



TUGAS AKHIR - RG 141536

**KAJIAN PENGAMATAN REGANGAN TEKTONIK
MENGUNAKAN DATA SUGAR (SUMATRAN
GPS ARRAY)
(Studi Kasus: Gempa Sumatra Barat tahun
2009)**

ACHMAD UMAR AZMI
NRP 3512 100043

Dosen Pembimbing
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
Meiriska Yufania, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL ASIGNMENT - RG 141536

**STUDY OBSERVATION OF TECTONIC STRAIN
USING SUGAR DATA (SUMATRAN GPS ARRAY)
(Case Study: The Earthquake of West
Sumatra in 2009)**

ACHMAD UMAR AZMI
NRP 3512 100043

Supervisors

Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
Meiriska Yusfania, S.T., M.T.

GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil Engineering and Planning
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**KAJIAN PENGAMATAN REGANGAN TEKTONIK
MENGUNAKAN DATA SUGAR (SUMATRAN GPS
ARRAY)**

(Studi Kasus: Gempa Sumatra Barat tahun 2009)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

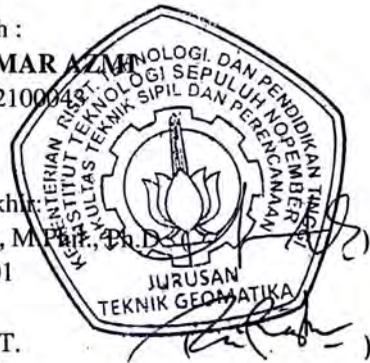
Pada

Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ACHMAD UMAR AZMI

NRP 3512100044



Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.P.
NIP. 19781231 200212 2 001
2. Meiriska Yusfania, S.T., M.T.
NIP. 19850510 201504 2 003

SURABAYA, JULI 2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KAJIAN PENGAMATAN REGANGAN TEKTONIK
MENGUNAKAN DATA SUGAR (SUMATRAN GPS
ARRAY)

(Studi Kasus: Gempa Sumatra Barat tahun 2009)

Nama Mahasiswa : Achmad Umar Azmi
NRP : 3511 100 043
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP – ITS
Pembimbing : 1. Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
2. Meiriska Yusfania, S.T., M.T.

ABSTRAK

Indonesia merupakan daerah pertemuan 3 lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia dan lempeng Pasifik. Pada daerah sekitar batas lempeng tersebut umumnya aktifitas tektonik utama terjadi, seperti misalnya subduksi, tumbukan (collision), pemekaran punggung tengah samudra, dan sesar transform. Akibatnya gempa bumi akan sering terjadi pada wilayah di sekitar batas-batas lempeng tersebut. Salah satu pulau yang sering mengalami gempa adalah pulau Sumatra yang berdekatan dengan zona subduksi antara lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Gempa besar yang pernah terjadi salah satunya adalah gempa Sumatra Barat tanggal 30 september 2009. Pemantauan deformasi kerak bumi akibat aktivitas gempa dapat dilakukan menggunakan teknologi GPS. Melalui pemantauan GPS secara kontinyu atau berkala dapat diketahui pergerakan deformasi yang terjadi sebelum dan sesudah gempa. Dalam penelitian ini, dilakukan pemantauan deformasi dengan GPS menggunakan metode pemantauan kontinyu dari titik-titik stasiun SuGAR (Sumatran GPS Array). Penelitian ini menghasilkan nilai kecepatan dan arah pergeseran lempeng tektonik serta mendapatkan besar dan pola regangan mengacu pada titik-titik stasiun SuGAR di daerah Sumatra barat dan sekitarnya. Kecepatan pergeseran horizontal tertinggi pada fase interseismik adalah 0.01368 m/1.5 bulan arah barat daya pada stasiun NGNG

sedangkan pada fase poseismik adalah 0.23719 m/3 bulan arah barat daya pada stasiun NGNG. Kecepatan pergeseran vertikal tertinggi pada fase interseismik adalah 0.01073 m/1.5 bulan arah up-lift pada stasiun SLBU sedangkan pada fase poseismik adalah 0.54010 m/3 bulan arah up-lift pada stasiun NGNG. Untuk besar dan pola regangan fase interseismik, pola kompresi terbesar terjadi antara segmen segitiga NGNG-PKRT-PSKI sebesar -0.3854 μ strain sedangkan pola ekstensi terbesar terjadi pada segmen segitiga TIKU-MSAI-TLLU sebesar 0.1025 μ strain. Pada fase poseismik, Pola kompresi terbesar terjadi pada segmen segitiga PSKI-NGNG-PKRT sebesar -1.6203 μ strain sedangkan pola ekstensi terbesar terjadi pada segmen segitiga yang sama pula dengan besar 3.4052 μ strain.

Kata Kunci: Gempa Sumatra Barat 2009, GPS SuGAR, Kecepatan Pergeseran , Regangan Tektonik.

STUDY OBSERVATION OF TECTONIC STRAIN USING
SUGAR DATA (SUMATRAN GPS ARRAY)
(Case Study: The Earthquake of West Sumatra in 2009)

Name : Achmad Umar Azmi
NRP : 3511 100 043
Department : Geomatics Engineering FTSP-ITS
Supervisors :1. Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
2. Meiriska Yusufania, S.T., M.T.

ABSTRACT

Indonesia is the confluence of three major tectonic plates, namely Indo-Australia, Eurasia and the Pacific plate. In the area around the plate boundaries are generally the major tectonic activity occurs, such as subduction, collisions, the expansion of the Middle back of the ocean, and transform fault. As a result of the earthquake will often occur not far from plate boundaries. One of the Islands that are often experienced earthquake is Sumatra as it is adjacent to the subduction zone between the Indo-Australia and the Eurasian plate. The massive earthquake that ever happened on this island is the West Sumatra earthquake on 30 september 2009. Monitoring the deformation of the Earth's crust due to earthquake activities can be done using the Global Positioning System (GPS). Using GPS the monitoring can be done continuously or periodically to observe the deformation that occurs before and after the earthquake. This study will conduct deformation analysis using continuous monitoring station SuGAR (Sumatran GPS Array). The result show the speed and direction of the shift of tectonic plates is getting bigger and strain pattern refers to the points in the area of SuGAR station and its surrounding areas. The highest speed of horizontal shift on phase of interseismic is 0.01368 m/1.5 month towards the Southwest in station NGNG whereas in phase of poseismic is 0.23719 m/3 month towards the southwest in station NGNG. The highest speed of vertical shift on phase of

interseismik is 0.01073 m/1.5 month with up-lift direction in station SLBU while on phase poseismic is 0.54010 m/3 month with up-lift direction at the station NGNG. The large strain on phases of interseismik, the largest compression occurs between segments of triangle NGNG-PKRT-PSKI is 0.3854 μ strain while the largest extension occurs on a triangular segment TIKU-MSAI-TLLU is 0.1025 μ strain. In poseismik, the largest compression occurs on segments of triangle PSKI-PKRT-NGNG is 1.6203 μ strain whereas the largest extension occurs on the same triangular segments is 3.4052 μ strain.

Key words: Earthquake of West Sumatra 2009, GPS SuGAR, speed shifting, Tectonic Strain.

DAFTAR ISI

LAMAN JUDUL	i
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
HALAMAN PENGESAHAN	viii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Gempa Bumi.....	5
2.2 Global Positioning Sistem	9
2.2.1 Sinyal GPS	10
2.2.2 Penentuan Posisi dengan GPS	11
2.2.3 Kesalahan dan Bias pada GPS.....	14

2.3 Uji Statistik	18
2.4 Vektor Pergeseran	19
2.5 Regangan	20
2.6 Software GAMIT/GLOBK.....	24
2.7 Software GMT	25
2.8 SuGAr	25
2.9 International GNSS Service	25
2.10 Penelitian Terdahulu.....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Lokasi Penelitian	27
3.2 Data dan Peralatan	27
3.2.1 Data	27
3.2.2 Peralatan	28
3.3 Metodologi Penelitian	29
3.3.1 Tahapan Penelitian	29
3.2.3 Tahapan Pengolahan Data.....	32
BAB IV HASIL DAN ANALISA	37
4.1 Hasil Penelitian.....	37
4.1.1 Hasil Pengolahan GAMIT	37
4.1.2 Hasil Pengolahan GLOBK	40
4.1.3 Nilai Pergeseran.....	42
4.1.4 Hasil kecepatan pergeseran	46
4.1.5 Regangan	50
4.2 Analisa Penelitian.....	53

4.2.1 Analisa Kecepatan Pergeseran	53
4.2.2 Analisa Regangan	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN.....	69
BIODATA PENULIS.....	79

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Magnitude dan kelas kekuatan gempa.....	8
Tabel 2. 2 Skala intensitas <i>Modified mercalli</i> (MMI).....	9
Tabel 4. 1 Hasil nilai pergeseran horizontal fase interseismik	43
Tabel 4. 2 Hasil nilai pergeseran horizontal fase koseismik.....	43
Tabel 4. 3 Hasil nilai pergeseran horizontal fase koseismik.....	44
Tabel 4. 4 Hasil nilai pergeseran vertikal fase interseismik.....	45
Tabel 4. 5 Hasil nilai pergeseran vertikal fase poseismik.....	46
Tabel 4. 6 Hasil kecepatan pergeseran horizontal fase interseismik	47
Tabel 4. 7 Hasil kecepatan pergeseran horizontal fase poseismik	48
Tabel 4. 8 Hasil kecepatan pergeseran vertikal fase interseismik	49
Tabel 4. 9 Hasil kecepatan pergeseran vertikal fase poseismik...	50
Tabel 4. 10 Parameter-parameter regangan fase interseismik	51
Tabel 4. 11 Parameter-parameter regangan fase poseismik.....	51
Tabel 4. 12 Nilai <i>principal strain</i> fase interseismik.....	52
Tabel 4. 13 Nilai <i>principal strain</i> fase poseismik	53

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Tektonik lempeng dunia	5
Gambar 2. 3 Metode penentuan posisi dengan GPS	11
Gambar 2. 5 Ilustrasi pengamatan GPS diferensial	14
Gambar 2. 6 Regangan normal.....	20
Gambar 2. 7 Regangan geser	21
Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian	27
Gambar 3. 2 Tahapan Penelitian	29
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data.....	32
Gambar 4. 1 Nilai Postfit NRMS.....	38
Gambar 4. 2 Nilai Wide Lane	39
Gambar 4. 3 Nilai Narrow Lane	40
Gambar 4. 4 Gambar <i>time series</i> seuruh fase stasiun PSKI	41
Gambar 4. 5 Hasil plot kecepatan pergeseran horizontal fase interseismik	55
Gambar 4. 6 Hasil plot kecepatan pergeseran horizontal fase poseismik.....	56
Gambar 4. 7 Hasil plot kecepatan pergeseran vertikal fase interseismik	57
Gambar 4. 8 Hasil plot kecepatan pergeseran vertikal fase poseismik.....	57
Gambar 4. 9 Regangan fase interseismik	58
Gambar 4. 10 Regangan fase poseismik.....	59

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. <i>Time series</i> stasiun PSKI.....	69
Lampiran 2. <i>Time series</i> stasiun PKRT	70
Lampiran 3. <i>Time series</i> stasiun SLBU	71
Lampiran 4. <i>Time series</i> stasiun TIKU	72
Lampiran 5. <i>Time series</i> stasiun KTET.....	73
Lampiran 6. <i>Time series</i> stasiun NGNG	74
Lampiran 7. <i>Time series</i> stasiun MSAI	75
Lampiran 8. <i>Time series</i> stasiun TLLU.....	76
Lampiran 9. Plot GMT.....	77

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan daerah pertemuan 3 lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia dan lempeng Pasifik. Lempeng Indo-Australia bertumbukan dengan lempeng Eurasia di lepas pantai Sumatra, Jawa dan Nusa Tenggara, sedangkan lempeng Eurasia dengan lempeng Pasifik di utara pulau Irian Jaya dan Maluku utara. Pertemuan lempeng Indo-Australia dengan Eurasia di selatan Jawa hampir tegak lurus (gerak lempeng Hindia-Australia dalam menghampiri lempeng Sunda mempunyai arah yang tetap sejak Miosen Tengah yaitu dengan arah $N200^{\circ}E$, maka sudut interaksi antara lempeng Hindia dengan Pulau Jawa akan berkisar antara 70° atau hampir tegak lurus), berbeda dengan pertemuan lempeng di wilayah Sumatra yang mempunyai subduksi miring dengan kecepatan 5-6 cm/tahun (Bock, 2000). Pada daerah sekitar batas lempeng tersebut umumnya aktifitas tektonik utama berlangsung, seperti misalnya subduksi, tumbukan (*collision*), pemekaran punggung tengah samudra, dan sesar *transform*. Akibatnya gempa bumi dan letusan gunung api akan sering terjadi tidak jauh dari batas-batas lempeng tersebut.

Pulau Sumatra termasuk salah satu pulau terbesar di Indonesia. Pulau ini merupakan salah satu wilayah dengan aktifitas tektonik paling aktif di dunia. Pulau Sumatra mengakomodasi tumbukan lempeng Indo-Australia yang mensubduksi lempeng Eurasia dengan kecepatan 5-6 cm/tahun (Prawirodirdjo, 2000). Pulau Sumatra dicirikan oleh tiga sistem tektonik, berurutan dari barat ke timur yaitu zona subduksi *oblique* dengan sudut penunjaman yang landai, sesar Mentawai dan zona sesar besar Sumatra. Hingga saat ini, lempeng Indo-Australia masih terus bersubduksi di bawah lempeng Eurasia yang mengakibatkan Pulau Sumatra menjadi

salah satu pulau di Indonesia dengan aktivitas tektonik yang cukup tinggi dan rawan bencana.

Zona subduksi di Pulau Sumatra yang sering sekali menimbulkan gempa tektonik memanjang membentang sampai ke Selat Sunda dan berlanjut hingga selatan Pulau Jawa. Subduksi ini mendesak lempeng Eurasia dari bawah Samudera Hindia ke arah barat laut di Sumatra dan mendesak 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 millimeter hingga beberapa sentimeter per tahun ini memang tidak terasa oleh manusia karena dorongan lempeng Indo-Australia terhadap bagian utara Sumatra kecepatannya hanya 5.2 cm per tahun, sedangkan yang di bagian selatannya kecepatannya 6 cm per tahun. Pergerakan lempeng di daerah barat Sumatra yang miring posisinya ini lebih cepat dibandingkan dengan penyusupan lempeng di selatan Jawa. Hal ini mengakibatkan Pulau Sumatra rawan terjadi gempa tektonik yang disebabkan dari pergerakan lempeng tersebut.

Salah satu gempa besar yang terjadi di pulau ini adalah gempa Sumatra Barat pada tahun 2009 yang memiliki kekuatan 7.6 M_w terjadi pada tanggal 30 september 2009 pukul 17:16:10 WIB (10:16:10 UTC) dengan kedalaman 81.0 km pada lokasi koordinat 0.720°S 99.867°E (<http://earthquake.usgs.gov>). Lokasi gempa berada di lepas pantai Sumatra, sekitar 50 km barat laut Kota Padang.

Dengan adanya perkembangan teknologi yang semakin maju saat ini, pemantauan deformasi kerak bumi dapat menggunakan teknologi 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 kontinyu.

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.

Penyedia data GPS di kawasan Pulau Sumatra salah satunya adalah SuGAR¹. SuGAR adalah sekumpulan jaring stasiun GPS yang terpasang dan terinstal disepanjang Pulau Sumatra dan pulau-pulau sekitar batas lempeng samudera. Jaring 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 Sumatra. SuGAR setiap harinya merekam data GPS dengan akurasi tinggi secara kontinyu dan dapat dimanfaatkan untuk studi deformasi.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a) Berapakah besar kecepatan pergeseran dan bagaimana arah lempeng tektonik mengacu pada titik-titik stasiun SuGAR di daerah Sumatra Barat dan sekitarnya akibat gempa Sumatra Barat 30 September 2009?
- b) Berapakah besar regangan lempeng tektonik mengacu pada stasiun SuGAR di daerah Sumatra Barat dan sekitarnya akibat gempa Sumatra Barat 30 September 2009?
- c) Bagaimana pola regangan stasiun SuGAR di daerah Sumatra Barat dan sekitarnya akibat gempa Sumatra Barat 30 September 2009?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

- a. Studi kasus yang digunakan adalah gempa Sumatra Barat 30 September 2009.

- b. Penelitian mengenai analisa deformasi dan regangan tektonik akibat gempa bumi Sumatra Barat 2009 menggunakan data GPS secara kontinyu.
- c. Data GPS yang digunakan adalah data stasiun GPS SuGAR pada bulan Agustus sampai dengan bulan Desember tahun 2009.
- d. Titik stasiun SuGAR yang digunakan berjumlah 8 titik stasiun SuGAR di Sumatra Barat dan sekitarnya.
- e. Pengolahan data GPS menggunakan perangkat lunak pengolah data GPS ilmiah GAMIT/GLOBK.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah :

- a) Menentukan besar vektor kecepatan pergeseran lempeng tektonik mengacu pada titik-titik stasiun SuGAR di daerah Sumatra Barat dan sekitarnya akibat gempa Sumatra Barat 30 September 2009.
- b) Menentukan besar regangan lempeng tektonik mengacu pada stasiun SuGAR di daerah Sumatra Barat dan sekitarnya akibat gempa Sumatra Barat 30 September 2009.
- c) Mengetahui pola regangan lempeng tektonik mengacu pada stasiun SuGAR di daerah Sumatra Barat dan sekitarnya akibat gempa Sumatra Barat 30 September 2009.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memperkaya informasi mengenai aktivitas tektonik di wilayah zona subduksi Sumatra serta memberikan informasi mengenai vektor pergeseran yang diakibatkan oleh gempa Sumatra Barat tahun 2009 guna peningkatan informasi untuk mitigasi bencana.

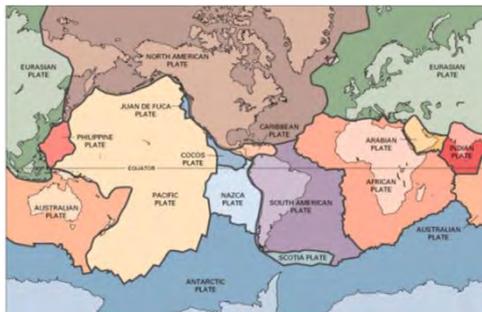
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 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 gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi (BMKG, 2010).

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 astenosfer (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 3 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. 1 Tektonik lempeng dunia
(<http://earthquake.usgs.gov>)

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 (Andreas, 2007), 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.

Berdasarkan salah satu karakteristik gempa yaitu memiliki potensi terulang kembali (*earth cycle*), gempa yang terjadi diwaktu tertentu akan terulang lagi dimasa yang akan datang dalam periode waktu tertentu. Satu siklus dari gempa bumi ini biasanya berlangsung dalam kurun waktu puluhan sampai ribuan tahun. Data mengenai siklus gempa bumi pada suatu daerah dapat diperoleh dari catatan sejarah gempa yang didokumentasikan atau melalui penelitian geologi seperti penelitian stratigrafi batuan atau terumbu karang, likuifaksi, paleotsunami dan lain-lain. Berdasarkan data geologi batuan bisa diprediksi kejadian gempa yang telah lampau, yaitu dengan mempelajari pola pertumbuhan terumbu karang (*coral microatolls*) dan menghitung kejadian serta perulangan gempa bumi.

Proses terjadinya gempa bumi dapat dibagi menjadi tiga tahapan yaitu :

1. Tahapan interseismik

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.

2. Tahapan pre-seismik
Merupakan tahapan sesaat sebelum terjadinya gempa bumi.
3. Tahapan koseismik
Merupakan tahapan ketika terjadinya gempa bumi dimana energi yang telah terakumulasi dari tahapan *interseismic* dilepaskan secara tiba-tiba (Andreas, 2007).

Gempa dapat diukur dan dinyatakan dalam skala *Richter* (M) atau skala *Modified mercalli* (MMI). Skala *Richter* mengukur *Magnitude* gempa berdasarkan amplitudo yang terjadi sehingga lebih objektif. Sedangkan *Modified Mercalli* mengukur *Intensitas* gempa berdasarkan efeknya terhadap manusia atau bangunan sehingga lebih bersifat subjektif.

Magnitudo M menunjukkan perbandingan amplitudo A pada jarak 100 km dari epicenter dengan amplitudo standar $A_0 = 0.001$ mm dalam skala logaritma.

$$M = \text{Log}_{10} \frac{A}{A_0} \quad (2. 1)$$

Sedangkan energi E yang dilepaskan oleh gempa berskala M *Richter* adalah :

$$\text{Log}_{10}E = 11.4 + 1.5M \quad (2. 2)$$

Berikut adalah tabel yang menggambarkan tingkatan magnitudo dan kekuatan gempa, pengaruh-pengaruhnya, serta perkiraan jumlah gempa yang terjadi disetiap tahunnya. Hanya gempa-gempa dengan $M \geq 5$ yang perlu ditinjau dalam perencanaan struktur.

Tabel 2. 1 Magnitude dan kelas kekuatan gempa

Magnitude Gempa	Kelas Kekuatan gempa	Pengaruh Gempa	Perkiraan Kejadian Pertahun
< 2,5	Minor earthquake	Pada umumnya tidak dirasakan, tetapi dapat direkam oleh seismograf	900.000
2,5 s/d 4,9	Light earthquake	Selalu dapat dirasakan, tetapi hanya menyebabkan kerusakan kecil	30.000
5,0 s/d 5,9	Moderate earthquake	Menyebabkan kerusakan pada bangunan struktur-struktur lain	500
6,0 s/d 6,9	Strong earthquake	Kemungkinan dapat menyebabkan kerusakan besar, pada daerah dengan populasi tinggi	100
7,0 s/d 7,9	Major earthquake	Menimbulkan kerusakan yang serius	20
$\geq 8,0$	Great earthquake	Dapat menghancurkan/leburkan daerah yang dekat dengan pusat gempa	Satu setiap 5-10 tahun

Karena skala *Mercalli* bersifat subjektif, maka untuk suatu kerusakan yang diakibatkan oleh gempa, pengamatan yang dilakukan oleh beberapa orang akan mempunyai pendapat yang berbeda mengenai tingkat kerusakan yang terjadi. Berikut ini tingkatan kekuatan gempa dengan skala MMI dalam table 2.2 berikut :

Tabel 2. 2 Skala intensitas *Modified mercalli* (MMI)

Skala Intensitas	Keterangan
I	Tidak terasa, hanya tercatat oleh alat pencatat yang peka
II	Getaran terasa oleh orang yang sedang istirahat, terutama orang yang berada di lantai dan di atasnya
III	Benda-benda yang tergantung bergoyang, bergetar ringan
IV	Getaran seperti truk lewat. Jendela, pintu dan barang pecah belah bergemerincing
V	Getaran terasa oleh orang di luar gedung, orang tidur terbangun, benda-benda tidak stabil di atas meja terguling atau jatuh, pintu bergerak menutup dan membuka
VI	Getaran terasa oleh semua orang, banyak orang takut dan keluar rumah, berjalan kaki sulit, kaca jendela pecah, meja dan kursi bergerak
VII	Sulit berdiri, getaran terasa oleh pengendara motor dan mobil, genteng diatap terlepas
VIII	Pengemudi mobil terganggu, tembok bangunan retak
IX	Semua orang panik, tembok bangunan mengalami kerusakan berat, pipa-pipa dalam tanah putus
X	Sebagian konstruksi portal dan temboknya rusak beserta pondasinya, tanggul dan bendungan rusak berat, rel kereta api bengkok sedikit, banyak terjadi tanah longsor
XI	Rel kereta api rusak berat, pipa-pipa di dalam tanah rusak
XII	Terjadi kerusakan total, bangunan-bangunan mengalami kerusakan, barang-barang terlempar ke udara

2.2 Global Positioning Sistem

GPS atau NAVSTAR GPS (*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning Sistem*), merupakan sebuah sistem yang dapat menginformasikan posisi secara global kepada penggunanya.

Pada prinsipnya, penentuan posisi dengan GPS dilakukan dengan mengamati satelit-satelit GPS yang memancarkan sinyal-sinyal yang memiliki informasi tentang posisi satelit yang bersangkutan serta jaraknya dari pengamat. Dengan mengamati satelit dalam jumlah yang cukup, pengamat dapat menentukan posisi dan kecepatannya. Setiap satelit GPS memiliki struktur kode yang unik sehingga memungkinkan *receiver* GPS untuk mengenali

dan membedakan sinyal yang datang dari satelit yang berbeda (Seeber, 2003).

2.2.1 Sinyal GPS

Sinyal GPS dibagi dalam tiga komponen, yaitu penginformasi jarak (kode) yang berupa kode-P(Y) dan kode $-C/A$, penginformasi posisi satelit (*navigation message*), dan gelombang pembawa (*carrier wave*) L1 dan L2.

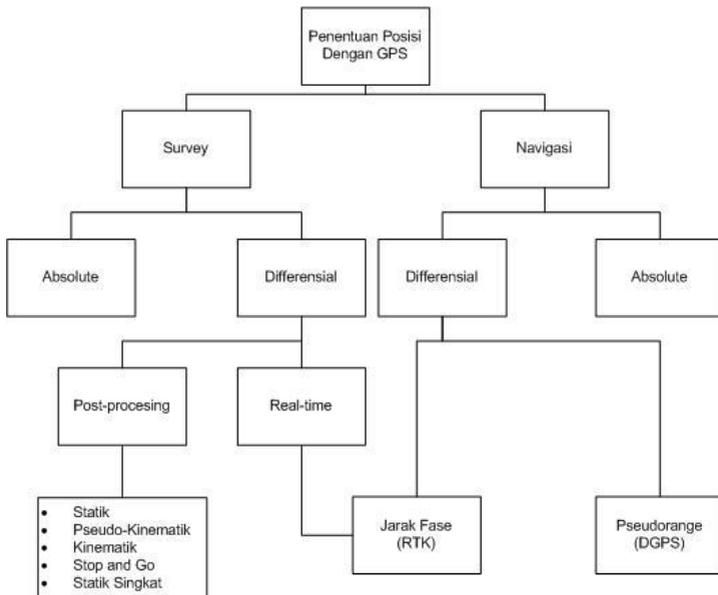
Terdapat dua kode *pseudo-random noise* (PRN) yang digunakan sebagai penginformasi jarak. Kode yang pertama adalah kode P (*Precise* atau *private*) yang digunakan untuk kepentingan militer Amerika Serikat dan pihak berwenang lainnya. Kode P didesain untuk *precise positioning service* (PPS), memiliki panjang gelombang sekitar 30 m. Kode P terdapat pada gelombang pembawa L1, L2, dan L5. Kode yang kedua adalah kode C/A (*Coarse Acquisition* atau *Clear Access*) yang tersedia untuk kepentingan sipil. Kode C/A didesain untuk *standard positioning service* (SPS), memiliki panjang gelombang sekitar 300 m. Kode C/A hanya terdapat pada gelombang L1. Setiap satelit GPS memiliki struktur kode yang unik sehingga memungkinkan *receiver* GPS untuk mengenali dan membedakan sinyal yang datang dari satelit yang berbeda.

Disamping kode-kode, sinyal GPS juga membawa pesan navigasi yang berisi informasi tentang koefisien koreksi jam satelit, parameter orbit, almanak satelit, UTC, parameter koreksi ionosfer, informasi mengenai konstelasi dan kesehatan satelit, serta *broadcast ephemeris* (orbit satelit). Kode-kode dan pesan navigasi tersebut dibawa ke pengamat dari satelit oleh gelombang pembawa. Selain itu terdapat tiga gelombang pembawa yang digunakan oleh masyarakat sipil, yaitu L1 dengan frekuensi 1,57542 GHz, L2 dengan frekuensi 1227.60 MHz, dan yang terbaru adalah gelombang L5 dengan frekuensi 1,17645 GHz (Hofmann-Wellenhof, 2008). Adanya pengukuran dual frekuensi dengan L1 dan L2 memiliki keuntungan untuk mengeliminasi bias ionosfer dan meningkatkan ambiguitas resolusi terutama untuk

pengukuran dengan tingkat presisi tinggi. Gelombang L5 memiliki kemampuan *ranging* memiliki kode pengukuran yang lebih baik daripada kode L1 C/A (Kornhauser, 2006).

2.2.2 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. Pada pengamatan dengan GPS, yang bisa diukur hanyalah jarak antara pengamat dengan satelit dan bukan vektornya. Oleh sebab itu, penentuan posisi pengamat dilakukan dengan melakukan pengamatan terhadap beberapa satelit sekaligus secara simultan dan tidak hanya terhadap satu satelit.



Gambar 2. 2 Metode penentuan posisi dengan GPS

Posisi yang diberikan oleh GPS adalah posisi tiga dimensi (X,Y,Z ataupun j, l, h) yang dinyatakan dalam datum WGS (*World Geodetic Sistem*) 1984. Dalam GPS, titik yang akan ditentukan posisinya dapat diam (*static positioning*) ataupun bergerak (*kinematic positioning*). Posisi titik dapat ditentukan dengan menggunakan satu receiver GPS terhadap pusat bumi dengan menggunakan metode *absolute (point) positioning*, ataupun terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya (*station referensi*) dengan menggunakan metode *differential (relative) positioning* yang menggunakan minimal dua receiver GPS. Disamping itu GPS dapat memberikan posisi secara instan (*real time*) ataupun sesudah pengamatan setelah data pengamatannya diproses secara lebih ekstensif (*post processing*) yang biasanya dilakukan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih baik. Adapun pengelompokan metode penentuan posisi dengan GPS berdasarkan mekanisme pengaplikasiannya dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2 1 Metode penentuan posisi dengan GPS

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

A. Metode Absolut

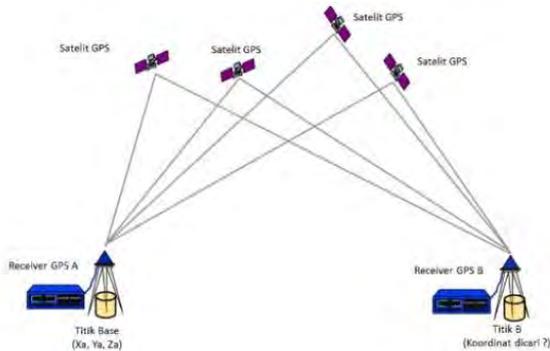
Penentuan posisi secara absolut (*absolute positioning*) adalah metode penentuan posisi yang paling mendasar dari GPS. Posisi suatu titik direferensikan terhadap pusat dari sistem koordinat dalam hal ini adalah geocenter untuk GPS. Data yang digunakan adalah pseudorange, sehingga ketelitian yang dihasilkan tidak

begitu tinggi. Melalui satelit GPS dilakukan pengukuran vektor jarak (p) 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.

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.

B. Metode Diferensial

Ketelitian penentuan posisi secara absolut yang dijelaskan di atas dapat ditingkatkan dengan menggunakan penentuan posisi secara diferensial (relatif). Pada penentuan posisi secara diferensial, posisi suatu titik ditentukan relatif terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya. Adapun biasanya titik yang akan ditentukan posisinya dinamakan *rover*, sedangkan titik yang posisinya telah diketahui dinamakan *base/master*. Pengamatan GPS dengan metode ini membutuhkan 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.



Gambar 2. 3 Ilustrasi pengamatan GPS diferensial (Ramadhon, 2013)

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.

2.2.3 Kesalahan dan Bias pada GPS

Dalam perjalanannya dari satelit hingga menuju antena di permukaan bumi, sinyal GPS akan dipengaruhi oleh 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 antena *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 ephemeris adalah kesalahan dimana orbit satelit yang dilaporkan oleh ephemeris satelit tidak sama dengan orbit satelit yang sebenarnya. Kesalahan ephemeris tersebut kemudian akan mempengaruhi ketelitian dari koordinat titik-titik (absolut maupun relatif) yang ditentukan. Dalam penentuan posisi secara relatif, efek bias ephemeris satelit akan semakin besar jika semakin panjang baseline yang diamati.

Kesalahan orbit satelit GPS pada dasarnya dapat disebabkan oleh tiga faktor secara bersama-sama, yaitu :

- i. Kekurangtelitian pada proses perhitungan orbit satelit oleh stasiun-stasiun pengontrol satelit.
- ii. Kesalahan dalam prediksi orbit untuk periode waktu setelah uploading ke satelit.
- iii. Penerapan kesalahan orbit yang sengaja diterapkan, seperti dalam kasus penerapan *Selective Availability* (SA) yang sejak 2 Mei 2000 telah ditiadakan.

Beberapa cara yang dapat diaplikasikan untuk mereduksi efek kesalahan orbit, yaitu:

- 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

Ion-ion bebas (elektron) dalam lapisan ionosfer akan mempengaruhi propagasi sinyal GPS. Dalam hal ini ionosfer akan mempengaruhi kecepatan, arah, polarisasi, dan kekuatan GPS yang melaluinya. Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk mereduksi efek bias ionosfer, yaitu :

- i. Menggunakan data GPS dari dua frekuensi (L1 dan L2)
- ii. Melakukan 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 antara lain:

- 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-kontinyuan 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 antena GPS melalui dua atau lebih lintasan yang berbeda. 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

f. Ambiguitas Fase

Ambiguitas fase adalah jumlah gelombang penuh yang tidak dapat terukur oleh receiver GPS. Selama receiver GPS mengamati sinyal secara kontinyu (tidak terjadi *cycle slips*), maka ambiguitas fase akan selalu sama untuk setiap epok.

g. Kesalahan jam

Kesalahan jam ada dua, yaitu kesalahan jam receiver dan jam satelit. Kesalahan dari salah satu jam akan langsung mempengaruhi jarak, baik pseudorange maupun jarak fase. Selisih antara kedua jam yang terlibat dapat di perkecil (semakin teliti hasil yang didapat) dengan :

- a. Membuat acuan ke sistem waktu yang sama antara jam receiver dan jam satelit (sistem waktu UTC)
- b. Menyinkronkan satu sama lain
- c. Menjaga kestabilannya

2.3 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 data GPS adalah 90%. Artinya bahwa data GPS akan dianggap *outlier* apabila data tersebut melebihi 3 kali *root-mean-square* (RMS), dengan rumus RMS sebagai berikut (Nikolaidis dalam Yusfania, 2014):

$$\sigma = \pm \sqrt{\left(\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n}\right)} \quad (2.3)$$

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

2.4 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). Salah satu cara untuk menghitung besarnya kecepatan vektor pergeseran masing-masing titik adalah metode linier fit, yaitu memanfaatkan pendekatan fungsi linier yang dirumuskan sebagai berikut :

$$y = ax + b \quad (2.4)$$

Keterangan :

x = waktu pengamatan (tahun + DOY/365)

y = data pada waktu pengamatan

a dan b = nilai yang ditentukan berdasarkan kumpulan data pengamatan

Dengan metode kuadrat terkecil, solusi persamaan adalah sebagai berikut :

$$X = (A^t P A)^{-1} \cdot (A^t P F) \quad (2.5)$$

Keterangan :

A dan F = matrik desain dan matrik identitas

X = parameter yang dicari (a dan b)

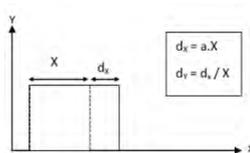
a = menunjukkan besarnya pergeseran
 P = matrik bobot

2.5 Regangan

Regangan adalah perubahan bentuk pada suatu materi yang meliputi perubahan pada ukuran, bentuk, serta volume akibat reaksi dari tegangan (*stress*) seperti yang dikutip dari (Segall dan Davis, 1997). Sebuah materi yang diberikan gaya akan menyebabkan terjadinya deformasi, di mana beberapa bagian dari materi akan berpindah atau dapat dikatakan dapat terjadi pergeseran (*displacement*). Pergeseran tersebut berkaitan dengan perubahan posisi pada satu materi.

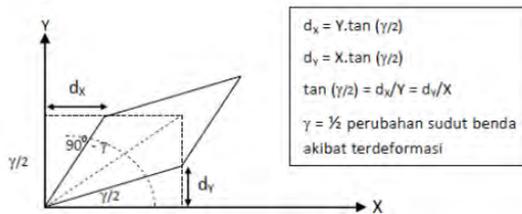
Regangan terbagi ke dalam dua jenis, yaitu :

- Regangan normal (*normal strain*)
 Regangan normal merupakan perbandingan (*ratio*) antara perubahan panjang objek dengan panjang objek sebelum terdeformasi.



Gambar 2. 4 Regangan normal
 (Hanna, 2012)

- Regangan Geser (*shear strain*)
 Regangan geser atau regangan menyilang merupakan perubahan sudut pada suatu objek pada saat terdeformasi.



Gambar 2. 5 Regangan geser
(Hanna, 2012)

Analisis deformasi dapat dilakukan secara geometrik (Chrzanowski et al., 1986), yaitu analisis regangan dengan hanya mengamati status geometri (ukuran dan dimensi) objek yang diamati. Data hasil pengamatan geodetik terhadap efek-efek respon suatu materi terhadap gaya yang bekerja padanya dapat membantu untuk menyusun suatu model matematik yang mewakili jenis deformasi. Analisis geometrik ini dapat dikelompokkan menjadi 2, yaitu :

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

Terdapat bermacam-macam metode dalam melakukan survei deformasi, seperti metode konvensional dengan menggunakan total stasion ataupun dengan menggunakan metode sipat datar. Dengan adanya perkembangan teknologi, survei deformasi dan geodinamika juga dapat dilakukan dengan menggunakan satelit, seperti menggunakan GPS.

2.1.1 Analisis Regangan

Dalam melakukan analisis regangan terlebih dahulu dihitung vektor pergeseran setiap titik pengamatan, yaitu koordinat toposentrik kala (n+1) dikurangkan terhadap kala sebelumnya (ke-n).

$$\begin{pmatrix} dn \\ de \\ du \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nT(n+1) \\ eT(n+1) \\ uT(n+1) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} nT(n) \\ eT(n) \\ uT(n) \end{pmatrix}; \text{ jika } n = 0 \rightarrow \\ \begin{pmatrix} nT(1) \\ eT(1) \\ uT(1) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} nT(0) \\ eT(0) \\ uT(0) \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Keterangan :

$nT(0)$, $eT(0)$, $uT(0)$ = koordinat Toposentrik pada kala ke-0

$nT(1)$, $eT(1)$, $uT(1)$ = koordinat Toposentrik pada kala ke-1

adapun besar dan arah vektor pergeseran arah horizontal yaitu :

$$ds = \sqrt{dn^2 + de^2} \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{de}{dn} \right) \quad (2.7)$$

setelah mendapatkan vektor pergeseran setiap titik pengamatan, tahapan selanjutnya adalah menghitung nilai regangan dengan menggunakan model regangan yang terdiri dari 9 parameter yaitu 6 parameter regangan dan 3 parameter rotasi. Titik ikat yang akan dihitung nilai regangannya adalah titik stasiun SuGAR dengan titik IGS sebagai titik ikat. Tujuan penggunaan titik ikat adalah untuk memberikan pola pergeseran yang konsisten. Pada perhitungan deformasi metode 9 parameter ini hubungan fungsional antara vektor pergeseran dan parameter-parameter deformasi dalam koordinat toposentrik dinyatakan sebagai berikut (Ma'ruf, 2001):

$$dn = \varepsilon_{nn} n + \varepsilon_{ne} e + \Omega_{ne} e \quad (2.8)$$

$$de = \varepsilon_{ne} n + \varepsilon_{ee} e - \Omega_{ne} n \quad (2.9)$$

dalam notasi matrik dinyatakan sebagai berikut :

$$d = Bc$$

$$d = [dn \ de]^T$$

keterangan :

$$B = \begin{pmatrix} n & e & e \\ n & e & -n \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$c = \begin{pmatrix} \varepsilon_{nn} & \varepsilon_{ne} \\ \varepsilon_{ne} & \varepsilon_{ee} \\ \Omega_{ne} & \Omega_{ne} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

d = vektor pergeseran

B = matriks desain

c = parameter-parameter deformasi

parameter-parameter regangan dan deformasi dapat dihitung dengan metode hitung perataan kuadrat terkecil, yaitu :

$$c = (B^T \ \Sigma_{dd} \ B)^{-1} (B^T \ \Sigma_{dd} \ d) \quad (2.12)$$

sedangkan standar deviasi parameter-parameter regangan dan rotasi ditentukan dengan :

$$\Sigma_{pp} = (B^T \ \Sigma_{dd} \ B)^{-1} \quad (2.13)$$

Berdasarkan parameter-parameter tersebut, besaran yang akan digunakan dalam analisis regangan yaitu besaran *principal strain* ε_1 dan ε_2 dapat diturunkan. ε_1 merupakan besaran yang menunjukkan nilai perpanjangan utama (*extension*) dan dapat dijadikan indikator adanya poseismik sedangkan ε_2 adalah besaran yang menunjukkan nilai kontraksi (*contraction*) dan dapat dijadikan indikator proses interseismik, keduanya diperoleh melalui persamaan sebagai berikut :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{ee} \cos^2 \theta + 2 \varepsilon_{ne} \sin \theta \cos \theta + \varepsilon_{nn} \sin^2 \theta \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{ee} \cos^2 (\theta + 90^\circ) + 2 \varepsilon_{ne} \sin (\theta + 90^\circ) \cos (\theta + 90^\circ) + \varepsilon_{nn} \sin^2 (\theta + 90^\circ) \quad (2.15)$$

$$\tan 2\theta = (2 \varepsilon_{ne}) / (\varepsilon_{ee} - \varepsilon_{nn}) \quad (2.16)$$

Principal strain (ε_1 dan ε_2) menyatakan perubahan elemen panjang terhadap panjang awal (mm/mm) dan dinyatakan dengan satuan strain.

2.6 Software GAMIT/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.

2.7 Software GMT

GMT adalah software open source untuk menggambarkan peta geografis dan kartesian, gambar, grafik atau diagram, kontur, trend, proyeksi, filtering, dan aplikasi data lainnya. Software ini dikembangkan dari tahun 1988 oleh Paul Wessel dan Walter H.F.Smith. Hasil keluaran berupa file EPS (emulated post script) dengan ilustrasi mulai dari plot xy sederhana sampai pada perspektif tiga dimensi ruang. GMT mempunyai 30 jenis peta proyeksi dan transformasi yang dilengkapi dengan data dukung geografis, seperti sungai, ketinggian gunung, kedalaman laut, batas-batas daerah dan negara. Umumnya sistem penggambaran di seismologi (gempa bumi) dan meteorologi menggunakan gambar peta GMT, untuk membuat peta distribusi sebaran epicenter, pemodelan tsunami, arah mata angin, dll.

2.8 SuGAR

Salah satu penyedia data GPS di kawasan Pulau Sumatra adalah SuGAR. SuGAR adalah sekumpulan jaring stasiun GPS yang terpasang dan terinstal disepanjang Pulau Sumatra dan pulau-pulau sekitar batas lempeng samudera. Stasiun-stasiun ini melakukan pengamatan geodetik secara kontinyu selama 24 jam per hari. Stasiun SuGAR dikembangkan oleh *Earth Observatory of Singapore* (EOS) dan Lembaga Ilmu Penelitian Indonesia (LIPI). Sejak tahun 2002, stasiun SuGAR digunakan untuk memantau aktivitas tektonik di Pulau Sumatra. Stasiun-stasiun SuGAR dapat merekam data pengukuran 100 Kbytes sampai 1 MBytes per hari dengan *sampling rate* yang digunakan adalah 15 detik (McLoughlin et al., 2003).

2.9 International GNSS Service

IGS merupakan badan multi nasional yang menyediakan data GPS, informasi *ephemeris* satelit GPS, serta informasi pendukung keperluan geodetik lainnya. IGS ini didirikan oleh *International Association of Geodesy* (IAG) pada tahun 1993, dan mulai beroperasi pada tahun 1994. Saat ini, IGS memiliki stasiun

pengamat yang berjumlah sekitar 200 stasiun yang tersebar di permukaan bumi.

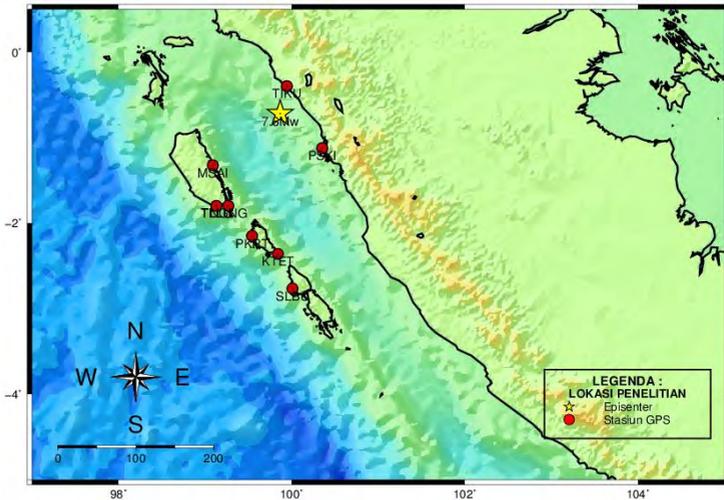
2.10 Penelitian Terdahulu

M Ridholfi Rusmen (2013) telah melakukan penelitian mengenai analisis deformasi gempa Mentawai tahun 2010 berdasarkan data pengamatan GPS kontinyu tahun 2010-2011. Tujuan dilakukannya penelitian tersebut antara lain untuk mengetahui besarnya nilai dan vektor kecepatan pergeseran atau deformasi dari lempeng tektonik yang mengacu pada titik-titik stasiun GPS kontinyu SuGAR yang tersebar di Pulau Sumatra, mempelajari gejala-gejala deformasi saat, sebelum dan sesudah terjadi gempa serta mendapatkan variasi regangan tektonik pulau Sumatra sebelum dan sesudah terjadi gempa. Hasil penelitian tersebut antara lain data pergeseran horizontal dan vertikal akibat gempa mentawai, vektor pergeseran sebelum dan sesudah gempa mentawai, data regangan sebelum dan sesudah terjadi gempa, serta ditampilkannya kontur pola kompresi regangan sebelum gempa dan kontur pola ekstensi regangan setelah terjadi gempa.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah daerah Sumatra Barat yang mengalami gempa pada tanggal 30 September 2009 dengan besar gempa 7.6 M_w dan kedalaman 81.0 km, episenter gempa berada pada koordinat 0.720°S 99.867°E di lepas pantai Sumatra, sekitar 50 km barat laut Kota Padang.



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Data RINEX

Data yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah data pengamatan GPS berupa data RINEX pada

bulan Agustus sampai dengan bulan Desember tahun 2009, data tersimpan dalam format RINEX. Data GPS bersumber dari hasil pemantauan *online*. Data pengamatan diunduh di salah satu penyedia data SuGAR yaitu “*Scripps Orbit and Permanent Array*” (SOPAC). Dalam penelitian ini akan menggunakan delapan buah stasiun *receiver* GPS SuGAR di kawasan sekitar wilayah gempa Sumatra Barat tahun 2009. Data pengamatan yang digunakan adalah data pengamatan GPS KTET, MSAI, NGNG, PKRT, PSKI, SLBU, TIKU, TLLU.

- b. 3 Titik ikat GPS IGS untuk kontrol file yaitu :
 - XMIS (-1696343.6790 ; 6039590.1166)
 - COCO (-741949.8528 ; 6190961.6634)
 - KARR (-2713832.1550 ; 5303935.1870)
- c. Data pendukung yang dibutuhkan saat pengolahan yang akan diunduh otomatis oleh perangkat lunak GAMIT/GLOBK yaitu :
 - data pemodelan atmosfer (atmdisp_cm.2009)
 - data pemodelan pasang-surut laut (otl_FES2004.grid)
 - data pemodelan cuaca (vmflgrd.2009)

3.2.2 Peralatan

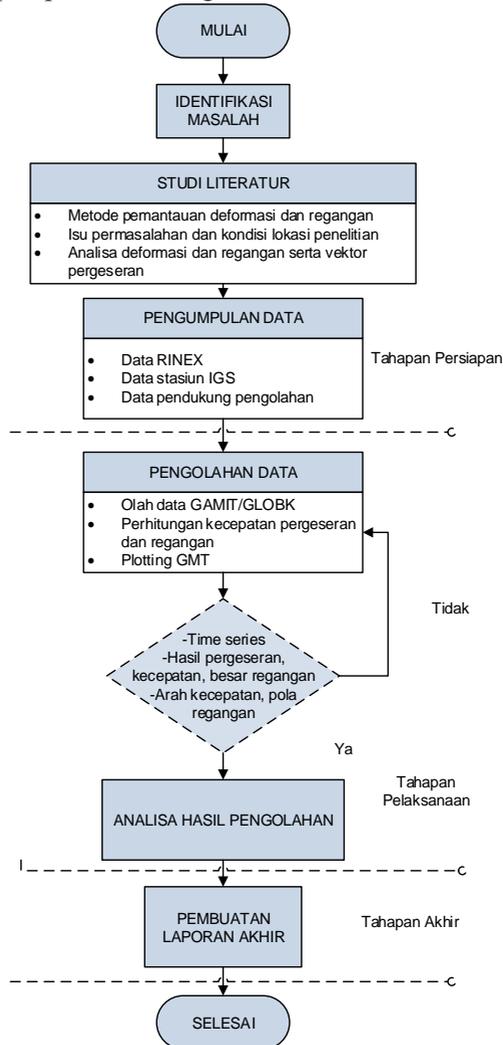
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Perangkat Keras (*Hardware*)
 - a. Stasiun GPS *online*
2. Perangkat Lunak (*Software*)
 - a. Sistem operasi LINUX Ubuntu 14.04 dan Windows 8.
 - b. Microsoft Word, Excel dan Notepad
 - c. *Software* GAMIT/GLOBK.
 - d. *Software* GMT

3.3 Metodologi Penelitian

3.3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian Tugas Akhir ini adalah:



Gambar 3. 2 Tahapan Penelitian

Penjelasan:

a. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana menghitung kecepatan pergeseran dan regangan dari titik-titik pemantauan deformasi di wilayah Sumatra Barat dan sekitarnya akibat gempa bumi Sumatra Barat tahun 2009.

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 dan regangan kerak bumi.
- ii. Pengkajian mengenai isu permasalahan dan kondisi lapangan mengenai lokasi penelitian.
- iii. Studi literatur mengenai analisa deformasi dan regangan serta besar vektor pergeseran titik-titik pemantauan deformasi menggunakan data GPS kontinyu.

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 kontinyu oleh SOPAC pada bulan Agustus sampai dengan bulan Desember tahun 2009.

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

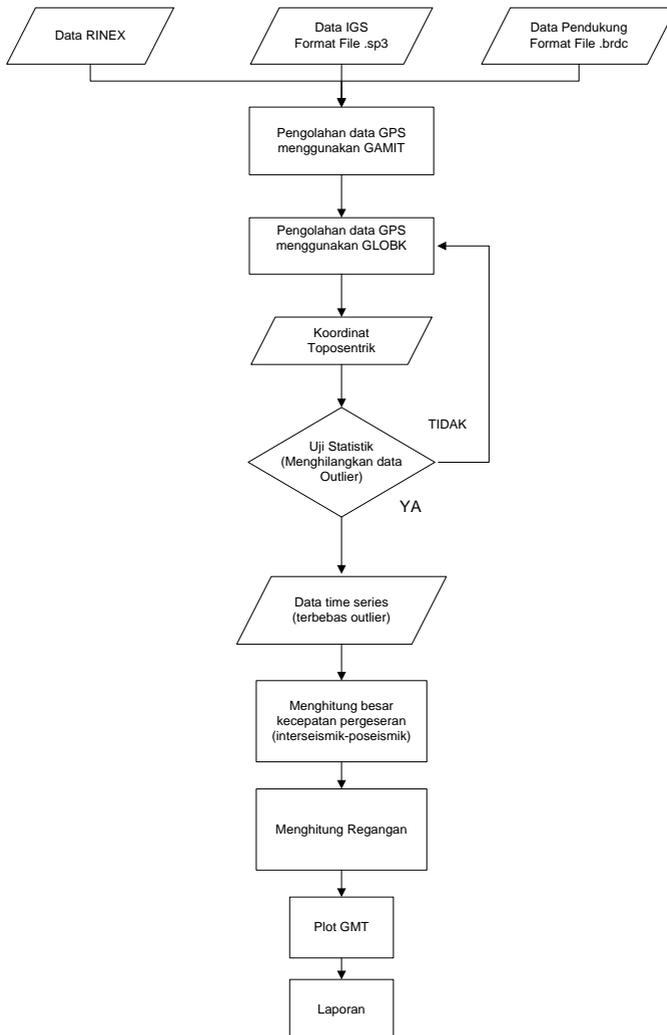
Setelah data selesai diolah, maka akan dilakukan analisa terhadap hasil pengolahan. Pada tahap ini, hasil dari pengolahan akan dianalisa perubahan dan besar kecepatan pergeseran deformasinya secara *time series*.

f. Pembuatan Laporan Akhir

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

3.2.3 Tahapan Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan Data

Penjelasan :

- a. Persiapan dan pengumpulan data
Dalam tahap ini adalah melakukan persiapan perangkat keras dan software untuk pengolahan data serta melakukan proses *download* data RINEX dari pusat data di SOPAC.
- b. Pengolahan data SuGAR menggunakan GAMIT/GLOBK
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. Berikut langkah-langkah menjalankan software GAMIT :
 1. Editing file kontrol pada *folder tables*

Editing file kontrol dilakukan untuk menyesuaikan skema pengolahan dengan data yang tersedia. Lakukan editing pada file-file control berikut :

Lfile. : Isi koordinat apriori stasiun global, titik ikat, maupun stasiun pengamatan yang belum tersedia. Untuk data stasiun pengamatan bisa mengambil dari RINEX observasi.

Process.default : Tentukan tempat pengolahan, letak folder data yang dipakai, waktu pengamatan, sampling rate, file itrif yang dipakai, dan set file brdc.

Sestbl. : Atur skenario dan strategi pengolahan data pada GAMIT untuk data yang diolah, antara lain :

- *choice of experiment* = RELAX karena pada umumnya apabila pengolahan dilakukan untuk pergerakan lempeng maka *choice of experiment* diganti dengan RELAX
- *cut of elevation* = 10°
- *use atml.grid* = Y
- *use otl.grid* = Y

sites.default : Tambahkan nama stasiun yang akan diolah beserta opsi pengambilan data dan opsi pengolahannya pada file ini. Penulisan nama stasiun pada file ini adalah sebagai berikut :

```
<ssss_gps> <expt> <opt_1> <opt_2>
```

ssss_gps = 4 karakter nama stasiun yang diolah
 expt = 4 karakter nama project
 opt_1, opt_2 = opsi pengambilan data, bisa : *ftprnx*,
ftpraw, *xstinfo*, *xsite*, dan *localrx*.

Sittbl : Ini digunakan untuk memasukkan *constraint* dari setiap stasiun yang diolah dengan menggunakan perangkat lunak GAMIT. *File* ini sudah berisi dengan nilai *constraint* untuk stasiun global yang dapat digunakan sebagai titik ikat.

Station.info : isikan informasi stasiun seperti *session start* (awal pengamatan), *session stop* (akhir pengamatan), *Ant Ht* (tinggi antena), *Ht Cod* (posisi pusat phase yang dilambangkan kode tertentu tergantung tipe dan merk instrument), *receiver type* (tipe receiver), dan *antenna type* (tipe antena). Informasi-informasi tersebut didapat dari data RINEX yang digunakan.

Menambahkan file gelombang pasang surut (*otl_FES2004.grd*), file atmosfer (*atmdisp_cm.2009*), file pemodelan cuaca (*vmf1grd.2009*) sebagai data sekunder penunjang pengolahan menggunakan GAMIT/GLOBK.

2. Menjalankan pengolahan GAMIT dengan *automatic batch processing*

Dengan menjalankan perintah berikut ini pada direktori kerja.

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

Keterangan :

yyyy = tahun data yang diolah

ddd₁ = DOY awal data yang diolah

ddd₂ = DOY akhir data yang diolah

expt = nama *experiment* yang sudah ditentukan pada *sites.defaults*.

nogifs = tidak menggunakan file *gifs*

Hasil pengolahan ini menghasilkan koordinat geosentrik (x, y, z).

c. Uji Statistik (Menghilangkan data outlier)

Outliers adalah data yang menyimpang terlalu jauh dari data lainnya dalam suatu rangkaian data (*time series*). Fungsi dari uji statistik ini adalah mendeteksi dan menghilangkan data pengamatan GPS yang *outlier* berdasarkan data *time series* koordinat toposentrik dengan melakukan uji statistik. *Level of Confidence* yang digunakan uji statistik kualitatif terhadap terhadap data GPS adalah 90%. Artinya bahwa data GPS akan dianggap *outlier* apabila data tersebut melebihi 2 kali *root-mean-square* (RMS). Jika data masih mengandung data outlier, maka data outlier harus dihilangkan dan diulangi tahapan pengolahan data menggunakan GAMIT/GLOBK. Dan jika data tidak mengandung data outlier akan di lanjutkan menghitung nilai pergeseran dan vektor pergeseran.

d. Menghitung nilai pergeseran akibat gempa

Nilai pergeseran diperoleh dengan menghitung selisih rata-rata dari data sebelum dan data setelah terjadi gempa. Setelah di peroleh nilai pergeserannya maka selanjutnya di hitung resultan dari pergeseran tersebut untuk melihat besar pergeserannya.

e. Menghitung vektor pergeseran sebelum dan sesudah gempa

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 3 bulan pengamatan sebelum peristiwa gempa tanggal 30 september 2009 terjadi. Hal ini dimaksudkan agar didapatkan data yang linier, tidak terpengaruh efek gempa. Sedangkan untuk mengamati pergeseran titik GPS setelah gempa (*postseismic*) digunakan juga tiga bulan atau lebih pengamatan setelah peristiwa gempa agar mendapatkan data yang tidak memiliki efek gempa dan sesuai dengan algoritma Marone.

- f. Menghitung Regangan (ekstensi dan kompresi)
Hasil kecepatan pergeseran titik-titik pengamatan digunakan untuk melakukan analisis regangan tektonik.
- g. Plot dengan GMT
GMT digunakan untuk plotting data grafik koordinat lokal *time series* dari hasil pengolahan yang secara otomatis terintegrasi dengan dengan perangkat lunak GAMIT/GLOBK perangkat lunak ini diunduh dari <ftp://ftp.soest.hawaii.edu/gmt>.

BAB IV

HASIL DAN ANALISA

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

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Hasil Pengolahan GAMIT

Pengolahan data GPS SuGAR dan data-data pendukung (data tiga titik stasiun IGS dan data sekunder pengolahan GAMIT/GLOBK) diolah menggunakan software GPS *Analysis Package Developed at MIT* (GAMIT), paket program pengkombinasi data GPS GLOBK, serta GMT dalam sistem operasi Linux. Pada penelitian ini tahapan pengolahan data GPS menggunakan *GAMIT* dilakukan untuk mendapatkan hasil pengolahan berupa kumpulan folder dari sepanjang DOY yang diteliti sebanyak 136 DOY dimulai dari tanggal 17 Agustus (DOY 229) sampai dengan 31 Desember (DOY 365). Setiap folder DOY tersebut berisi solusi GAMIT H-file, Q-file dan *sh_gamit_ddd.summary* serta file-file lainnya.

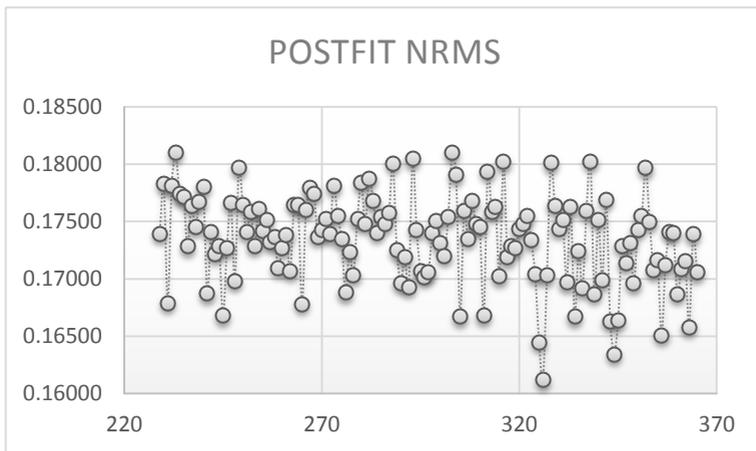
Hasil pengolahan GAMIT H-file memiliki nama dengan pola *h[expt]a.yyddd* dimana [expt] adalah nama *experiment*, yy adalah dua angka terakhir pada tahun, dan ddd adalah DOY dari data yang diolah. H-file berisi hasil pengolahan dengan Lossly Constraint Solutions yang berupa parameter-parameter yang digunakan serta matriks varian kovarian pada pengolahan lanjutan dengan GLOBK, input yang digunakan adalah H-file yang berisi parameter-parameter hasil pengolahan dengan perataan *Lossely Constraint* serta matriks varian kovarian.

Hasil pengolahan berupa Q-file berisi semua informasi hasil pengolahan data pengamatan GPS dengan GAMIT, yang disajikan dalam dua versi Biasses-free Solution dan Biasss-fixed Solution.

Hasil pengolahan berupa *sh_gamit_ddd.summary* berupa rangkuman hasil pengolahan per DOY dari data yang diolah.

a. Nilai NRMS

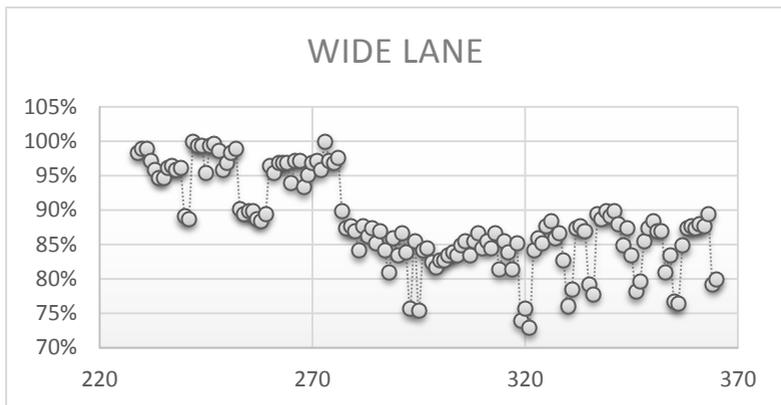
Postfit nrms merupakan perbandingan nilai varians aposteriori dan varians apriori untuk unit bobot. Untuk nilai *nrms* dalam pengolahan GAMIT adalah ± 0.25 dalam setiap pengamatan DOY-nya. Apabila nilai *Postfit nrms* lebih besar dari 0.5 maka mengindikasikan masih terdapat efek cycle slip yang belum hilang ataupun stasiun fixed dengan koordinat yang jelek. Nilai *nrms* dari hasil pengolahan GPS dalam penelitian ini adalah *nrms* maksimal 0.18102 dan *nrms* maksimal adalah 0.16121 serta rerata *nrms* adalah 0.17353.



Gambar 4. 1 Nilai Postfit NRMS

Nilai *Wide Lane* adalah resolusi ambiguitas fase yang didapat dengan menggabungkan sinyal GPS L1 dikurangkan dengan GPS L2 (*Wide Lane*). WL dipakai jika pengukuran memiliki baseline yang panjang. Nilai WL pada GAMIT dikatakan tidak memiliki *noise* pada *pseudorange* jika resolusi ambiguitas fase WL-nya adalah

melebihi 80%. Sedangkan resolusi ambiguitas fase dengan menggabungkan sinyal GPS L1 ditambahkan dengan GPS L2 (*Narrow Lane*) dikatakan tidak terdapat kesalahan ukuran, konfigurasi jaringan, kualitas orbit, koordinat *apriori* atau kondisi atmosfer jika resolusi ambiguitas fase NL-nya adalah melebihi 80%. NL digunakan jika melakukan pengukuran yang titiknya dekat dengan stasiun referensi.

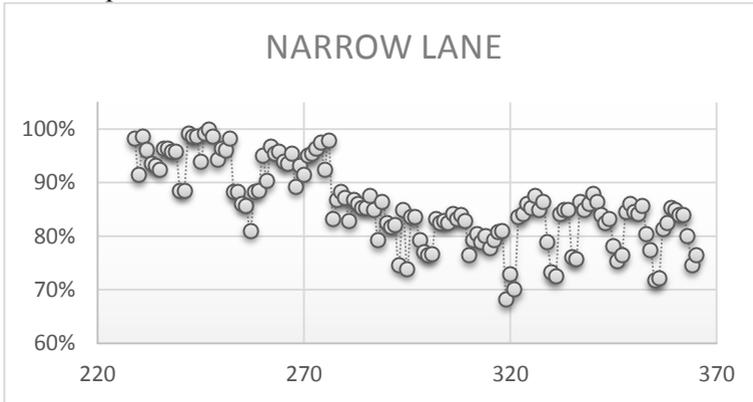


Gambar 4. 2 Nilai Wide Lane

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa nilai maksimal *Wide Lane* pada penelitian ini adalah sebesar 100% dan nilai reratanya sebesar 88% dan nilai minimumnya sebesar 73%. Hal 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 *psudorange*.

Pada Gambar 4.3 di bawah menunjukkan nilai *Narrow Lane* setiap DoY sepanjang waktu observasi. Dapat dilihat bahwa nilai maksimal *Narrow Lane* adalah sebesar 100% dan nilai minimalnya sebesar 68.2% serta nilai reratanya adalah sebesar 85.9%. Hal ini secara

umum menunjukkan bahwa pengolahan data GPS dalam penelitian ini baik.



Gambar 4. 3 Nilai Narrow Lane

Proses yang dilakukan setelah melakukan pengolahan GAMIT adalah mengolah solusi GAMIT (*h-file*), yang berisikan matriks kovarian dari data koordinat stasiun, dengan mengombinasikan seluruh hari pengamatan GPS dengan *software* GLOBK.

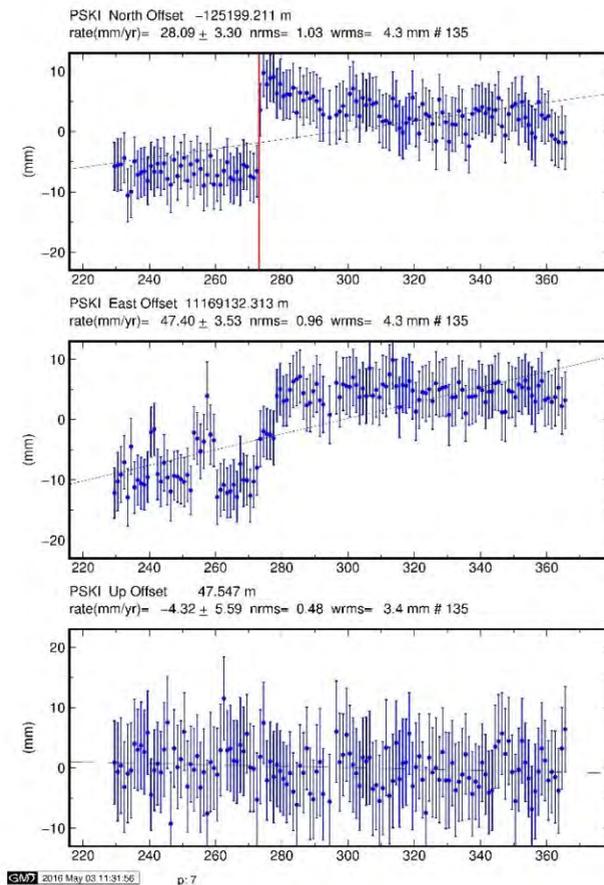
4.1.2 Hasil Pengolahan GLOBK

Dari hasil pengolahan data menggunakan GAMIT, akan dijadikan input file untuk pengolahan data menggunakan aplikasi GLOBK. Namun selain hasil pengolahan GAMIT, GLOBK juga dapat menerima input file hasil pengolahan dari perangkat lunak ilmiah lain, misal: GIPSY dan Bernesse (Herring, 2009).

Hasil pengolahan GLOBK didapatkan koordinat toposentrik yang selanjutnya akan diamati pergerakan posisi setiap stasiun GPS pada sumbu *easting* (E), *northing* (N) dan *up* (U), sehingga dapat diketahui besar pergeseran titik GPS yang diamati sepanjang DoY yang digunakan.

a. *Time series* seluruh fase

Hasil pengolahan GLOBK adalah *time series* seluruh data GPS yang dikombinasi. Hasil *plot time series* yang ditampilkan pada laporan ini adalah hasil *plot* pada seluruh fase gempa Sumatra Barat tanggal 30 september 2009 dimulai pada DOY 229 sampai dengan DOY 365 dari hasil pengolahan pada *software* GLOBK.



Gambar 4. 4 Gambar *time series* seluruh fase stasiun PSKI (DOY tahun 2009)

Pada gambar 4.4 di atas, masing-masing stasiun memiliki 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).

Hasil pengolahan plot time series tersebut memiliki nama dengan pola File `psbase_[expt].[GPS]` yang terdapat pada folder `gsoln`, dimana `[expt]` adalah nama *experiment* dan `[GPS]` adalah stasiun GPS yang digunakan. Hasil plot *time series* tersebut terdapat nilai Offset, rate (mm/yr), nilai *nrms* (*normalized root mean Square*) dan nilai *wrms* (*weighted root mean square*) setiap stasiun yang diamati.

4.1.3 Nilai Pergeseran

Saat gempa terjadi, akan mempengaruhi perubahan *time series* yang menimbulkan perubahan nilai pergeseran. Nilai pergeseran diperoleh dengan menghitung selisih dari perubahan data saat ini dengan data sebelumnya. Setelah diperoleh nilai pergeserannya maka selanjutnya dihitung resultan dari pergeseran tersebut untuk melihat besar pergeserannya. Berikut data hasil nilai pergeseran yang didapat dari data time series pada setiap fase gempa.

a. Nilai Pergeseran Horizontal - Interseismik

Data yang digunakan untuk menghitung nilai pergeseran horizontal pada fase interseismik sebanyak 44 DOY dimulai pada tanggal 17 Agustus 2009 sampai dengan 29 september 2009. Hasil nilai pergeseran yang didapat pada Tabel 4.1 menunjukkan besar nilai pergeseran dalam waktu 1.5 bulan pengamatan (fase interseismik) atau 44 DOY pengamatan.

Hasil nilai pergeseran horizontal fase interseismik pada tabel 4.1 di bawah menunjukkan besar pergeseran tertinggi sebesar 0.136 mm pada stasiun SLBU dan besar

pergeseran terendah sebesar 0.030 mm pada stasiun TLLU.

Tabel 4. 1 Hasil nilai pergeseran horizontal fase interseismik

Stasiun	dE (mm)	dN (mm)	Pergeseran Horizontal (mm)
PSKI	0.100	-0.020	0.102
SLBU	-0.130	-0.040	0.136
TIKU	0.070	-0.070	0.099
KTET	-0.010	-0.060	0.061
PKRT	-0.030	-0.060	0.067
NGNG	0.005	0.050	0.050
TLLU	0.001	0.030	0.030
MSAI	0.060	-0.001	0.060

- Koseismik

Pada fase saat terjadinya gempa, nilai pergeseran didapat dengan menghitung selisih rata-rata data sebelum gempa dengan data setelah gempa.

Tabel 4. 2 Hasil nilai pergeseran horizontal fase koseismik

Stasiun	dE (mm)	dN (mm)	Pergeseran Horizontal (mm)
PSKI	-0.412	-0.412	0.583
SLBU	0.360	-0.250	0.438
TIKU	-0.330	0.020	0.331
KTET	0.130	-0.060	0.143
PKRT	-0.130	-0.429	0.448
NGNG	0.050	1.383	1.384
TLLU	-0.060	0.100	0.117
MSAI	0.290	-0.020	0.291

Hasil nilai pergeseran pada saat terjadi gempa (koseismik) menunjukkan besar pergeseran tertinggi adalah pada stasiun NGNG sebesar 1.384 mm sedangkan besar pergeseran terendah adalah pada stasiun TLLU sebesar 0.117 mm.

- Poseismik

Untuk menghitung nilai pergeseran horizontal pada fase poseismik, digunakan data sebanyak 92 DOY dimulai pada tanggal 1 oktober 2009 sampai dengan 31 Desember 2009. Hasil nilai pergeseran yang didapat pada tabel 3 menunjukkan besar nilai pergeseran dalam waktu 3 bulan pengamatan (fase poseismik) atau 92 DOY pengamatan.

Tabel 4. 3 Hasil nilai pergeseran horizontal fase poseismik

Stasiun	dE (mm)	dN (mm)	Pergeseran Horizontal (mm)
PSKI	0.080	-0.130	0.153
SLBU	0.050	-0.070	0.086
TIKU	0.070	-0.100	0.122
KTET	0.030	-0.010	0.032
PKRT	-0.040	-0.070	0.081
NGNG	-5.500	-0.430	5.517
TLLU	0.700	-0.010	0.700
MSAI	1.600	-0.030	1.600

Hasil nilai pergeseran horizontal pada fase poseismik menunjukkan besar pergeseran tertinggi sebesar 5.517 mm pada stasiun NGNG dan besar pergeseran terendah sebesar 0.032 mm pada stasiun KTET.

b. Nilai Pergeseran Vertikal
- Interseismik

Tabel 4. 4 Hasil nilai pergeseran vertikal fase interseismik

Stasiun	dU (mm)
PSKI	-0.1467
SLBU	0.0881
TIKU	-0.1330
KTET	0.1337
PKRT	0.0095
NGNG	0.2560
TLLU	-0.1623
MSAI	-0.0495

Tabel 4.4 menunjukkan hasil nilai pergeseran vertikal pada fase interseismik, nilai pergeseran terbesar adalah pada stasiun NGNG sebesar 0.2560 mm mengarah *up-lift* karena bernilai positif dan pergeseran vertikal terkecil ada pada stasiun PKRT sebesar 0.0095 mm dengan arah yang sama.

Besar nilai pergeseran vertikal yang didapat pada tabel 4.4 diatas merupakan besar nilai pergeseran selama waktu 1.5 bulan atau 44 DOY pengamatan pada fase interseismik.

- Poseismik

Besar nilai pergeseran vertikal yang didapat pada tabel 4.5 dibawah merupakan besar nilai pergeseran selama waktu 3 bulan pengamatan waktu poseismik atau 92 DOY pengamatan.

Tabel 4. 5 Hasil nilai pergeseran vertikal fase poseismik

Stasiun	dU (mm)
PSKI	-0.1294
SLBU	-0.0198
TIKU	-0.0248
KTET	-0.0481
PKRT	0.0143
NGNG	0.9467
TLLU	0.0143
MSAI	0.0654

Nilai pergeseran vertikal terbesar pada fase poseismik pada stasiun NGNG sebesar 0.9467 mm mengarah keatas karena bernilai positif dan pergeseran vertikal terkecil ada pada stasiun PKRT dan TLLU sebesar 0.0143 mm mengarah ke atas.

4.1.4 Hasil kecepatan pergeseran

Kecepatan pergeseran adalah besaran yang menyatakan perubahan suatu titik pantau dalam selang waktu tertentu sehingga bisa menjadi indikator terjadinya deformasi di daerah pengamatan. Dalam penelitian ini perhitungan kecepatan pergeseran dibagi menjadi dua yaitu horizontal dan vertikal. Hasil kecepatan pergeseran ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

- a. Kecepatan pergeseran horizontal
 - Interseismik

Untuk menghitung kecepatan pergeseran horizontal pada fase interseismik, digunakan data sebanyak 44 DOY dimulai pada tanggal 17 Agustus 2009 sampai dengan 29 september 2009.

Tabel 4. 6 Hasil kecepatan pergeseran horizontal fase interseismik

Stasiun	V_e (m/1.5bulan)	V_n (m/1.5bulan)	Kecepatan Horizontal (m/1.5bulan)	sd_E (m)	sd_N (m)
PSKI	-0.00356	0.00094	0.00368	0.00003	0.00002
SLBU	-0.01002	0.00326	0.01054	0.00003	0.00002
TIKU	0.00207	0.00224	0.00305	0.00003	0.00002
KTET	-0.00808	-0.00165	0.00825	0.00004	0.00002
PKRT	-0.00384	0.00336	0.00510	0.00003	0.00002
NGNG	0.00611	-0.01224	0.01368	0.00005	0.00003
TLLU	-0.00418	-0.00329	0.00532	0.00002	0.00002
MSAI	-0.00283	0.00169	0.00330	0.00003	0.00001

Dari tabel 4.6 hasil kecepatan pergeseran diatas didapat nilai kecepatan pergeseran tertinggi pada stasiun NGNG sebesar 0.01368 m/1.5 bln dan nilai kecepatan pergeseran terkecil pada stasiun TIKU sebesar 0.00305 m/1.5 bln. Hasil kecepatan pergeseran pada tabel 6 di atas menunjukkan nilai kecepatan pergeseran selama 1.5 bulan waktu pengamatan fase interseismik.

- Poseismik

Untuk menghitung kecepatan pergeseran horizontal pada fase poseismik, digunakan data sebanyak 92 DOY dimulai pada tanggal 1 oktober 2009 sampai dengan 31 Desember 2009.

Dari tabel 4.7 hasil kecepatan pergeseran diatas didapat nilai kecepatan pergeseran tertinggi pada stasiun NGNG sebesar 0.23719 m/3 bln dan nilai kecepatan pergeseran terkecil pada stasiun KTET sebesar 0.00226 m/3 bln. Hasil kecepatan pergeseran pada tabel 7 diatas menunjukkan nilai kecepatan pergeseran selama 3 bulan waktu pengamatan fase interseismik.

Tabel 4. 7 Hasil kecepatan pergeseran horizontal fase poseismik

Stasiun	Ve (m/3 bulan)	Vn (m/3 bulan)	Kecepatan Horizontal (m/3 bulan)	sd_E (m)	sd_N (m)
PSKI	-0.00269	0.00038	0.00272	0.00001	0.00001
SLBU	-0.00225	0.00019	0.00226	0.00001	0.00001
TIKU	-0.00284	0.00008	0.00284	0.00001	0.00001
KTET	-0.00121	0.00011	0.00122	0.00001	0.00001
PKRT	-0.00207	-0.00023	0.00208	0.00001	0.00001
NGNG	-0.20742	-0.11505	0.23719	0.00051	0.00022
TLLU	-0.00097	0.00180	0.00205	0.00001	0.00001
MSAI	-0.00191	-0.00035	0.00194	0.00001	0.00001

Dari tabel 4.7 hasil kecepatan pergeseran diatas didapat nilai kecepatan pergeseran tertinggi pada stasiun NGNG sebesar 0.23719 m/3 bln dan nilai kecepatan pergeseran terkecil pada stasiun KTET sebesar 0.00226 m/3 bln. Hasil kecepatan pergeseran pada tabel 7 diatas menunjukkan nilai kecepatan pergeseran selama 3 bulan waktu pengamatan fase interseismik.

b. Kecepatan pergeseran vertikal
- Interseismik

Untuk menghitung kecepatan pergeseran vertikal pada fase interseismik, digunakan data sebanyak 44 DOY dimulai pada tanggal 17 Agustus 2009 sampai dengan 29 september 2009.

Dari tabel 4.8 di bawah ini, hasil kecepatan pergeseran vertikal diatas didapat nilai kecepatan pergeseran tertinggi pada stasiun SLBU sebesar 0.01073 m/1.5 bln dan nilai kecepatan pergeseran terkecil pada stasiun TLLU sebesar 0.00263 m/1.5 bln. Nilai positif menunjukkan kecepatan pergeseran mengarah keatas dan nilai negatif mengarah kebawah. Hasil kecepatan pergeseran pada tabel 4.8 di bawah menunjukkan nilai kecepatan pergeseran selama 1.5 bulan waktu pengamatan fase interseismik.

Tabel 4. 8 Hasil kecepatan pergeseran vertikal fase interseismik

Stasiun	Vu (m/1.5 bulan)	sd U (m)
PSKI	-0.00465	0.00004
SLBU	0.01073	0.00003
TIKU	-0.00338	0.00005
KTET	0.00491	0.00004
PKRT	0.00333	0.00005
NGNG	0.00701	0.00008
TLLU	0.00263	0.00005
MSAI	0.00318	0.00003

- Poseismik

Untuk menghitung kecepatan pergeseran vertikal pada fase poseismik, digunakan data sebanyak 92 DOY dimulai pada tanggal 1 oktober 2009 sampai dengan 31 Desember 2009.

Dari tabel 4.9 hasil kecepatan pergeseran diatas didapat nilai kecepatan pergeseran tertinggi pada stasiun NGNG sebesar 0.54010 m/3 bln dan nilai kecepatan pergeseran terkecil pada stasiun PSKI sebesar 0.00028 m/3 bln. Nilai positif menunjukkan kecepatan pergeseran mengarah keatas dan nilai negatif mengarah kebawah. Hasil kecepatan pergeseran pada tabel 4.9 diatas menunjukkan nilai kecepatan pergeseran selama 3 bulan waktu pengamatan fase interseismik.

Tabel 4. 9 Hasil kecepatan pergeseran vertikal fase poseismik

Stasiun	Vu (m/3 bulan)	sd_U (m)
PSKI	0.00028	0.00002
SLBU	0.00134	0.00002
TIKU	0.00092	0.00002
KTET	0.00121	0.00002
PKRT	0.00137	0.00002
NGNG	0.54010	0.00117
TLLU	0.00120	0.00002
MSAI	0.00114	0.00003

Dari tabel 4.9 hasil kecepatan pergeseran diatas didapat nilai kecepatan pergeseran tertinggi pada stasiun NGNG sebesar 0.54010 m/3 bln dan nilai kecepatan pergeseran terkecil pada stasiun PSKI sebesar 0.00028 m/3 bln. Nilai positif menunjukkan kecepatan pergeseran mengarah keatas dan nilai negatif mengarah kebawah. Hasil kecepatan pergeseran pada tabel 4.9 diatas menunjukkan nilai kecepatan pergeseran selama 3 bulan waktu pengamatan fase interseismik.

4.1.5 Regangan

Hasil kecepatan pergeseran titik-titik pengamatan digunakan untuk melakukan analisis regangan tektonik. Metode yang digunakan untuk menghitung parameter regangan tersebut adalah metode hitungan segmen segitiga. Pada metode ini akan dibuat segmen-segmen segitiga yang melalui titik-titik pengamatan kemudian dihitung nilai parameter regangan yang melalui tiga titik pengamatan. Bidang segitiga merupakan geometri yang paling optimal untuk mendapatkan nilai parameter regangan (Hidayat, 2012).

Pada penelitian ini dibuat lima segmen segitiga dari delapan titik pengamatan yang ada. Hasil perhitungan regangan pada penelitian ini dibagi menjadi dua fase yaitu pada fase interseismik dan fase poseismik. Parameter-parameter regangan yang diperoleh dari perhitungan kecepatan pergeseran ditunjukkan pada table 4.10 dan tabel 4.11 di bawah ini.

Tabel 4. 10 Parameter-parameter regangan fase interseismik

No	Segmen Segitiga	Ω	ϵ_{ee}	ϵ_{nn}	ϵ_{ne}
1	TIKU-MSAI-TLLU	-0.0581	0.0220	-0.0315	0.0902
2	TIKU-NGNG-PSKI	0.0260	-0.0905	0.0467	0.0554
3	PSKI-NGNG-PKRT	0.0520	-0.1614	0.1899	-0.2242
4	PSKI-PKRT-KTET	-0.0892	-0.0816	-0.0187	0.0690
5	PSKI-KTET-SLBU	0.0599	-0.0128	0.0987	-0.0553

Tabel 4. 11 Parameter-parameter regangan fase poseismik

No	Segmen Segitiga	Ω	ϵ_{ee}	ϵ_{nn}	ϵ_{ne}
1	TIKU-MSAI-TLLU	0.0313	0.0089	0.0139	-0.0386
2	TIKU-NGNG-PSKI	0.0160	1.2438	0.6866	0.3761
3	PSKI-NGNG-PKRT	2.3548	3.3608	-0.4704	-1.5758
4	PSKI-PKRT-KTET	0.0133	0.0143	-0.0042	-0.0023
5	PSKI-KTET-SLBU	-0.0021	-0.0420	0.0048	-0.0002

Dari parameter-parameter pada table 4.10 dan table 4.11 di atas diperoleh nilai *principal strain* dari lima segmen segitiga dalam fase interseismik dan poseismik. ϵ_1 untuk ekstensi dan ϵ_2 untuk kompresi sedangkan θ adalah arah dengan Satuan derajat. θ diperoleh dengan menggunakan

rumus (2.16) sesuai yang telah dijelaskan pada bab II sebagai berikut:

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_{ne}}{(\varepsilon_{ee} - \varepsilon_{nn})}$$

ε_{ee} , ε_{nn} , ε_{ne} adalah parameter-parameter regangan, Ω adalah parameter rotasi. ε_{ee} adalah parameter regangan normal arah timur-barat, ε_{nn} adalah parameter regangan arah Utara-selatan, ε_{ne} adalah parameter regangan geser atau regangan menyilang. Parameter regangan digunakan untuk mencari nilai *principal strain* yaitu ekstensi dan kompresi dengan menggunakan rumus sebagai berikut

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{ee} \cos^2 \theta + 2 \varepsilon_{ne} \sin \theta \cos \theta + \varepsilon_{nn} \sin^2 \theta$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{ee} \cos^2 (\theta + 90^\circ) + 2 \varepsilon_{ne} \sin (\theta + 90^\circ) \cos (\theta + 90^\circ) + \varepsilon_{nn} \sin^2 (\theta + 90^\circ)$$

Rumus ekstensi dan kompresi di atas sesuai dengan rumus 2.14 dan 2.15 dalam bab II dasar teori. Berikut ini adalah nilai *principal strain* yang didapatkan.

Tabel 4. 12 Nilai *principal strain* fase interseismik

No	Segmen Segitiga	<i>Principal Strain</i>		
		ε_1 (Ekstensi)	ε_2 (Kompresi)	θ (derajat)
1	TIKU-MSAI-TLLU	0.1025	0.0097	36.7474
2	TIKU-NGNG-PSKI	0.0691	-0.1042	340.5450
3	PSKI-NGNG-PKRT	-0.0003	-0.3854	25.9590
4	PSKI-PKRT-KTET	0.0711	-0.0838	327.2496
5	PSKI-KTET-SLBU	0.0668	-0.1350	22.3794

Tabel 4. 13 Nilai *principal strain* fase poseismik

No	Segmen Segitiga	<i>Principal Strain</i>		
		ϵ_1 (Ekstensi)	ϵ_2 (Kompresi)	θ (derajat)
1	TIKU-MSAI-TLLU	0.0126	-0.0424	43.1407
2	TIKU-NGNG-PSKI	1.6222	-0.0022	26.7341
3	PSKI-NGNG-PKRT	3.4052	-1.6203	340.2792
4	PSKI-PKRT-KTET	0.0153	-0.0033	353.0535
5	PSKI-KTET-SLBU	0.0009	-0.0430	0.2507

Nilai principal strain di atas jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu seperti penelitian dari Rino dari ITB tahun 2010 mengenai regangan di seluruh Pulau Sumatra menunjukkan adanya kesamaan dari perhitungan meskipun tidak keseluruhan sama. Rata-rata nilai ekstensi Pulau Sumatra dalam penelitian Rino tahun 2010 menunjukkan nilai 0.372 μ strain dan nilai kompresi sebesar 0.876 μ strain yang hampir memiliki kesamaan rata-rata dengan nilai principal strain penelitian ini.

Gaya ekstensi adalah gaya-gaya yang bekerja menjauhi satu titik yaitu gaya yang membuat lempeng-lempeng saling menjauh. Gaya kompresi adalah gaya-gaya yang bekerja menuju ke satu titik yaitu gaya yang menekan daerah tersebut. Kompresi menunjukkan adanya energi yang belum lepas dan potensial menjadi koseismik atau menjadi gempa.

4.2 Analisa Penelitian

4.2.1 Analisa Kecepatan Pergeseran

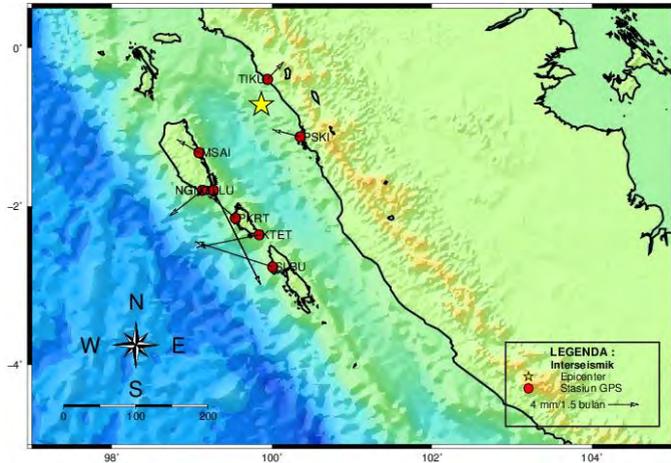
- Horizontal

Hasil *plotting* kecepatan pergeseran (*velocity*) stasiun pengamatan berdasarkan data pengamatan GPS tanggal 17 Agustus – 31 Desember 2009 dilakukan dengan menggunakan *software* GMT. Gambar plot kecepatan pergeseran horizontal di

bawah merupakan *plotting* arah dan kecepatan pergeseran (*velocity*) dari data pengamatan GPS KTET, TLLU, PSKI, PKRT, SLBU, TIKU, MSAI, NGNG dalam fase interseismik dan poseismik.

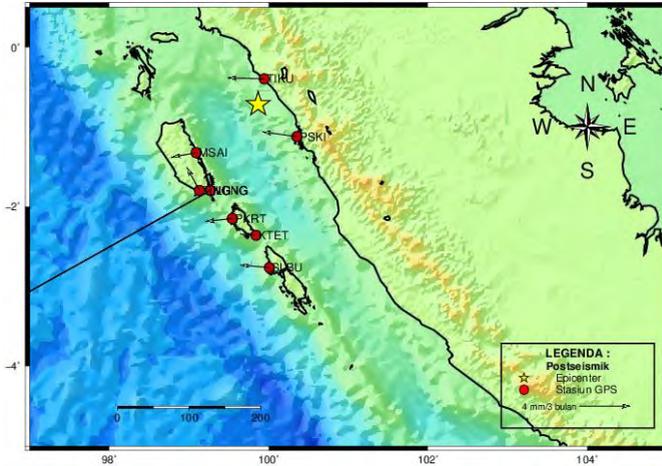
Arah dan kecepatan pergeseran horizontal terfokus pada jarak dari nilai pergeseran yang diolah. Nilai pergeseran tersebut dapat bernilai negatif (-) atau positif (+) yang dapat mempengaruhi dari arah pergeseran. Hasil arah dan kecepatan ditunjukkan dalam gambar 4.5 di bawah ini.

Dari hasil *plotting* gambar 4.5 di bawah menunjukkan arah pergeseran horizontal dari setiap titik-titik stasiun SuGAR yang digunakan bergerak ke arah barat laut dengan kecepatan pergeseran antara 2.53 cm/yr sampai dengan 11.35 cm/yr jika dihitung dalam satuan pertahun (dari perhitungan table 4.6). 4 stasiun yaitu PSKI, MSAI, PKRT, SLBU menunjukkan arah yang sama yaitu arah barat laut. Stasiun TLLU dan KTET menunjukkan arah barat sedangkan TIKU mengarah ke timur laut serta stasiun NGNG mengarah ke tenggara. Sebagian besar stasiun mengarah ke barat laut dan adanya perbedaan arah pada titik yang digunakan disebabkan masih adanya pengaruh poseismik gempa sebelumnya yang terjadi pada tanggal 16 Agustus 2009. Adanya perbedaan arah juga bisa diakibatkan oleh penggunaan data pengamatan yang tidak lengkap pada stasiun yang digunakan dalam selang waktu pengamatan sehingga hasilnya tidak mewakili sepenuhnya hasil pengamatan.



Gambar 4. 5 Hasil plot kecepatan pergeseran horizontal fase interseismik

Untuk hasil plotting gambar 4.6 di bawah ini menunjukkan bahwa kecepatan pergeseran setelah gempa dari data stasiun SuGAR sebagian besar memiliki arah yang sama menuju arah barat dengan rata-rata kecepatan 0.856 cm/yr dalam hitungan waktu pertahun (dari perhitungan table 4.7). Dari fase interseismik dan poseismik terdapat perubahan kecepatan pergeserannya, dimana kecepatan interseismik lebih tinggi dari pada fase poseismik dikarenakan adanya pengaruh fase poseismik dari gempa sebelumnya pada tanggal 16 Agustus 2009 dengan besar gempa 6.7 M_w pada kedalaman 44.8 km. Arah kecepatan seluruh stasiun menunjukkan arah barat dan hanya stasiun TLLU yang menuju arah barat daya.

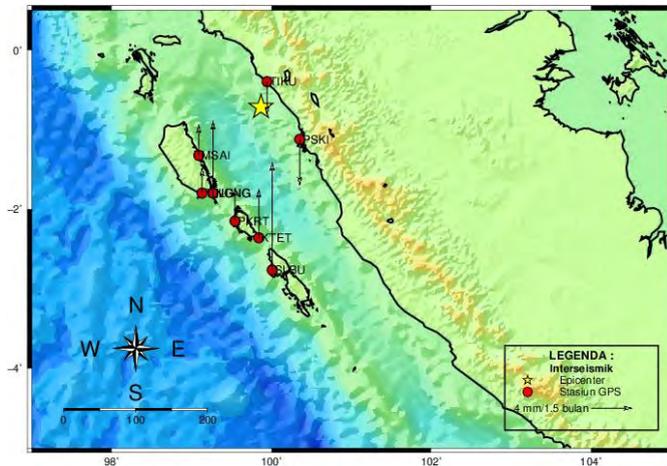


Gambar 4. 6 Hasil plot kecepatan pergeseran horizontal fase poseismik

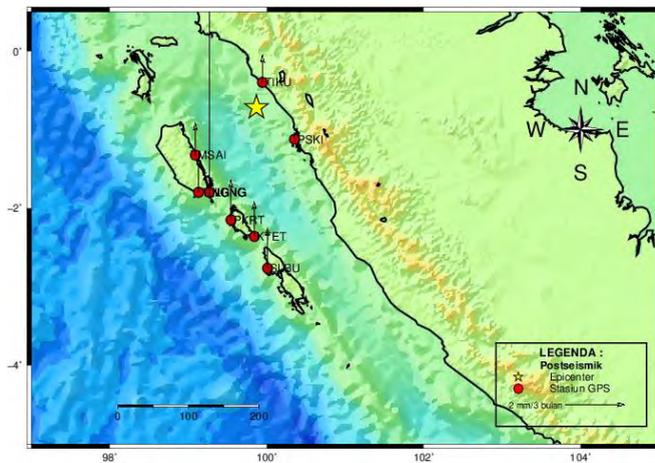
- Vertikal

Hasil kecepatan pergeseran vertikal dapat bernilai negatif (-) atau positif (+) yang dapat mempengaruhi dari arah pergeseran. Nilai negatif menandakan bergeser turun ke bawah dan nilai positif mengarah *up-lift*. Berikut ini adalah hasil plot arah dan kecepatan pergeseran vertikal pada fase interseismik dan poseismik.

Pada gambar 4.7 di bawah ini menunjukkan hasil plot kecepatan pergeseran pada sumbu vertikal fase interseismik. Meskipun ditampilkan dalam diagram mata angin, tetapi arah pergerakan vektor pada gambar tersebut menunjukkan pergeseran stasiun GPS di sumbu vertikal. Besar dan arah vektor pada gambar 4.7 diambil dari data perhitungan pergeseran interseismik di sumbu vertikal pada Tabel 4.8 di atas.



Gambar 4. 7 Hasil plot kecepatan pergeseran vertikal fase interseismik



Gambar 4. 8 Hasil plot kecepatan pergeseran vertikal fase poseismik

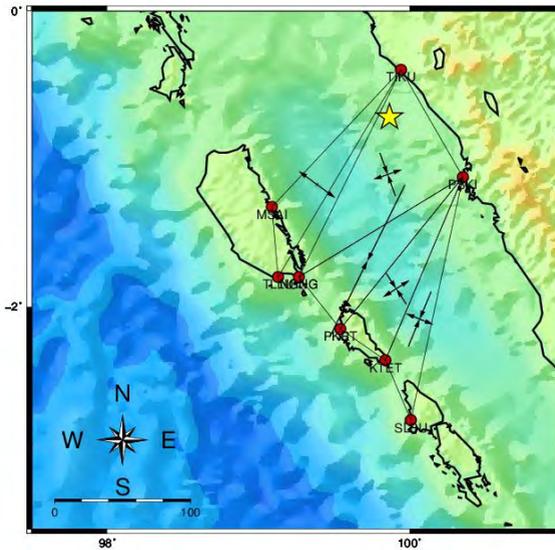
Berdasarkan penelitian ini, semua stasiun mengalami pergeseran vertikal. Pada gambar 4.7, 2 stasiun yang terdekat dengan pusat gempa mengalami pergeseran ke bawah. 6 stasiun yang berada pada sekitar kepulauan Mentawai

mengalami menunjukkan arah positif atau mengalami kenaikan posisi (*up-lift*). Berdasarkan tabel 4.8 di atas, kecepatan pergeseran terbesar berada pada stasiun terjauh dari pusat gempa yaitu stasiun SLBU.

Hasil plot setelah terjadinya gempa yang ditunjukkan pada gambar 4.8 menunjukkan seluruh stasiun mengalami pergeseran vertikal dengan arah yang sama. Semua stasiun menunjukkan arah positif atau mengalami pergeseran ke atas (*up-lift*). Berdasarkan tabel 4.9 kecepatan pergeseran setelah terjadinya gempa antara 0.3-1.4 mm perwaktu pengamatan selama 3 bulan. Pergeseran yang kecil pada fase poseismik dapat diakibatkan karena episenter gempa yang terjadi berada pada kedalaman 81 km.

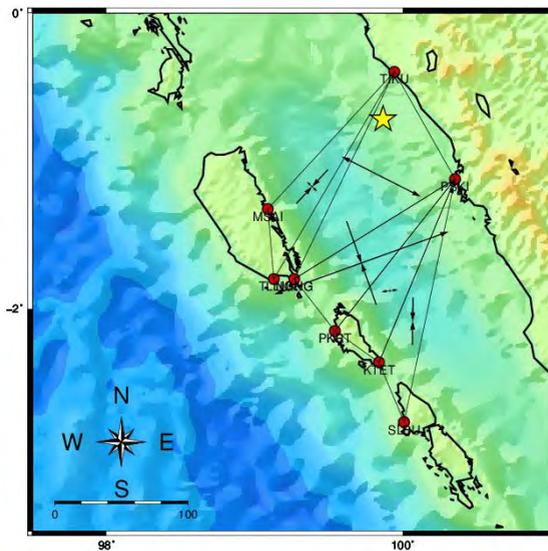
4.2.2 Analisa Regangan

Berikut ini adalah hasil plotting perhitungan regangan dalam dua fase yaitu fase interseismik dan fase poseismik.



Gambar 4. 9 Regangan fase interseismik

Pola kompresi dan pola ekstensi terjadi pada kedua fase yang diamati pada penelitian ini. Pada fase interseismik, pola kompresi terbesar terjadi antara segmen tiga segitiga stasiun pengamatan yaitu NGNG-PKRT-PSKI. Pola kompresi ini menunjukkan adanya energi yang belum lepas dan potensial menjadi koseismik atau menjadi gempa. Pola ekstensi terbesar terjadi pada segmen segitiga antara titik stasiun TIKU-MSAI-TLLU. Terjadinya pola ekstensi adalah karena adanya fase poseismik dari gempa sebelumnya yaitu gempa di dekat Siberut, Kepulauan Mentawai pada tanggal 16 Agustus 2009.



Gambar 4. 10 Regangan fase poseismik

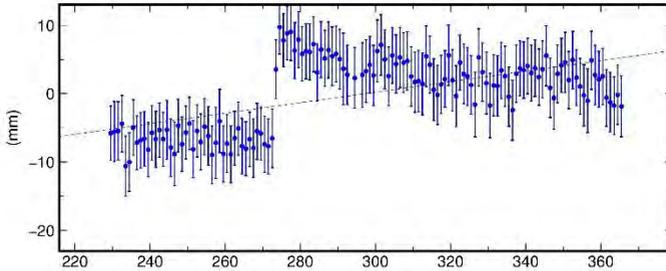
Pada fase poseismik juga terjadi kompresi dan ekstensi pada lima segmen segitiga antar stasiun. Kompresi terjadi pada dua segmen segitiga dan ekstensi terjadi pada tiga segmen segitiga. Pola kompresi terbesar terjadi pada segmen segitiga PSKI-NGNG-PKRT yang menunjukkan adanya energi yang

belum lepas dan potensial menjadi koseismik atau menjadi gempa sedangkan pola ekstensi terbesar terjadi pada segmen segitiga yang sama, hal ini mengindikasikan masih adanya fase poseismik dari gempa sebelumnya.

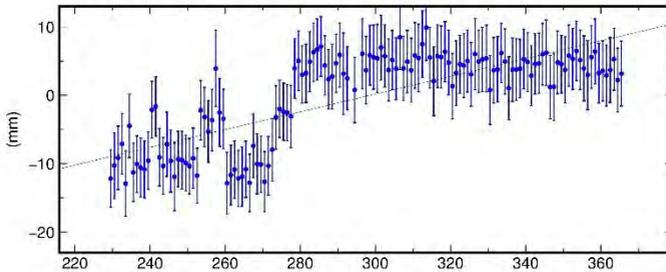
LAMPIRAN

Lampiran 1. *Time series* stasiun PSKI

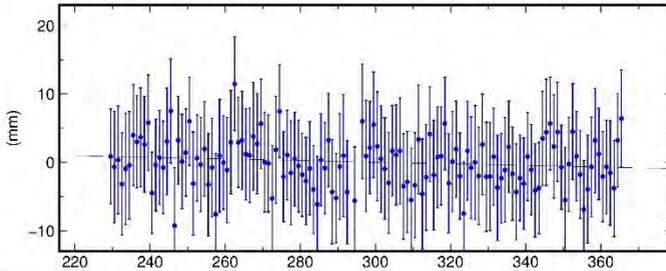
PSKI North Offset -125199.211 m
rate(mm/yr)= 28.09 ± 3.30 nrms= 1.03 wrms= 4.3 mm # 135

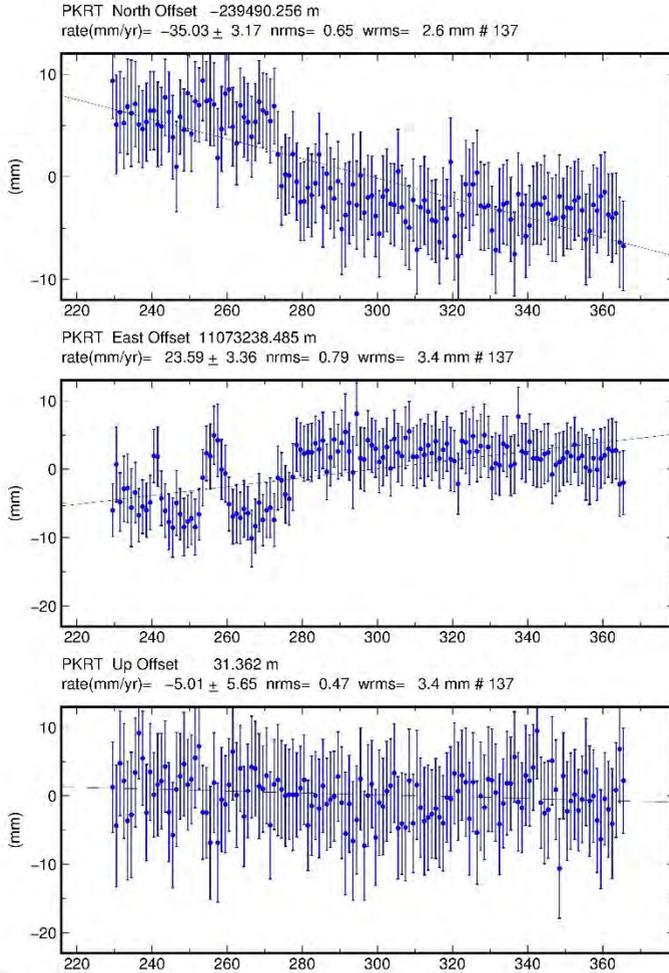


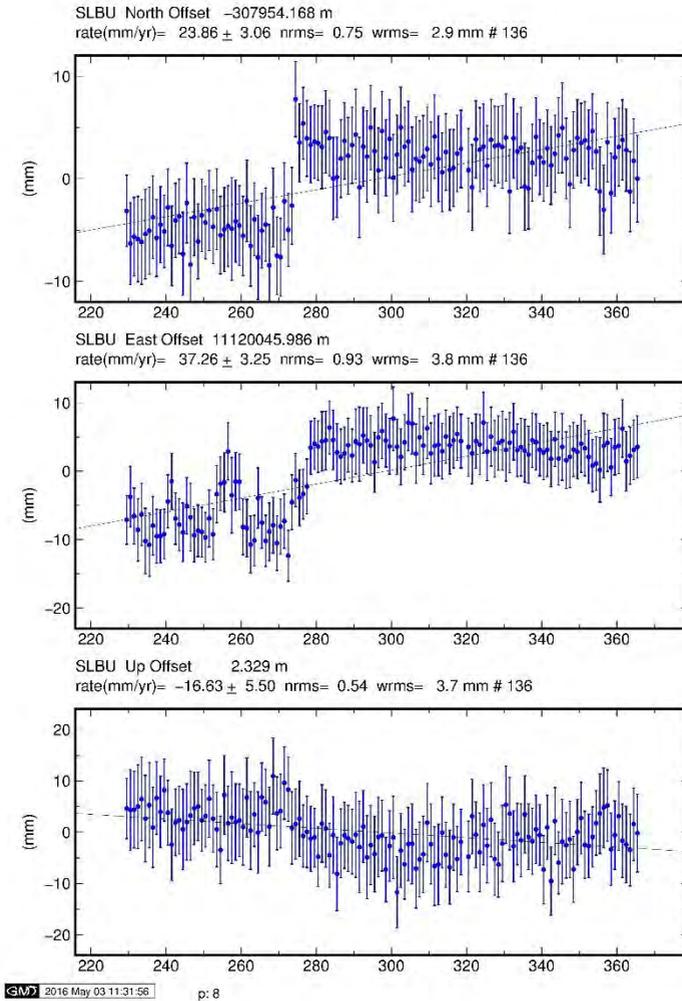
PSKI East Offset 11169132.313 m
rate(mm/yr)= 47.40 ± 3.53 nrms= 0.96 wrms= 4.3 mm # 135



PSKI Up Offset 47.547 m
rate(mm/yr)= -4.32 ± 5.59 nrms= 0.48 wrms= 3.4 mm # 135

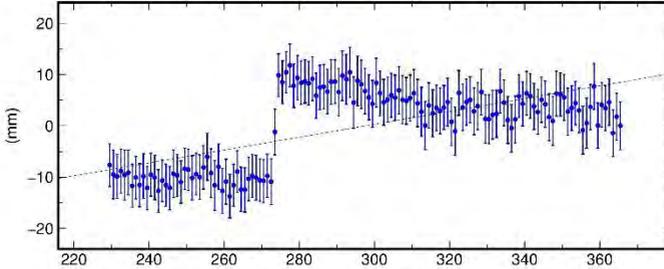


Lampiran 2. *Time series* stasiun PKRT

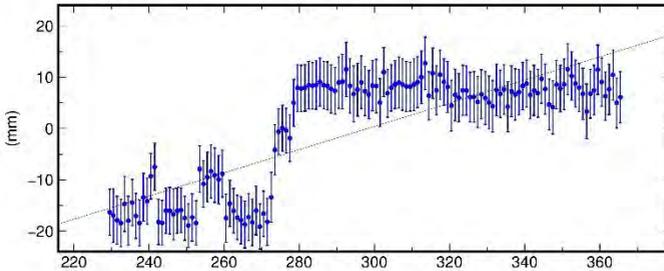
Lampiran 3. *Time series* stasiun SLBU

Lampiran 4. *Time series* stasiun TIKU

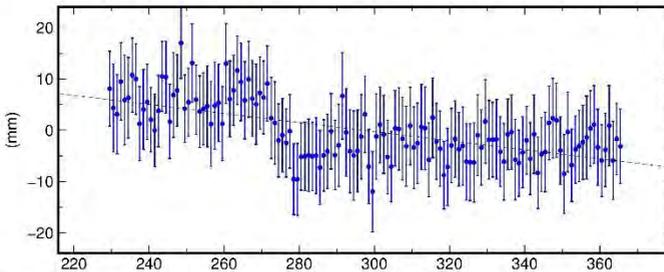
TIKU North Offset -44430.650 m
 rate(mm/yr)= 45.77 ± 3.46 nrms= 1.33 wrms= 5.9 mm # 137

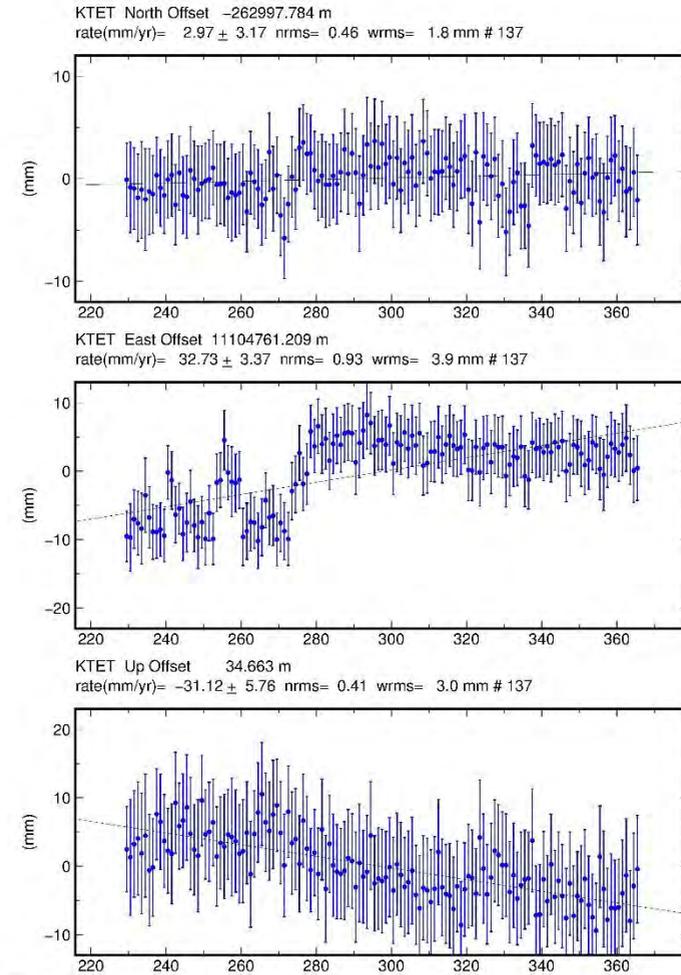


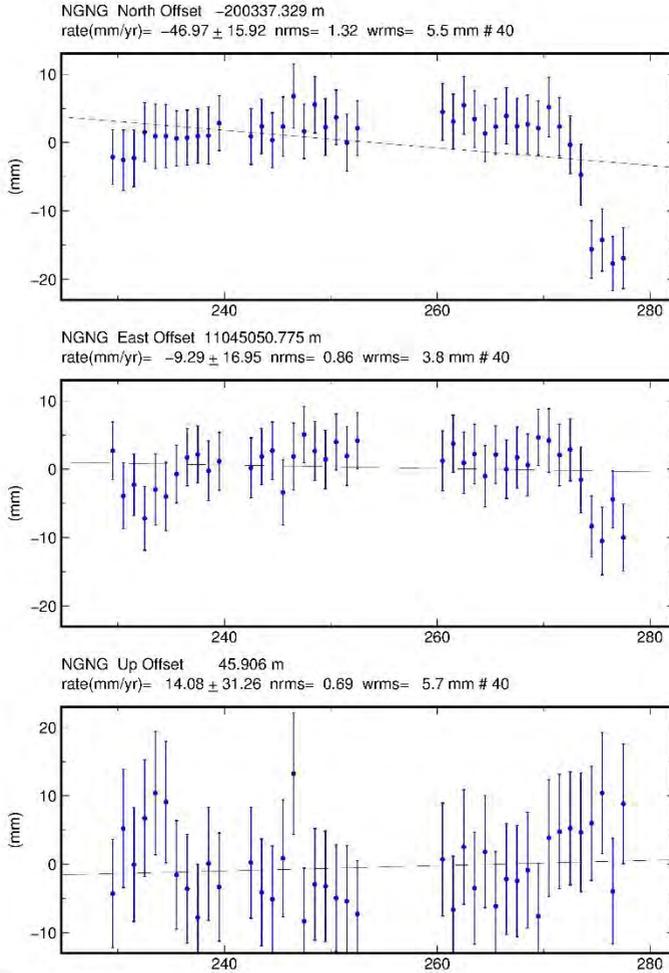
TIKU East Offset 11125466.732 m
 rate(mm/yr)= 82.63 ± 3.72 nrms= 1.40 wrms= 6.6 mm # 137



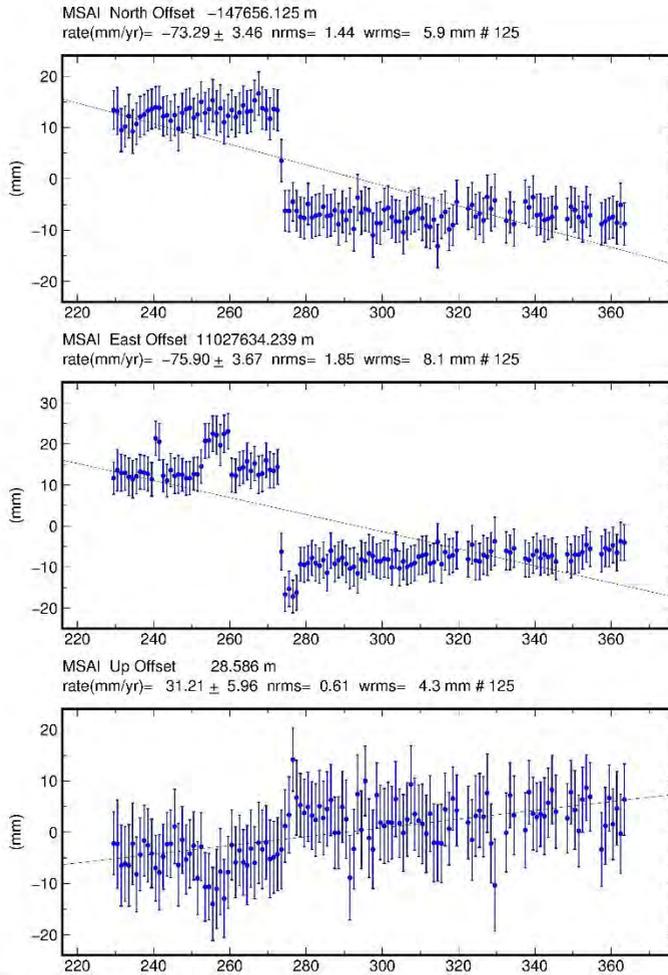
TIKU Up Offset 18.278 m
 rate(mm/yr)= -32.23 ± 5.76 nrms= 0.60 wrms= 4.4 mm # 137

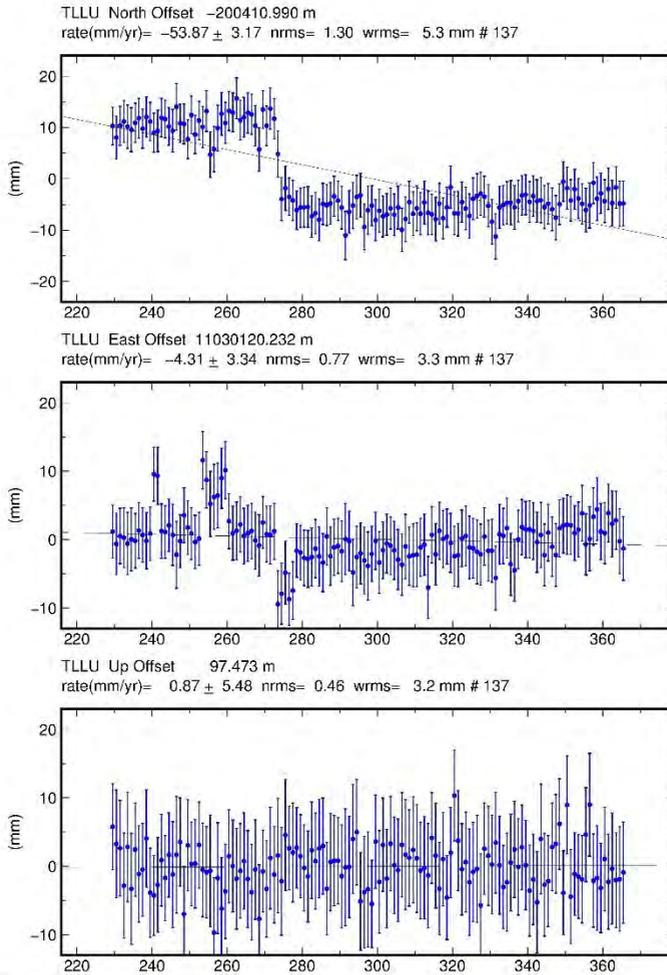


Lampiran 5. *Time series* stasiun KTET

Lampiran 6. *Time series* stasiun NGNG

Lampiran 7. Time series stasiun MSAI



Lampiran 8. *Time series* stasiun TLLU

Lampiran 9. Plot GMT

```

|grdsample etopo2.grd -I0.5m -Gsumat.grd -R97.5/101/-3.5/0 -fg
|grdgradient sumat.grd -Gsumati.grd -M -Ne0.25 -A0/270 -V
makecpt -Chaxby -T-10000/10000/500 -Z > SUGAR.cpt
|grdimage sumat.grd -Isumati.grd -JM19c -R97.5/101/-3.5/0 -CSUGAR.cpt -K -Yc > reganganplot.ps
pscoast -R -B2WSne -Lf98.1/-3.3/0/100 -Tf98.1/-2.9/0.7i/2 -J -O -W2 -K -V -Di>> reganganplot.ps
echo 99.867 -0.72 |psxy -R -J -O -H0 -Sa1.0 -G255/255/0 -W1 -K >> reganganplot.ps
psxy velointer.txt -R -J -O -H0 -Sc0.4 -G200/0/0 -W1 -K >> reganganplot.ps
#psxy velointer.txt -R -JM -B -O -P -K -Wthinner >> reganganplot.ps
psxy regangan1.txt -R -JM -B -O -P -K -Wthinner >> reganganplot.ps
psxy regangan2.txt -R -JM -B -O -P -K -Wthinner >> reganganplot.ps
psxy regangan3.txt -R -JM -B -O -P -K -Wthinner >> reganganplot.ps
psxy regangan4.txt -R -JM -B -O -P -K -Wthinner >> reganganplot.ps
psxy regangan5.txt -R -JM -B -O -P -K -Wthinner >> reganganplot.ps
psvelo velointer.txt -R -JM -O -H0 -Sr.1/0.95/13 -L -W1/0/0/0 -K >> reganganplot.ps
#psvelo -R -JM -Sr.3/0.95/10 -W1/0/0/255 -P -O -L -V -K velointer.txt >> reganganplot.ps
psvelo -R -JM -Sx8m/0.95/3 -W1/0/0/0 -P -O -L -V e1.txt -K >> reganganplot.ps
psvelo -R -JM -Sx8m/0.95/3 -W1/250/0/0 -P -O -L -V e2.txt -K >> reganganplot.ps
ps2raster reganganplot.ps -A -P -TG

```

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut :

- a. Besar dan arah kecepatan pergeseran horizontal dalam tiap fase gempa sebagai berikut :

Tabel 5. 1 Fase Interseismik

Stasiun	Kecepatan Horizontal (m/1.5bulan)	Arah
PSKI	0.00368	Barat laut
SLBU	0.01054	Barat laut
TIKU	0.00305	Timur laut
KTET	0.00825	Barat
PKRT	0.00510	Barat laut
NGNG	0.01368	tenggara
TLLU	0.00532	Barat
MSAI	0.00330	Barat laut

Tabel 5. 2 Fase poseismik

Stasiun	Kecepatan Horizontal (m/3 bulan)	Arah
PSKI	0.00272	Barat
SLBU	0.00226	Barat
TIKU	0.00284	Barat
KTET	0.00122	Barat
PKRT	0.00208	Barat
NGNG	0.23719	Barat daya
TLLU	0.00205	Barat laut
MSAI	0.00194	Barat

Pada fase interseismik, sebagian besar stasiun mengarah ke arah barat laut sedangkan pada fase poseismik sebagian besar stasiun mengarah ke arah barat. Perbedaan arah pada titik stasiun disebabkan masih adanya pengaruh poseismik gempa sebelumnya dan penggunaan data pengamatan yang tidak lengkap sehingga tidak mewakili hasil pengamatan sepenuhnya.

- b. Besar dan arah kecepatan pergeseran vertikal dalam tiap fase gempa sebagai berikut :

Tabel 5. 3 Hasil besar dan arah kecepatan pergeseran vertikal

STASIUN	INTERSEISMIK		STASIUN	POSEISMIK	
	Vu (m/1.5 bulan)	Arah		Vu (m/3 bulan)	Arah
PSKI	-0.00465	Bawah	PSKI	0.00028	Atas
SLBU	0.01073	Atas	SLBU	0.00134	Atas
TIKU	-0.00338	Bawah	TIKU	0.00092	Atas
KTET	0.00491	Atas	KTET	0.00121	Atas
PKRT	0.00333	Atas	PKRT	0.00137	Atas
NGNG	0.00701	Atas	NGNG	0.54010	Atas
TLLU	0.00263	Atas	TLLU	0.00120	Atas
MSAI	0.00318	Atas	MSAI	0.00114	Atas

Hasil table 5.3 dapat bernilai negative (-) dan positif (+) yang dapat mempengaruhi arah pergeseran. Nilai negative menandakan pergeseran ke arah bawah dan nilai positif menandakan arah *up-lift*.

- c. Dari hasil perhitungan regangan dan hasil plotting regangan didapatkan gambaran mengenai adanya daerah yang mengalami pola ekstensi dan pola kompresi. Besar ekstensi dan kompresi fase interseimik sebagai berikut:

No	Segmen Segitiga	Ekstensi (μ strain)	Kompresi (μ strain)
1	TIKU-MSAI-TLLU	0.1025	0.0097
2	TIKU-NGNG-PSKI	0.0691	-0.1042
3	PSKI-NGNG-PKRT	-0.0003	-0.3854
4	PSKI-PKRT-KTET	0.0711	-0.0838
5	PSKI-KTET-SLBU	0.0668	-0.1350

Sedangkan besar ekstensi dan kompresi fase poseismik sebagai berikut:

No	Segmen Segitiga	Ekstensi (μ strain)	Kompresi (μ strain)
1	TIKU-MSAI-TLLU	0.0126	-0.0424
2	TIKU-NGNG-PSKI	1.6222	-0.0022
3	PSKI-NGNG-PKRT	3.4052	-1.6203
4	PSKI-PKRT-KTET	0.0153	-0.0033
5	PSKI-KTET-SLBU	0.0009	-0.0430

Pola ekstensi terjadi karena adanya fase poseismik dari gempa sebelumnya. Sedangkan pola kompresi ini menunjukkan adanya energi yang belum lepas dan potensial menjadi koseismik atau menjadi gempa pada masa mendatang.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kajian pengamatan regangan tektonik menggunakan data SuGAr studi kasus gempa Sumatra Barat tahun 2009, maka penulis memberikan saran sebagai berikut:

- a. Menggunakan stasiun pengamatan yang memiliki data harian (DOY) lengkap sehingga hasil penelitian data

sesuai dengan data yang sebenarnya. Stasiun yang memiliki data tidak lengkap dapat mempengaruhi hasil penelitian sehingga hasil penelitian tidak sesuai dengan yang sebenarnya.

- b. Menambahkan data stasiun IGS dalam pengolahan sebagai titik kontrol atau titik ikat global.
- c. Melakukan penelitian dengan menggunakan software pengolah data yang berbeda untuk mendapatkan perbandingan hasil pengolahan data.
- d. Melakukan analisa gempa Sumatra Barat pada seluruh fase gempa (interseismik dan koseismik).

DAFTAR PUSTAKA

Andreas, H. 2007. *Karakteristik deformasi strain and stress* Bandung: Prodi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB.

BMKG. 2015. *Lempeng Dunia*. http://inatews.bmkg.go.id/tentang_eq.php. Diakses : 14 Desember 2015.

Bock, Y. Prawirodirjo, L. & Genrich, J (2000). One century of tectonic deformation along the Sumatran fault from triangulation and Global Positioning Sistem surveys. *Journal Geophys. Res. Solid Earth* 105, 28343-28361

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., King R. W. 2010. *GLOBK Reference Manual 10.4*. San Diego: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences.

Hidayat, Marta Nugraha. 2012. *REGANGAN TEKTONIK DAN ESTIMASI POTENSI BAHAYA GEMPA DI SELAT SUNDA BERDASARKAN DATA PENGAMATAN GPS*. Bandung: ITB.

Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2008, *GNSS: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer-Verlag Wien, Austria

Kornhauser, A., 2006. *Global Navigation Satellite Sistem (GNSS)*, Princeton University, Amerika Serikat.

Laksmantyo, Johannes M. V. 2014. "analisis deformasi di wilayah jawa tengah akibat pengaruh subduksi berdasarkan data pengamatan GPS tahun 2009-2012". Bandung: ITB.

Ma'ruf, Bilal. 2001. *Analisis Deformasi Gunung Api dengan Metode Geodetik-GPS*. Tesis Program Studi teknik Geodesi dan Geomatika.

Prawirodirdjo. 2000. *Accomodated the subduction of Indo-Australian plate through Eurasian Plate*.

Prijatna, K., Wedyanto, K., 2005. *Sistem Koordinat dan Datum Geodetik*. Bandung : Modul Perkuliahan Ilmu Hitung Geodesi II.

Ramadhon, syafiril. 2013. *Analisis ketelitian data pengukuran menggunakan GPS dengan metode diferensial statik dalam moda jaring dan radial*. Jakarta. Pusdiklatmigas.

Rusmen, M. Ridholfi. 2012. "Analisis Deformasi Gempa Mentawai Tahun 2010 Berdasarkan Data Pengamatan GPS Kontinyu Tahun 2010-2011". Bandung: Teknik Geodesi dan Geomatika.

Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Hannover: Walter de Gruyter GmbH & co. KG.

Segall and Davis. 1997. *GPS Applications for Geodynamics and earthquake Studies*. Stanford.edu

USGS. 2016. *Tectonic*.
<http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>. Diakses : 27 Januari 2016.

Wibawa, I Gusti. "Perkembangan tektonik pulau Sumatra". <https://smaatmiundip.wordpress.com/2012/05/17/perkembangan-tektonik-pulau-sumatra/>. Diakses : 30 Desember 2015.

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*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kediri, Provinsi Jawa Timur tanggal 31 Januari 1994. Penulis yang akrab dipanggil Amik ini merupakan anak pertama dari 2 bersaudara pasangan bapak Marjuki dan ibu Zuliati. Pendidikan formal yang ditempuh penulis antara MI Raudlatut Tholabah (2000-2006), MTsN 2 Kediri (2006-2009) dan SMAN 2 Kediri (2009-2012). Pada tahun 2012, penulis melanjutkan pendidikan Strata 1 di Jurusan Teknik Geomatika FTSP-ITS Surabaya. Selama menjalani perkuliahan, penulis aktif di organisasi jurusan antara lain sebagai ketua panitia LKMM-TD HIMAGE ITS tahun 2014, Ketua Departemen PSDM (Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa) HIMAGE-ITS tahun 2014-2015 dan Ketua Forum Mahasiswa El-Smada (2014-2015). Pada tahun ke-empat perkuliahan, penulis aktif menjalani kegiatan penelitian Tugas Akhir di Laboratorium Geodinamika dan Lingkungan Geomatika-ITS.