang bervariasi. Puluhan hingga ratusan tahun, dua lempeng itu saling menekan. Namun lempeng Indo-Australia dari selatan bergerak lebih aktif. Pergerakannya yang hanya beberapa milimeter hingga beberapa sentimeter per tahun ini memang tidak terasa oleh manusia. Karena dorongan lempeng Indo-Australia terhadap bagian utara Sumatera kecepatannya hanya 5,2 cm per tahun, sedangkan yang di bagian selatannya kecepatannya 6 cm per tahun. Pergerakan lempeng di daerah barat Sumatera yang miring posisinya ini lebih cepat dibandingkan dengan penyusupan lempeng di selatan Jawa (Kristanto, 1991).



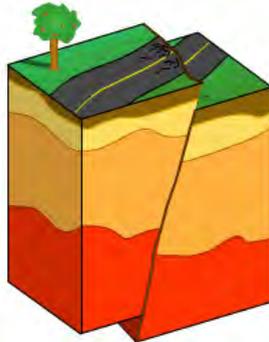
Gambar 2. 9 Pola Tektonik Pulau Sumatera (Kamaruddin, 2012).

Berdasarkan data pengamatan *United States Geological Survey* (USGS) dalam catatan gempa yang signifikan, tercatat terdapat 33 kali gempa tektonik signifikan sejak tahun 2004 hingga tahun 2014. Adapun lokasi yang sering terjadi gempa bumi di Pulau Sumatera adalah terletak membentang di sepanjang bagian sebelah barat Pulau Sumatera. Mulai dari Aceh, Sumatera Utara, Pulau Nias, Pulau Mentawai, Sumatera Selatan hingga Selat Sunda.

2.5 Gempa Mentawai 2008

Berdasarkan *United States Geological Survey* (USGS, 2011) pada tanggal 25 Februari 2008 (pukul 3:36 sore waktu lokal Indonesia) terjadi gempa 7,2 Mw di Mentawai, Indonesia. Gempa yang memiliki episentrum di koordinat $100,018^{\circ}$ BT; $2,353^{\circ}$ LS terasa hingga seluruh pulau Sumatera, Malaysia dan Singapura.

Gempa dengan kedalaman 35 km ini terjadi karena hasil dari *thrust-faulting* perbatasan dua lempeng, yakni Australia dan Sunda. *Thrust-faulting* adalah patahan lempeng ke arah atas yang memiliki sudut patahan secara vertikal sebesar 45 derajat atau kurang.



Gambar 2. 10 Ilustrasi Patahan *Thrust Faulting* (USGS, 2011)

Adapun gempa ini adalah kelanjutan dari rentetan aktivitas gempa besar yang mengakibatkan destruktif di Sumatera dan sekitarnya. Rentetan gempa ini bermula dari Gempa Sumatera-Andaman pada 26 Desember, 2004 (9,1 Mw), dilanjutkan Gempa Nias pada 28 Maret, 2005 (8,6 Mw) dan terakhir adalah Gempa Mentawai pada 12 September, 2007 (8,4 dan 7,9 Mw). Gempa Mentawai pada 25 Februari

2008 ini masih masuk ke dalam rentetan *aftershock* Gempa Mentawai 12 September 2007.

2.6 Pengamatan *Global Positioning System* (GPS)

GPS adalah sistem radio navigasi dan penentuan posisi menggunakan satelit. Nama formalnya adalah *Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System* (NAVSTAR GPS). GPS didesain untuk memberikan informasi posisi, kecepatan dan waktu (Abidin, 2006). Pada dasarnya GPS terdiri atas 3 segmen utama, yaitu:

- a. Segmen angkasa (*space segment*)
Terdiri dari 24 satelit yang terbagi dalam 6 orbit dengan inklinasi 55° dan ketinggian 20.200 km dan periode orbit 11 jam 58 menit.
- b. Segmen sistem control (*control system segment*)
Memiliki tanggung jawab untuk memantau satelit GPS supaya satelit GPS dapat tetap berfungsi dengan tepat. Misalnya untuk sinkronisasi waktu, prediksi orbit dan monitoring “kesehatan” satelit.
- c. Segmen pemakai (*user segment*)
Segmen pemakai merupakan pengguna, baik di darat, laut maupun udara, yang menggunakan receiver GPS untuk mendapatkan sinyal GPS sehingga dapat menghitung posisi, kecepatan, waktu dan parameter lainnya.

2.6.1 Sinyal dan Penentuan Jarak GPS

Sinyal GPS terbagi menjadi tiga komponen, antara lain adalah komponen kode sebagai pemberi informasi jarak. Komponen ini terdiri atas dua *pseudo-random noise* (PRN) yaitu kode P (*Precise*) dan kode C/A (*Coarse Acquisition*). Kemudian komponen yang kedua adalah *Navigation Message* sebagai pemberi informasi posisi satelit (X, Y, Z) termasuk di dalamnya terdapat parameter orbitnya. Komponen ini juga

dikenal dengan *Broadcast Ephemeris*. Kemudian komponen yang terakhir adalah gelombang *carrier* (pembawa) sebagai gelombang pembawa komponen kode dan *navigation message* dari satelit kepada pengguna. Terdapat dua jenis gelombang *carrier* yaitu, gelombang pembawa *L1* (kode P, kode C/A dan *navigation message*) yang memiliki frekuensi 1575,42 MHz dan *L2* (kode P dan *navigation message*) dengan frekuensi 1227,60 MHz. Untuk menentukan jarak semu (*pseudorange*) dan jarak fase (*phase range*) dengan GPS serta parameter-parameter lainnya melalui hubungan yang dapat diformulasikan secara umum berikut ini (Abidin, 2006):

$$P_i = \rho + d\rho + dtrop + dion + (dt - dT) + MP_i + \vartheta P_i \quad (2.1)$$

$$L_i = \rho + d\rho + dtrop - dion + (dt - dT) + MC_i - \lambda_i \cdot N_i + \vartheta L_i \quad (2.2)$$

Dengan P_i (m) adalah *pseudorange* pada frekuensi f_i ($i = 1, 2$), L_i (m) jarak fase pada frekuensi f_i ($i = 1, 2$), P (m) jarak geometris antara pengamat (x, y, z) dengan satelit, C (m/s) adalah kecepatan cahaya dalam vakum, λ (m) panjang gelombang dari sinyal, $d\rho$ kesalahan jarak yang disebabkan oleh kesalahan ephemeris orbit, $dtrop$ (m) bias yang disebabkan oleh refraksi troposfer, $dion_i$ (m) bias yang disebabkan oleh refraksi ionosfer pada frekuensi f_i dt (m) dan dT (m) adalah kesalahan dan *offset* dari jam *receiver* dan jam satelit, MP_i (m) dan MC_i (m) adalah efek *multipath* pada hasil pengamatan P_i dan L_i .

2.6.2 Penentuan Posisi dengan GPS

Pada dasarnya konsep penentuan posisi dengan *GPS* adalah reseksi (pengikatan ke belakang) dengan jarak, yaitu dengan pengukuran jarak secara simultan ke beberapa satelit *GPS* yang koordinatnya telah diketahui. Posisi yang diberikan oleh *GPS* adalah posisi 3 dimensi (x, y, z atau l, b, h) yang dinyatakan dalam datum WGS (*World Geodetic System*)

1984, sedangkan tinggi yang diperoleh adalah tinggi ellipsoid. Sehingga untuk sistem tingginya berbeda dengan tinggi *orthometrik* yang merupakan tinggi di atas geoid yang diukur sepanjang garis gaya berat melalui titik tersebut. Adapun pengelompokan metode penentuan posisi dengan *GPS* berdasarkan mekanisme pengaplikasiannya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

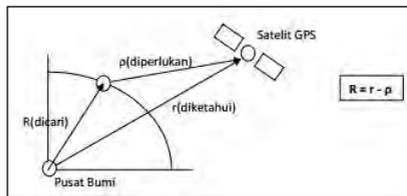
a. Metode Absolut

Penentuan posisi secara absolut (*absolute positioning*) adalah metode penentuan posisi yang paling mendasar dari *GPS*. Melalui satelit *GPS* dilakukan pengukuran vektor jarak (ρ) ke titik yang akan ditentukan posisinya. Dengan catatan posisi satelit (r) telah diketahui relatif terhadap pusat bumi, maka posisi P (pengamat) akan diperoleh pula relatif terhadap pusat bumi. Prinsip dasar penentuan posisi dengan *GPS* melalui pendekatan vektor tampak pada Gambar 2.11.

Tabel 2. 1 Metode Penentuan Posisi dengan *GPS*
(Abidin, 2006).

Metode	Absolute (1 receiver)	Differensial (minimal 2 receiver)	Titik	Receiver
Static	v	v	Diam	Diam
Kinematik	v	v	Bergerak	Bergerak
Rapid Static		v	Diam	Diam (singkat)
Pseudo Kinematik		v	Diam	Diam & bergerak
Stop and Go		v	Diam	Diam & bergerak

Pada metode ini penentuan posisi suatu titik tidak bergantung terhadap titik lainnya (hanya menggunakan satu *receiver*), oleh karena itu kesalahan jam *receiver* masih besar pengaruhnya. Ada 4 (empat) parameter yang akan ditentukan nilainya dalam metode absolut, yaitu 3 (tiga) parameter koordinat (X,Y,Z atau l,b,h) dan parameter kesalahan jam satelit. Keempat parameter tersebut didapat melalui penurunan persamaan model matematika pengukuran jarak satelit. Jadi dibutuhkan minimal 4 (empat) satelit GPS untuk bisa mendapatkan posisi secara absolut.

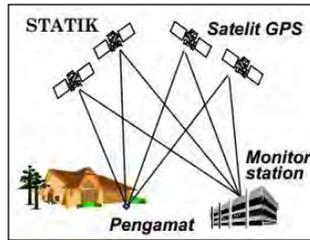


Gambar 2. 11 Prinsip dasar penentuan posisi GPS (Abidin, 2006).

b. Metode Diferensial

Pada pengamatan GPS dengan metode diferensial (metode relatif) dibutuhkan minimal dua *receiver* GPS. Prinsipnya adalah dengan mengurangi data yang diamati oleh dua *receiver* GPS pada waktu yang bersamaan, maka beberapa jenis kesalahan dan bias dari data dapat dieliminasi atau direduksi. Pengeliminasian dan pereduksian ini akan meningkatkan akurasi dan presisi data, dan selanjutnya akan meningkatkan tingkat akurasi dan presisi posisi yang diperoleh.

Adapun biasanya titik yang akan ditentukan posisinya dinamakan *rover*, sedangkan titik yang posisinya telah diketahui dinamakan *base/master*.



Gambar 2. 12 Ilustrasi pengamatan GPS diferensial (Abidin, 2006).

Ada tiga metode pengeliminasian (*differencing*), yaitu *Single Difference*, *Double Difference*, dan *Triple Difference*. Metode *Single Difference* (SD), disimbolkan dengan (Δ), dilakukan dengan menggunakan dua *receiver* A dan B serta satu satelit dimana kesalahan ephemeris (orbit) atau dua satelit dan satu *receiver* dan kesalahan jam satelit dapat dieliminasi dengan mengurangi dua data *one-way* (OW) masing-masing receiver atau satelit. Kemudian *Double Difference* (DD), disimbolkan dengan ($\Delta\nabla$), dilakukan dengan dua *receiver*, dua satelit sehingga kesalahan jam *receiver* dapat dieliminasi. Sedangkan *Triple Difference* (TD) dilakukan dengan dua *receiver*, dua satelit dan dua *epoch* pengamatan sehingga ambiguitas fase dapat dieliminasi.

$$SD = OW - OW \quad (2.3)$$

$$DD = SD - SD \quad (2.4)$$

$$TD = DD - DD \quad (2.5)$$

2.6.3 Kesalahan dan Bias pada GPS

Dalam pengambilan data GPS, sinyal satelit akan mengalami beberapa kesalahan dan bias. Adapun kesalahan dan bias pada dasarnya dikelompokkan berdasarkan komponennya, yakni pada:

- a. Satelit, seperti kesalahan *ephemeris*, jam satelit dan *selective availability* (SA).
- b. Medium propagasi sinyal, seperti bias ionosfer dan bias troposfer.
- c. *Receiver* GPS, seperti kesalahan jam *receiver*, kesalahan pada antenna *receiver* dan *noise*.
- d. Data pengamatan, *ambiguitas phase* dan *cycle slips*.
- e. Lingkungan sekitar *receiver* GPS, seperti *multipath* dan *imaging*.

Kesalahan dan bias GPS tersebut harus diperhitungkan secara benar, karena besar dari kesalahan dan bias tersebut akan mempengaruhi ketelitian informasi (posisi, kecepatan, percepatan, dan waktu) yang diperoleh serta proses penentuan ambiguitas fase dari sinyal GPS. Secara umum kesalahan dan bias di atas akan dijelaskan berikut ini:

- a. Kesalahan *ephemeris* (orbit)

Kesalahan ini terjadi dimana orbit satelit yang dilaporkan oleh *ephemeris* satelit tidak sama dengan orbit satelit dengan posisi satelit yang sebenarnya. Kesalahan *ephemeris* akan mempengaruhi ketelitian dan koordinat titik pengamatan baik pengamatan *absolut* maupun relatif. Kesalahan ini terjadi akibat dari beberapa faktor, yakni kurang telitnya proses perhitungan orbit satelit oleh stasiun pengontrol satelit dan kesalahan dalam prediksi orbit untuk periode waktu setelah *uploading* ke satelit. Untuk

mengatasi efek kesalahan ini dapat dilakukan antara lain:

- i. Menerapkan metode *differensial positioning*
- ii. Memperpendek panjang *baseline*
- iii. Memperpanjang waktu pengamatan
- iv. Tentukan parameter kesalahan orbit dalam proses estimasi
- v. Mengutamakan informasi orbit yang lebih teliti seperti *precise ephemeris*.

b. Bias Ionosfer

Ionosfer merupakan bagian dari lapisan atas atmosfer dimana terdapat sejumlah elektron dan ion bebas yang mempengaruhi perambatan gelombang radio. Lapisan ionosfer mempengaruhi kecepatan sinyal baik itu fase maupun kode. Pada sinyal fase ionosfer akan meningkatkan kecepatan sinyal fase sehingga waktu tempuh sinyal menjadi lebih pendek dan sebaliknya pada kode, ionosfer akan menurunkan kecepatan sinyal sehingga waktu yang ditempuh sinyal menjadi lebih panjang. Untuk mengurangi efek bias ini ada beberapa cara yang dapat dilakukan (Abidin, 2006):

- i. Menggunakan data GPS dari dua frekuensi (L1 dan L2)
- ii. Lakukan pengurangan (*differencing*) data pengamatan.
- iii. Memperpendek panjang *baseline*.
- iv. Menggunakan model ionosfer (model *Bent* atau *Klobuchar*)
- v. Menggunakan parameter koreksi yang dikirimkan oleh sistem

WADGPS (*Wide Area Differential GPS*).

c. Bias Troposfer

Ketika melalui lapisan troposfer, sinyal GPS akan mengalami refraksi, yang menyebabkan perubahan kecepatan dan arah sinyal GPS atau dengan kata lain berpengaruh pada hasil ukuran jarak. Untuk mengurangi efek bias ini ada beberapa cara yang dapat dilakukan (Abidin, 2006):

- i. *Differencing* hasil pengamatan
- ii. Memperpendek *baseline*
- iii. Kedua stasiun pengamat berada pada ketinggian dan kondisi meteorologi relatif sama.
- iv. Penggunaan model koreksi standar troposfer seperti model *Hopfield* dan *Saastamoinen*.
- v. Model koreksi lokal troposfer.
- vi. Penggunaan *Water Vapour Radiometer* untuk estimasi besar komponen basah,
- vii. Estimasi besar bias troposfer.
- vi. Menggunakan parameter koreksi yang dikirimkan oleh sistem WADGPS (*Wide Area Differential GPS*).

d. *Cycle slip*

Cycle slip adalah kesalahan yang menunjukkan ketidak-kontinuan dari fase gelombang pembawa yang diamati dalam jumlah gelombang penuh, karena sinyal ke receiver terputus pada saat pengamatan sinyal.

Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya *Cycle slip* pada saat pengamatan, antara lain:

- i. Mematikan dan menghidupkan *receiver* dengan sengaja.
 - ii. Terhalangnya sinyal GPS akibat terhalang pohon atau bangunan.
 - iii. Pengaruh aktivitas ionosfer dan *multipath*.
 - iv. Adanya kerusakan di dalam receiver sehingga tidak dapat menerima gelombang secara penuh.
- e. *Multipath*

Multipath merupakan fenomena dimana sinyal dari satelit tiba di antenna GPS melalui dua atau lebih lintasan yang berbeda. Dalam hal ini satu sinyal merupakan sinyal langsung dari satelit ke antena, sedangkan yang lainnya merupakan sinyal tidak langsung yang dipantulkan oleh benda disekitar antena *receiver* GPS. Kesalahan ini mempengaruhi hasil ukuran *pseudorange* dan *phase*. Adapun pendekatan yang dapat dilakukan untuk mereduksi kesalahan *multipath*, yaitu :

- i. Menghindari lingkungan pengamatan yang reflektif
- ii. Menggunakan antena GPS yang baik dan tepat
- iii. Menggunakan bidang dasar antena pengabsorpsi sinyal yang berguna untuk menahan sinyal pantulan yang datang dari bawah horizon antena

- iv. Tidak mengamati satelit pada wilayah yang berelevasi rendah
- v. Melakukan pengamatan yang relatif panjang dan kemudian reratakan data pengamatan.

2.6.4 Ketelitian Pengolahan GPS

Ketelitian posisi yang diperoleh dari hasil pengamatan GPS secara umum akan tergantung pada empat faktor (Abidin, 2006), yaitu:

- a. Ketelitian data, tergantung pada tipe data yang digunakan, kualitas *receiver* GPS dan level dari kesalahan dan bias.
- b. Geometri satelit, tergantung pada jumlah satelit, lokasi dan distribusi satelit dan lama pengamatan.
- c. Metode penentuan posisinya, apakah menggunakan *absolute* atau *differential positioning*, *static*, *rapid static*, *pseudo-kinematic*, *stop and go* atau *kinematic* dan *one & multi monitor stations*.
- d. Strategi pemrosesan datanya, apakah menggunakan *real-time* atau *post processing*, strategi dalam eliminasi dan pengkoreksian kesalahan dan biasanya, metode estimasi yang digunakan, pemrosesan *baseline* atau perataan jaringnya dan kontrol kualitasnya.

2.6.5 Pengolahan Data GPS dengan *Software* GAMIT

GAMIT adalah *software* pengolah data GNSS ilmiah yang bekerja pada sistem operasi Unix. *Software* ini menghasilkan posisi relatif tiga dimensi dengan ketelitian tinggi karena menggunakan data *broadcast ephemeris* dan *precise ephemeris*. Adapun data yang perlu dimasukkan

dalam proses pengolahan GAMIT adalah sebagai berikut (Herring dan King, 2010):

- a. *Raw data* pengamatan GPS
- b. *File* navigasi global yang diunduh melalui situs IGS
- c. *File GPS Ephemeris* yang diunduh dari IGS dalam format SP3
- d. *File *.apr* yang di dalamnya adalah berisi kumpulan koordinat apriori stasiun pengamatan yang akan digunakan. Koordinat ini bisa diperoleh dari data RINEX GPS.
- e. *File lfile* yang di dalamnya adalah berisi kumpulan koordinat pendekatan masing-masing stasiun GPS yang digunakan.
- f. *File station.info* yang di dalamnya berisi informasi tentang jenis *receiver*, antena, *firmware* yang digunakan oleh *receiver* dan waktu/sesi kerja GPS. Tipe data ini adalah ASCII.
- g. *File sittbl.* yang di dalamnya berisi nilai *constraint* pada setiap koordinat apriori stasiun yang akan diolah. Tipe data ini adalah berformat ASCII.
- h. *File sestbl.* yang di dalamnya berisi skenario pengolahan. Untuk melakukan analisa deformasi maka salah satu parameter yang perlu diubah adalah *choice of experiment*-nya diubah menjadi tipe pengolahan *baseline* jenis RELAX.
- i. *File sites.defaults* yang berisi daftar stasiun yang digunakan dalam proses pengolahan data menggunakan perangkat lunak GAMIT.
- j. *File process.defaults* yang di dalamnya terdapat pengaturan direktori file dan data yang akan digunakan dalam pengolahan aplikasi GAMIT/GLOBK.

Pada proses pengolahan GPS menggunakan aplikasi GAMIT tujuan akhirnya adalah untuk mendapatkan solusi pengolahan koordinat per-hari di seluruh stasiun pengamatan berdasarkan epok pertama pengamatan dalam bentuk *loosely constrained solution* (h-file) yang berisikan matriks kovarian dan parameter perataannya sebagai data input pengolahan GLOBK, (q-file) yang berisikan informasi koordinat *apriori*, *spheris*, *adjust*, *formal* dan *posfit* koordinat *spheris* untuk setiap stasiun pengamatan dalam satuan meter, dan *sh_gamit_ddd.summary* yang berisi nilai *posfit Normalised Root Mean Square (nrms)*.

Adapun untuk mengevaluasi hasil pengolahan GAMIT dapat dilakukan dengan memperhatikan parameter-parameter evaluasi GAMIT, yakni nilai *posfit nrms*, *Wide Lane (WL)* dan *Narrow Lane (NL)*.

Posfit nrms perbandingan nilai varians *aposteriori* dan varians *apriori* untuk unit bobot. Sesuai dengan pedoman manual pengolahan GPS dengan GAMIT, bahwa *nrms* solusi harian harus kurang dari 0,25. Apabila nilai *posfit nrms* lebih besar dari 0,5 maka mengindikasikan data GPS masih terdapat efek *cycle slip*. Nilai *posfit nrms* dirumuskan seperti pada persamaan berikut (Taftazani dalam Sudrajat, 2014):

$$posfit\ nrms = \sqrt{\frac{x^2}{(n-u)}} \quad (2.6)$$

$$\text{Dengan nilai } x^2 = \frac{\sigma'^2}{\sigma^2} \quad (2.7)$$

Dimana σ^2 adalah varian apriori untuk bobot, kemudian σ'^2 adalah varian aposteriori untuk bobot, n adalah jumlah ukuran dan u adalah ukuran minimum.

Adapun nilai *wide lane* dan *narrow lane* menunjukkan resolusi ambiguitas fase yang didapat dengan

mengkombinasikan sinyal GPS L1 dikurangkan dengan GPS L2 untuk *wide lane*. Sedangkan resolusi ambiguitas fase dengan mengkombinasikan sinyal GPS L1 ditambahkan dengan GPS L2 untuk *narrow lane*. Nilai *wavelength wide lane* (λ_δ) dan *wavelength narrow lane* (λ_n) dirumuskan pada persamaan (2.8) dan (2.9) secara berturut-turut (Zhang, 2007):

$$\lambda_\delta = \frac{c}{f_1 - f_2} \quad (2.8)$$

$$\lambda_n = \frac{c}{f_1 + f_2} \quad (2.9)$$

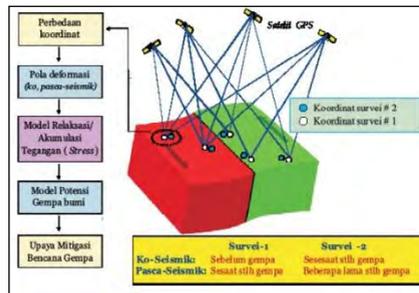
Dimana c adalah kecepatan cahaya dalam vakum (m/s), sedangkan f_1 dan f_2 adalah frekuensi sinyal L1 dan L2. Pada GAMIT akan dihasilkan nilai ambiguitas fase setiap pengamatan hariannya baik pada jenis WL maupun NL dalam bentuk presentase.

Nilai *Wide Lane* (WL) dan *Narrow Lane* (NL) resolusi ambiguitas fase hasil pengolahan harian GAMIT harus berada di atas 90% dan 80 % untuk masing-masing nilai. Jika nilai WL tersebut masih di bawah ketentuan maka menunjukkan pengolahan tersebut masih terdapat *noise* pada *pseudorange*. Demikian juga jika nilai NL masih di bawah ketentuan menunjukkan pengolahan data masih terdapat kesalahan pada ukuran, konfigurasi jaringan, kualitas orbit, koordinat *apriori*, atau kondisi atmosfer (Herring dan King 2010).

2.7 Pemantauan Kerak Bumi dengan GPS

Prinsip penentuan deformasi koseismik dan pascaseismik dengan metode survei GPS pada prinsipnya menggunakan beberapa titik yang ditempatkan pada beberapa lokasi yang dipilih, secara periodik ditentukan koordinatnya secara teliti dengan menggunakan metode survei GPS. Untuk mempelajari deformasi koseismik maka survei pertama harus

dilaksanakan sebelum gempa, dan survei berikutnya sebaiknya dilaksanakan beberapa saat setelah gempa terjadi. Sementara untuk deformasi pascaseismik, survei pertama sebaiknya dilaksanakan beberapa saat setelah gempa terjadi, dan survei berikutnya dilaksanakan beberapa lama setelah gempa. Dengan mempelajari pola dan kecepatan perubahan koordinat titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, maka karakteristik deformasi koseismik dan pascaseismik gempa akan dapat diestimasi dan dipelajari lebih lanjut guna pembuatan model potensi bencana gempa bumi berikutnya (Abidin, 2009).



Gambar 2. 13 Prinsip estimasi deformasi *coseismic* dan *postseismic* dengan GPS (Abidin, 2009).

Adapun beberapa kelebihan pengamatan pergerakan kerak bumi (deformasi) menggunakan metode pengamatan GPS antara lain:

- a. Pada pengamatan GPS dapat menghasilkan nilai vektor pergerakan kerak bumi dalam tiga dimensi (dua komponen horisontal dan satu komponen vertikal).
- b. Pada pengamatan GPS pula menghasilkan nilai dari vektor pergerakannya dalam suatu sistem koordinat referensi yang tunggal. Maka dari itu, pengamatan GPS dapat digunakan untuk

- memantau deformasi suatu wilayah secara regional dengan efektif dan efisien.
- c. Tingkat presisi nilai vektor pergerakan deformasi dengan pengamatan GPS tergolong tinggi karena hingga skala milimeter (mm) baik secara spasial maupun temporal.
 - d. GPS dapat digunakan secara kontinu tanpa bergantung waktu (kondisi siang atau malam) maupun cuaca. Maka pengamatan deformasi dapat dilakukan secara efektif dan fleksibel.

2.8 Mencari Besar Vektor Pergeseran

Vektor pergeseran adalah besaran yang menyatakan perubahan suatu titik pengamatan dalam selang waktu tertentu, sehingga bisa menjadi indikator terjadinya deformasi di daerah pengamatan (Rusmen, 2012). Adapun salah satu metode penghitungan besar pergeseran vektor adalah dengan linear fit.

$$y = ax + b \quad (2.10)$$

Dimana x adalah waktu pengamatan (tahun +DOY/365), kemudian y adalah data pada waktu pengamatan, sedangkan a dan b ialah nilai yang ditentukan berdasarkan kumpulan data pengamatan dengan metode kuadrat terkecil, dengan solusi persamaannya adalah sebagai berikut:

$$X = (A^t P A)^{-1} \cdot (A^t P F) \quad (2.11)$$

Dimana, A dan F adalah matriks desain dan matriks identitas, X adalah parameter yang dicari (a dan b), dimana a ialah menunjukkan besarnya pergeseran, sedangkan P adalah matriks bobot.

Koordinat stasiun pengamatan yang diolah dan diamati adalah sistem koordinat lokal toposentrik *North, East, Up* (*n, e, u*) yang pusat sumbunya ada di permukaan bumi sehingga pergeseran di permukaan bumi dapat terlihat. Adapun karena sistem koordinat hasil pengolahan data GPS adalah sistem koordinat geosentrik (*X, Y, Z*), maka perlu dilakukan transformasi dengan rumus transformasi (Kosasih dalam Yusufania, 2005):

$$\begin{bmatrix} np \\ ep \\ up \end{bmatrix} = R(\varphi_0, \lambda_0) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} XP - XO \\ YP - YO \\ ZP - ZO \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$R(\varphi_0, \lambda_0) = \begin{pmatrix} -\sin\varphi_0\cos\lambda_0 & -\sin\varphi_0\sin\lambda_0 & \cos\varphi_0 \\ -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ \cos\varphi_0\cos\lambda_0 & \cos\varphi_0\sin\lambda_0 & \sin\varphi_0 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

dimana (*np, ep, up*) adalah koordinat toposentrik titik P, kemudian (φ_0, λ_0) adalah koordinat geodetik bujur dan lintang titik ikat, (*XO, YO, ZO*) adalah koordinat geosentrik titik ikat (0,0,0), lalu (*XP, YP, ZP*) adalah koordinat geosentrik titik yang akan dicari, ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) adalah selisih koordinat geosentrik titik ikat dan titik yang dicari, dan *R* adalah matriks rotasi.

Untuk menentukan besar vektor pergeseran stasiun GPS dapat menggunakan rumus (Sudrajat, 2014):

$$X_t = (t - t_0)V + X_{t_0} \quad (2.15)$$

dimana X_t adalah koordinat stasiun pengamatan di epok *t*, kemudian X_{t_0} adalah koordinat stasiun pengamatan di epok t_0 , t_0 adalah waktu pengamatan koordinat stasiun pertama, *t*

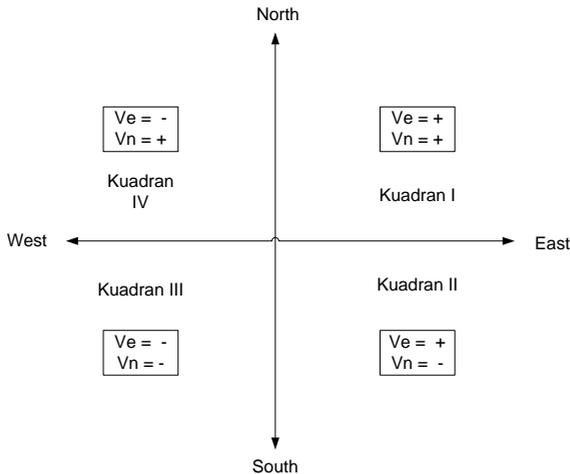
adalah waktu pengamatan koordinat stasiun terakhir, dan V adalah besar pergeserannya. Sehingga pada bidang datar akan didapatkan resultan pergeserannya V_R melalui parameter V_n dan V_e , yakni besar resultan pergeseran di sumbu *northing* dan *easting* :

$$V_R = \sqrt{(V_n)^2 + (V_e)^2} \quad (2.16)$$

Sedangkan untuk menemukan arah vektor pergeserannya (α) dapat diketahui dengan menghitung parameter V_n dan V_e dengan rumus:

$$\alpha = \tan \frac{V_e}{V_n} \quad (2.17)$$

Gambar 2.14 mengilustrasikan arah vektor pergeseran berdasarkan nilai positif (+) atau negatif (-) parameter V_n dan V_e dalam arah mata angin *north*, *east*, *south* dan *west*.



Gambar 2. 14 Kuadran Arah Vektor Pergeseran.

2.9 Uji Statistik

Langkah ini diambil untuk melihat apakah sampel diambil dari populasi yang sesuai dengan nilai toleransi yang didapat. Fungsi dari uji statistik ini adalah mendeteksi dan menghilangkan data pengamatan GPS yang *outlier* berdasarkan data *time series* koordinat toposentrik dengan melakukan uji statistik. Sebelumnya *outlier* adalah data yang menyimpang terlalu jauh dengan data lainnya pada suatu rangkaian data, sehingga menyebabkan bias pada analisa data karena data *outlier* tidak menggambarkan kondisi sebenarnya. *Level of Confidence* yang digunakan uji statistik kualitatif terhadap terhadap data GPS adalah 95%. Artinya bahwa data GPS akan dianggap *outlier* apabila data tersebut melebihi 2 kali *root-mean-square* (RMS), dengan rumus RMS sebagai berikut (Nikolaidis dalam Yusfania, 2014):

$$\sigma = \pm \left(\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

dimana $\sum \varepsilon_i^2$ adalah penjumlahan dari kuadrat *error* dan n adalah jumlah pengukuran/pengamatan

2.10 Penelitian Terdahulu

Dalam melaksanakan penelitian tugas akhir ini, penulis melakukan studi literatur berdasarkan tiga penelitian sebelumnya. Penelitian pertama adalah analisa deformasi pada gempa Mentawai tahun 2010 menggunakan pengamatan GPS kontinu sejak tahun 2010-2011. Lokasi penelitian adalah di koordinat 99,93 BT; 3,61 LS. Penelitian ini dilakukan oleh (Rusmen, 2012). Dalam jurnalnya dijelaskan tujuan dari penelitiannya adalah untuk mendapatkan arah beserta besar vektor pergerakan deformasi akibat gempa Mentawai tahun 2008. Pengamatan deformasi yang dikerjakan dibagi menjadi ke dalam tiga tahapan sesuai dengan aktivitas tektoniknya. Tahapan tersebut antara lain *interseismic*, *coseismic* dan

terakhir *postseismic*. Adapun untuk data GPS yang digunakan dalam penelitian ini adalah data *Sumatran GPS Array* (SuGAR) milik Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) seluruh stasiun yang aktif pada waktu pengamatan. Dengan menggunakan perangkat lunak pengolah data GPS ilmiah GAMIT dan GLOBK. Adapun metode yang digunakan dalam pengamatan pergerakan vektor pergeseran adalah menggunakan metode kuadrat terkecil yang kemudian dalam pembentukan *time series* digunakan permodelan *linear fit* terhadap ketiga fase siklus gempa tektonik. Sehingga dari pengamatan yang dilakukan, di dapatkan kesimpulan bahwa Gempa Mentawai memberikan pengaruh pergeseran horizontal dan vertikal. Pergeseran yang cukup besar teramati 10-30 cm untuk horizontal dan 1-6 cm untuk vertikal yang berada di sekitar pusat gempa (Rusmen, 2012). Kesimpulan berikutnya adalah menunjukkan gempa Mentawai masih memiliki pengaruh *postseismic* berdasarkan dari data vektor pergeseran setelah terjadi Gempa Mentawai terdapat beberapa stasiun pengamatan yang berlawanan arah dengan vektor *interseismic*.

Penelitian yang serupa juga pernah dilakukan oleh (Yusfania, 2014) di Bengkulu. Perbedaan antara peneliti pertama dan kedua adalah perangkat lunak, objek pengamatan dan metode analisisnya. Pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak ilmiah *BERNESSE*, kemudian objek yang diamati adalah gempa Bengkulu tahun 2007. Adapun metode analisis deformasi yang digunakan dengan menggunakan *spatial filtering* dengan pembagian dua algoritma. Untuk pengamatan *interseismic* menggunakan *linear fit*, sedangkan untuk fase *postseismic* menggunakan Algoritma Logaritmik Marone. Hasil dari pengamatan didapatkan rata-rata perpindahan titik stasiun GPS adalah $0,029\text{m} \pm 4\text{mm}$ untuk horisontal dan $0,008\text{m} \pm 8\text{mm}$ untuk vertikal. Kemudian rata-

rata *coseismic* horisontal dan vertikal adalah $0,640\text{m} \pm 4\text{mm}$ dan $0,037\text{m} \pm 11\text{mm}$. Sedangkan, *postseismic* untuk horisontal dan vertikal adalah $0,084\text{m} \pm 5\text{mm}$ dan $0,013\text{m} \pm 10\text{mm}$ ke arah barat daya.

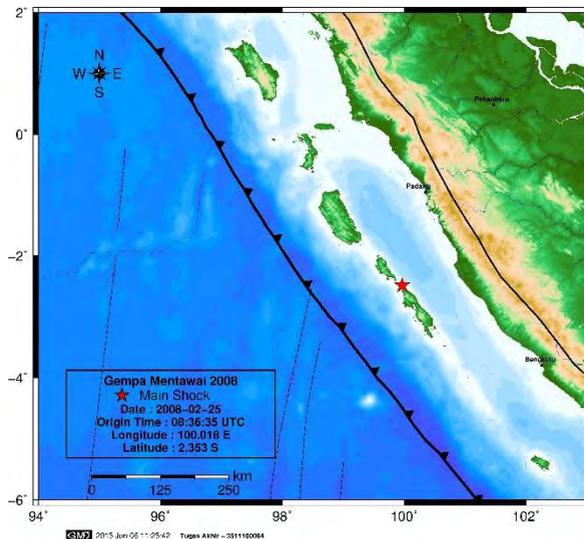
Sumber acuan terkahir dalam pelaksanaan penelitian ini adalah penelitian milik (Purnomo, 2014) yang melakukan analisa deformasi pada gunung api aktif, Gunung Merapi, Jawa Tengah. Penelitian ini dilakukan dengan stasiun GPS kontinu lokal milik instansi peneliti gunung api di Gunung Merapi, Jawa Tengah. Adapun metode dan perangkat lunak yang digunakan sama dengan peneliti pertama, yakni menggunakan GAMIT/GLOBK yang analisa vektor kecepatan pergeserannya menggunakan *linear fit*. Dari hasil analisa yang dilakukan, mulai bulan September 2013 sampai 31 Maret 2014, didapatkan nilai pergeseran horisontal untuk stasiun DELS sebesar 0,0108 dan vertikal sebesar -0,0236, pergeseran horisontal untuk stasiun GRWH sebesar 0,0463 dan vertikal sebesar 0,0409, dan pergeseran horisontal untuk stasiun KLAT sebesar 0,0131 dan vertikal sebesar -0,0147, satuan dalam meter (m).

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah gempa bumi yang terjadi di Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat pada tanggal 25 Februari 2008 dengan besar gempa 7 skala richter (SR) dan kedalaman 35 km. Posisi *epicenter* secara geografis terletak pada koordinat 100,018° BT; 2,353° LS yang berada di jalur lempeng tektonik.



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian.

3.2 Data dan Peralatan

3.1.1 Data

a. Data *RINEX*

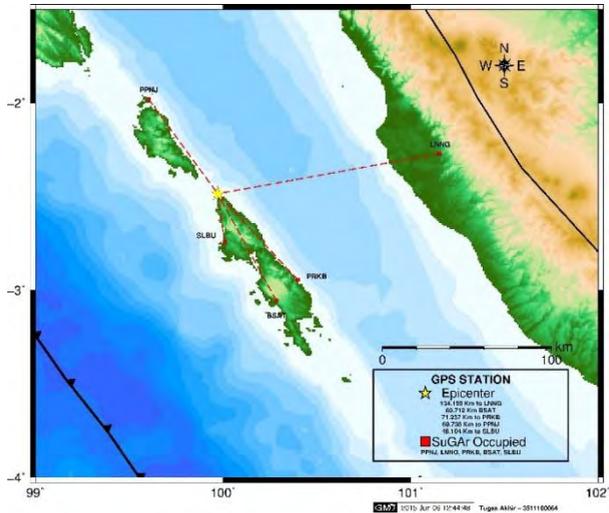
Data yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah data pengamatan GPS berupa data *RINEX* pada bulan Januari tahun 2008 sampai Mei tahun 2008,

yakni *day of year* ke-002 hingga 150. Data tersimpan dalam format *RINEX* dengan sampling pengukuran tiap satu detik. Data GPS bersumber dari hasil pemantauan *online*. Data pengamatan diunduh di salah satu penyedia data *Sumateran GPS Array* (SuGAR) yaitu “*Scripps Orbit and Permanent Array*” (SOPAC). Dalam penelitian ini akan menggunakan enam buah stasiun *receiver* GPS SuGAR di kawasan sekitar wilayah gempa Pulau Mentawai tahun 2008. Data pengamatan yang digunakan adalah data pengamatan GPS PPNJ, GPS PRKB, GPS BSAT, GPS LNNG dan GPS SLBU seperti yang dijelaskan pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.2.

Tabel 3. 1 Lokasi *receiver* Pengamatan GPS SuGAR (SOPAC, 2014)

No	Stasiun	Lokasi	Jarak Dari Pusat Gempa (Km)
1	PPNJ	Pulau Panjang, Tuapejat	69.738
2	PRKB	Parak Batu, Pulau Pagai Selatan	71.237
3	BSAT	Bulasat, Pulau Pagai Selatan	69.712
4	LNNG	Lunang, Indonesia	134.199
5	SLBU	Silabu, Sumatera Barat	46.104

- b. Tiga *file data* tambahan yaitu : *file* gelombang pasang surut, *file* atmosfer, *file* pemodelan cuaca.

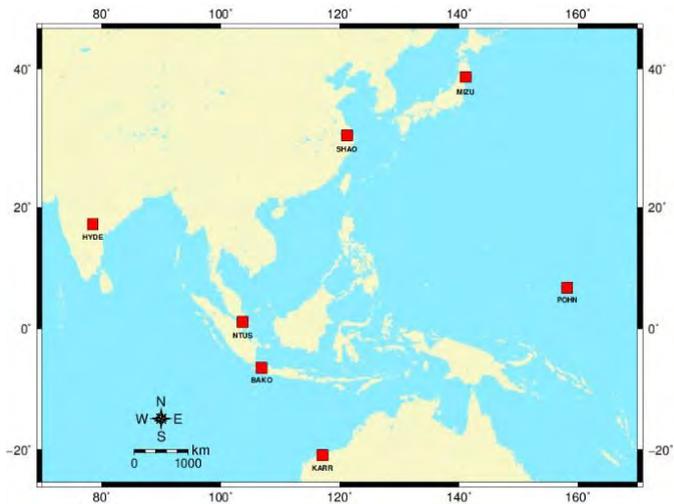


Gambar 3. 2 Lokasi Pengamatan Stasiun GPS Kontinu SuGAR yang Digunakan.

- c. 7 Titik ikat GPS *International GNSS Service* (IGS) untuk kontrol file (BAKO, NTUS, SHAO, POHN, MIZU, HYDE dan KARR). Lokasi titik ikat IGS dijelaskan pada Tabel 3.2 dan digambarkan pada Gambar 3.3.
- d. Data orbit satelit; IGS SP3 *ephemeris file* (igsWWWD.sp3)
- e. Nilai jam satelit; file navigasi RINEX (brdcDDD0.YYn).
- f. Data sekunder yang dibutuhkan saat pengolahan yang akan diunduh otomatis oleh perangkat lunak *GAMIT/GLOBK*.

Tabel 3. 2 Lokasi Stasiun Titik Ikat GPS IGS
(SOPAC, 2014)

No	Stasiun	Lokasi
1	BAKO	Indonesia
2	NTUS	Singapore
3	POHN	Micronesia
4	MIZU	Jepang
5	KARR	Australia
6	SHAO	China
7	HYDE	India



Gambar 3. 3 Lokasi Pengamatan Stasiun Titik Ikat GPS IGS

3.1.2 Peralatan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu:

1. *Hardware*
 - a. Stasiun GPS *online*
2. *Software*
 - a. Sistem operasi LINUX Ubuntu 12.04 dan Windows 7.
 - b. Microsoft Word dan Excel.
 - c. *Software* GAMIT dan GLOBK.

GPS Analysis Package Developed at MIT (GAMIT) adalah sebuah paket perangkat lunak ilmiah untuk pengolahan data pengamatan GPS yang dikembangkan oleh *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) dan *Scripps Institution of Oceanography* (SIO). Perangkat lunak ini dapat menghasilkan posisi relatif tiga dimensi dari pengamat dengan tingkat ketelitian tinggi karena data yang digunakan selain data broadcast ephemeris, juga digunakan data precise ephemeris. GLOBK adalah satu paket program yang dapat mengkombinasikan hasil pemrosesan data survei terestris ataupun data survei ekstra terestris. Data input pada GLOBK adalah matriks kovarian dari koordinat stasiun, parameter rotasi bumi, parameter orbit, dan koordinat hasil pengamatan lapangan. Ada tiga fungsi yang dilakukan dalam oleh GLOBK (Herring dan King, 2010), yaitu:

- i. Mengkombinasikan hasil pengolahan individual (misal: harian) untuk menghasilkan koordinat stasiun rata-rata dari pengamatan yang dilakukan lebih dari satu hari.
 - ii. Melakukan estimasi koordinat stasiun dari pengamatan individual, yang digunakan untuk menggeneralisasikan data runtut waktu (*time series*) dari pengamatan teliti harian atau tahunan.
 - iii. Mengkombinasikan sesi pengamatan individu dengan koordinat stasiun dianggap stokastik. Hasilnya adalah koordinat *repeatabilities* untuk mengevaluasi tingkat presisi pengukuran harian atau tahunan.
- d. *Software* GMT
- Generic Mapping Tools* (GMT), digunakan untuk plotting data grafik koordinat lokal *time series* dari hasil pengolahan yang secara otomatis terintegrasi dengan perangkat lunak GAMIT/GLOBK perangkat lunak ini diunduh dari <ftp://ftp.soest.hawaii.edu/gmt>.

3.2 Tahapan Penelitian

Adapun untuk melaksanakan penelitian ini secara garis besar tahapannya tertuang dalam diagram alir Gambar 3.4. Berikut adalah penjelasan dari diagram alir tersebut:

a. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana menganalisa perubahan deformasi dan besar vektor pergeseran dari titik-titik pemantauan deformasi di wilayah Kepulauan Mentawai akibat gempa bumi Mentawai tahun 2008.

b. Studi Literatur

Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan referensi yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur yang akan dilakukan meliputi:

- i. Pengkajian metode untuk pemantauan deformasi kerak bumi.
- ii. Pengkajian mengenai isu permasalahan dan kondisi lapangan mengenai lokasi penelitian.
- iii. Studi literatur mengenai analisa deformasi dan besar vektor pergeseran titik-titik pemantauan deformasi menggunakan data GPS kontinu.

c. Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan semua data yang diperlukan untuk penelitian. Data diperoleh dari hasil pemantauan menggunakan GPS di stasiun-stasiun pemantauan secara kontinu oleh SOPAC pada bulan Januari 2008 hingga Mei 2008. Termasuk data-data pendukung lainnya seperti terlampir pada bab sebelumnya.

d. Pengolahan Data

Dalam tahapan ini, akan dilakukan proses pengolahan data dengan perangkat lunak GAMIT sebagai pengolah data RINEX dan GLOBK sebagai pengolah penentuan besar

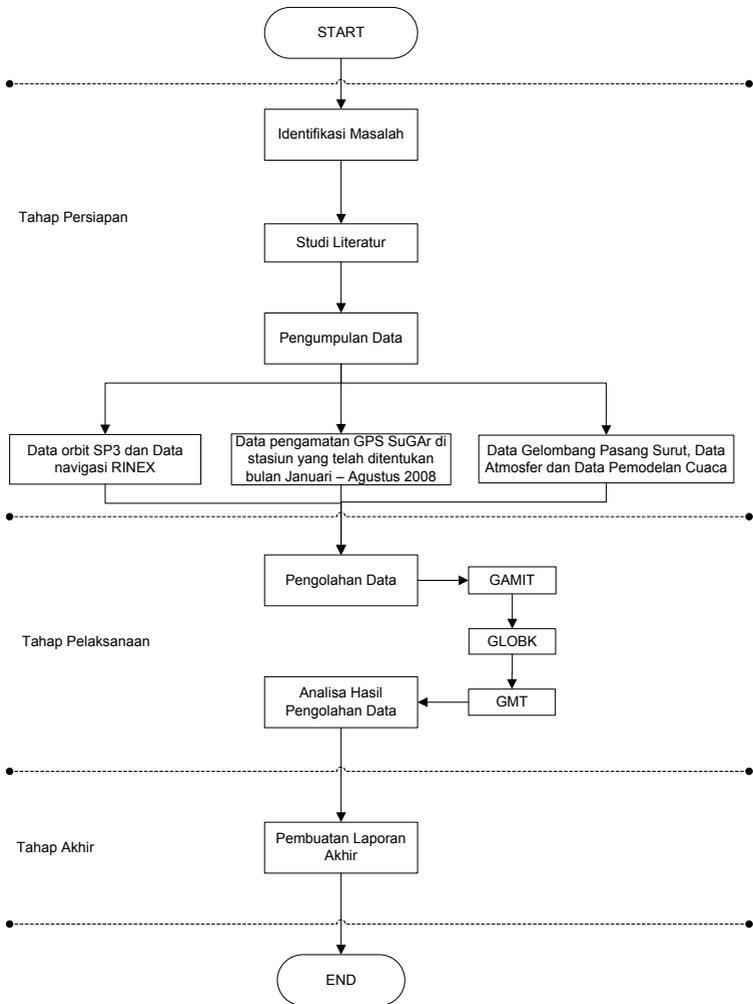
dan vektor data titik-titik GPS serta GMT untuk menampilkan hasil pengolahan data.

e. Analisa Hasil Pengolahan

Setelah data selesai diolah, maka akan dilakukan analisa terhadap hasil pengolahan. Pada tahap ini, hasil dari pengolahan akan dianalisa perubahan dan besar vektor pergeseran deformasinya secara *time series*.

f. Pembuatan Laporan Akhir

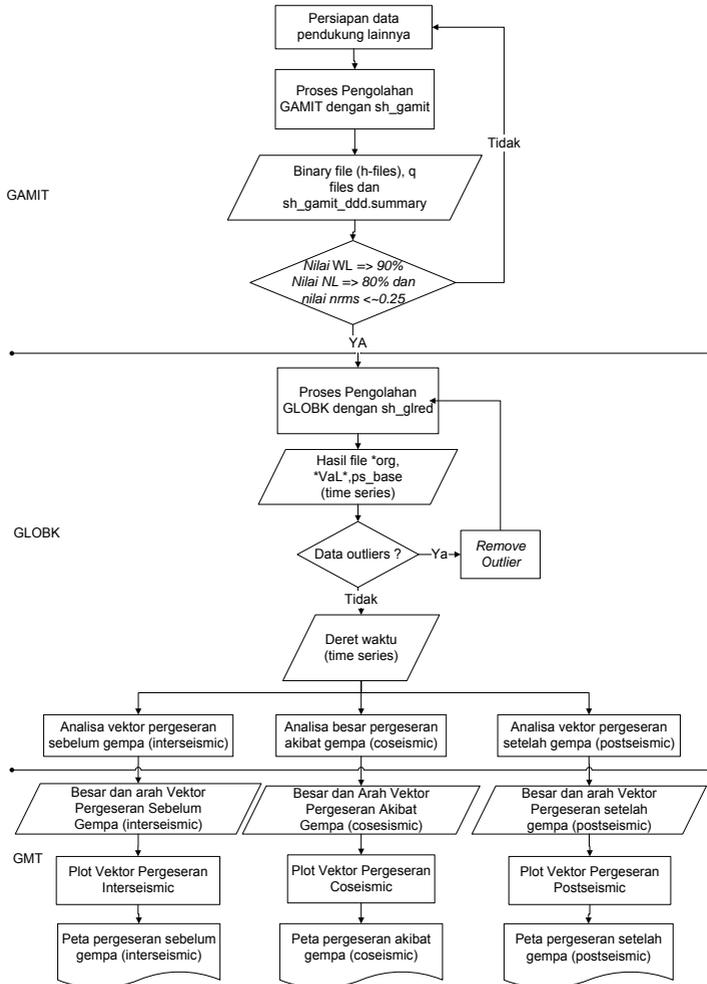
Tahapan ini adalah tahapan akhir, yaitu proses penyajian hasil penelitian dalam bentuk laporan dan presentasi.



Gambar 3. 4 Diagram Alir Penelitian

3.3 Tahapan Pengolahan Data

Adapun tahapan pengolahan data dalam penelitian ini secara garis besar seperti yang dijelaskan pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3. 5 Diagram Alir Pengolahan Data.

a. Pengumpulan Data

Dalam tahap ini adalah proses *download* data RINEX dari pusat data di SOPAC.

b. Persiapan data pendukung lainnya

Seperti yang dijelaskan dalam bab sebelumnya dibutuhkan beberapa data pendukung lainnya sebelum memulai proses pengolahan data seperti data *receiver* dan informasi antena untuk setiap data (file *station.info*), *list station* (sesuai dengan data stasiun yang di butuhkan untuk penelitian), titik ikat untuk kontrol file, data untuk direktori table lunar/solar *ephemerides*, rotasi bumi, datum geodetik, *spacecraft* dan informasi *instrumentation*, data orbit satelit; IGS SP3 *ephemeris file* (*igsWWWWD.sp3*), nilai jam satelit; file navigasi RINEX (*brdcDDD0.YYn*). Informasi-informasi diatas digunakan untuk mereduksi kesalahan-kesalahan dalam pengamatan GPS seperti kesalahan orbit, kesalahan jam, siklus ambiguitas efek atmosfer dan ionosfir (Purnomo, 2014).

c. Proses pengolahan data dengan GAMIT

Langkah pertama dalam pengolahan data GPS menggunakan GAMIT adalah membuat direktori pekerjaan `EXPT` dan menghubungkan seluruh file yang dibutuhkan seperti *control file* yang terletak di `~gg/tables/` dengan perintah `sh_setup -yr yyyy` pada terminal linux. Selanjutnya adalah melakukan *editing control file* yang akan digunakan sesuai dengan parameter dan skenario pengamatan yang telah direncanakan. Adapun data-data *control file* yang akan digunakan adalah seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya mengenai “Pengolahan Data GPS dengan *Software* GAMIT”.

Jika seluruh data yang dibutuhkan sudah disiapkan di letakkan pada direktori kerja dan seluruh *file control* dalam direktori /tables sudah di sesuaikan dengan kebutuhan, maka langkah berikutnya adalah melakukan perintah `sh_gamit` pada terminal linux dengan perintah lengkap sebagai berikut:

```
sh_gamit -s yyyy ddd1 ddd2 -expt EXPT -nogifs >
sh_gamit.log&
```

Maka hasil dari perintah tersebut akan menghasilkan sejumlah folder *day of year* (DOY) sesuai dengan jumlah DOY yang diatur pada tahap persiapan data. File h-file memiliki format `h[EXPT]a.yyddd`, dimana `EXPT` adalah nama direktori kerja, `yy` adalah dua angka tahun terakhir dan `ddd` DOY dari data yang diproses.

d. Evaluasi Solusi GAMIT

Proses pengamatan GPS dapat dikatakan baik atau salah dengan melihat beberapa parameter hasil solusi *file* GAMIT seperti h-file, q-file dan *postfit.autcl.summary*. Parameter yang dicek adalah:

- Nilai *postfit nrms* (*normalized root mean square*), yang merupakan perbandingan nilai varians *aposteriori* dan varians *apriori* untuk unit bobot. Sesuai dengan pedoman manual pengolahan GPS dengan GAMIT, bahwa *nrms* solusi harian harus kurang dari 0,25. Apabila nilai *postfit nrms* lebih besar dari 0,5 maka mengindikasikan data GPS masih terdapat efek *cycle slip*.
- Nilai *Wide Lane* adalah resolusi ambiguitas fase yang didapat dengan mengkombinasikan sinyal GPS L1 dikurangkan dengan GPS L2 (*Wide Lane*). Sedangkan resolusi ambiguitas fase dengan

mengkombinasikan sinyal GPS L1 ditambahkan dengan GPS L2 (*Narrow Lane*). Nilai *Wide Lane* (WL) dan *Narrow Lane* (NL) resolusi ambiguitas fase hasil pengolahan harian GAMIT harus berada di atas 90% dan 80 % untuk masing-masing nilai. Jika nilai WL tersebut masih di bawah ketentuan maka menunjukkan pengolahan tersebut masih terdapat *noise* pada *pseudorange*. Demikian juga jika nilai NL masih di bawah ketentuan menunjukkan pengolahan data masih terdapat kesalahan pada ukuran, konfigurasi jaringan, kualitas orbit, koordinat *a priori*, atau kondisi atmosfer.

e. Proses pengolahan data dengan GLOBK

Dalam aplikasi GLOBK akan dilakukan kombinasi DOY dan *plotting* parameter koordinat h-file secara *time series* yang sebelumnya dilakukan *filtering* dengan metode *Kalman Filter*. Format data plot *time series* yang dihasilkan dari proses GLOBK ini adalah berformat *postscript*, dengan nama `psbase_EXPT.GPS`, dimana `EXPT` adalah nama proyek dan `GPS` adalah nama stasiun GPS yang digunakan.

Adapun file yang perlu disiapkan dan di-*edit* sesuai dengan kebutuhan pengguna adalah file kontrol `globk` dan `glorg` yaitu `globk_comb.cmd` dan `glorg_comb.cmd` yang dapat dicopy dari folder `~gg/tables` dan ditempatkan di folder `gsoln` di dalam direktori proyek `EXPT`. Kemudian file nilai parameter orientasi bumi, `pmu.usno`, yang diperoleh dari `~gg/tables` dan ditempatkan pada `/tables` di direktori proyek. Terakhir adalah file *global directory list* (`*.gdl`) yang berisikan list file biner h-file hasil dari konversi proses `hgtolb` yang sudah tidak

memiliki nilai ambiguitas biasanya, *ambiguities resolve*, format *.glx.

Jika semua file sudah disipkan maka lakukan proses perintah solusi harian dengan perintah sebagai berikut:

```
glred 6 globk_rep.prt globk_rep.log xxxx.gdl globk_comb.cmd
```

dimana `glred` adalah perintah untuk membuat solusi DOY, kemudian angka 6 menunjukkan bahwa akan dibuat sebanyak 6 file .gdl dalam setiap 30 hari pengolahan data, *globk_rep.prt* adalah keluaran berbentuk print file yang berisikan solusi `glred`, *globk_rep.log* adalah log file yang berisikan waktu pengolahan dan *prefit chii square* per nilai derajat kebebasan untuk setiap file matriks yang diolah, *xxxx.gdl* adalah file .gdl yang akan digunakan dan *globk_comb.cmd* adalah file kontrol `globk` yang secara otomatis akan terhubung dengan file *glorg_comb.cmd*.

Dari proses `glred` didapatkan pergeseran titik stasiun GPS dalam bentuk file *glred.org*. Kemudian untuk melihat hasil plot secara *timeseries* adalah dengan perintah sebagai berikut:

```
sh_plotcrd -f globk_comb.org -s long
```

dimana `sh_plotcrd` adalah perintah untuk membuat plot koordinat secara *timeseries* dan *globk_comb.org* adalah file .org keluaran dari proses `glred` sebelumnya. Evaluasi hasil GLOBK dapat dilihat pada *plot* deret waktu hasil pengolahan menggunakan GLOBK. Untuk nilai *wrms* yang baik adalah di bawah 10 mm (Panuntun dalam Sudrajat, 2012). Selain itu, nilai statistik *chi-squared increment per degree of freedom x^2/f* dimana nilai x^2/f tidak boleh lebih dari 10 dan limit maksimal adalah 30 (Lestari dalam Sudrajat, 2006).

f. Deteksi data *outlier*

Outliers adalah data yang menyimpang terlalu jauh dari data lainnya dalam suatu rangkaian data (*time series*). Agar analisis dari hasil tidak menjadi bias atau tidak sesuai dengan sebenarnya, maka perlu dihilangkan. Pada perangkat lunak GAMIT proses ini dilakukan menggunakan metode kuadrat terkecil. Sehingga dengan kata lain proses ini adalah termasuk ke dalam tahapan uji statistik. Adapun data yang dihasilkan adalah data berformat *Val.<expt>*, *<expt>* adalah nama experiment. Kemudian dilakukan pengolahan ulang dengan melakukan proses pengolahan GLOBK kembali dengan tidak mengikutsertakan data folder DOY yang ter-*outliers*. Maka akan diperoleh data *time series* GPS yang sudah bersih dari *noises*.

g. Analisa Deformasi dan Besar Pergeseran Vektor Fase *Interseismic*, *Coseismic* dan *Postseismic*.

Langkah berikutnya adalah mendapatkan besar dan arah besar vektor pergeseran titik stasiun GPS pada setiap fase gempa. Untuk mendapatkan besar pergeseran titik GPS sebelum gempa (*interseismic*) digunakan 41 hari pengamatan sebelum peristiwa gempa tanggal 25 Februari 2008 terjadi. Hal ini dimaksudkan agar didapatkan data yang linier, tidak terpengaruh efek gempa. Sedangkan untuk mengamati pergeseran titik GPS setelah gempa (*postseismic*) digunakan tiga bulan atau lebih pengamatan setelah peristiwa gempa agar mendapatkan data yang tidak memiliki efek gempa dan sesuai dengan algoritma Marone (Yusfania, 2014). Adapun fase *coseismic* didapatkan dari lima data pengamatan yang diambil sebelum dan setelah

gempa. Untuk mendapatkan nilai pergeserannya adalah dengan menghitung selisih rata-rata dari data tersebut.

Pada aplikasi GLOBK siapkan file perintah *globk_vel.cmd* dan *glorg_vel.cmd* yang didapat dari `~gg/tables` kemudian di tempatkan pada folder `gsoln`. Kemudian atur parameter di dalamnya sesuai kebutuhan yang dibutuhkan pengguna. Dengan menggunakan perintah terminal Linux sebagai berikut:

```
globk 6 globk.prt globk.log xxxx.gdl globk_vel.cmd
```

dimana `globk` adalah perintah untuk menghasilkan estimasi besar vektor pergeseran titik pantau GPS, kemudian angka 6 menunjukkan bahwa akan dibuat sebanyak 6 file `.gdl` dalam setiap 30 hari pengolahan data, *globk.log* adalah log file yang berisikan waktu pengolahan dan *prefit chii square* per nilai derajat kebebasan untuk setiap file matriks yang diolah, *xxxx.gdl* adalah file `.gdl list experiment` yang akan dilakukan (misal fase *interseismic*, maka masukkan seluruh hari pengamatan yang termasuk fase tersebut), *globk_vel.cmd* adalah file kontrol untuk menentukan besar vektor pergeseran titik.

Adapun proses `glred` dan `globk` di atas sebenarnya dapat disingkat dengan hanya menggunakan satu perintah sebagai berikut:

```
sh_glred -s YYYY1 DDD1 YYYY2DDD2-expt NNNN -opt H G E
```

dimana *YYYY1* adalah tahun awal data yang diolah, *DDD1* hari akhir data yang diolah, *YYYY2* tahun akhir data yang diolah, *DDD2* hari akhir data yang diolah, *Expt* adalah nama *experiment* yang sudah ditentukan pada *sites.defaults*, *H* untuk memindah h-file kedalam direktori *glbf*, *G* untuk membentuk *file* ekstensi `.gdl` pada setiap

harinya kedalam direktori *gsoln*, dan *E* untuk plotting *time series*.

- h. *Plot* Vektor Pergeseran Fase *Interseismic*, *Coseismic* dan *Postseismic*.

Dari proses `globk` di dapatkan besar vektor pergeseran titik stasiun GPS dalam bentuk file *globk.org*. Kemudian untuk melihat hasil plot secara spasial adalah dengan perintah GMT sebagai berikut:

```
sh_plotvel -f globk_vel.org -R90/110/-10/15
```

dimana `sh_plotvel` adalah perintah untuk membuat plot spasial besar vektor pergeseran titik GPS, *globk_vel.org* adalah file `.org` yang dihasilkan dari proses `globk`.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diuraikan hasil dan pembahasan dari penelitian ini mulai dari pengolahan data GPS, analisis data *time series*, perhitungan besar vektor pergeseran dan *plotting* vektor pergeseran.

4.1 Hasil Pengolahan GAMIT

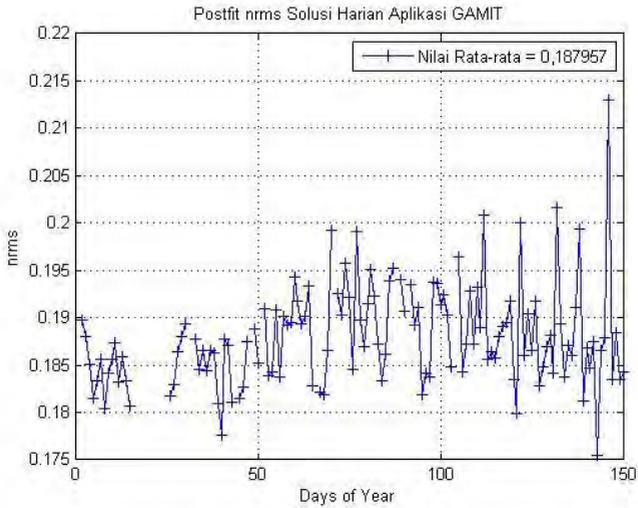
Pengolahan data GPS SuGAR beserta data-data pendukung lainnya dalam penelitian ini diolah menggunakan GPS *Analysis at MIT* (GAMIT), aplikasi pengkombinasi data GPS dan *Kalman Filter* (GLOBK), dan *Generic Mapping Tools* (GMT) dalam lingkungan sistem operasi komputer Linux.

Pengolahan GPS dengan menggunakan aplikasi GAMIT menghasilkan kumpulan folder dari *Days of Year* (DoY) yang diteliti dan setiap foldernya berisikan solusi GAMIT (h-file), kemudian q-file dan *sh_gamit_ddd.summary* serta file-file lainnya. Namun untuk memastikan bahwa penggunaan GAMIT dalam pengolahan data GPS dikatakan baik, ketiga *file* di atas sudah cukup mewakili informasi parameter yang akan dievaluasi. Berikut di bawah ini adalah evaluasi parameter yang digunakan.

4.1.1 Nilai Normalised Root Mean Square (nrms)

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan GPS sepanjang 150 DoY, dimulai pada awal bulan Januari 2015 (DoY 002) hingga akhir bulan Mei 2015 (DoY 150) pada tahun 2008. Adapun untuk nilai *nrms* dalam pengolahan GAMIT harus memiliki kurang dari 0,25 dalam setiap pengamatan DoY-nya. Nilai *nrms* dari hasil pengolahan GPS dalam penelitian ini adalah ditunjukkan Gambar 4.1. Dari Gambar 4.1 dapat dilihat hasil *nrms* minimal adalah 0,1754, *nrms* maksimal adalah 0,2129, dan rerata *nrms* adalah 0,1879. Hal ini

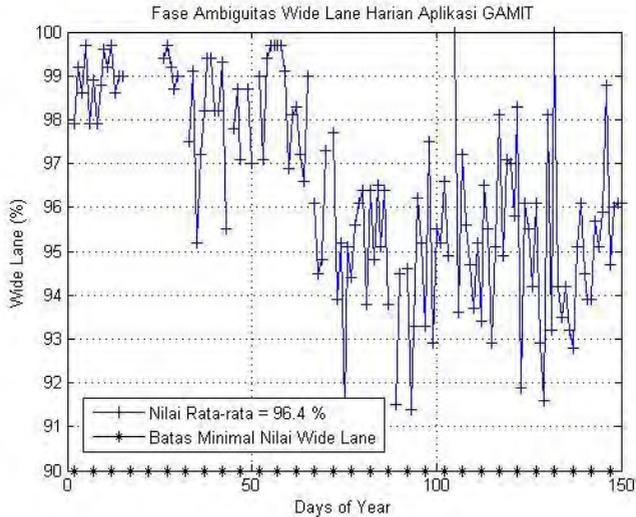
menunjukkan bahwa metode penggunaan GAMIT sesuai dengan kriteria.



Gambar 4. 1 Nilai *nrms* Solusi Harian Pengolahan GAMIT

4.1.2 Nilai *Wide Lane* dan *Narrow Lane*

Nilai *Wide Lane* adalah resolusi ambiguitas fase yang didapat dengan mengkombinasikan sinyal GPS L1 dikurangkan dengan GPS L2 (*Wide Lane*). Nilai WL pada GAMIT dikatakan tidak memiliki *noise* pada *pseudorange* jika resolusi ambiguitas fase WL-nya adalah melebihi 90%. Sedangkan resolusi ambiguitas fase dengan mengkombinasikan sinyal GPS L1 ditambahkan dengan GPS L2 (*Narrow Lane*) dikatakan tidak terdapat kesalahan pada ukuran, konfigurasi jaringan, kualitas orbit, koordinat *a priori*, atau kondisi atmosfer jika resolusi ambiguitas fase NL-nya adalah melebihi 80%. Gambar 4.2 menunjukkan nilai WL setiap DoY sepanjang waktu observasi.

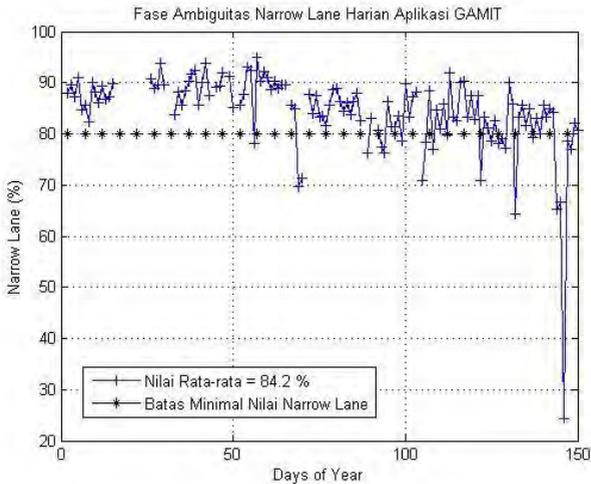


Gambar 4. 2 Resolusi Fase Ambiguitas *Wide Lane* Sepanjang Hari Pengamatan

Ditunjukkan pada Gambar 4.2 bahwa nilai maksimal WL pada penelitian ini adalah 100%, nilai minimalnya adalah 91,3% dan nilai reratanya adalah 96,4%. Ini menunjukkan bahwa hasil pengolahan data GPS dalam penelitian ini masih dalam toleransi yang diberikan *software* GAMIT dan menggambarkan data GPS yang digunakan tidak memiliki *noise* pada *pseudorange*.

Sedangkan pada Gambar 4.3 menunjukkan nilai NL setiap DoY sepanjang waktu observasi. Dapat dilihat bahwa nilai maksimal NL pada penelitian ini adalah 94,9%, kemudian 24,4% untuk nilai minimalnya dan nilai rata-rata NL-nya adalah 84,2%. Mengindikasikan secara umum hasil pengolahan data GPS dalam penelitian ini baik namun di beberapa DoY observasi terdapat kemungkinan

kesalahan pada ukuran, konfigurasi jaringan, kualitas orbit, koordinat *apriori*, atau kondisi atmosfer.



Gambar 4. 3 Resolusi Fase Ambiguitas *Narrow Lane* Sepanjang Hari Pengamatan

Adapun jika kontrol kualitas data hasil pengolahan GPS dengan *software* GAMIT selesai dan masuk ke dalam toleransi minimal, maka proses selanjutnya adalah mengolah solusi GAMIT (*h-file*), yang berisikan matriks kovarian dari data koordinat stasiun, dengan mengkombinasikan seluruh hari pengamatan GPS dengan *software* GLOBK.

4.2 Hasil Pengolahan GLOBK

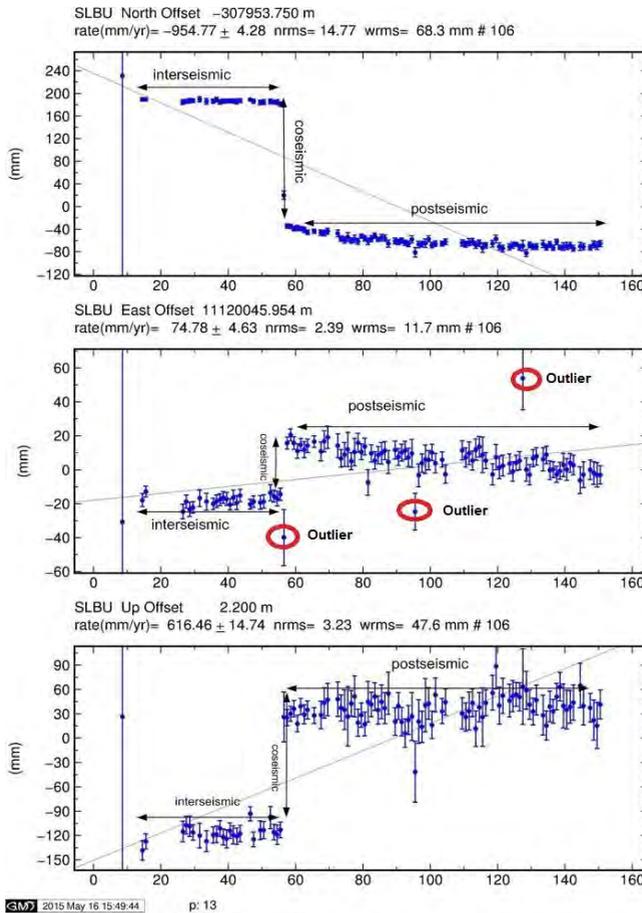
Dalam pengolahan GLOBK didapatkan koordinat geosentrik dan lokal toposentrik yang selanjutnya akan diamati pergerakan posisi setiap stasiun GPS pada sumbu *easting* (E), *northing* (N) dan *up* (U), sehingga nantinya dapat diketahui besar

pergeseran titik GPS yang diamati sepanjang DoY yang digunakan. Untuk mendapatkan besar dan arah pergeseran suatu stasiun GPS pada setiap fase gempa, dilakukan pembagian pengamatan posisi GPS ke dalam tiga fase menurut fase gempa itu sendiri yaitu, *interseismic* atau fase sebelum gempa terjadi, *coseismic* yakni fase dimana gempa itu terjadi, dan *postseismic* adalah fase pasca gempa terjadi.

Dalam penelitian ini pembagian tiga fase tersebut didasarkan atas waktu terjadinya gempa, ketersediaannya data pengamatan GPS yang akan digunakan dan pengaruh aktivitas efek gempa terhadap data pengamatan GPS. Untuk pengamatan vektor pergeseran pada fase *interseismic* dimulai dari DoY ke-002 sampai ke-048. Kemudian untuk fase *coseismic* dimulai dari DoY ke-049 sampai ke-062. Sedangkan untuk fase *interseismic* dimulai dari DoY ke-063 sampai ke-150. Adapun gempa Mentawai tahun 2008 terjadi pada DoY ke-056.

4.2.1 Deret Waktu Seluruh Fase

Salah satu keluaran pengolahan GLOBK adalah deret waktu seluruh data GPS yang dikombinasi. Tujuan dari deret waktu ini adalah untuk menentukan fungsi matematika dari data yang dihasilkan *software* pengolah GPS sepanjang waktu pengamatan (DoY) dan menghapus *outlier*. Hasil *plot time series* yang ditampilkan pada Gambar 4.4 dan pada lampiran *time series* adalah hasil *plot* pada seluruh fase gempa Mentawai 2008 (DoY 002-150) hasil pengolahan pada *software* GLOBK, baik pada fase *interseismic*, *coseismic* dan *postseismic*. Pada masing-masing stasiun terdapat tiga grafik yang menggambarkan kondisi posisi stasiun GPS (sumbu-Y) pada tiga sumbu koordinat GPS *easting* (E), *northing* (N) dan *up* (U) dalam satuan DoY (sumbu-X).



Gambar 4. 4 Deret Waktu Pengamatan GPS Stasiun SLBU Pada DoY 002-150 dan Fase Gempa Mentawai 2008.

Gambar *time series* stasiun GPS SLBU di atas memiliki nilai rms 68,3 mm, 11,7 mm, dan 47,6 mm untuk sumbu *northing*, *easting* dan *up*-nya. Menunjukkan bahwa kombinasi harian SLBU di atas masih belum masuk

toleransi rms, yaitu 10 mm. Hal tersebut disebabkan karena kombinasi harian data pengamatan GPS tersebut memasukkan DoY pada waktu gempa (*coseismic*). Prinsip dasar pada *software* GLOBK ini adalah bahwa *uncertainties* dari pengamatan GPS dihasilkan dari pendekatan linier, sehingga data yang akan dihitung dengan GLOBK harus sudah terbebas dari model-model distribusi peluang khusus peubah acak kontinu (Herring dan King, 2010). Sehingga untuk menganalisa kombinasi *time series* data GPS yang di dalamnya terdapat *coseismic*, diperlukan dua kali analisa *time series*, yakni pengamatan untuk *interseismic* sendiri dan *postseismic* sendiri. Namun penulis disini hanya akan menampilkan *time series* pada seluruh fase gempa, untuk menunjukkan besar deformasi secara visual akibat gempa Mentawai 2008.

Pada Gambar 4.4 juga ditunjukkan pula tiga data *outlier*, dengan lingkaran merah, karena ketiga *uncertainty* data tersebut menunjukkan lebih kecil daripada residunya. Sehingga untuk mendapatkan analisa data *time series* yang bebas dari bias, data *outlier* tersebut harus dihilangkan. Untuk itu sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, yakni untuk menganalisa arah dan besar vektor pergeseran stasiun GPS pada saat sebelum (*interseismic*) dan setelah (*postseismic*) Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*), pengolahan data pada penelitian ini akan dibagi ke dalam dua tahapan mulai dari analisa data *time series* pada fase *interseismic* dan fase *postseismic*, penentuan besar pergeseran di sumbu *easting*, *northing* dan *up*, hingga penentuan besar dan arah vektor pergeseran stasiun GPS yang digunakan.

4.2.2 Uji Kualitas Data GPS Pada Fase *Interseismic*

Analisa kualitas data GPS dilakukan secara terpisah antara dua fase gempa agar permodelan dan penentuan nilai *root-mean-square* (RMS) *error* tidak terpengaruh akibat bias gempa, yakni *interseismic* dan *postseismic*. Maka untuk fase *interseismic* Gempa Mentawai 2008, dilakukan pengamatan GPS mulai dari DoY 002-055 dan didapatkan RMS *error* dari data mentah untuk masing-masing stasiun GPS sebelum dihilangkan *outlier*-nya pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 RMS Data GPS *Interseismic* Sebelum *Removing Outlier*.

Stasiun GPS	RMS Easting (\pm mm)	RMS Northing (\pm mm)	RMS Up (\pm mm)
LNNG	2,9	4,9	8,3
PPNJ	2,5	2,1	10,6
BSAT	4,4	4,8	4,4
PRKB	4,5	3,4	3,4
SLBU	3,5	10,0	33,4

Kemudian dilakukan penghapusan *outlier* dengan *level of confidence* yang digunakan untuk uji statistik kualitatif terhadap data GPS ini sebesar 95% atau sebesar 2 kali RMS *error*. Tabel 4.2 menunjukkan nilai RMS *error* setelah dilakukan penghapusan *outlier*.

Tabel 4. 2 RMS Data GPS *Interseismic* Setelah *Removing Outlier*.

Stasiun GPS	RMS Easting (\pm mm)	RMS Northing (\pm mm)	RMS Up (\pm mm)
LNNG	2,7	4,9	6,2
PPNJ	1,7	2,0	8,1
BSAT	4,2	4,2	4,7
PRKB	4,2	3,2	4,4
SLBU	2,4	1,6	9,2

Melihat nilai RMS hasil *filtering*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2, maka langkah penentuan arah dan besar pergeseran stasiun GPS di fase *interseismic* bisa dilanjutkan karena hasil RMS di bawah dari nilai 10 mm.

4.2.2 Uji Kualitas Data GPS Pada Fase *Postseismic*

Untuk analisa data GPS pasca gempa, dilakukan pengamatan GPS mulai dari DoY 057-150 kemudian didapatkan RMS *error* dari data mentah untuk masing-masing stasiun GPS sebelum dihilangkan *outlier*-nya yang dijelaskan pada Tabel 4.3.

Kemudian dilakukan penghapusan *outlier* dengan *level of confidence* yang digunakan untuk uji statistik kualitatif terhadap terhadap data GPS ini sebesar 95% atau sebesar 2 kali RMS *error*. Ditunjukkan pada Tabel 4.4 nilai RMS *error* setelah dilakukan penghapusan *outlier*.

Tabel 4. 3 RMS Data GPS *Postseismic* Sebelum *Removing Outlier*.

Stasiun GPS	RMS Easting (\pm mm)	RMS Northing (\pm mm)	RMS Up (\pm mm)
LNNG	3,8	4,3	11,8
PPNJ	2,4	2,4	10,3
BSAT	4,7	4,3	9,0
PRKB	4,8	2,6	9,4
SLBU	8,9	8,5	8,9

Tabel 4. 4 RMS Data GPS *Postseismic* Setelah *Removing Outlier*.

Stasiun GPS	RMS Easting (\pm mm)	RMS Northing (\pm mm)	RMS Up (\pm mm)
LNNG	3,6	3,6	8,2
PPNJ	2,0	2,2	7,8
BSAT	4,6	3,5	7,7
PRKB	4,2	2,3	7,4
SLBU	6,0	6,5	9,3

Melihat nilai RMS hasil *filtering*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4, maka langkah penentuan arah dan besar pergeseran stasiun GPS di fase *postseismic* juga bisa dilanjutkan karena hasil RMS di bawah dari nilai 10mm.

4.2.3 Analisa Vektor Pergeseran Horizontal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008

Dengan melakukan pengolahan data GPS yang sudah terbebas dari *outlier*, maka dapat dilakukan penentuan besar pergeseran titik GPS di seluruh fase

gempa. Penentuan besar pergeseran vektor fase Gempa Mentawai 2008 dihitung pada bidang horisontal (E dan N) maupun bidang vertikal (U). Namun sebelumnya, untuk seluruh nilai pergeseran stasiun GPS hasil perhitungan pada sumbu horisontal baik pada fase *interseismic*, *coseismic*, dan *postseismic* perlu dijumlahkan dengan kecepatan dari lempeng dibawahnya. Nilai kecepatan lempeng dari Blok Sunda pada stasiun GPS yang digunakan didapatkan dari teorema *euler pole*, menggunakan model bumi *spherical* dengan pusat rotasi di bujur 86,90°BT dan lintang 38,90°LU serta kecepatan rotasi 0,322 deg/yr (Bock dalam Yusufania, 2014). Tabel 4.5 adalah besar kecepatan stasiun GPS yang diamati terhadap kecepatan Blok Sunda.

Tabel 4. 5 Kecepatan Blok Sunda Pada Stasiun GPS yang Diamati.

Stasiun GPS	Easting (m/tahun)	Northing (m/tahun)
LNNG	0,021	-0,004
PPNJ	0,021	-0,003
BSAT	0,021	-0,003
PRKB	0,021	-0,004
SLBU	-0,003	0,021

Sehingga nilai-nilai pergeseran vektor horisontal di seluruh fase Gempa Mentawai 2008 ini telah diestimasi pula pergerakan dari Blok Sunda.

Adapun untuk mendapatkan nilai pergeseran akibat gempa yang terjadi, dilakukan perhitungan selisih rata-rata dari data *coseismic*, yakni lima hari sebelum gempa dan lima hari setelah gempa. Tabel 4.6 menunjukkan besar pergeseran titik GPS akibat gempa (*coseismic*).

Tabel 4.6 Pergeseran Horizontal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*).

Titik Pengamatan	Pergeseran Horizontal		
	dE (m)	dN (m)	(m)
LNNG	-0,0063	-0,0023	0,0067
PPNJ	0,0040	-0,0430	0,0432
BSAT	0,0064	-0,0102	0,0121
PRKB	0,0037	-0,0036	0,0051
SLBU	0,0314	-0,2197	0,2220

Sedangkan pada Tabel 4.7 ditunjukkan besar vektor pergeseran bidang horisontal setiap stasiun GPS pada fase *interseismic*, dengan menggunakan rumus (2.15) dan (2.16), pada data yang sudah terbebas dari *outlier*. Maka didapatkan besarnya seperti berikut. Pada Tabel 4.7 dapat dilihat pergeseran titik stasiun GPS pada saat sebelum Gempa Mentawai 2008. Besar vektor pergeseran horisontal tertinggi dimiliki oleh stasiun BSAT sebesar 0,1179 m. Sedangkan besar vektor pergeseran horisontal terendah dimiliki oleh stasiun PPNJ sebesar 0,0236 m.

Sedangkan pada Tabel 4.8 menunjukkan besar pergeseran titik GPS setelah gempa (*postseismic*). Tabel tersebut menggambarkan bahwa stasiun GPS SLBU memiliki besar vektor pergeseran horisontal tertinggi sebesar 0,1020 m, sedangkan stasiun GPS PPNJ adalah stasiun yang pergeseran horisontalnya terendah sebesar 0,0309 m. Dari Tabel 4.7 dan 4.8 dapat dihasilkan arah pergerakan dari masing-masing stasiun GPS menggunakan rumus (2.17).

Tabel 4. 7 Besar Vektor Pergeseran Stasiun GPS Sebelum (*interseismic*) Gempa Mentawai 2008.

Titik Pengamatan	dE (m)	dN (m)	Pergeseran Horizontal (m)
LNNG	-0,0233	-0,1083	0,1108
PPNJ	0,0091	-0,0218	0,0236
BSAT	-0,0696	-0,0952	0,1179
PRKB	-0,0576	-0,0564	0,0806
SLBU	-0,0287	-0,0163	0,0331

Maka selanjutnya pada Tabel 4.9 dijelaskan arah pergerakan setiap stasiun GPS pada saat fase *interseismic* dan *postseismic* berdasarkan kuadran arah pergeseran menurut mata angin *north*, *east*, *south* dan *west* seperti yang dijelaskan Gambar 2.14 dan arah sudut mata anginnya. Dengan artian bahwa kuadran 1 menggambarkan bahwa vektor arah menuju ke arah *north-east* (NE), kemudian kuadran 2 menggambarkan arah *north-west* (NW), kuadran 3 menggambarkan arah *south-west* (SW) dan terakhir kuadran 4 menggambarkan arah *south-east* (SE).

Sehingga dapat disimpulkan bahwa arah pergeseran stasiun GPS SLBU, PRKB, BSAT, dan LNNG pada fase *interseismic* adalah *south-west*. Sedangkan pada fase *postseismic* stasiun GPS SLBU, PRKB, BSAT, dan LNNG juga tetap memiliki arah vektor pergeseran ke *south-west*. Sedangkan stasiun PPNJ baik fase *interseismic* maupun *postseismic* tetap berada pada arah *south-east* dengan arah sudutnya masing-masing.

Tabel 4. 8 Besar Vektor Pergeseran Setelah Gempa Mentawai 2008 (*postseismic*).

Titik Pengamatan	dE (m)	dN (m)	Pergeseran Horizontal (m)
LNNG	-0,0110	-0,0626	0,0636
PPNJ	0,0236	-0,0199	0,0309
BSAT	-0,0237	-0,0615	0,0659
PRKB	-0,0199	-0,0330	0,0385
SLBU	-0,0501	-0,0889	0,1020

Tabel 4. 9 Arah Pergerakan Stasiun GPS Fase *interseismic* dan *postseismic*.

Titik Pengamatan	<i>Interseismic</i>		<i>Postseismic</i>	
	Arah Sudut	Kuadran	Arah Sudut	Kuadran
LNNG	S 12,14° W	Kuadran III	S 9,96° W	Kuadran III
PPNJ	S 22,66° E	Kuadran II	S 49,87° E	Kuadran II
BSAT	S 36,17° W	Kuadran III	S 21,07° W	Kuadran III
PRKB	S 45,60° W	Kuadran III	S 31,09° W	Kuadran III
SLBU	S 60,40° W	Kuadran III	S 29,40° W	Kuadran III

Sedangkan pada Tabel 4.10 dijelaskan arah vektor pergeseran stasiun GPS akibat Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*). Sama seperti fase-fase sebelumnya, arah pergerakan dari masing-masing stasiun GPS ini didapat menggunakan rumus (2.17).

Tabel 4. 10 Arah Pergerakan Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*).

Titik Pengamatan	Arah Sudut	Kuadran
LNNG	S 69,94° W	Kuadran III
PPNJ	S 5,31° E	Kuadran II
BSAT	S 32,10° E	Kuadran II
PRKB	S 45,78° E	Kuadran II
SLBU	S 8,12° E	Kuadran II

Dapat disimpulkan bahwa arah dari vektor pergeseran akibat Gempa Mentawai 2008 adalah menghadap ke arah *south-east* untuk stasiun pengamatan GPS PPNJ, BSAT, PRKB dan SLBU. Sedangkan untuk stasiun LNNG menghadap ke arah *south-west* seperti dijelaskan pada Tabel 4.10.

4.2.4 Analisa Pergeseran Sumbu Vertikal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008

Sama halnya dengan analisa vektor pergeseran horisontal, untuk mendapatkan nilai pergeseran di sumbu vertikal akibat gempa yang terjadi, dilakukan perhitungan selisih rata-rata dari data *coseismic*, yakni lima hari sebelum gempa dan lima hari setelah gempa. Tabel 4.11 menunjukkan besar pergeseran vertikal titik GPS akibat gempa (*coseismic*). Sama dengan analisa *coseismic* pada sumbu horisontal, bahwa SLBU adalah stasiun GPS yang mengalami dampak deformasi paling besar di sumbu vertikal berdasarkan Tabel 4.11 sebesar 0,1415 meter.

Tabel 4. 101 Pergeseran Vertikal Stasiun GPS Akibat Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*).

Titik Pengamatan	Pergeseran Vertikal (m)
LNNG	-0,0007
PPNJ	-0,0092
BSAT	0,0021
PRKB	0,0002
SLBU	0,1415

Sedangkan pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13 menunjukkan besar pergeseran vertikal pada fase *interseismic* dan *postseismic* secara berturut-turut.

Tabel 4. 12 Pergeseran Vertikal Stasiun GPS Sebelum (*interseismic*) Gempa Mentawai 2008.

Titik Pengamatan	Pergeseran Vertikal (m)
LNNG	0,0790
PPNJ	0,1107
BSAT	0,0556
PRKB	0,0711
SLBU	0,0393

Ditunjukkan pada fase sebelum gempa bahwa besar pergeseran vertikal pada titik stasiun GPS PPNJ adalah stasiun yang memiliki pergeseran paling besar dengan arah *Up-lift* sebesar 0,1107 m. Sedangkan titik stasiun GPS BSAT memiliki pergeseran yang paling kecil dengan besar vektor pergeserannya 0,0556 m.

Tabel 4. 13 Pergeseran Vertikal Stasiun GPS Setelah Gempa Mentawai 2008 (*postseismic*).

Titik Pengamatan	Pergeseran Vertikal (m)
LNNG	0,0108
PPNJ	0,0055
BSAT	-0,0447
PRKB	-0,0096
SLBU	0,0494

Adapun untuk fase setelah gempa, stasiun GPS SLBU memiliki besar pergeseran vektor vertikal yang paling besar ke arah *Up-lift*, sebesar 0,0494 m dan stasiun GPS PPNJ adalah stasiun GPS yang perubahannya paling kecil yakni sebesar 0,0055 m.

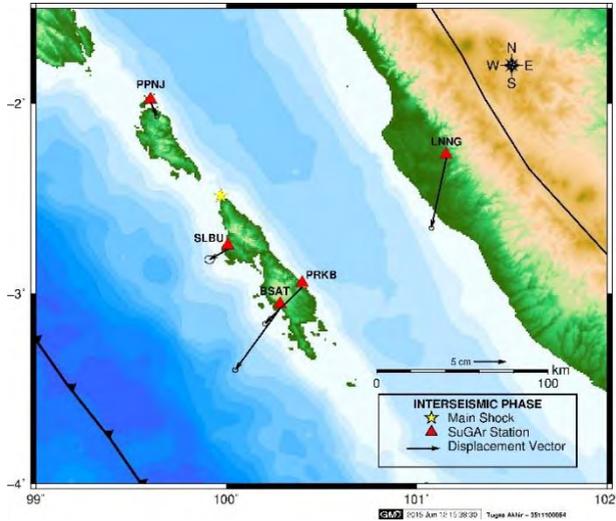
4.3 Hasil Pengolahan GMT

4.2.1 Plot Vektor Pergeseran Horizontal Fase *Interseismic*

Langkah berikutnya setelah mendapatkan data besar dan arah pergeseran vektor setiap fase pada setiap stasiun GPS maka untuk memvisualisasikannya dilakukan plotting data vektor pergeseran stasiun GPS.

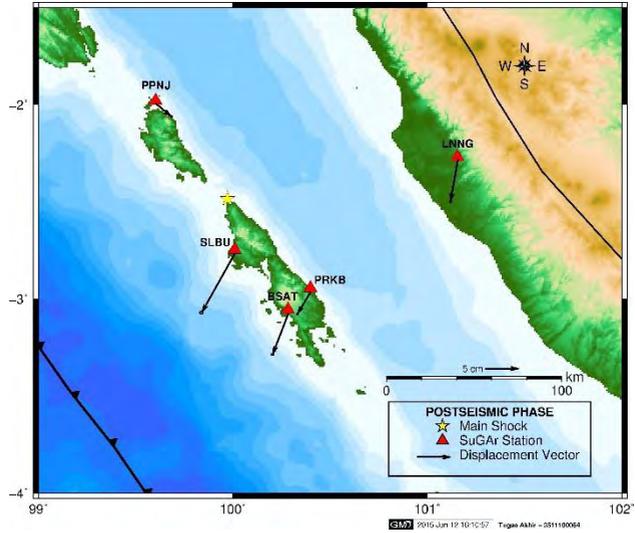
Data yang digunakan dalam penentuan arah dan besar vektor horizontal pada sebelum gempa (*interseismic*) adalah data hasil perhitungan pergeseran setiap stasiun GPS di sumbu *Easting* dan *Northing* pada Tabel 4.7. Adapun data yang digunakan dalam penentuan arah dan besar vektor horizontal pada setelah gempa (*postseismic*) adalah data hasil perhitungan pergeseran setiap stasiun GPS di sumbu *Easting* dan *Northing* pada Tabel 4.8. Sedangkan untuk fase *coseismic* baik pada sumbu horizontal dan vertikal digunakan hasil perhitungan *coseismic* pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.10.

Berikut Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 menunjukkan arah dan besar vektor pergeseran stasiun GPS secara horisontal pada fase *interseismic* dan *postseismic* Gempa Mentawai 2008.

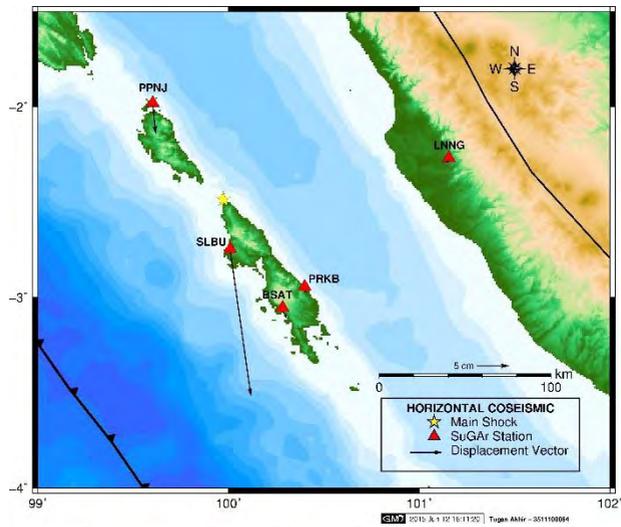


Gambar 4. 5 Besar dan Arah Vektor Pergeseran Horizontal Sebelum Gempa Mentawai 2008 (*interseismic*).

Sedangkan Gambar 4.7 adalah menggambarkan arah dan besar vektor pergeseran akibat Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*) di sumbu horisontal.

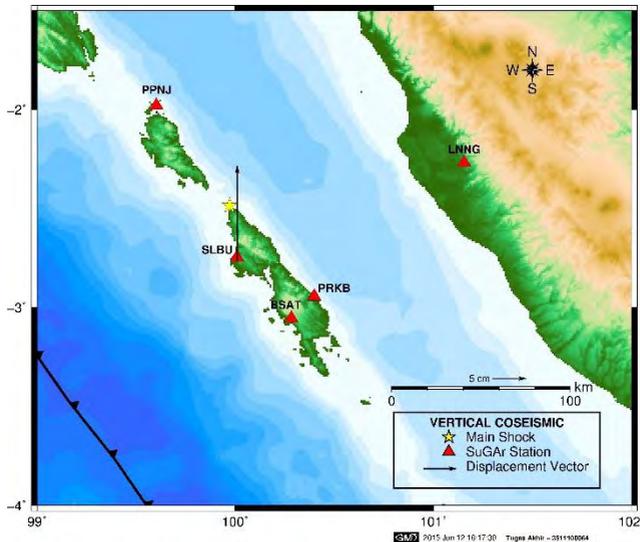


Gambar 4. 6 Besar dan Arah Vektor Pergeseran Horizontal Setelah Gempa Mentawai 2008 (*postseismic*).



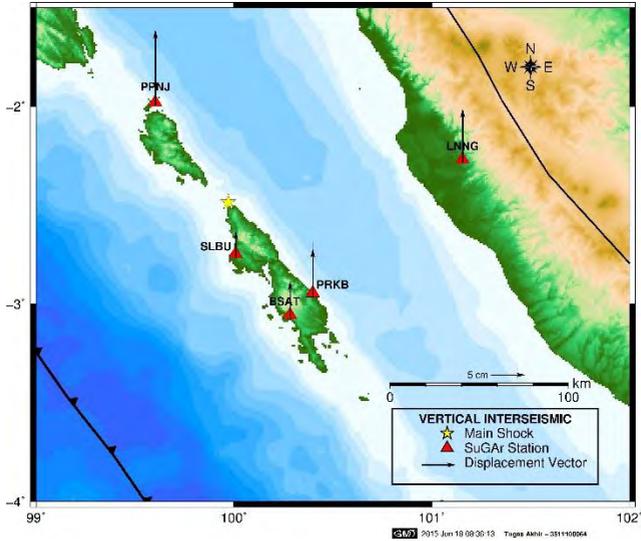
Gambar 4. 7 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Horizontal Akibat Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*).

Kemudian untuk Gambar 4.8, Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 adalah arah dan besar vektor pergeseran Gempa Mentawai 2008 pada fase *coseismic*, fase *interseismic* dan fase *postseismic* pada sumbu vertikal. Meskipun ditampilkan dalam diagram mata angin, tetapi arah pergerakan vektor pada gambar-gambar tersebut menunjukkan pergeseran stasiun GPS di sumbu vertikal. Besar dan arah vektor pada Gambar 4.8 diambil dari data perhitungan pergeseran *coseismic* di sumbu vertikal pada Tabel 4.10.

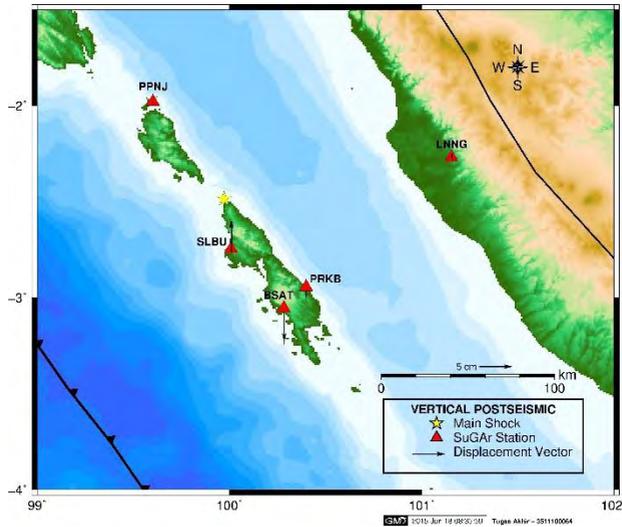


Gambar 4. 8 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Vertikal Akibat Gempa Mentawai 2008 (*coseismic*).

Sedangkan data yang digunakan dalam penentuan arah dan besar vektor vertikal pada fase *interseismic* dan fase *postseismic* adalah data hasil perhitungan pergeseran setiap stasiun GPS di sumbu *Up* pada Tabel 4.11 dan Tabel 4.12.



Gambar 4. 9 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Vertikal Sebelum Gempa Mentawai 2008 (*interseismic*).



Gambar 4. 10 Arah dan Besar Vektor Pergeseran Sumbu Vertikal Setelah Gempa Mentawai 2008 (*postseismic*)

4.4 Analisa Hasil

Setelah didapatkan seluruh hasil dari pengolahan data sebelumnya, selanjutnya dilanjutkan analisa hasil pengolahan data berdasarkan data dan informasi yang ada terkait dengan Gempa Mentawai 2008.

4.4.1 Vektor Pergeseran Pada Sumbu Horisontal

Analisa pertama dilakukan pada fase sebelum Gempa Mentawai 2008. Dijelaskan pada Gambar 4.5 bahwa arah dan besar vektor pergeseran stasiun GPS BSAT, SLBU, LNNG, dan PKRB sebelum gempa secara horisontal memiliki pergerakan lempeng ke arah *South-West* (SW). Hal ini berbanding lurus dengan vektor pergeseran stasiun GPS dalam fase *postseismic* gempa Mentawai 2007 yang juga memiliki arah vektor pergeseran *South-West* (SW) (Yusfania, 2014). Hal tersebut disebabkan karena berdasarkan USGS bahwa, “Gempa Mentawai 2008 ini adalah kelanjutan dari rentetan aktivitas gempa besar yang mengakibatkan destruktif di Sumatera dan sekitarnya. Rentetan gempa ini bermula dari Gempa Sumatera-Andaman pada 26 Desember, 2004 (9,1 Mw), dilanjutkan Gempa Nias pada 28 Maret, 2005 (8,6 Mw) dan terakhir adalah Gempa Mentawai pada 12 September, 2007 (8,4 dan 7,9 Mw). Gempa Mentawai pada 25 Februari 2008 ini masih masuk ke dalam rentetan *aftershock* Gempa Mentawai 12 September 2007”. Sehingga dapat disimpulkan bahwa fase *interseismic* Gempa Mentawai 2008 adalah termasuk fase *postseismic* Gempa Mentawai 2007.

Adapun pada fase *postseismic* Gempa Mentawai 2008 adalah juga termasuk ke dalam fase *postseismic* Gempa Mentawai 2007. Hal tersebut ditunjukkan oleh Yusfania, yang menganalisa fase *postseismic* Gempa

Mentawai 2007 dengan menggunakan waktu pengamatan *postseismic* mulai dari beberapa hari setelah gempa hingga tahun 2008 akhir, DoY ke-366 yang juga menghasilkan arah pergerakan vektor GPS masih menghadap *south-west*. Sehingga akan didapatkan hasil untuk fase *postseismic* Gempa Mentawai 2008 ini, yang dianalisa mulai DoY 63-150, juga akan memiliki arah yang sama dengan *postseismic* Gempa Mentawai 2007.

Adapun analisa *coseismic* Gempa Mentawai 2008 ini dijelaskan pada Tabel 4.6. Ditunjukkan bahwa stasiun GPS SLBU adalah stasiun GPS yang mengalami dampak deformasi paling besar di sumbu horisontal. Dengan besar pergeserannya sebesar 22,2 cm. Dilanjutkan dengan stasiun PPNJ dan BSAT yang memiliki pergeseran horisontal sebesar 4,32 cm dan 1,21 cm untuk masing-masing stasiun. Sedangkan untuk stasiun GPS LNNG dan PRKB mengalami pergeseran di bidang horisontal namun tidak signifikan, yakni sebesar 6,7 mm dan 5,1 mm.

Stasiun GPS SLBU mengalami deformasi akibat gempa lebih besar karena hanya berjarak 46.104 Km dari *epicenter*. Begitu pula stasiun PPNJ dan BSAT yang hanya berjarak 69.638 Km dan 69.712 Km. Sedangkan stasiun GPS PRKB dan LNNG memiliki jarak yang lebih jauh dari pusat gempa dibanding stasiun GPS lainnya, yakni 71.237 Km dan 134.199 Km.

4.4.2 Pergeseran Pada Sumbu Vertikal

Berdasarkan catatan sejarah gempa USGS, dijelaskan bahwa Gempa Mentawai 2008 yang memiliki kedalaman 35 km ini, terjadi karena hasil dari *thrust-faulting* perbatasan dua lempeng, yakni Australia dan Sunda. Adapun definisi dari *thrust-faulting*, adalah patahan lempeng ke arah atas yang memiliki sudut patahan

secara vertikal sebesar 45 derajat atau kurang. Akibatnya gempa ini akan mengakibatkan pergeseran lempeng bukan hanya di sumbu horisontal tetapi juga pada sumbu vertikal.

Berdasarkan data pengamatan GPS dalam penelitian ini, didapatkan bahwa beberapa stasiun GPS yang digunakan mengalami pergeseran pada sumbu vertikal, seperti yang dijelaskan pada Tabel 4.10 Stasiun GPS yang memiliki pergeseran secara vertikal terbesar adalah stasiun SLBU, dengan besar pergeserannya sebesar 14,15 cm, menunjukkan bahwa stasiun SLBU mengalami kenaikan posisi (*up-lift*). Dilanjutkan dengan stasiun PPNJ dan BSAT yang memiliki pergeseran vertikal sebesar -9,2 mm dan 2,1 mm untuk masing-masing stasiun. Sedangkan untuk stasiun GPS LNNG dan PRKB mengalami pergeseran di bidang vertikal namun tidak signifikan, yakni sebesar -0,7 mm dan 0,2 mm.

Sehingga sama seperti hasil hitung besar deformasi *coseismic* pada sumbu horisontal, bahwa urutan deformasi terbesar pada *coseismic* di sumbu vertikal adalah stasiun GPS SLBU, PPNJ, BSAT, PRKB dan LNNG, sebanding dengan urutan jarak terdekat hingga terjauh stasiun GPS terhadap *epicenter*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Melalui pengamatan GPS secara kontinu dengan menggunakan *software* pengolah data GPS ilmiah, GAMIT/GLOBK, di dapatkan nilai dan arah pergeseran vektor horisontal setiap stasiun GPS pada fase *interseismic* Gempa Mentawai 2008 sebagai berikut:

- SLBU : 0,0331 m ke arah S 60,40° W
- BSAT : 0,1179 m ke arah S 36,17° W
- PPNJ : 0,0236 m ke arah S 22,66° E
- PRKB : 0,0806 m ke arah S 45,60° W
- LNNG : 0,1108 m ke arah S 12,14° W

- b) Gempa Mentawai 2008 ini adalah akibat dari *thrust-faulting* perbatasan lempeng Australia dan Sunda. Sehingga selain mengakibatkan deformasi di bidang horisontal juga menghasilkan deformasi di sumbu vertikal. Berikut nilai *coseismic* akibat gempa Mentawai 2008 pada setiap stasiun GPS :

- SLBU : 0,2220 m pada sumbu horisontal dan 0,1415 m pada sumbu vertikal.
- BSAT : 0,0121 m pada sumbu horisontal dan 0,0021 m pada sumbu vertikal.
- PPNJ : 0,0432 m pada sumbu horisontal dan -0,0092 m pada sumbu vertikal.
- PRKB : 0,0051 m pada sumbu horisontal dan 0,0002 m pada sumbu vertikal.

- LNNG : 0,0067 m pada sumbu horisontal dan -0,0007 m pada sumbu vertikal.
- c) Nilai dan arah pergeseran vektor horisontal setiap stasiun GPS pada fase *postseismic* Gempa Mentawai 2008 sebagai berikut:
- SLBU : 0,1020 m ke arah S 29,40° W
 - BSAT : 0,0659 m ke arah S 21,07° W
 - PPNJ : 0,0309 m ke arah S 49,87° E
 - PRKB : 0,0385 m ke arah S 31,09° W
 - LNNG : 0,0636 m ke arah S 9,96° W

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini untuk ke depannya adalah sebagai berikut:

- a) Melakukan penelitian analisa deformasi fase Gempa Mentawai 2008 dengan menggunakan *software* pengolah data GPS yang berbeda untuk membandingkan hasil penelitian ini.
- b) Melakukan analisa regangan pada seluruh fase Gempa Mentawai 2008.
- c) Melakukan analisa pergerakan vektor dengan menggunakan data harian pengamatan GPS (DoY) yang lebih lama.
- d) Melakukan analisa deformasi fase Gempa Mentawai 2008 pada seluruh stasiun GPS SuGAR.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Hasanuddin Z. 2009. "Deformasi Koseismik dan Pascaseismik Gempa Yogyakarta 2006 dari Hasil Survei GPS." *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 4 No.4 Desember 275-284.
- Abidin, Hassanudin, and Hassanudin Abidin. 2006. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Jakarta: PT PRADNYA PARAMITA.
- Andreas, H. 2007. *Karakteristik deformasi strain and stress*. Bandung: Prodi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB.
- Andriyani, Gina. 2012. *Kajian Regangan Selat Bali Berdasarkan Data GNSS Kontinu Tahun 2009-2011*. Semarang: Teknik Geodesi Universitas Diponeoro.
- Anjasmara, Ira Mutiara. 2014. *Catatan Kuliah: Struktur Bumi dan Tektonik Lempeng*. Surabaya: Kuliah Minggu-2 Geodinamika.
- BMKG. 2010. *Tentang*. November 5. http://inatews.bmkg.go.id/tentang_eq.php.
- Chrzanowski A, Chen Y.Q, Secord J. 1986. "Geometrical analysis of deformation surveys." *Deform Measurment Workshop*. MIT, Boston: Proceedings MIT. 170-206.
- Herring, T. A. 2010. *GAMIT Reference Manual GPS Analysis at MIT Release 10.4*. San Diego: Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.

- Herring, T. A., King R. W. 2010. *GLOBK Reference Manual 10.4*. San Diego: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences.
- Kamaruddin, Basri. 2012. *Kajian Pustaka Tenrang Perbendaan Gempa Bumi Aceh 26 Desember dengan 11 April 2012*. Taruna Geofisika.
- Kristanto, A. S. 1991. *Structural Analysis of The Sumatran Fault Zone Around The Semangka Bay, Lampung South Sumatera*. Proa IAGI20th Annual Convention.
- Kuang, Shanlong. 1996. *Geodetic Network Analysis & Optimal Design*. Michigan: Ann Arbor Press, Inc.
- Permana. 2012. "Analisa Deformasi Gempa Padang Tahun 2009 Berdasarkan Data Pengamatan GPS Kontinu Tahun 2009-2011." *J. Geofisika Vol.13 No.2*.
- Purnomo, Budi Joko. 2014. *Analisa Deformasi Kawasan Vulkanik Aktif dengan Menggunakan Data GPS September 2013 - Maret 2014 (Studi Kasus : Gunung Merapi, DIY)*. Surabaya: Teknik Geomatika ITS.
- Rusmen, M. Ridholfi. 2012. "Analisis Deformasi Gempa Mentawai Tahun 2010 Berdasarkan Data ." *J. Geofisika Vol. 13 No.2* 42-51.
- Sudrajat, Adjat. 2014. *Analisa Pergerakan Lempeng di Daerah Pantai Barat Pulau Sumatera*. Yogyakarta: Teknik Geodesi Universitas Gadjah Mada.
- Sule. 2007. "THE UTILIZATION OF RESISTIVITY AND GPS METHODS IN LANDSLIDE MONITORING: CASE STUDY AT PANAWANGAN AREA – CIAMIS,

INDONESIA." *The 32nd HAGI, The 36th IAGI, The 29th IATMI Annual Conference and Exhibition.*

SOPAC. 2014. The Scripps Orbit and Permanent Array Center. 02 January. Accessed 12 20, 2014. <http://sopac.ucsd.edu/nearbySites.shtml>.

USGS. 2011. *USGS*. 02 01. Accessed 12 02, 2014. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2008/us2008nwbg/>.

Yusfania, Meiriska. 2014. "The Utilization of Spatial Filtering for Tectonic Strain Study Based on SUGAR Data 2006-2008 (Study Case : The September 2007 Bengkulu Earthquake)." *FIG Congress 2014, Kuala Lumpur, Malaysia.*

Zhang, Fei-peng. 2007. "*GPS Data Processing at GFZ for Monitoring the Vertical Motion of Global Tide Gauge Benchmarks.*" *Scientific Technical Report*, Postdam: Geo Forshungs Zentrum

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

FILE station.info

```
*          Gamit station.info
*
*          Generated by SOPAC on 29-Oct-2012 @ 22:00:09 UTC
*          Send questions, comments or concerns to
devel@gpsmail.ucsd.edu
*
*SITE Station Name      Session Start      Session Stop
Ant Ht  HtCod Ant N      Ant E   Receiver Type    Vers
SwVer  Receiver SN      Antenna Type      Dome    Antenna
SN
  BAKO BAKOSURTANAL      2008 002 00 00 00  2008 150 23 59
59 1.6480 DHPAB 0.0000 0.0000  LEICA GRX1200GGPRO
8.10                8.10 351819
LEIAT504GG          LEIS 200067

  HUTB Hutbay            2008 002 00 00 00  2008 150 23 59
59 0.0000 DHPAB 0.0000 0.0000  TRIMBLE NETRS
1.1-2                2.11 4427235664
TRM41249.00         NONE N/A

  HYDE Hyderabad        2008 002 00 00 00  2008 150 23 59
59 0.0000 DHPAB 0.0000 0.0000  LEICA GRX1200GGPRO
5.60                2.11 355192
LEIAT504GG          NONE N/A

  NTUS Nanyang Technolo  2008 002 00 00 00  2008 150 23 59
59 0.0776 DHPAB 0.0000 0.0000  LEICA GRX1200GGPRO
8.10                8.10 352729
LEIAT504GG          NONE 200240

  SLBU Silabu, North Pa  2008 002 00 00 00  2008 150 23 59
59 0.0083 DHPAB 0.0000 0.0000  ASHTECH MICROZ
CN00                2.10 UC2200404020
ASH701945B_M        SCIT CR_____

  LNNG Lunang            2008 002 00 00 00  2008 150 23 59
59 0.0083 DHPAB 0.0000 0.0000  ASHTECH MICROZ
2.10                2.10 UC2200350009
ASH701945B_M        SCIT CR5200348015

  PRKB Parak Batu        2008 002 00 00 00  2008 150 23 59
59 0.0083 DHPAB 0.0000 0.0000  ASHTECH MICROZ
2.10                2.10 UC2200404007
ASH701945B_M        SCIT CR_____009
```

```

PPNJ Pulau Panjang      2008 002 00 00 00 2008 150 23 59
59 0.0083 DHPAB 0.0000 0.0000 ASHTECH MICROZ
2.10      2.10 UC2200404____
ASH701945B_M SCIT CR_____

BSAT Bulasat           2008 002 00 00 00 2008 150 23 59
59 0.0083 DHPAB 0.0000 0.0000 ASHTECH MICROZ
2.10      2.10 UC2200350006
ASH701945B_M SCIT CR620021804

MIZU Mizusawa          2008 002 00 00 00 2008 150 23 59
59 0.1206 DHPAB 0.0000 0.0000 SEPT POLARX2
2.5.0     2.11 232
TPSCR3_GGD NONE 217-0371

POHN Pohnpei           2008 002 00 00 00 2008 150 23 59
59 0.0000 DHPAB 0.0000 0.0000 ASHTECH UZ-12
CQ00      2.11 UC2200524005
ASH701945C_M SCIS 21301

KARR Karratha          2008 002 00 00 00 2008 150 23 59
59 0.0020 DHPAB 0.0000 0.0000 ASHTECH UZ-12
CN00      2.10 UC2200302005 AOAD/M_T
AUST 320

SHAO Shanghai          2008 002 00 00 00 2008 150 23 59
59 0.0814 DHPAB 0.0000 0.0000 ASHTECH UZ-12
CQ00      2.10 UC2200524020 AOAD/M_T
JPLA 429

```

FILE sites.default

```

# File to control the use of stations in the processing
#
# Format: site expt keyword1 keyword2 ....
#
# where the first token is the 4- or 8-character site name
# (GAMIT uses only
# 4 characters, GLOBK allows only 4 unless there are
# earthquakes or renames),
# the second token is the 4-character experiment name, and
# the remaining
# tokens, read free-format, indicate how the site is to be
# used in the processing.

```

```

# All sites for which there are RINEX files in the local
directory will be used
# automatically and do not need to be listed.
#
# GAMIT:
# ftpnrx = sites to ftp from rinex data archives.
# ftpraw = sites to ftp from raw data archives.
# localrx = sites names used to search for rinex files on
your local system.
#           (required in conjunction with rnxwnd path
variable set in process.defaults).
# xstinfo = sites to exclude from automatic station.info
updating.
# xsite   = sites to exclude from processing, all days or
specified days
# GLOBK:
# glrepu = sites used in the GLRED repeatability solution
(default is to use all)
# glreps = sites used for reference frame definition
(stabilization) in
#           GLOGR for the GLRED repeatability solution
(default is IGS list)
# glts   = sites to plot as time series from GLRED
repeatability solution (default is all)
#
# Replace 'expt' with your experiment name and edit the
following to list sites needed from external archive
all_sites nauf xstinfo
BAKO_GPS nauf localrx xstinfo
HYDE_GPS nauf localrx xstinfo
NTUS_GPS nauf localrx xstinfo
KARR_GPS nauf localrx xstinfo
HUTB_GPS nauf localrx xstinfo
BSAT_GPS nauf localrx xstinfo
LNNG_GPS nauf localrx xstinfo
PPNJ_GPS nauf localrx xstinfo
PRKB_GPS nauf localrx xstinfo
SLBU_GPS nauf localrx xstinfo
SHAO_GPS nauf localrx xstinfo
MIZU_GPS nauf localrx xstinfo
POHN_GPS nauf localrx xstinfo
# templates for removing sites
ttht_gps expt xsite:1999_256-1999_278 glreps
xsite:1999_300-1999_365
thht_gps expt xsite glreps

```

FILE process.default

```
# process.defaults
#
# Do not remove any of these entries. To by-pass a
function, set the value to null: ""

## LOCAL DIRECTORIES
# Directory for translation of raw data
set rawpth = "$procdir/raw"
# Directory path for raw archives (search all levels); e.g.
/data18/simon
set rawfnd = ""
# Input files for RINEX translators
set mpth = "$procdir/mkrinex"
# RINEX files directory
set rpth = "$procdir/rinex"
# Directory path for RINEX archives (search all levels);
e.g. /data18/simon
set rnxfnd = ""
# Broadcast orbit directory
set bpth = "$procdir/brdc"
# IGS files directory
set ipth = "$procdir/igs"
# G-files directory
set gpth = "$procdir/gfiles"
# GAMIT and GLOBK tables directory
set tpth = "$procdir/tables"
# Output gifs directory
set gifpth = "$procdir/gifs"
# Globk solution directory
set glbpth = "$procdir/gsoln"
# Globk binary h-file directory
set glfpth = "$procdir/glbf"
# Directory path for other h-files (search all levels); e.g.
/raid1/tah/SIO_GLL
set hfnd = ""
# Template files
set templatepth = "$procdir/templates"
# Place to store temporary control files
set cpth = "$procdir/control"
# Archive root directory (cannot be null)
set archivepth = "$procdir/archive"

## FTP INFO FOR REMOTE FILES
# Raw data archive
# set rawarchive = 'chandler.mit.edu'
# set rawdir = 'pub/continuous/mitnet'
# set rawlogin = "anonymous simon@chandler.mit.edu"
```

```

# Addresses for CDDSI, SOPAC, IGSCB, UNAVCO, BKG, IGN, USNO
are given in template/ftp_info

##GAMIT
# Set sampling interval, number of epochs, and start time
for processing
  set sint = '30'
  set nepc = '2880'
  set stime = '0 0'
# Variables for updating tables
  set stinf_unique = "-u"
  set stinf_nosort = "-nosort"
  set stinf_slthgt = "2.00"
# Set "Y" to use RINEX header coordinates not in lfile or
apr file
  set use_rxc      = "N"
# Broadcast orbits
  set brdc = 'brdc'
# Minimum x-file size to be processed (Def. 300 blocks; most
OS use 1 Kb blocks)
  set minxf = '1'
# Set search window for RINEX files which might contain data
for day - default check the previous day
  set rx_doy_plus = 0
  set rx_doy_minus = 1
# Default globk .apr file
  set aprf = itrfr08_comb.apr
# Set compress (copts), delete (dopts) and archive (aopts)
options. (Don't forget to set the archivepth.)
# Possible d-, c-, and a- opts: D, H, ao, ac, as, b, c, d,
e, g, h, i, j, k, l, m, o, p, q, t, x, ps, all"
  set dopts = ( c )
  set copts = ( x k ao )
  set aopts = ''
# Set the rinex ftp archives (defined in ftp_info) you would
like to look for data in.
# (Default archives searched are: sopac, cddis and unavco).
set rinex_ftpsites = (sopac cddis unavco)

## RESOURCES
# Minimum raw disk space in Mbytes
  set minraw = '100'
# Minimum rinex disk space in Mbytes
  set minrinex = '100'
# Minimum archive disk space in Mbytes
  set minarchive = '100'
# Minimum working disk space in Mbytes
  set minwork = '500'

```

```
## SYSTEM-DEPENDENT SETTINGS
# UNIX df command must be set to return the correct form
# Most machines (
  set udf = 'df -mk'
#   but note that if you have free > 1 Tb, you will need to
change this to Mb
# set udf = 'df -m'
# HP
# set udf = 'bdf'
# UNIX mail command
# Most machines
  set umail = 'mail -s'
# HP
# set umail = 'mailx -s'
# Mail address for sending the processing report (if '' will
default to `whoami` in sh_gamit)
  set mailto = ''
# Host name for email and anonymous ftp password use (if ''
will default to `hostname` in sh_gamit)
  set machine = ''
# Ghostscript path
set gspath = '/usr/bin'
# ImageMagick path fir gif conversion
# set impath = '/usr/bin/X11'
set impath = '/usr/bin'
```

FILE globk_comb.cmd

```
* Globk command file to combine two or more daily h-file
and/or daily h-files
* into longer spans (e.g weekly or monthly) (no velocities)
*   --works also for daily repeatabilities

* << column 1 must be blank if not comment >>

# renames and earthquakes for global IGS analysis--add local
earthquakes and renames
eq_file ../tables/itrf08_comb.eq
make_svs ../tables/svs_exclude.dat
com_file globk_comb.com
srt_file glb.srt

apr_file ../tables/itrf08_comb.apr

sol_file globk_comb.sol

# increase chii and rotation tolerance to include all files
for diagnostics
# or to account for naturally large rotations when you have
only short baselines
x max_chi 50. 10 2000

in_pmu ../tables/pmu.usno

crt_opt NOPR
# rwk 080916: add MIDP option when combining files of more
than one day
prt_opt BLEN BRAT VSUM
org_opt CMDS PSUM GDLF BLEN VSUM UTM
org_cmd glorg_comb.cmd
* org_out globk_comb.org      ! Normally org file name is
generated from print
*                               ! file name and is not given
in command file.

* Apply the pole tide whenever not applied in GAMIT
app_ptid all

* Stations loose for glorg
apr_neu all 20 20 20 0 0 0
mar_neu all .000001 .000001 .000009 0 0 0
```

```

* Satellites loose for combination w/ global h-files
apr_svs all 0.5 0.5 0.5 .005 .005 .005 .01 .01 F F F F F
F F F F F F F F F F
# tight if not combining with global data (may omit if
GAMIT in BASELINE mode)
# Do not use Z option on make_svs command above
x apr_svs all 100 100 100 10 10 10 1 1 .02 .02 .02 .02 .02
.02 .02 .02 .02

* If using old SIO h-files, unlink radiation-pressure for
satellites with the wrong block number
# PN22/SV22 1993-2003
x apr_svs prn_22 100 100 100 10 10 10 0R
# PN16/SV56 2003 2 7 - 2003 3 31
x apr_svs prn_16 100 100 100 10 10 10 0R
# PN21/SV45 2003 4 1 - 2003 4 30
x apr_svs prn_21 100 100 100 10 10 10 0R
# PN22/SV47 2006 12 1 - 2007 2 28
x apr_svs prn_22 100 100 100 10 10 10 0R
# PN12/SV58 2006 11 17 - 2007 2 28
x apr_svs prn_12 100 100 100 10 10 10 0R
# PN25/SV62 possibly mismatched radition-pressure models
in some MIT or SOPAC h-files
x apr_svs prn_25 100 100 100 10 10 10 0R
# Unlink rad parms for some days that have chi2 > 0.3
x apr_svs all 100 100 100 10 10 10 0R

* apply constraints before 1994
x apr_svs all .05 .05 .05 .005 .005 .005 .01 .01 F F F F F
F F F F F F F

# EOP loose if estimating rotation in glorg
x apr_wob 100. 100. 10. 10.
x apr_ut1 100. 10.
x mar wob 36500 36500 365 365
x mar_ut1 36500 365

# EOP tight if translation-only stabilization in glorg
apr_wob .25 .25 .001 .001
apr_ut1 .25 .25
mar wob 1 1 .001 .001
mar_ut1 1 .001

# Comment out this line if not saving a combined H-file
out_glb H-----_comb.GLX

* Estimate translation - .0005 m**2/yr = 15 mm/half-yr
apr_tran .005 .005 .005 0 0 0

```

```
x mar_tran .0025 .0025 .0025 0 0 0
```

FILE globk_vel.cmd

```
* GLOBK command file for multiyear velocity solution from
combination h-files
* --- works for repeats but set site and EOP velocity sigmas
to 0

# renames and earthquakes for global IGS analysis--add local
earthquakes and renames
eq_file ../tables/itrf08_comb.eq
make_svs ../tables/svs_exclude.dat
com_file globk_comb.com
srt_file glb.srt
sol_file globk_comb.sol

apr_file ../tables/itrf08_comb.apr

# increase chii and rotation tolerance to include all files
for diagnostics
x max_chi 30 50 2000.0

in_pmu ../tables/pmu.usno

crt_opt NOPR
prt_opt NOPR GDLF CMDS
org_opt PSUM CMDS GDLF VSUM FIXA RNRP
org_cmd glorg_vel.cmd
# org_out globk_vel.org      ! Normally use name generated
from print file name

apr_neu all 10 10 10 0.2 0.2 0.2

# EOP loose if estimating rotation in glorg
x apr_wob 10 10 10 10
x apr_ut1 10 10
x mar_wob 3650 3650 365 365
x mar_ut1 365 365

* Estimate translation - .0005 m**2/yr = 15 mm/half-yr
apr_tran .005 .005 .005 0 0 0
x mar_tran .0025 .0025 .0025 0 0 0
```

```
# Optionally put a long uselist and/or sig_neu and mar_neu
reweight in a source file
x source ../tables/uselist
x source ../tables/monthly_reweights
```

FILE glorg_comb.cmd

```
* Glorg command file for daily- to monthly solutions (no
velocities)
* --works also for daily repeatabilities

* << column 1 must be blank if not comment >>

apr file ../tables/itrf08_comb.apr
# Substitute a regional solution for spatial filtering:
x apr_file ../tables/vel_070425c.apr

# Position and rotation (moderate to large spatial scale, at
least 6 well-distributed stations)
x pos_org xtran ytran ztran xrot yrot zrot

x Position only (if small network, EOP constrained in globk)
pos_org xtran ytran ztran

# Natural downweight of heights is 10 in variance (3 in
sigma)
x cnd_hgtv 10 10 2.0 2.0
x Downweight heights 20-1000 if necessary (but need more
stations for redundancy)
x cnd_hgtv 1000 1000 2.0 2.0

# Set n-sigma for keeping station between 2.5 and 4.0
x stab_it 4 0.5 2.5

# List of stations for stabilization (default is 'all')
stab_site clear
stab_site BAKO NTUS HUTB KARR SHAO MIZU POHN
source ../tables/itrf08_comb.apr
# substitute or augment a regional list for spatial
filtering
source ../tables/itrf08_comb.apr
```

FILE glorg_vel.cmd

```
*Glorg command file for velocity solution
*
# apr site file(s)
# ITRF96 for global stabilization
#NNR frame
apr_file ../tables/itrf08_comb.apr

# Define the stabilization frame
source ../tables/stab_site.global

# Translation and rotation (moderate to large spatial
scale, at least 6 well-distributed stations)
# Use SCALE for <OPTION> to estimate scale
  pos_org xtran ytran ztran xrot yrot zrot
  rate_org xtran ytran ztran xrot yrot zrot
SCALE pos_org xtran ytran ztran xrot yrot zrot  scale
SCALE rate_org xtran ytran ztran xrot yrot zrot  scale

# Position only (small network, EOP constrained in globk)
x pos_org xtran ytran ztran
x rate_org xtran ytran ztran

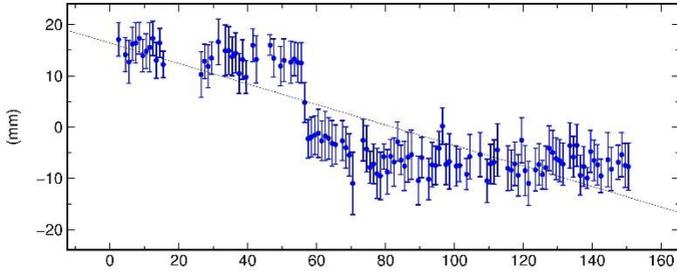
# Natural downweight of heights is 10 in variance (3 in
sigma)
  cnd_hgtv 10 10 3. 3.
# Downweight heights 20-1000 if necessary (but need more
stations for redundancy)
x cnd_hgtv 100 100 3. 3.

# Set n-sigma for keeping station between 2.5 and 4.0
stab_it 4 0.8 3.0

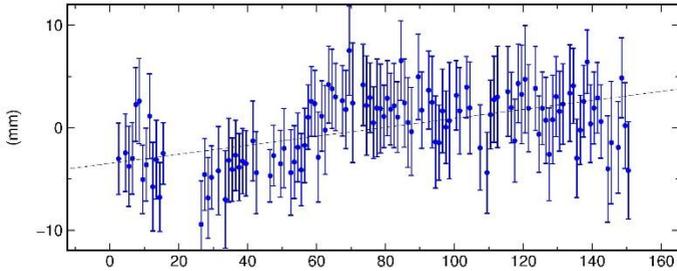
# List of stations for stabilization (default is 'all')
stab_site clear
stab_site BAKO NTUS HUTB KARR SHAO MIZU POHN
source ../tables/itrf08_comb.apr
# substitute or augment a regional list for spatial
filtering
source ../tables/itrf08_comb.apr
```

TIME SERIES SELURUH FASE GEMPA MENTAWAI STASIUN PPNJ PADA DOY 002-150 TAHUN 2008.

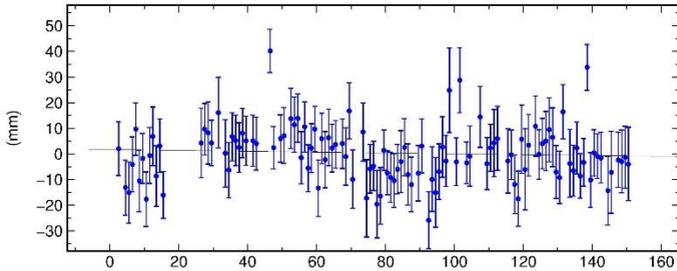
PPNJ North Offset -221969.445 m
rate(mm/yr)= -72.93 ± 2.93 nrms= 1.35 wrms= 5.1 mm # 114



PPNJ East Offset 11081116.765 m
rate(mm/yr)= 15.97 ± 3.05 nrms= 0.74 wrms= 2.8 mm # 114

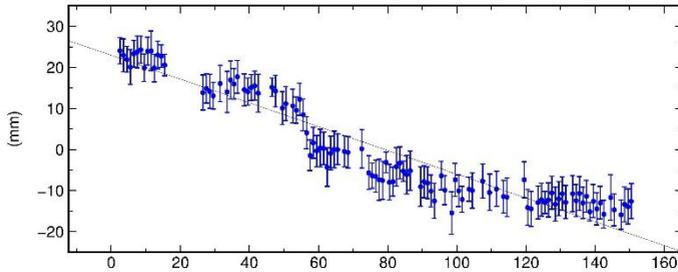


PPNJ Up Offset 34.696 m
rate(mm/yr)= -6.01 ± 8.61 nrms= 1.00 wrms= 10.5 mm # 114

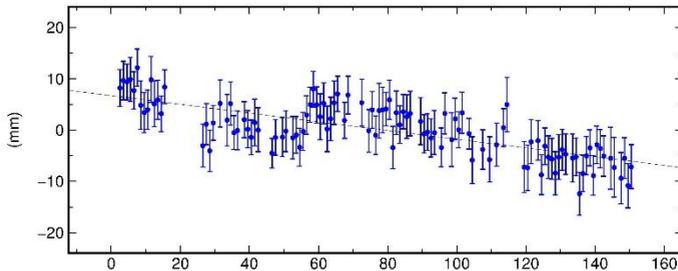


TIME SERIES SELURUH FASE GEMPA MENTAWAI STASIUN BSAT PADA DOY 002-150 TAHUN 2008.

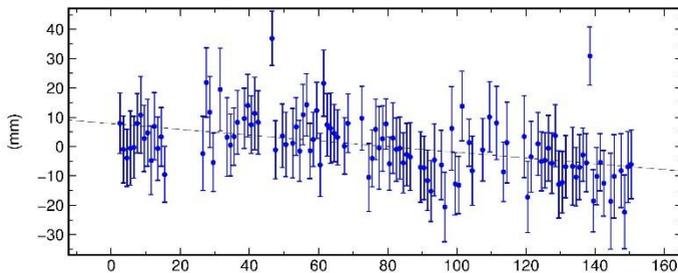
BSAT North Offset -342496.796 m
rate(mm/yr)= -105.73 \pm 2.95 nrms= 1.12 wrms= 4.2 mm # 108



BSAT East Offset 11147531.092 m
rate(mm/yr)= -30.99 \pm 3.19 nrms= 0.89 wrms= 3.5 mm # 108

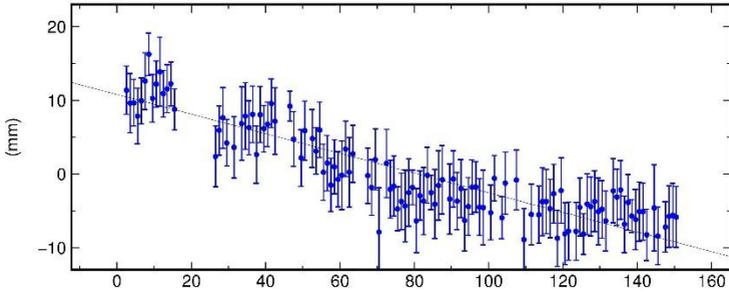


BSAT Up Offset 6.547 m
rate(mm/yr)= -35.63 \pm 8.87 nrms= 0.84 wrms= 9.1 mm # 108

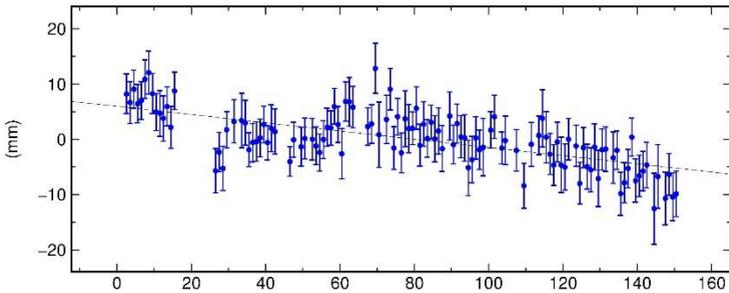


TIME SERIES SELURUH FASE GEMPA MENTAWAI STASIUN PRKB PADA DOY 002-150 TAHUN 2008.

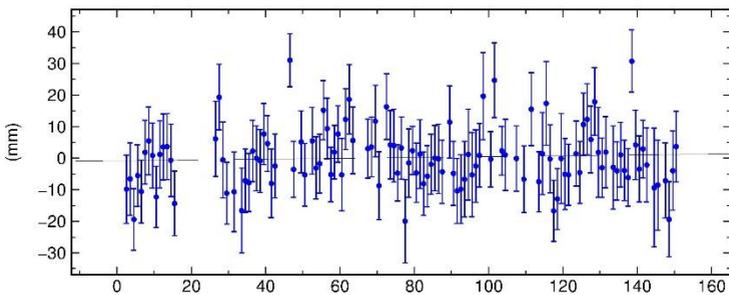
PRKB North Offset -330241.156 m
rate(mm/yr)= -48.72 ± 2.86 nrms= 0.75 wrms= 2.8 mm # 116



PRKB East Offset 11161468.464 m
rate(mm/yr)= -27.17 ± 3.00 nrms= 0.94 wrms= 3.6 mm # 116

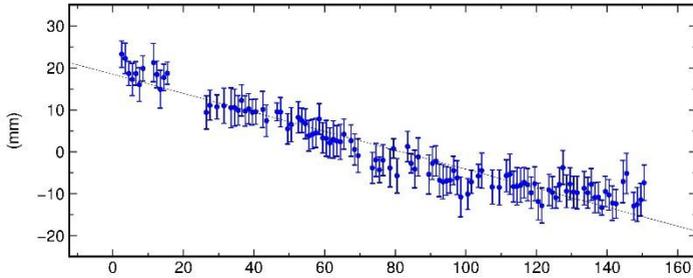


PRKB Up Offset 21.547 m
rate(mm/yr)= 4.83 ± 8.38 nrms= 0.91 wrms= 9.4 mm # 116

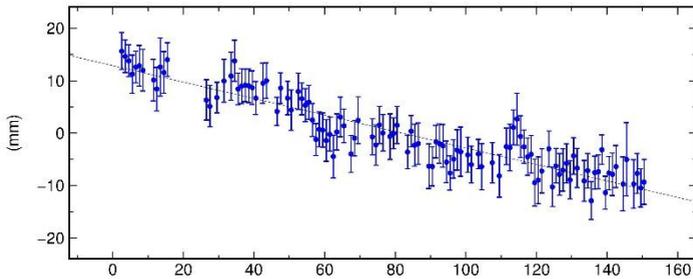


TIME SERIES SELURUH FASE GEMPA MENTAWAI STASIUN LNNG PADA DOY 002-150 TAHUN 2008.

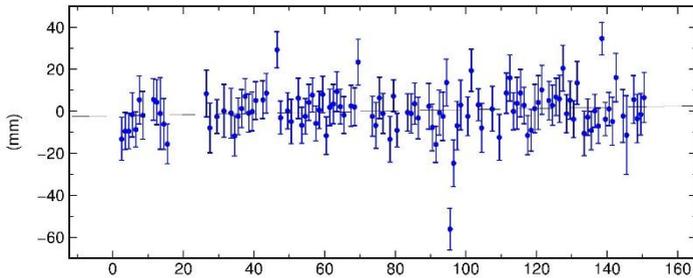
LNNG North Offset -254401.312 m
rate(mm/yr)= -82.61 ± 2.83 nrms= 0.77 wrms= 2.7 mm # 110



LNNG East Offset 11251724.822 m
rate(mm/yr)= -57.35 ± 2.94 nrms= 0.78 wrms= 2.8 mm # 110



LNNG Up Offset 39.513 m
rate(mm/yr)= 10.78 ± 8.03 nrms= 1.09 wrms= 10.5 mm # 110



MAIN SHOCK PLOT-GMT SCRIPT

```
grdimage indo.nc -R94/103/-6/2 -JM20c -CGMT_globe.cpt -K -
Ba2f2WSne:: -X3 -Y2 --LABEL_FONT_SIZE=1p --
HEADER_FONT_SIZE=13p --HEADER_OFFSET=0.05i > TA.ps

pscoast -JM -R -K -O -Dh -Na/thinnest,brown -Ir/0.1p,blue -
Lf96/-5.6/1/250+1+jr --LABEL_FONT_SIZE=15p --
HEADER_FONT_SIZE=15p --HEADER_OFFSET=0.04i -
Tf95/1/0.3i/3 >> TA.ps

psxy -R -JM -W10.0 -Sf0.8i/0.1ilt -Dh -Gblack -m -O -K
trench >> TA.ps

psxy -R -JM -Wthicker -O -K transform -Dh -m >> TA.ps

psxy -R -JM -Wthinner,- -m -O -K GSFML_SF_FZ_KM.gmt >> TA.ps
psxy -R -JM -Wthinnest,- -m -O -K GSFML_SF_ER_KM.gmt >>
TA.ps

psxy ibukota -R -JM -Sc0.1 -W1 -G0/0/0 -O -K >> TA.ps

pstext textkota -R -JM -O -K >> TA.ps

psxy gempa08 -R -JM -Sa0.6 -W -G255/255/0 -O -K >> TA.ps

echo H 13 1 Gempa Mentawai 2008 >> legenda2
echo S 0.75i a 0.2i yellow 0.75p 1.0i Main Shock >> legenda2
echo H 12 1 Date : 2008-02-25 >> legenda2
echo H 12 1 Origin Time : 08:36:35 UTC >> legenda2
echo H 12 1 Longitude : 100.018 E >> legenda2
echo H 12 1 Latitude : 2.353 S >> legenda2
echo H 12 1 Depth : 35 Km >> legenda2
echo H 12 1 Magnitude : 7.0 >> legenda2

pslegend -R -JM -Dx0.4i/0.6i/3i/1.25i/B1 -O -F -U/0/-
3/"Tugas Akhir - 3511100064" legenda2 >> TA.ps

ps2raster -A -Tj -P TA.ps
```

SUGAR STATION PLOT-GMT SCRIPT

```
grdimage indo.nc -R94/103/-6/2 -JM20c -CGMT_globe.cpt -K -
Ba2f2WSne:: -X3 -Y2 --LABEL_FONT_SIZE=1p --
HEADER_FONT_SIZE=13p --HEADER_OFFSET=0.05i > TA1.ps
```

```
pscoast -JM -R -K -O -Dh -Na/thinnest,brown -Ir/0.1p,blue -  
Lf96/-5.6/1/250+1+jr --LABEL_FONT_SIZE=15p --  
HEADER_FONT_SIZE=15p --HEADER_OFFSET=0.04i -  
Tf95/1/0.3i/3 >> TA1.ps
```

```
psxy -R -JM -W10.0 -Sf0.8i/0.1ilt -Dh -Gblack -m -O -K  
trench >> TA1.ps
```

```
psxy -R -JM -Wthicker -O -K transform -Dh -m >> TA1.ps
```

```
psxy -R -JM -Wthinner,- -m -O -K GSFML_SF_FZ_KM.gmt >>  
TA1.ps
```

```
psxy -R -JM -Wthinnest,- -m -O -K GSFML_SF_ER_KM.gmt >>  
TA1.ps
```

```
echo 101.156 -2.270 LNNG LT > lnng.dat  
echo 99.972 -2.486 >> lnng.dat  
psxy lnng.dat -R -JM -O -K -Wthick,red,- >> TA1.ps
```

```
echo 100.284 -3.056 BSAT LT > bsat.dat  
echo 99.972 -2.486 >> bsat.dat  
psxy bsat.dat -R -JM -O -K -Wthick,red,- >> TA1.ps
```

```
echo 100.399 -2.946 PRKB LT > prkb.dat  
echo 99.972 -2.486 >> prkb.dat  
psxy prkb.dat -R -JM -O -K -Wthick,red,- >> TA1.ps
```

```
echo 99.603 -1.980 PPNJ LT > ppnj.dat  
echo 99.972 -2.486 >> ppnj.dat  
psxy ppnj.dat -R -JM -O -K -Wthick,red,- >> TA1.ps
```

```
echo 100.009 -2.747 SLBU LT > slbu.dat  
echo 99.972 -2.486 >> slbu.dat  
psxy slbu.dat -R -JM -O -K -Wthick,red,- >> TA1.ps
```

```
echo 101.156 -2.270 98 -2 LNNG LT Km kota From>> city.d  
echo 100.284 -3.056 98 -3 BSAT LT Km kota From>> city.d  
echo 100.399 -2.946 98 -4 PRKB LT Km kota From>> city.d  
echo 99.603 -1.980 98 -4.5 PPNJ LT Km kota From>> city.d  
echo 100.009 -2.747 98 -5 SLBU LT Km kota From>> city.d  
psxy -R -J -O -K -Ss0.2 -Gred -Wthinnest city.d >>TA1.ps
```

```
pstext textgps -R -JM -O -K >> TA1.ps
```

```
psxy ibukota -R -JM -Sc0.1 -W1 -G0/0/0 -O -K >> TA1.ps
```

```

pstext textkota -R -JM -O -K >> TA1.ps

pstext textjarak -R -JM -O -K >> TA1.ps

psxy gempa08 -R -JM -Sa0.6 -W -G255/255/0 -O -K >> TA1.ps

echo H 13 1 GPS STATION >> legenda22
echo S 0.75i a 0.2i yellow 0.75p 1i Epicenter >> legenda22
echo H 7 1 134.199 Km to LNNG >> legenda22
echo H 7 1 69.712 Km BSAT >> legenda22
echo H 7 1 71.237 Km to PRKB >> legenda22
echo H 7 1 69.738 Km to PPNJ >> legenda22
echo H 7 1 46.104 Km to SLBU >> legenda22
echo S 0.75i s 0.2i red 0.75p 0.85i SuGAR Occupied>>
legenda22
echo H 7 1 PPNJ, LNNG, PRKB, BSAT, SLBU >> legenda22

pslegend -R -JM -Dx0.4i/0.6i/3i/1.4i/B1 -O -F -U/0/-
3/"Tugas Akhir - 3511100064" legenda22 >> TA1.ps

ps2raster -A -Tj -P TA1.ps

```

PLOT VELO- INTERSEISMIC PHASE

```

grdimage indo.nc -R94/103/-6/2 -JM20c -CGMT_globe.cpt -K -
Ba2f2WSne:: -X3 -Y2 --LABEL_FONT_SIZE=1p --
HEADER_FONT_SIZE=13p --HEADER_OFFSET=0.05i > TA2.ps

pscoast -JM -R -K -O -Dh -Na/thinnest,brown -Ir/0.1p,blue -
Lf96/-5.6/1/250+1+jr --LABEL_FONT_SIZE=15p --
HEADER_FONT_SIZE=15p --HEADER_OFFSET=0.04i -
Tf95/1/0.3i/3 >> TA2.ps

psxy -R -JM -W10.0 -Sf0.8i/0.1ilt -Dh -Gblack -m -O -K
trench >> TA2.ps

psxy -R -JM -Wthicker -O -K transform -Dh -m >> TA2.ps

psxy -R -JM -Wthinner,- -m -O -K GSFML_SF_FZ_KM.gmt >>
TA2.ps
psxy -R -JM -Wthinnest,- -m -O -K GSFML_SF_ER_KM.gmt >>
TA2.ps

psxy GPS -R -JM -St0.6 -W -G255/0/0 -O -K >> TA2.ps

```

```

pstext textgps -R -JM -O -K >> TA2.ps

psxy ibukota -R -JM -Sc0.1 -W1 -G0/0/0 -O -K >> TA2.ps

pstext textkota -R -JM -O -K >> TA2.ps

psxy gempa08 -R -JM -Sa0.6 -W -G255/255/0 -O -K >> TA2.ps

psvelo velointer1 -R -JM -O -H0 -Se0.25m/0.05/7 -L -W1/0/0/0
-K >> TA2.ps

echo H 13 1 INTERSEISMIC PHASE >> legenda222
echo S 0.75i a 0.2i yellow 0.75p 1.0i Main Shock >>
legenda222
echo S 0.75i t 0.2i red 0.75p 1.0i SuGAR Station >>
legenda222
echo H 12 1 SuGAR Occupied : >> legenda222
echo H 12 1 PPNJ, LNNG, PRKB, BSAT, SLBU >> legenda222

pslegend -R -JM -Dx0.4i/0.6i/3i/1.2i/B1 -O -F -U/0/-
3/"Tugas Akhir - 3511100064" legenda222 >> TA2.ps

ps2raster -A -Tj -P TA2.ps

```

PLOT VELO- POSTSEISMIC PHASE

```

grdimage indo.nc -R94/103/-6/2 -JM20c -CGMT_globe.cpt -K -
Ba2f2WSne:: -X3 -Y2 --LABEL_FONT_SIZE=1p --
HEADER_FONT_SIZE=13p --HEADER_OFFSET=0.05i > TA3.ps

pscoast -JM -R -K -O -Dh -Na/thinnest,brown -Ir/0.1p,blue -
Lf96/-5.6/1/250+1+jr --LABEL_FONT_SIZE=15p --
HEADER_FONT_SIZE=15p --HEADER_OFFSET=0.04i -
Tf95/1/0.3i/3 >> TA3.ps

psxy -R -JM -W10.0 -Sf0.8i/0.1ilt -Dh -Gblack -m -O -K
trench >> TA3.ps

psxy -R -JM -Wthicker -O -K transform -Dh -m >> TA3.ps

psxy -R -JM -Wthinner,- -m -O -K GSFML_SF_FZ_KM.gmt >>
TA3.ps
psxy -R -JM -Wthinnest,- -m -O -K GSFML_SF_ER_KM.gmt >>

```

TA3.ps

```
psxy GPS -R -JM -St0.6 -W -G255/0/0 -O -K >> TA3.ps
```

```
pstext textgps -R -JM -O -K >> TA3.ps
```

```
psxy ibukota -R -JM -Sc0.1 -W1 -G0/0/0 -O -K >> TA3.ps
```

```
pstext textkota -R -JM -O -K >> TA3.ps
```

```
psxy gempa08 -R -JM -Sa0.6 -W -G255/255/0 -O -K >> TA3.ps
```

```
psvelo velopost1 -R -JM -O -H0 -Se0.25m/0.05/7 -L -W1/0/0/0  
-K >> TA3.ps
```

```
echo H 13 1 POSTSEISMIC PHASE >> legenda3  
echo S 0.75i a 0.2i yellow 0.75p 1.0i Main Shock >> legenda3  
echo S 0.75i t 0.2i red 0.75p 1.0i SuGAR Station >> legenda3  
echo H 12 1 SuGAR Occupied : >> legenda3  
echo H 12 1 PPNJ, LNNG, PRKB, BSAT, SLBU >> legenda3
```

```
pslegend -R -JM -Dx0.4i/0.6i/3i/1.2i/B1 -O -F -U/0/-3/"Tugas  
Akhir - 3511100064" legenda3 >> TA3.ps
```

```
ps2raster -A -Tj -P TA3.ps
```

PLOT VELO- HORIZONTAL COSEISMIC

```
grdimage indo.nc -R94/103/-6/2 -JM20c -CGMT_globe.cpt -K -  
Ba2f2WSne:: -X3 -Y2 --LABEL_FONT_SIZE=1p --  
HEADER_FONT_SIZE=13p --HEADER_OFFSET=0.05i > TA4.ps
```

```
pscoast -JM -R -K -O -Dh -Na/thinnest,brown -Ir/0.1p,blue -  
Lf96/-5.6/1/250+1+jr --LABEL_FONT_SIZE=15p --  
HEADER_FONT_SIZE=15p --HEADER_OFFSET=0.04i -  
Tf95/1/0.3i/3 >> TA4.ps
```

```
psxy -R -JM -W10.0 -Sf0.8i/0.1ilt -Dh -Gblack -m -O -K  
trench >> TA4.ps
```

```
psxy -R -JM -Wthicker -O -K transform -Dh -m >> TA4.ps
```

```
psxy -R -JM -Wthinner,- -m -O -K GSFML_SF_FZ_KM.gmt >>  
TA4.ps
```

```
psxy -R -JM -Wthinnest,- -m -O -K GSFML_SF_ER_KM.gmt >>  
TA4.ps
```

```

psxy GPS -R -JM -St0.6 -W -G255/0/0 -O -K >> TA4.ps
pstext textgps -R -JM -O -K >> TA4.ps
psxy ibukota -R -JM -Sc0.1 -W1 -G0/0/0 -O -K >> TA4.ps
pstext textkota -R -JM -O -K >>TA4.ps
psxy gempa08 -R -JM -Sa0.6 -W -G255/255/0 -O -K >> TA4.ps
psvelo velocos -R -JM -O -H0 -Se0.25m/0.05/7 -L -W1/0/0/0 -
K >> TA4.ps

echo H 13 1 HORIZONTAL COSEISMIC >> legendaintZ
echo S 0.75i a 0.2i yellow 0.75p 1.0i Main Shock >>
legendaintZ
echo S 0.75i t 0.2i red 0.75p 1.0i SuGAR Station >>
legendaintZ
echo H 12 1 SuGAR Occupied : >> legendaintZ
echo H 12 1 PPNJ, LNNG, PRKB, BSAT, SLBU >> legendaintZ

pslegend -R -JM -Dx0.4i/0.6i/3i/1.2i/B1 -O -F -U/0/-
3/"Tugas Akhir - 3511100064" legendaintZ >> TA4.ps

ps2raster -A -Tj -P TA4.ps

```

PLOT VELO- VERTICAL DISPLACEMENT

```

grdimage indo.nc -R94/103/-6/2 -JM20c -CGMT_globe.cpt -K -
Ba2f2WSne:: -X3 -Y2 --LABEL_FONT_SIZE=1p --
HEADER_FONT_SIZE=13p --HEADER_OFFSET=0.05i > TA5.ps

pscoast -JM -R -K -O -Dh -Na/thinnest,brown -Ir/0.1p,blue -
Lf96/-5.6/1/250+1+jr --LABEL_FONT_SIZE=15p --
HEADER_FONT_SIZE=15p --HEADER_OFFSET=0.04i -
Tf95/1/0.3i/3 >> TA5.ps

psxy -R -JM -W10.0 -Sf0.8i/0.1i1t -Dh -Gblack -m -O -K
trench >> TA5.ps

psxy -R -JM -Wthicker -O -K transform -Dh -m >> TA5.pss

psxy -R -JM -Wthinner,- -m -O -K GSFML_SF_FZ_KM.gmt >>

```

```
TA5.ps
psxy -R -JM -Wthinnest,- -m -O -K GSFML_SF_ER_KM.gmt >>
TA5.ps

psxy GPS -R -JM -St0.6 -W -G255/0/0 -O -K >> TA5.ps

pstext textgps -R -JM -O -K >> TA5.ps

psxy ibukota -R -JM -Sc0.1 -W1 -G0/0/0 -O -K >> TA5.ps

pstext textkota -R -JM -O -K >>TA5.ps
psxy gempa08 -R -JM -Sa0.6 -W -G255/255/0 -O -K >> TA5.ps
psvelo velopostZ -R -JM -O -H0 -Se0.25m/0.05/7 -L -W1/0/0/0
-K >> TA5.ps

echo H 13 1 VERTICAL COSEISMIC >> legendapostZ
echo S 0.75i a 0.2i yellow 0.75p 1.0i Main Shock >>
legendapostZ
echo S 0.75i t 0.2i red 0.75p 1.0i SuGAR Station >>
legendapostZ
echo H 12 1 SuGAR Occupied : >> legendapostZ
echo H 12 1 PPNJ, LNNG, PRKB, BSAT, SLBU >> legendapostZ

pslegend -R -JM -Dx0.4i/0.6i/3i/1.2i/B1 -O -F -U/0/-
3/"Tugas Akhir - 3511100064" legendapostZ >> TA5.ps

ps2raster -A -Tj -P TA5.ps
```

BIODATA PENULIS



Ihsan Naufal Muafiry lahir di Tasikmalaya, pada tanggal 25 Oktober 1993. Anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Sofyan Halim dan Lilis Suryani. Pendidikan formal yang ditempuhnya antara lain SD Islam Al-Azhar 23 Jatikramat, SMP Islam Al-Azhar 9 Bekasi dan SMA Negeri 5 Bekasi. Tahun 2011, penulis yang akrab dipanggil Ihsan ini diterima pada Program Studi Teknik Geomatika FTSP-ITS.

Riwayat organisasi penulis adalah sebagai *staff* Biro Kaderisasi Lembaga Dakwah Jurusan Teknik Geomatika ITS pada tahun 2012. Pada tahun 2013 penulis diamanahi untuk menjadi Ketua Lembaga Dakwah Jurusan Teknik Geomatika ITS yang berada di bawah organisasi induk mahasiswa yakni Himpunan Mahasiswa Teknik Geomatika ITS (HIMAGE-ITS). Di tahun ke-empat perkuliahannya, penulis terpilih sebagai anggota legislatif Badan Pengawas Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Geomatika ITS (BPM-HIMAGE ITS). Adapun riwayat karya tulis penulis adalah mendapatkan bantuan dana program perencanaan bisnis “Program Wirausaha Mahasiswa ITS” dengan judul yang ditawarkan “*Jarizz Pizza, Makanan Murah dan Bergizi*”. Kemudian di tahun ketiga perkuliahan, penulis memulai penelitian pertama bersama koleganya, terkait “Analisa Perubahan Nilai *Total Suspended Solid* di Selat Madura Akibat Pembuangan Lumpur Lapindo”, yang juga diterima untuk dipresentasikan secara *oral* di “*The 6th Indonesia Japan Joint Scientific Symposium* tahun 2014. Karya lain adalah terkait “Peran Toponimi Sebagai Sarana Pengembangan Potensi Desa” yang telah dipresentasikan dalam Simposium Nasional Teknik Geomatika tahun 2014.