Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RM 184831

ANALISIS DEFORMASI DAN POTENSI GEMPA DI KOTA SURABAYA MENGGUNAKAN DATA GPS

ANDIKA MAURADHIA
NRP 03311540000083

Dosen Pembimbing
Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil, Ph.D.
Dr. Susilo S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

TUGAS AKHIR – RM 184831

ANALISIS DEFORMASI DAN POTENSI GEMPA DI KOTA SURABAYA MENGGUNAKAN DATA GPS

ANDIKA MAURADHIA
NRP 033115 4000 0083

Dosen Pembimbing
Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil, Ph.D.
Dr. Susilo S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

UNDERGRADUATE THESIS – RM 184831

ANALYSIS OF DEFORMATION AND EARTHQUAKE POTENTIAL IN SURABAYA CITY USING GPS DATA

ANDIKA MAURADHIA
NRP 033115 4000 0083

Supervisor
Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil, Ph.D.
Dr. Susilo S.T., M.T.

GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil, Environtment, Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

ANALISIS DEFORMASI DAN POTENSI GEMPA DI KOTA SURABAYA MENGGUNAKAN DATA GPS

Nama	: Andika Mauradhia
NRP	: 03311540000083
Departemen	: Teknik Geomatika FTLSK-ITS
Dosen Pembimbing	: Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil, Ph.D.
	Dr. Susilo S.T., M.T.

ABSTRAK

Indonesia adalah negara kepulauan yang dikelilingi oleh Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik. Interaksi antar lempeng tersebut menyebabkan Indonesia rawan akan bencana gempa bumi, gunung api, dan tsunami. Kota Surabaya adalah ibu kota Provinsi Jawa Timur sekaligus kota metropolitan kedua terbesar di Indonesia. Salah satu ancaman bencana di wilayah Surabaya berasal dari sesar Kendeng yang dapat menyebabkan terjadinya gempa bumi. Salah satu langkah awal mitigasi bencana gempa yang dapat dilakukan adalah menganalisis potensi gempa di wilayah tersebut. Untuk menganalisis potensi gempa pada suatu wilayah dapat dilakukan dengan pemantauan deformasi menggunakan data *Global Positioning System* (GPS).

Dari hasil dan analisis pengolahan data pengamatan GPS sebanyak 3-4 kala, diperoleh nilai kecepatan pergeseran dan regangan. Pergeseran horizontal titik-titik pengamatan GPS dominan menuju ke arah tenggara dengan rentang nilai kecepatan pergeseran antara 1,034 cm/tahun hingga 5,674 cm/tahun. Pada pergeseran vertical, titik-titik selain BM23, BM29, dan BM24 mengalami *subsidence* dengan rentang nilai kecepatan pergeseranan antara -0,190 cm/tahun hingga -5,769 cm/tahun. Perhitungan regangan menghasilkan tingkat ekstensi di Kota Surabaya berkisar antara 0,012 hingga 8,697 µstrain dan tingkat kompresi dengan rentang nilai 0,190 hingga 11,950 µstrain. Sehingga dapat disimpulkan Kota Surabaya memiliki potensi

gempa yang perlu diwaspadai, terutama dari wilayah Surabaya Barat karena adanya aktivitas sesar dan didominasi oleh tingkat kompresi yang lebih besar daripada wilayah lain.

Kata Kunci: Potensi Gempa, Deformasi, GPS, Kecepatan, Regangan

ANALYSIS OF DEFORMATION AND EARTHQUAKE POTENTIAL IN SURABAYA CITY USING GPS DATA

Name : Andika Mauradhia
NRP : 03311540000083
Department : Geomatics Engineering, FTLSK-ITS
Supervisor : Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil, Ph.D
Dr. Susilo S.T., M.T

ABSTRACT

Indonesia is an archipelago surrounded by the Eurasian Plate, the Indo-Australian Plate, the Philippine Sea Plate, and the Pacific Plate. Interaction between these plates is causing Indonesia to be prone to earthquakes, volcanoes and tsunamis. Surabaya City is the capital of East Java Province as well as the second largest metropolitan city in Indonesia. One of the disaster threats in the Surabaya City came from the Kendeng fault which could cause an earthquake. One of the first steps in earthquake disaster mitigation that can be done is to analyze the potential of earthquakes in the region. To analyze the potential of earthquakes in an area can be done by observing deformation using Global Positioning System (GPS) data.

From the results and analysis of GPS data processing, the values of shift velocity and strain are obtained. The horizontal shift of the dominant GPS observation points towards the southeast with a range of values of shifting speeds between 1.034 cm/year to 5.674 cm/year. In vertical shifts, points other than BM23, BM29, and BM24 experience subsidence with a range of displacement velocities between -0.190 cm/year to -5.769 cm/year. The resulting strain calculation extension level in the city of Surabaya ranges from 0.012 to 8.697 µstrain and the level of compression with a range of values between 0.190 to 11.950 µstrain. So it can be concluded that Surabaya City has the potential for earthquakes to watch out for, especially from the West Surabaya region due to

fault activity and is dominated by a greater compression level than other regions.

Key words: Earthquakes Potential, Deformation, GPS, Velocity, Strain

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS DEFORMASI DAN POTENSI GEMPA DI KOTA SURABAYA MENGGUNAKAN DATA GPS

TUGAS AKHIR

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

Oleh :
ANDIKA MAURADHIA
NRP. 03311540000083

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil, Ph.D. ( )
NIP. 19781231 200212 2 001

Dr. Susilo S.T., M.T. ( )
NIP. 19770702 200312 1 002

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIAN
DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA

SURABAYA, JULI 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya sehingga laporan tugas akhir yang berjudul “**Analisis Deformasi dan Potensi Gempa di Kota Surabaya Menggunakan Data GPS”** ini dapat diselesaikan dengan baik dan lancar.

Selama pelaksanaan penelitian tugas akhir ini, banyak pihak yang telah memberikan bantuan dan dorongan secara moral maupun material. Atas segala bantuan dan dukungan tersebut, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan.
2. Keluarga terutama orang tua penulis yang selama pelaksanaan tugas akhir sampai pembuatan laporan ini memberikan inspirasi, semangat, kasih sayang dan seluruh dukungannya kepada penulis.
3. Bapak Mokhamad Nur Cahyadi, ST, MSc, Ph.D, selaku Ketua Departemen Teknik Geomatika ITS.
4. Bapak Lalu Muhamad Jaelani, ST, MSc, Ph.D, selaku dosen wali penulis yang telah banyak membantu khususnya administrasi perkuliahan selama semester 1 sampai 8.
5. Ibu Ira Mutiara Anjasmara S.T., M.Phil, Ph.D selaku dosen pembimbing utama atas segala bimbingan dan sarannya.
6. Bapak Dr. Susilo S.T., M.T. selaku pembimbing kedua penulis atas saran-saran yang diberikan terutama dalam hal pengolahan.
7. Seluruh dosen ITS Departemen Teknik Geomatika yang telah memberikan banyak ilmu baik dalam hal akademik dan non-akademik kepada penulis
8. Seluruh karyawan dan karyawati ITS Departemen Teknik Geomatika yang telah memberikan kenyamanan baik dalam hal akademik dan non-akademik
9. Teman-teman ITS Departemen Teknik Geomatika, khususnya angkatan 2015 yang telah menemani penulis melewati segala suka dan duka bersama.

10. Teman-teman Kontrakan Barokah (Agung, Dino, Fafa, Rega, dan Umam) yang telah memberikan kenangan indah kepada penulis dalam melalui hari bersama.
11. Pak Sidik, Bang Yudha, dan Mas Yuan yang telah banyak membantu dan memberikan saran kepada penulis dalam penelitian ini.
12. Teman-teman Lab Geodinamika dan Lingkungan + Janu yang telah menjadi teman seperjuangan dan banyak membantu penulis dalam menyelasaikan tugas akhir ini.
13. Teman-teman ITSmaga Solits yang telah menjadi partner merantau penulis dalam dunia perkuliahan ini.
14. Teman-teman JMMI ITS yang telah mengajarkan kepada penulis untuk tidak lupa menuntut ilmu agama.
15. Teman-teman PLH Siklus ITS yang telah mengajarkan penulis bahwa alam ini tidak membutuhkan kita, kitalah yang membutuhkan alam.
16. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis sangat mengharapkan saran dan masukan sebagai pembelajaran bagi penulis untuk menjadi lebih baik. Penulis menyadari bahwa dalam laporan ini masih banyak terdapat kekurangan, oleh karena itu, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Akhir kata, penulis menyampaikan terima kasih atas segala kesempatan yang telah diberikan, semoga penelitian ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
ABSTRAK v
ABSTRACT vii
LEMBAR PENGESAHAN ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xvii
DAFTAR LAMPIRAN xix
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan 4
1.5 Manfaat 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Teori Tektonik Lempeng 5
2.2 Zona Subduksi 6
2.3 Sesar 7
2.4 Gempa Bumi 10
2.5 Deformasi 11
2.6 Hubungan Deformasi dengan Gempa Bumi 16
2.7 Global Positioning System (GPS) 17
2.8 Pemantauan Deformasi dengan GPS 23
2.9 Uji Hipotesis 25
2.10 Penelitian Terdahulu 25
BAB 3 METODOLOGI 27
3.1 Lokasi Penelitian 27
3.2 Data dan Peralatan 28
3.3 Metode Penelitian 31
BAB IV HASIL DAN ANALISIS 39
4.1 Analisis Kecepatan Pergeseran 39
4.2 Uji Hipotesis 46

4.3 Analisis Regangan 49
4.4 Analisis Potensi Gempa 55
4.5 Analisis dengan Peta Geologi 57
4.6 Validasi menggunakan Metode *Synthetic Aperture Radar* (SAR) 60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 63
5.1 Kesimpulan 63
5.2 Saran 63
DAFTAR PUSTAKA 65
LAMPIRAN 69
BIODATA PENULIS 845

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Peta Sesar Aktif di Jawa 2
Gambar 2. 1 Jenis-Jenis Batas Lempeng 6
Gambar 2. 2 Zona Subduksi 7
Gambar 2. 3 Pergerakan Sesar 9
Gambar 2. 4 Estimasi Posisi Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru 10
Gambar 2. 5 Translasi 12
Gambar 2. 6 Rotasi 13
Gambar 2. 7 Regangan Normal 13
Gambar 2. 8 Regangan Geser 14
Gambar 2. 9 Mekanisme Terjadinya Gempa Bumi 17
Gambar 2. 10 Prinsip Penentuan Posisi Sistem GPS Metode Absolut 19
Gambar 2. 11 Penentuan Posisi Sistem GPS Metode Diferensial 20
Gambar 2. 12 Kesalahan Orbit 21
Gambar 2. 13 Ambiguitas Fase 21
Gambar 2. 14 Multipath 22
Gambar 2. 15 Bias Ionosferik dan Bias Troposferik 23
Gambar 2. 16 Cycle Slip 23
Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian dan Letak Titik Pengamatan GPS Periodik di Kota Surabaya 27
Gambar 3. 2 Letak Titik Pengamatan GPS kontinyu 30
Gambar 3. 3 Persebaran Titik IGS 31
Gambar 3. 4 Diagram Alir Penelitian 32
Gambar 3. 5 Struktur Direktori Kerja GAMIT 35
Gambar 4. 1 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Horizontal Titik Pengamatan GPS Periodik 42
Gambar 4. 2 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Horizontal Titik Pengamatan GPS Kontinyu 43
Gambar 4. 3 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Vertikal Titik Pengamatan GPS Periodik 45

Gambar 4. 4 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Vertikal Titik Pengamatan GPS Kontinyu....................................46
Gambar 4. 5 Segmen Segitiga Titik Pengamatan GPS................49
Gambar 4. 6 Hasil *Plotting* Regangan di Kota Surabaya 52
Gambar 4. 7 Hasil Zonasi Regangan di Kota Surabaya pada Tingkat Kecamatan 54
Gambar 4. 8 Wilayah Surabaya dengan kompresi tinggi yang ditunjukkan garis hijau..57
Gambar 4. 9 Hasil Digitasi Peta Geologi Surabaya.....................59
Gambar 4. 10 Potongan Peta Geologi Lembar Surabaya dan Sapulu, Jawa..59
Gambar 4. 11 Pola Deformasi Mei 2015-September 2017..........61

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Waktu Pengamatan..28
Tabel 3. 2 Titik Pengamatan Tiap Kala.......................................28
Tabel 4. 1 Komponen Kecepatan Titik Pengamatan dan Standar Deviasinya (cm/tahun) 39
Tabel 4. 2 Kecepatan Pergeseran Horizontal Titik Pengamatan (cm/tahun) 41
Tabel 4. 3 Hasil Uji Hipotesis *T-Student* Pergeseran Horizontal 47
Tabel 4. 4 Hasil Uji Hipotesis *T-Student* Pergeseran Vertikal 48
Tabel 4. 5 Nilai Parameter Deformasi Berdasarkan Segmen Segitiga...50
Tabel 4. 6 Nilai *Principal Strain* Berdasarkan Segmen Segitiga 51
Tabel 4. 7 Hasil SBAS Mei 2015-September 2017.....................60

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Alat 69
Lampiran 2 *Control Files* GAMIT-GLOBK 71
Lampiran 3 *Time Series* Titik Pengamatan GPS 77
Lampiran 4 Script Perhitungan Regangan 83

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

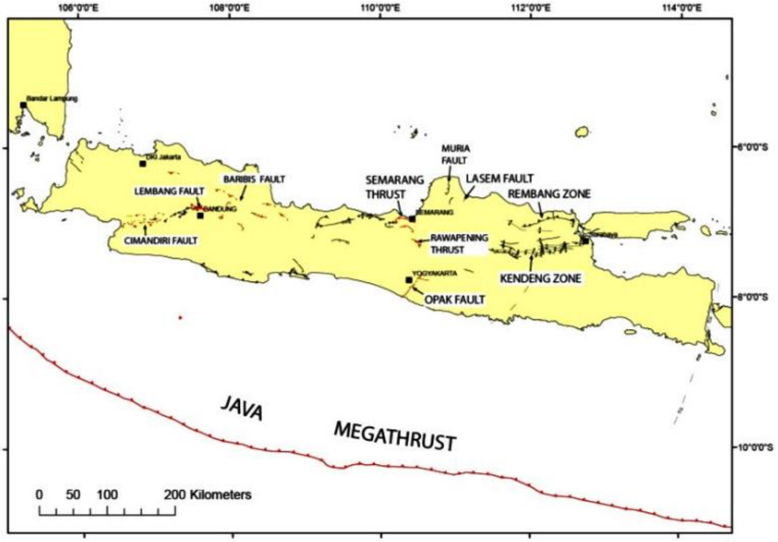
BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara kepulauan yang dikelilingi oleh empat lempeng besar, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik. Lempeng–lempeng tersebut terus bergerak yang mana suatu saat gerakannya akan mengalami gesekan atau benturan yang cukup keras sehingga menyebabkan terjadinya subduksi. Subduksi merupakan suatu fenomena yang terjadi pada batas konvergen antara dua lempeng yang berbeda densitas yang mengakibatkan salah satu lempeng bergerak ke bawah lempeng lainnya dan tenggelam ke arah mantel bumi. Penunjaman ini terjadi di batas antar lempeng samudra dan benua atau di antara sesama lempeng samudra. Sisa energi dari proses subduksi antar lempeng tersebut akan mengakibatkan adanya sesar di daratan atau lautan. Pergerakan lempeng, zona subduksi, atau sesar inilah yang menyebabkan Indonesia rawan akan bencana gempa bumi, gunung api, dan tsunami.

Kota Surabaya adalah ibu kota Provinsi Jawa Timur sekaligus kota metropolitan terbesar kedua di Indonesia. Sebagai kota berpenduduk terbesar kedua setelah Jakarta dan Indonesia yang rawan akan bencana, aspek mitigasi bencana perlu mendapatkan perhatian serius untuk menghindari korban jiwa dan kerugian yang besar. Salah satu ancaman bencana di wilayah Surabaya berasal dari sesar Kendeng yang dapat menyebabkan terjadinya gempa bumi. Sesar ini terdiri dari kumpulan sesar-sesar naik dan lipatan-lipatan (*blind faults*) yang dapat diamati dari adanya anomali Bouguer di daerah ini (Smyth, Hall, dan Nichols, 2008 dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Berdasarkan Pakar Geologi dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Amien Widodo, menyebutkan bahwa Sesar Waru memanjang dari sekitar Waru tepatnya mulai dari kawasan Karangpilang, Surabaya hingga ke Jombang, Nganjuk dan sampai ke Saradan, Madiun. Sedangkan

Sesar Surabaya memanjang mulai dari kawasan perbukitan Wonokitri, Mayjen Sungkono hingga ke kawasan Cerme, Gresik.



Gambar 1. 1 Peta Sesar Aktif di Jawa (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)

Salah satu langkah awal mitigasi bencana gempa yang dapat dilakukan adalah mengetahui dan menganalisis potensi gempa di wilayah tersebut. Untuk menganalisis potensi gempa pada suatu wilayah dapat dilakukan dengan pengamatan deformasi pada titik-titik yang telah ditentukan. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam pengamatan deformasi adalah metode *Global Navigation Satellite System* (GNSS) dengan memanfaatkan *Continuously Operating Reference Station* (CORS) yang stasiunnya tersebar di wilayah Indonesia. Dalam pemanfaatannya, CORS dapat menyediakan data penentuan posisi secara kontinyu selama 24 jam per hari sehingga dapat digunakan untuk pengamatan deformasi. Setelah dilakukan pengamatan data-data

yang diperoleh dapat digunakan untuk menganalisis deformasi yang terjadi dan potensi gempa yang dimiliki suatu wilayah.

Pada penelitian ini wilayah yang dipilih adalah Kota Surabaya yang memiliki dua segmen Sesar Kendeng, yaitu Sesar Surabaya dan Sesar Waru. Metode yang digunakan menggunakan data *Global Positioning System* (GPS) yang bersifat kontinyu dan periodik yang diperoleh dari pengukuran. Data tersebut selanjutnya diolah menggunakan *software* GAMIT (*GPS Analysis at MIT*) dan GLOBK (*Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program*) untuk mengetahui arah dan besar pergeseran posisi titik-titik pengamatan. Setelah didapat posisi, arah, dan besar pergeseran maka nilai tersebut dapat digunakan untuk mengetahui besar dan pola regangan yang terjadi. Data pergeseran dan regangan yang didapat selanjutnya dianalisis deformasi dan potensi gempa di Kota Surabaya.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. bagaimana menentukan deformasi berdasarkan besar dan arah pergeseran posisi titik-titik pengamatan GPS?;
2. bagaimana menentukan deformasi berdasarkan besar dan pola regangan di Kota Surabaya dari titik-titik pengamatan GPS?;
3. bagaimana menganalisis potensi gempa di Kota Surabaya dari hasil deformasi yang diperoleh serta keberadaan Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru?.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. lokasi penelitian berada di Kota Surabaya yang terletak pada koordinat 07^{o}11’00’’–07^{o}21’00’’ Lintang Selatan dan 112^{o}36’00’’–112^{o}54’00’’ Bujur Timur;
2. stasiun CORS yang digunakan milik Badan Informasi Geospasial (BIG), yaitu stasiun CSBY di Surabaya, CMJT di

Mojokerto, CLMG di Lamongan, CPAS di Pasuruan, dan CSMP di Sampang;
3. titik pengamatan yang digunakan tersebar di Kota Surabaya dengan rincian waktu 10-13 Maret dan 11-15 September pada tahun 2017 serta 11-15 Mei dan 26-29 Oktober pada tahun 2018;
4. pengolahan data GPS menggunakan *scientific software* GAMIT-GLOBK;
5. analisis potensi gempa yang dilakukan berdasarkan pada deformasi yang terjadi di Kota Surabaya.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitiani ini sebagai berikut:

1. menentukan deformasi berdasarkan besar dan arah pergeseran posisi titik-titik pengamatan;
2. menentukan deformasi berdasarkan besar dan pola regangan di Kota Surabaya;
3. menganalisis potensi gempa di Kota Surabaya dari hasil deformasi yang diperoleh dan keberadaan Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru.

1.5 Manfaat

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah dapat memberikan informasi mengenai potensi gempa di wilayah Kota Surabaya dari analisis deformasi berdasarkan observasi GPS. Informasi tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam tahapan mitigasi bencana selanjutnya khususnya gempa bumi dan/atau penelitian lain yang terkait.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Tektonik Lempeng

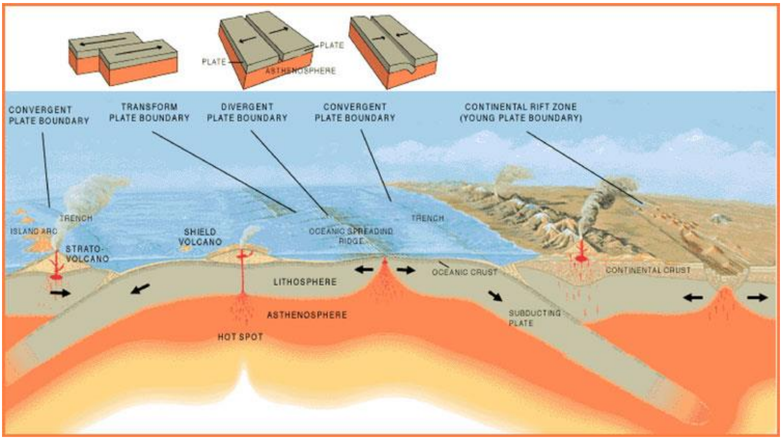
Teori Tektonik Lempeng adalah teori dalam bidang geologi yang dikembangkan untuk memberi penjelasan terhadap adanya bukti-bukti pergerakan skala besar yang di lakukan oleh *lithosphere*. Teori ini menyatakan bahwa lapisan terluar bumi terbuat dari suatu lempengan tipis dan keras yang masing-masing saling bergerak relatif terhadap yang lainnya. Setiap lempeng tektonik adalah kaku dan bergerak sebagai unit mekanis tunggal. Hal ini mengakibatkan bila sebagian bergerak maka satu unit lempeng akan bergerak. Perubahan kecil akan terjadi pada bagian tengah dan tentu saja kerusakan besar timbul pada bagian tepi karena bersinggungan langsung dengan lempeng yang lain.

2.1.1 Jenis-Jenis Batas Lempeng

Ada tiga jenis batas lempeng yang berbeda dari cara lempengan tersebut bergerak relatif terhadap satu sama lain. Tiga jenis ini masing-masing berhubungan dengan fenomena yang berbeda di permukaan. Tiga jenis batas lempeng tersebut adalah:

1. Batas Transform (*Transform Boundaries*)
   Batas transform terjadi jika lempeng bergerak dan mengalami gesekan satu sama lain secara menyamping di sepanjang sesar transform (*transform fault*). Gerakan relatif kedua lempeng bisa sinistral (ke kiri di sisi yang berlawanan dengan pengamat) ataupun dekstral (ke kanan di sisi yang berlawanan dengan pengamat).
2. Batas Divergen/Konstruktif (*Divergent/Constructive Boundaries*)
   Batas divergen terjadi ketika dua lempeng bergerak menjauh satu sama lain. *Mid-oceanic ridge* dan zona retakan (*rifting*) yang aktif adalah contoh batas divergen

3. Batas Konvergen/Destruktif (*Convergent/Destructive Boundaries*)
   Batas konvergen terjadi jika dua lempeng bergesekan mendekati satu sama lain sehingga membentuk zona subduksi jika salah satu lempeng bergerak di bawah yang lain, atau tabrakan benua (*Continental Collision*) jika kedua lempeng mengandung kerak benua. Palung laut yang dalam biasanya berada di zona subduksi, di mana potongan lempeng yang terhunjam mengandung banyak bersifat hidrat (mengandung air), sehingga kandungan air ini dilepaskan saat pemanasan terjadi bercampur dengan mantel dan menyebabkan pencairan sehingga menyebabkan aktivitas vulkanik.

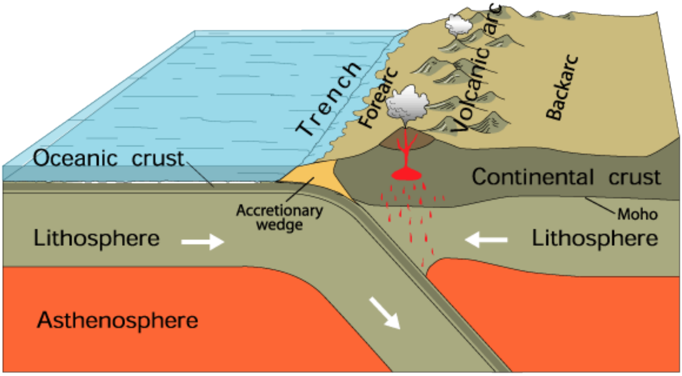


Gambar 2. 1 Jenis-Jenis Batas Lempeng (USGS, 1999)

2.2 Zona Subduksi

Zona subduksi atau zona penunjaan merupakan zona yang terdapat pada batas antar lempeng yang bersifat konvergen. Akibat perbedaan massa jenis antara kedua jenis lempeng tersebut, maka lempeng yang lebih besar massa jenisnya menunjam kebawah lempeng lainnya. Penunjaman ini terjadi di batas antar lempeng

samudra dan benua atau di antara sesama lempeng samudra. Zona penunjaman adalah salah satu tempat bagi tebentuknya deretan gunung berapi dan gempa bumi. Pergerakan lempeng tektonik sendiri disebabkan oleh arus konveksi panas. Sedangkan perbedaan massa jenis ini terjadi akibat dari jenis batuan yang ada pada kedua lempeng ini berbeda. Pada lempeng samudra batuannya bersifat lebih basa daripada lempeng benua.



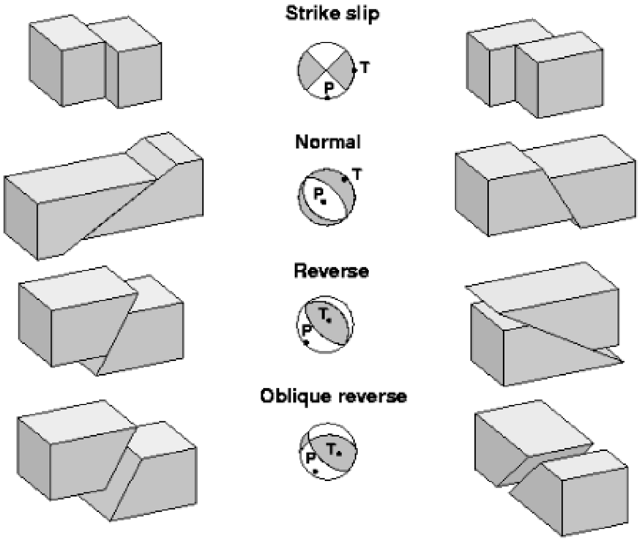
Gambar 2. 2 Zona Subduksi (USGS, 2016)

2.3 Sesar

Sesar (patahan) adalah fraktur planar atau diskontinuitas dalam volume batuan, di mana telah ada perpindahan signifikan sebagai akibat dari gerakan massa batuan. Sesar-sesar berukuran besar di kerak bumi merupakan hasil dari aksi gaya lempeng tektonik, dengan yang terbesar membentuk batas-batas antara lempeng, seperti zona subduksi atau sesar transform. Energi yang dilepaskan menyebabkan gerakan yang cepat pada sesar aktif yang merupakan penyebab utama gempa bumi. Menurut ilmu geofisika, sesar (patahan) terjadi ketika batuan mengalami tekanan dan suhu yang rendah sehingga sifatnya menjadi rapuh (Asikin, 1978).

2.3.1 Jenis-Jenis Sesar

1. Sesar Turun
   Patahan atau sesar turun atau disebut juga sesar normal, adalah satu bentuk rekahan pada lapisan bumi yg memungkinkan satu blok batuan bergerak relatif turun terhadap blok lainnya. blok yang ada di bagian bawah sesar disebut sebagai *foot wall* dan blok yang ada di bagian atas sesar disebut sebagai *hanging wall*. Pada sesar turun, bagian *hanging wall* akan bergerak relatif turun terhadap *foot wall*-nya. Karena ada gaya gravitasi yang mempengaruhinya maka sering disebut sesar turun.
2. Sesar Datar
   Pergerakan dari sesar ini horizontal. Sesar mendatar ditentukan dengan menghadap bidang sesar, bila bidang didepan bergerak kekiri seperti diagram disebut mendatar sinistral, dan sebaliknya sesar mendatar dekstral.
3. Sesar Miring
   Pergerakan dari sesar ini gabungan antara horizontal dan vertikal. Gaya-gaya yang bekerja menyebabkan sesar mendatar dan sesar normal.
4. Sesar Translasi
   Sesar ini mngalami pergeseran sepanjang garis lurus. Biasanya *hanging wall* relatif naik terhadap *foot wall*, dengan kemiringan bidang sesar besar. sesar ini biasanya disebut juga sesar naik.
5. Sesar Gunting
   Pergerakan dari sesar ini juga sama dengan sesar miring yaitu horizontal dan vertikal, sesar yang pergeserannya berhenti pada titik tertentu sepanjang jurus sesar. Gaya yang bekerja sama dengan sesar normal.



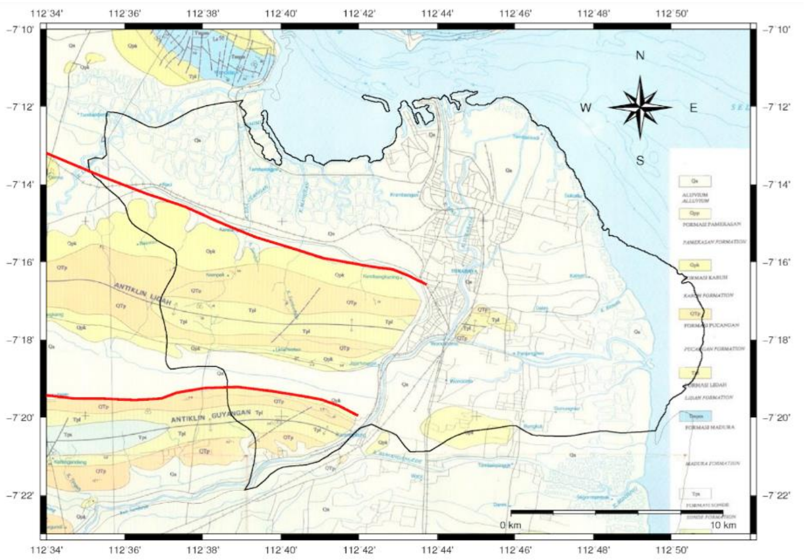
Gambar 2. 3 Pergerakan Sesar (USGS, 1996)

2.3.2 Sesar Kendeng

Sesar Kendeng merupakan zona sesar yang memanjang mengarah barat timur dari Jawa Tengah hingga bagian barat Jawa Timur. Sesar ini terdiri dari kumpulan sesar-sesar naik dan lipatan-lipatan (*blind faults*) yang dapat diamati dari adanya anomali Bouguer di daerah ini (Smyth, Hall, dan Nichols, 2008 dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Di bagian barat sesar kendeng ini terlihat menyambung ke dalam sistem Sesar Semarang dan Baribis. Gempa-gempa dangkal berukuran sedang (Mw4-5) terjadi di sepanjang zona sesar ini dalam beberapa tahun terakhir. Bukti pergerakan sesar ini dapat diamati dengan adanya teras-teras sungai yang terangkat seiring dengan pergerakan sesar-sesar di daerah ini (Marliyani, 2016)

Hasil penelitian terakhir dan juga hasil diskusi kelompok tim revisi zonasi gempa dari Pusat Studi Gempa Nasional menunjukkan bahwa Sesar Baribis merupakan bagian dari satu kesatuan jalur sesar naik belakang busur, termasuk di dalamnya

Sesar Semarang dan sesar-sesar naik di zona Kendeng, Jawa Timur (Natawidjaja dan Daryono, 2016). Sesar Kendeng di Surabaya terbagi menjadi dua segmen, yaitu Segmen Surabaya dan Segmen Waru. Berdasarkan Pakar Geologi dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Amien Widodo, menyebutkan bahwa Sesar Waru memanjang dari sekitar Waru tepatnya mulai dari kawasan Karangpilang, Surabaya hingga ke Jombang, Nganjuk dan sampai ke Saradan, Madiun. Sedangkan Sesar Surabaya memanjang mulai dari kawasan perbukitan Wonokitri, Mayjen Sungkono hingga ke kawasan Cerme Gresik



Gambar 2. 4 Estimasi Posisi Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru (Anjasmara dkk, 2018)

2.4 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran atau getar-getar yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi dari dalam secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Gempa Bumi biasa disebabkan oleh pergerakan kerak Bumi (lempeng Bumi).

Frekuensi suatu wilayah, mengacu pada jenis dan ukuran gempa Bumi yang dialami selama periode waktu. Gempa Bumi diukur dengan menggunakan alat Seismometer. Gempa mempunyai sifat berulang. Suatu gempa yang terjadi pada waktu tertentu akan terulang lagi di masa yang akan datang dalam periode waktu tertentu. Karena sifatnya yang berulang ini, gempa mempunyai suatu siklus yang disebut siklus gempa sebagai berikut (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017):

1. *Interseismic,* yaitu tahapan awal dari suatu siklus gempa. Pada tahap ini, energi dari dalam bumi menggerakkan lempeng kemudian terjadi akumulasi energi di beberapa bagian lempeng tempat biasanya terjadi gempa (batas antarlempeng atau sesar). Untuk beberapa kasus subduksi antara dua lempeng, pada saat fase *interseismic* di zona subduksi mengalami *locking* sehingga energi terkumpul di zona tersebut dan material lempeng yang tersubduksi mengalami *shortening*. Besarnya energi yang terkumpul di area *locking* semakin lama semakin meningkat hingga memasuki fase berikutnya.
2. *Coseismic,* yaitu fase saat energi yang telah terkumpul dilepaskan dalam bentuk gempa,. Saat akumulasi energi melebihi kekuatan destruktif dari area *locking*, terjadi pelepasan energi dalam bentuk gempa. Material lempeng pada fase ini mengalami ekstensi.
3. *Postseismic,* yaitu tahapan ketika sisa-sisa energi gempa terlepaskan secara perlahan dalam kurun waktu yang lama sampai kondisi kembali ke tahap keseimbangan awal yang baru.

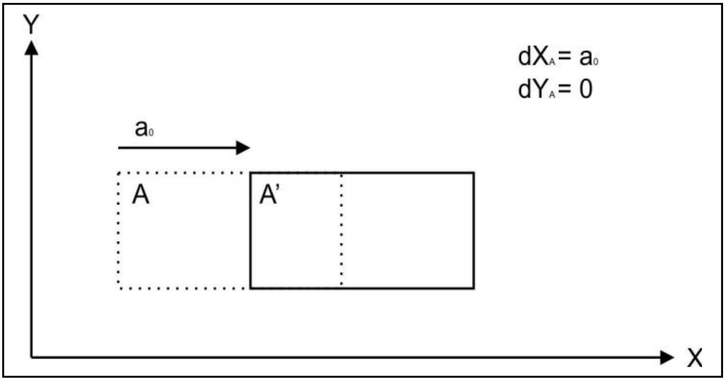
2.5 Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk, dimensi, dan posisi dari suatu materi baik merupakan bagian dari alam ataupun buatan manusia dalam skala waktu dan ruang (Kuang, 1991). Deformasi dari suatu materi dalam skala makro tidak selamanya bersifat permanen, besar perubahan sangat bergantung pada sifat materi itu sendiri sehingga deformasi dapat dibagi menjadi dua yaitu deformasi elastis dan plastis. Deformasi elastis adalah perubahan

bentuk yang terjadi bila ada gaya yang bekerja serta akan hilang apabila bebannya ditiadakan sedangkan deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang permanen meskipun bebannya dihilangkan. Pada umumnya deformasi terjadi pada materi bermedium padat.

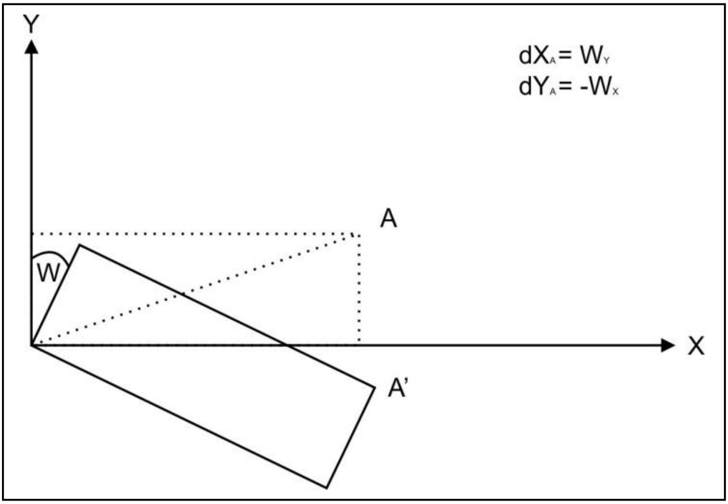
Dalam pemantauan deformasi suatu objek, perlu dilakukan suatu analisis deformasi untuk menentukan kuantitas pergeseran dan parameter-parameter deformasi yang mempunyai karakteristik dalam ruang dan waktu. Parameter deformasi didapatkan melalui hasil pergeseran koordinat dari titik-titik pengamatan secara berkala. Terdapat beberapa parameter dasar deformasi dalam ruang tiga dimensi, yaitu:

1. Translasi materi yang bersifat kaku, merupakan perpindahan posisi materi sesuai sumbu acuan tanpa mengalami perubahan bentuk.



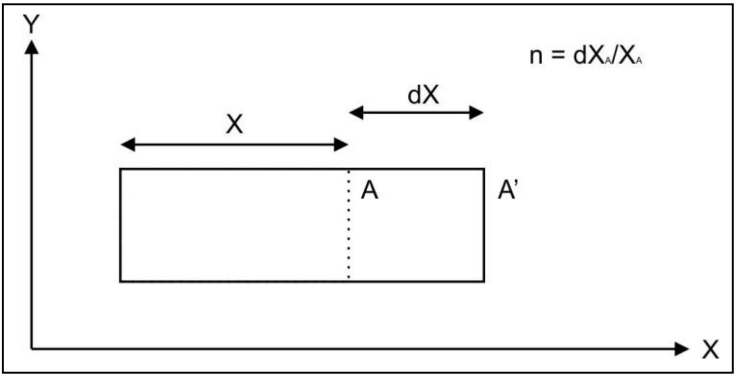
Gambar 2. 5 Translasi

2. Rotasi, merupakan perubahan posisi materi yang membentuk sudut terhadap sistem koordinat acuan tanpa mengalami perubahan bentuk.



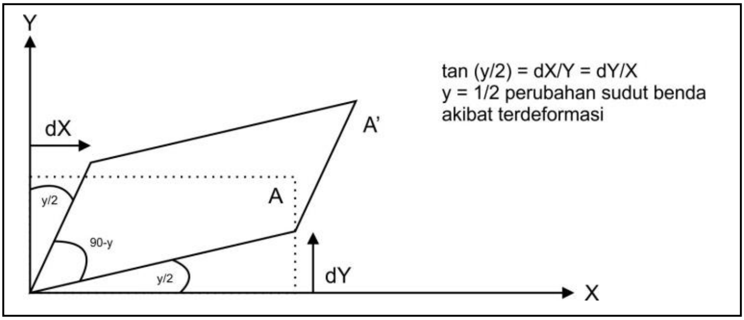
Gambar 2. 6 Rotasi

3. Regangan normal, merupakan perbandingan perubahan panjang terhadap panjang awalnya.



Gambar 2. 7 Regangan Normal

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



Gambar 2. 8 Regangan Geser

Analisis deformasi dapat dilakukan secara geometrik yaitu mengamati status geometri (ukuran dan dimensi) pada 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 jenis, yaitu:

1. Analisis Pergeseran

   Analisis pergeseran merupakan analisis yang menunjukkan perubahan posisi suatu benda dengan menggunakan data perbedaan posisi yang didapat dari perataan data pengamatan pada kala yang berbeda. Untuk menentukan pergeseran suatu titik pengamatan dapat menggunakan rumus:

$$y(t) = ax + b \tag{2.1}$$

$$AX = F \tag{2.2}$$

$$X = (A^T A)^{-1} (A^T F) \tag{2.3}$$

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & 1 \\ x_n & 1 \end{pmatrix} ; X = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} ; F = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

Keterangan:

x = Waktu pengamatan (tahun+(doy/365))

a = Kecepatan pergeseran (m/tahun)
b = Konstanta
$y(t)$ = Nilai pergeseran pada waktu t (m)

2. Analisis Regangan

Analisis regangan merupakan analisis yang menunjukkan perubahan posisi, bentuk, dan ukuran suatu benda dengan menggunakan data pengamatan geodetik langsung atau menggunakan data regangan yang diperoleh dari data pengamatan geodetik perubahan posisi. Dari hasil analisis regangan akan diketahui wilayah-wilayah yang mengalami pengumpulan dan pelepasan energi. Nilai regangan pada penelitian ini dihitung melalui model regangan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{xn} = \varepsilon_x X_n + \varepsilon_{xy} Y_n - \omega Y_n + T_x \tag{2.5}$$

$$V_{yn} = \varepsilon_{xy} X_n + \varepsilon_y Y_n + \omega X_n + T_y \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + {\varepsilon_{xy}}^2} \tag{2.7}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + {\varepsilon_{xy}}^2} \tag{2.8}$$

$$tan2\theta = \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{x-\varepsilon_y}} \tag{2.9}$$

Keterangan:
V_{xn} = vektor kecepatan sumbu x titik n
V_{yn} = vektor kecepatan sumbu y titik n
X_n = koordinat toposentrik sumbu x titik n
Y_n = koordinat toposentrik sumbu y titik n
ε_x = regangan normal pada sumbu x
ε_y = regangan normal pada sumbu y
ε_{xy} = regangan geser
T_x = translasi pada sumbu x
T_y = translasi pada sumbu y

ω = rotasi
$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \theta$ = komponen *principal strain*
Besaran yang akan digunakan dalam analisis regangan adalah $\mathcal{E}_1$ dan $\mathcal{E}_2$ (*principal strain*). *Principal strain* menyatakan perubahan elemen panjang terhadap panjang awal yang dinyatakan dalam satuan *strain*. $\mathcal{E}_1$ adalah ekstensi yang menunjukkan adanya pelepasan energi, dan $\mathcal{E}_2$ adalah kompresi yang menunjukkan adanya pengumpulan energi. Area dengan dominasi kompresi mengindikasi bahwa area tersebut sedang terjadi fenomena *interseismic*, sedangkan jika didominasi oleh ekstensi mengindikasikan bahwa area tersebut sedang dipengaruhi oleh efek *postseismic* (Turcotte dan Schubert, 2002).

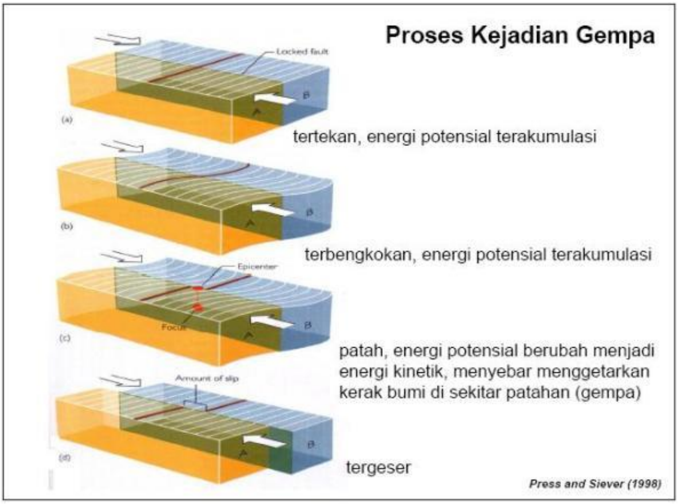
2.6 Hubungan Deformasi dengan Gempa Bumi

Gempa bumi adalah berguncangnya bumi yang diakibatkan oleh adanya patahan aktif, aktivitas gunung api, runtuhan batuan, dan tumbukan akibat pergerakan lempeng bumi. Pergerakan lempeng-lempeng bumi ini menghasilkan akumulasi energi yang menjadi penyebab utama terjadinya gempa bumi. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah dalam bentuk gelombang seismik sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi sebagai getaran atau guncangan tanah

Menurut Teori *Elastic Rebound* yang dinyatakan oleh Seismolog Amerika, Reid, gempa bumi merupakan gejala alam yang disebabkan oleh pelepasan energi regangan elastis batuan, yang disebabkan adanya deformasi batuan yang terjadi pada lapisan lithosfer (Bullen, 1965). Deformasi batuan terjadi akibat adanya tekanan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada lapisan bumi. Tekanan atau regangan yang terus menerus menyebabkan daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan mulai terjadi pergeseran dan akhirnya terjadi patahan secara tiba-tiba.

Hubungan deformasi dan gempa bumi dapat dilihat dari mekanisme terjadinya gempa bumi. Jika terdapat 2 buah gaya yang bekerja dengan arah berlawanan pada batuan kulit bumi, batuan

tersebut akan terdeformasi, karena batuan mempunyai sifat elastis. Bila gaya yang bekerja pada batuan dalam waktu yang lama dan terus menerus, maka lama kelamaan daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan akan mulai terjadi pergeseran. Akibatnya batuan akan mengalami patahan secara tiba-tiba sepanjang bidang patahan, setelah itu batuan akan kembali stabil, namun sudah mengalami perubahan bentuk atau posisi. Pada saat batuan mengalami gerakan yang tiba-tiba akibat pergeseran batuan, energi yang tersimpan akan dilepaskan dalam bentuk getaran yang dikenal sebagai gempa bumi.



Gambar 2. 9 Mekanisme Terjadinya Gempa Bumi (Press dan Siever, 1998)

2.7 Global Positioning System (GPS)

GPS adalah sistem radio navigasi dan penentuan posisi menggunakan satelit yang dimiliki dan dikendalikan oleh Amerika Serikat. GPS terdiri dari 24 satelit yang saling terkonstelasi, sistem satelit GPS didesain untuk menentukan posisi dan kecepatan tiga dimensi yang teliti dan juga informasi mengenai waktu secara

kontinyu di seluruh duni. Pada dasarnya GPS terdiri atas 3 segmen utama (Seeber, 2003) yaitu:

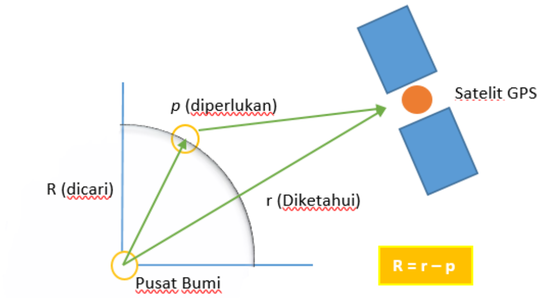
1. Segmen Angkasa (*Space Segment*)
   Terdiri dari 24 satelit yang terbagi dalam enam orbit dengan inklinasi 55^o dan ketinggian 20.200 km dan periode orbit 11 jam 58 menit.
2. Segmen Sistem Kontrol (*Control System Segment*)
   Sistem kontrol merupakan bagian yang bertugas dalam memantau kinerja dari sistem GPS agar dapat berfungsi dengan baik dan tepat. Tugas dari sistem kontrol antara lain adalah prediksi orbit, monitoring kondisi satelit, dan sinkronisasi waktu.
3. Segmen Pemakai (*User Segment*)
   Segmen pemakai merupakan pengguna dari sistem GPS baik itu di darat, laut, maupun udara. Secara garis besar segmen pemakai menggunakan *receiver* GPS untuk menangkap sinyal satelit GPS, sehingga didapatkan keluaran berupa posisi, kecepatan, ataupun parameter lainnya.

2.5.1 Penentuan Posisi dengan GPS

Pada prinsipnya penentuan posisi dengan GPS merupakan metode pengikatan ke belakang (*resection*), dengan pengukuran jarak ke beberapa satelit GPS yang telah diketahui koordinatnya. Hasil yang didapatkan dari pengukuran posisi menggunakan GPS adalah koordinat 3 dimensi (X, Y, Z atau L, B, h) yang dinyatakan dalam datum WGS 84 (*World Geodetic System 1984*), sedangkan tinggi yang diperoleh adalah tinggi ellipsoid, sehingga untuk sistem tingginya berbeda dengan tinggi orthometrik yang merupakan tinggi diatas geoid yang diukur sepanjang garis gaya berat melalui titik tersebut. Pelaksanaan metode penentuan posisi menggunakan GPS dapat diklasifikasikan atas beberapa cara bergantung pada mekanisme pengaplikasiannya, tetapi dua prinsip utama metode penentuan posisi adalah metode absolut dan diferensial yang dapat didefinisikan sebagai berikut:

1. Metode Absolut

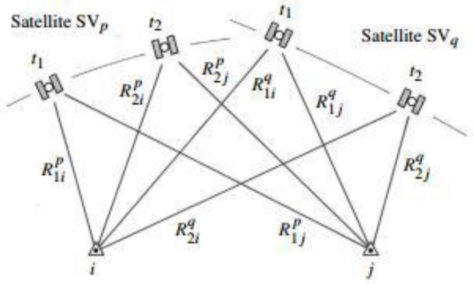
   Metode absolut secara sederhana dapat diartikan sebagai metode penentuan posisi suatu titik tanpa bergantung terhadap titik lain (hanya menggunakan satu *receiver*). Melalui satelit GPS dilakukan pengukuran vektor jarak (p) ke titik yang akan ditentukan posisinya. Dengan catatan posisi satelit (r) telah diketahui relatif terhadap pusat bumi, maka posisi P (pengamat) akan diperoleh pula relatif terhadap pusat bumi. prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS melalui pendekatan vektor ditunjukkan pada Gambar 2. 10.



Gambar 2. 10 Prinsip Penentuan Posisi Sistem GPS Metode Absolut (Abidin, 2007)

2. Metode Diferensial

   Metode diferensial secara sederhana dapat diartikan sebagai metode penentuan posisi suatu titik menggunakan minimal dua *receiver* GPS (posisi relatif). Prinsipnya adalah dengan mengurangkan data yang diamati oleh dua *receiver* GPS pada waktu yang bersamaan sehingga beberapa jenis kesalahan dan bias dari data dapat dieleminasi atau direduksi. Pengeleminasian dan pereduksian ini akan meningkatkan akurasi dan presisi data yang selanjutnya berimplikasi pada posisi yang diperoleh.

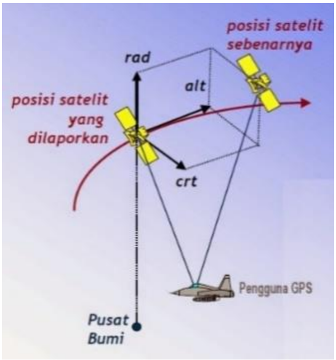


Gambar 2. 11 Penentuan Posisi Sistem GPS Metode Diferensial (Seeber, 2003)

2.5.2 Kesalahan dan Bias GPS

Dalam pengambilan data GPS, sinyal satelit GPS mengalami beberapa kesalahan dan bias. Kesalahan dan bias GPS tersebut harus diperhitungkan secara teliti dan benar, karena besar dari kesalahan dan bias tersebut mempengaruhi ketelitian informasi yang diperoleh serta proses penentuan ambiguitas fase dari sinyal GPS. Terdapat beberapa tipe kesalahan dari sistem GPS yang diantaranya adalah:

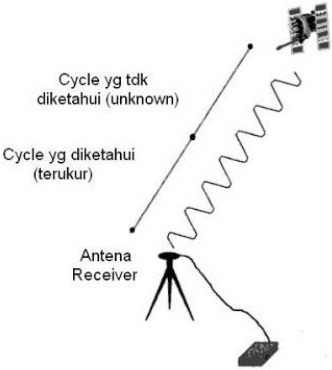
1. Kesalahan Jam Satelit dan *Receiver*
   Setiap satelit GPS selalu dilengkapi oleh beberapa jam atom yang digunakan untuk mendefiniskan sistem waktu. Jam-jam tersebut akan mengalami penyimpangan. Pada umumnya *receiver* GPS dilengkapi dengan jam kristal *quartz* yang relatif lebih kecil, lebih murah, dan relatif membutuhkan daya yang lebih sedikit dibandingkan dengan jam atom yang dibawa oleh satelit. Ketidaksinkronan antara jam satelit GPS dan jam *receiver* GPS inilah yang akan memberikan informasi waktu yang berbeda dan dapat menjadi sumber kesalahan.
2. Kesalahan Orbit
   Kesalahan orbit, adalah kesalahan dari posisi satelit GPS dimana posisi yang dilaporkan tidak sama dengan posisi satelit sebenarnya.



Gambar 2. 12 Kesalahan Orbit (Abidin, 2007)

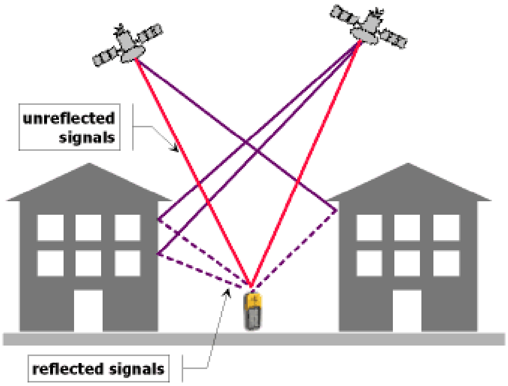
3. Ambiguitas Fase

   Ambiguitas fase adalah jumlah gelombang penuh yang tidak terukur oleh *receiver* GPS. Ambiguitas fase berupa bilangan bulat kelipatan panjang gelombang. Ketidaktepatan dalam mendefinisikan besarnya ambiguitas fase akan menyebabkan kesalahan dalam penentuan jarak dari satelit GPS ke pengamat.



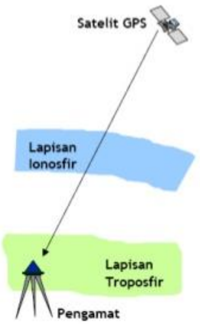
Gambar 2. 13 Ambiguitas Fase (Abidin, 2007)

4. Kesalahan *Multipath*
   Multipath adalah fenomena dimana sinyal satelit GPS tiba ke dalam *receiver* melalui dua lintasan sinyal yang berbeda. Satu sinyal merupakan sinyal langsung dari satelit GPS ke receiver GPS sedangkan sinyal yang lain merupakan sinyal tidak langsung yang dipantulkan oleh benda disekitar antena *receiver* GPS. Kesalahan *multipath* mempengaruhi hasil ukuran *pseudorange* dan *phase*



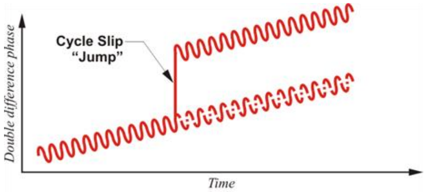
Gambar 2. 14 Multipath (Abidin, 2007)

5. Bias Ionosferik
   Lapisan Ionosfer yang terdapat pada atmosfer mempengaruhi kecepatan, arah, kekuatan, dan polarisasi dari sinyal GPS yang melaluinya. Efek terbesar yang terpengaruh oleh bias inosfer adalah kecepatan sinyal GPS, dimana mempengaruhi jarak dan ukuran.
6. *Bias Troposferik*
   Lapisan troposfer pada atmosfer memberikan efek refraksi yang menyebabkan perubahan kecepatan dan arah sinyal GPS.



Gambar 2. 15 Bias Ionosferik dan Bias Troposferik (Abidin, 2007)

7. *Cycle slip*
   Cycle Slip adalah kesalahan yang menunjukkan ketidak-kontinyuan dari fase gelombang pembawa yang diamati dalam jumlah gelombang penuh, karena sinyal *receiver* GPS terputus pada saat pengamatan sinyal GPS.



Gambar 2. 16 Cycle Slip (Abidin, 2007)

2.8 Pemantauan Deformasi dengan GPS

Sejak pengembangan pertamanya, GPS telah digunakan secara sukses untuk mengamati stabilitas struktur, sebuah aplikasi yang membutuhkan akurasi ketelitian tinggi. Beberapa contoh di dalamnya termasuk pemantauan deformasi bendungan, jembatan dan, menara televisi. Pemantauan deformasi tanah lahan minyak dan area penambangan adalah contoh lain di mana GPS telah berhasil digunakan. Dalam beberapa kasus, GPS dapat dilengkapi dengan sistem lain seperti INS atau *Total Station* untuk bekerja lebih efisien. Pemantauan deformasi dilakukan dengan mengambil

pengukuran GPS atas area yang sama pada interval waktu yang berbeda.

Pada metode ini, beberapa titik yang ditempatkan pada beberapa lokasi yang dipilih, secara periodik ditentukan koordinatnya secara teliti dengan menggunakan metode survei GPS (Abidin, 2007). Dengan mempelajari pola dan kecepatan perubahan koordinat dari titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, maka karakteristik deformasi dapat dihitung dan dipelajari lebih lanjut.

Perlu dicatat di sini bahwa dalam studi penurunan tanah dengan metode survei GPS, ada beberapa keunggulan dan keuntungan yang ditawarkan, yaitu seperti yang dijelaskan pada butir-butir berikut:

1. GPS memberikan nilai vektor deformasi dalam tiga dimensi (dua komponen horisontal dan satu komponen vertikal).
2. GPS memberikan nilai vektor deformasi dalam suatu sistem koordinat referensi yang tunggal. Dengan itu maka GPS dapat digunakan untuk memantau deformasi suatu wilayah secara regional secara efektif dan efisien.
3. GPS dapat memberikan nilai vektor deformasi dengan tingkat presisi sampai beberapa mm, dengan konsistensi yang tinggi baik secara spasial maupun temporal. Dengan presisi yang tinggi dan konsisten ini maka diharapkan besarnya deformasi yang kecil sekalipun akan dapat terdeteksi dengan baik.
4. GPS dapat dimanfaatkan secara kontinyu tanpa tergantung waktu (siang maupun malam), dalam segala kondisi cuaca. Dengan karakteristik semacam ini maka pelaksanaan survei GPS untuk studi deformasi dapat dilaksanakan secara efektif dan fleksibel.

Prinsip pemantauan deformasi tanah dengan GPS adalah menempatkan titik pantau di beberapa lokasi yang dipilih, dilakukan secara kontinu sehingga dapat ditentukan koordinat titik pantau tersebut secara teliti. Dari pengamatan GPS, data yang akan diperoleh adalah berupa koordinat titik pantau dan waktu. Dengan melakukan pengamatan secara periodik, perubahan posisi suatu

titik pantau dapat diidentifikasi dengan melihat adanya perubahan nilai koordinat titik pantau dari waktu kewaktu.

2.9 Uji Hipotesis

Suatu pengujian hipotesis statistik adalah prosedur yang memungkinkan keputusan dapat dibuat, yaitu keputusan untuk menolak atau menerima hipotesis yang sedang diuji. Struktur pengujian hipotesis akan dirumuskan dengan menggunakan istilah hipotesis nol. Ini menyatakan setiap hipotesis yang ingin diuji dinyatakan H_0. Penolakan H_0 akan membawa pada penerimaan suatu hipotesis tandingan, dinyatakan H_1. Suatu hipotesis nol mengenai parameter populasi akan selalu dinyatakan sedemikian rupa sehingga parameter tersebut memiliki nilai secara tepat, sedangkan hipotesis tandingan memungkinkan beberapa nilai.

Uji hipotesis memiliki beberapa ragam salah satunya adalah uji-*t*.. Uji-*t* pada dasarnya menunjukkan seberapa jauh pengaruh satu variabel bebas secara individual dalam menerangkan variasi variabel terikat. Uji ini dapat dilakukan dengan membandingkan *t* hitung (T) dengan *critical value (c)*. Uji hipotesis *t-student* satu sisi ditentukan melalui (Ghilani dan Wolf, 2006):

Hipotesa nol : $H_0 : T \leq C$

Hipotesa tandingan : $H_1 : T > C$

Berdasarkan uji tersebut, H_0 diterima jika nilai T lebih kecil atau sama dengan nilai *C* dan H_0 ditolak jika nilai T lebih besar dari nilai *C*.

2.10 Penelitian Terdahulu

Dalam melaksanakan penelitian tugas akhir ini, penulis melakukan studi literatur berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian pertama adalah Analisa Deformasi di Wilayah Jawa Tengah Bagian Selatan Menggunakan GPS-CORS Tahun 2013-2015. Lokasi penelitian sesuai dengan lokasi stasiun pengamatan yang digunakan yaitu stasiun CORS BIG Bantul, Cilacap, Solo, Kebumen, Magelang, dan Purbalingga yang seluruhnya berada di provinsi Jawa Tengah. Penelitian ini

dilakukan oleh Hadi (2016). Dalam jurnalnya dijelaskan tujuan dari penelitian tersebut untuk mengetahui koordinat pada masing-masing stasiun CORS BIG setiap tahun beserta arah pergeseran, mengetahui kecepatan pergeseran, dan mengetahui besarnya regangan Jawa Tengah bagian selatan. Data GPS yang digunakan adalah data CORS BIG yang pengolahannya menggunakan *software* ilmiah GAMIT-GLOBK dan pengeplotan menggunakan GMT. Penulis menggunakan penelitian Hadi (2016) sebagai referensi terutama dalam hal penentuan regangan menggunakan metode *delaunay triangle*.

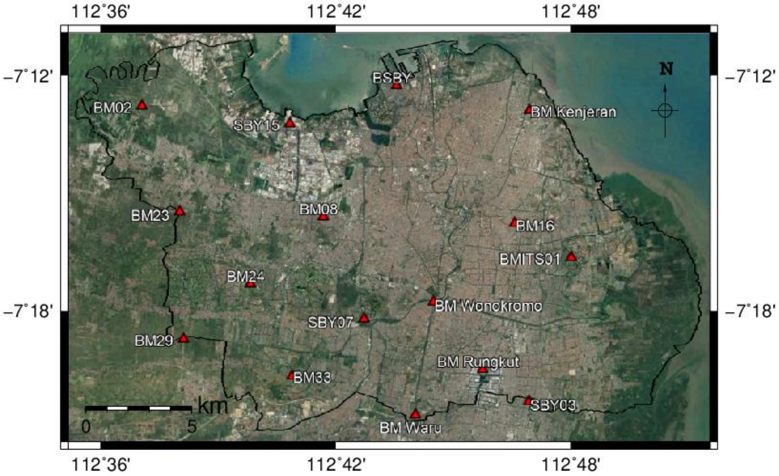
Penelitian kedua adalah penelitian yang dilakukan oleh Furqan (2015) dengan judul Analisis Deformasi Sesar Lembang Jawa Barat Menggunakan Data GPS Periodik dan Kontinu Tahun 2006 – 2014. Tujuan dari penelitian tersebut adalah mendapatkan nilai koordinat tiga dimensi di titik-titik pengamatan, mengestimasi pergerakan titik-titik pengamatan untuk melihat pola regangan, dan menganalisis adanya segmentasi pada Sesar Lembang. Data yang digunakan adalah data GPS periodik 17 stasiun dan 2 stasiun GPS Kontinu. Penulis menggunakan penelitian Furqan (2015) sebagai referensi terutama dalam hal analisis hasil dari penelitian tersebut

Sumber acuan terakhir dalam pelaksanaan penelitian ini adalah penelitian milik Afrizal (2011) dengan judul Analisis Regangan dan Potensi Bahaya Gempa di Selat Sunda Berdasarkan Data Pengamatan GPS 2006-2011. Tujuan akhir dari penelitian tersebut adalah menganalisis kondisi regangan antara bagian selatan Pulau Sumatera dan bagian barat Pulau Jawa berdasarkan data pengamatan GPS untuk mengidentifikasi pola deformasinya (termasuk parameter regangan), dan magnitude maksium gempa, sehingga dapat dijadikan informasi untuk melakukan mitigasi bencana di Pulau Sumatera dan Jawa di masa yang akan datang. Stasiun GPS yang digunakan adalah titik pengamatan berkala dari tahun 2006 – 2011. Penulis menggunakan penelitian Afrizal (2011) sebagai referensi terutama dalam hal analisis potensi gempa berdasarkan hasil regangan yang terjadi.

BAB 3
METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian untuk penelitian ini adalah Kota Surabaya, yang berada pada koordinat 07°11’00’’–07°21’00’’ Lintang Selatan dan 112°36’00’’–112°54’00’’ Bujur Timur.



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian dan Letak Titik Pengamatan GPS Periodik di Kota Surabaya

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kota Surabaya tahun 2018, Surabaya memiliki luas 326,36 km² dengan penduduknya berjumlah 2,87 juta jiwa. Daerah metropolitan Surabaya yaitu Gerbangkertosusila yang berpenduduk sekitar 10 juta jiwa, adalah kawasan metropolitan terbesar kedua di Indonesia setelah Jabodetabek. Batas-batas Kota Surabaya sebagai berikut:

Sebelah Utara : Selat Madura
Sebelah Timur : Selat Madura
Sebelah Selatan : Kabupaten Gresik
Sebelah Barat : Kabupaten Sidoarjo

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data stasiun tugas akhir ini menggunakan data RINEX GPS kontinyu dan periodik. Data GPS periodik diperoleh dari pengamatan sebanyak empat kala yang telah dilakukan oleh Anjasmara dkk (2017 dan 2018). Jumlah titik yang diamati tersebar di Kota Surabaya.

Tabel 3. 1 Waktu Pengamatan

Kala	Tanggal	*Doy*
1	10-13 Maret 2017	069-072
2	11-15 September 2017	254-258
3	11-15 Mei 2018	131-135
4	26-29 Oktober 2018	299-302

Titik pengamatan pada setiap kala tidak semua sama. Oleh karena itu terdapat kekosongan data pada beberapa titik. Titik pengamatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah titik yang pernah diukur minimal sebanyak tiga kala. Data titik pengamatan tiap kala dapat dilihat pada Tabel 3. 2.

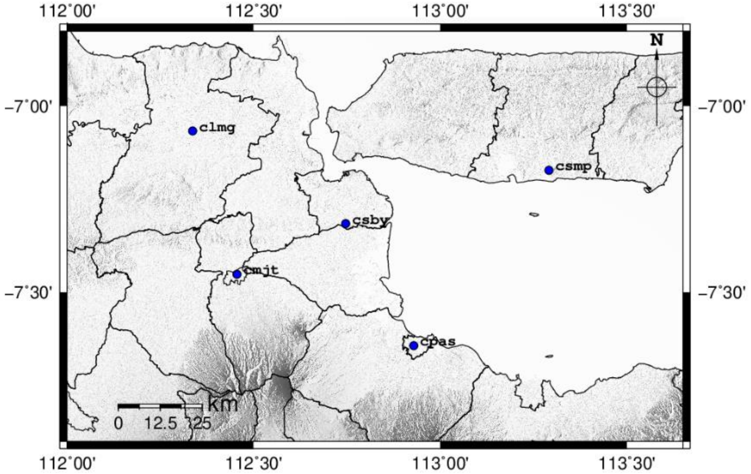
Tabel 3. 2 Ketersediaan Data Titik Pengamatan Tiap Kala

	Kala 1	Kala 2	Kala 3	Kala 4	Kecamatan di Surabaya
BM ITS 01	√	√	√	√	Sukolilo
BM 08	√	√	√	√	Sukomanunggal
BM 23	√	√	√	√	Benowo
BM 29	√	√	√	√	Lakarsantri
BM 33	√	√	√	√	Lakarsantri
BSBY	√	√	√	√	Pabean Cantikan
BM 16	√	√	√	√	Gubeng
BM Rungkut	√	√	√	√	Tenggilis Mejoyo

	Kala 1	Kala 2	Kala 3	Kala 4	Kecamatan di Surabaya
BM Kenjeran	√	√	√	√	Kenjeran
BM Wonokromo	√	√	√	√	Wonokromo
BM 21	√	X	X	X	Benowo
BM 24	√	√	√	√	Lakarsantri
BM Pakuwon	√	√	X	X	Sukolilo
SBY 15	√	√	√	√	Asemrowo
SBY 03	√	√	√	√	Gunung Anyar
BM Waru	√	√	√	√	Gayungan
BM Pasarturi	√	X	√	√	Bubutan
BM 01	√	X	X	X	Wonokromo
BM 19	√	X	X	X	Rungkut
SBY 07	√	√	√	√	Dukuh Pakis
BM Batas Rungkut-Gunung Anyar	X	X	√	X	Rungkut
BM Geomatika	X	X	√	√	Sukolilo
BM 02	X	√	√	√	Benowo
BM 15	X	X	√	√	Kenjeran
SBY 05	X	√	X	X	Sukolilo
SBY 18	X	√	X	X	Benowo

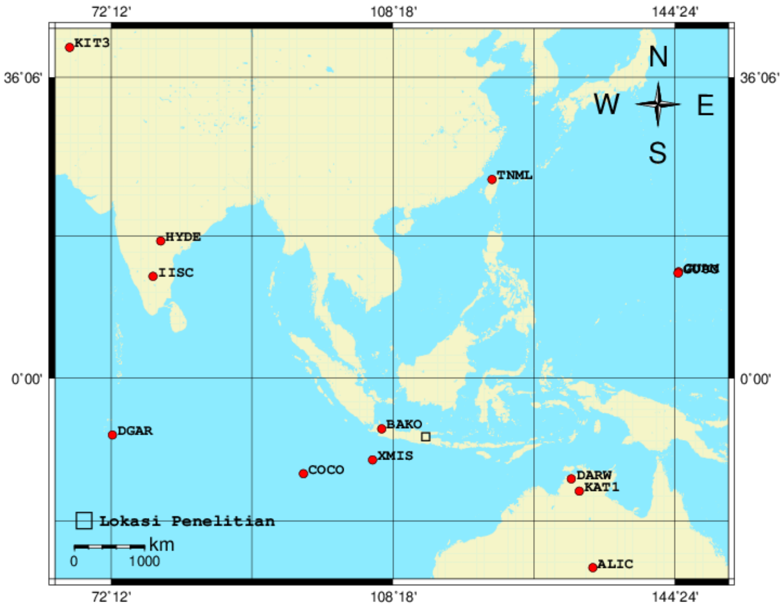
Data GPS kontinu diperoleh dari CORS BIG yang digunakan sebagai data yang dianggap memiliki ketelitian lebih tinggi dari data GPS periodik. CORS yang digunakan sebanyak lima titik yang berada di Kota Surabaya, Mojokerto, Pasuruan,

Lamongan, dan Sampang. Tanggal pengamatan yang digunakan sesuai dengan tanggal pengukuran GPS periodik kala 1–4. Lokasi persebaran titik-titik pengamatan GPS periodik dan kontinu dapat dilihat pada Gambar 3. 1 dan 3. 2.



Gambar 3. 2 Letak Titik Pengamatan GPS kontinyu

Pengolahan data GPS dalam penelitian ini menggunakan metode differensial sehingga membutuhkan titik-titik referensi yang dianggap stabil. Titik-titik referensi yang digunakan berasal dari *International GNSS Service* (IGS). Titik-titik IGS yang digunakan sebanyak 13 titik yang dibagi menjadi empat kuadran, sehingga dalam satu kuadran memiliki minimal tiga titik IGS. Hal ini dilakukan untuk menghindari kekosongan data di suatu kuadran. Lokasi persebaran titik-titik IGS dapat dilihat dalam Gambar 3. 3.



Gambar 3. 3 Persebaran Titik IGS

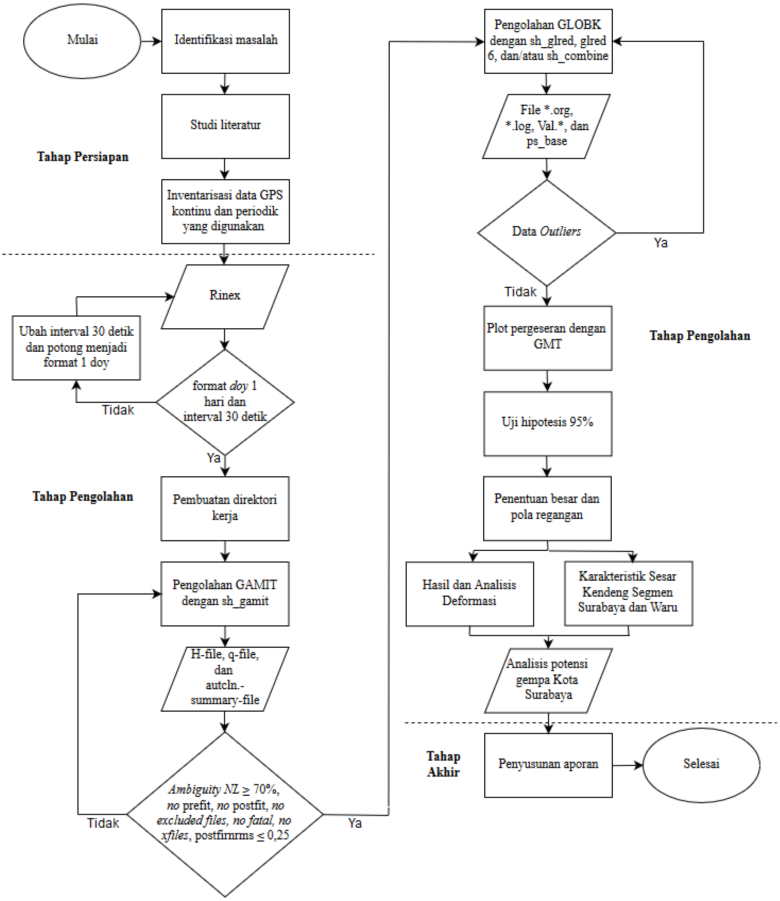
3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. *Translation, Editing, and Quality Checking* (TEQC) untuk mengubah raw data GPS ke format RINEX dan memotong serta menggabungkan data RINEX.
2. GAMIT-GLOBK untuk pengolahan data GPS.
3. MATLAB untuk perhitungan regangan.
4. GMT untuk *plotting* besar dan arah pergeseran serta regangan.

3.3 Metode Penelitian

Tahapan dari penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. 4.



Gambar 3. 4 Diagram Alir Penelitian

1. Identifikasi Masalah
   Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana memperoleh pergeseran dan regangan untuk analisis deformasi dan potensi gempa di Kota Surabaya menggunakan data GPS
2. Studi Literatur
   Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan referensi yang berhubungan dengan masalah yang akan diangkat dalam

penelitian ini. Studi literatur yang dilakukan meliputi:

a. Studi literatur mengenai metode pengolahan GPS untuk mendapatkan besar dan arah pergeseran suatu titik
b. Studi literatur mengenai penentuan besar dan pola regangan berdasarkan besar dan arah pergeseran yang terjadi
c. Studi literatur mengenai potensi gempa berdasarkan deformasi yang terjadi dan/atau aktivitas lain yang dapat mengancam pada suatu wilayah

3. Pengumpulan Data

   Pada tahap ini dilakukan pengumpulan semua data yang diperlukan dalam penelitian. Pengumpulan atau inventarisasi data merupakan tahap awal untuk mempersiapkan data yang akan diolah. Data GPS kontinyu yaitu CORS BIG didapatkan dengan mengajukan permohonan data kepada instansi terkait, sedangkan data GPS periodik didapatkan dari pengukuran sebanyak empat kala pada tahun 2017 dan 2018, dan data yang lain diperloeh dari proses *download* saat pengolahan GAMIT-GLOBK. Pengukuran GPS dilakukan dengan metode differensial menggunakan GPS geodetik dan lama berdiri alat kurang lebih 12 jam. Selain file GPS yang akan diolah juga terdapat file penunjang yang harus dimiliki sebelum dilakukan pengolahan menggunakan GAMIT-GLOBK yaitu file gelombang pasang surut (otl_FES2004.grd), file atmosfer (atmdisp_YYYY), file pemodelan cuaca (vmflgrd.YYYY), serta *h-file* global sebanyak *doy* yang akan diolah.

4. Pengolahan Data

   Pada tahap ini dilakukan pengolahan data yang diperoleh untuk selanjutnya dilakukan analisis. Tahap pengolahan data lebih lanjut dijelaskan seperti berikut:

   a. Pengecekan Data RINEX

      Data yang digunakan untuk pengolahan adalah data RINEX, sehingga data pengukuran GPS yang didapat harus diubah terlebih dahulu ke format RINEX. Dalam penelitian ini *software* yang digunakan TEQC. Selanjutnya adalah pengecekan data RINEX pengukuran apakah *doy* sudah

dalam format satu hari dan interval 30 detik. Jika belum data RINEX dipotong dan diubah intervalnya dengan *software* TEQC.

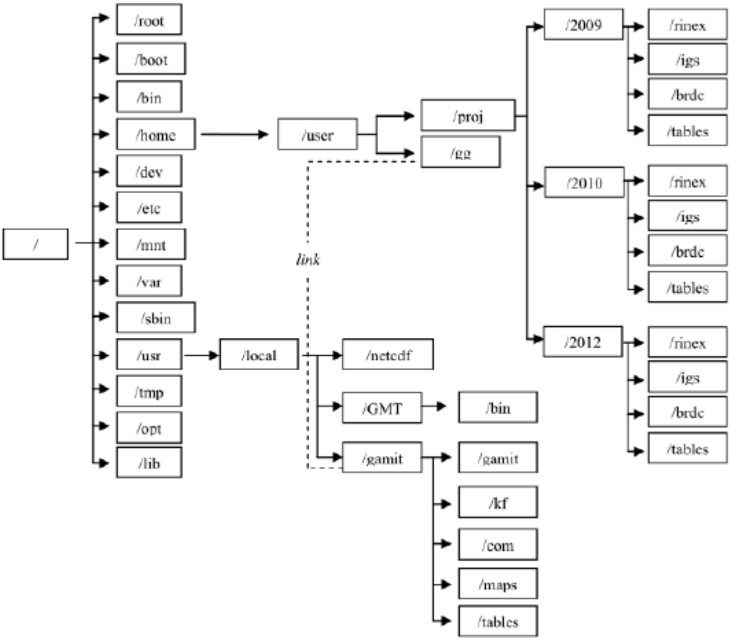
b. Pengolahan Data dengan GAMIT

GAMIT adalah paket analisis GPS komprehensif yang dikembangkan di MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) dan SIO (*Scripps Institution of Oceanography*). Untuk melakukan pengolahan data dengan GAMIT diperlukan pembuatan direktori kerja. Pada umumnya pada setiap direktori kerja memiliki direktori *project* yang menjadi tempat utama dalam pengolahan data nantinya. Dalam direktori *project* tersebut nantinya terdapat folder-folder yang menyusun struktur kerja dari pengolahan GAMIT, adapun folder tersebut adalah (Herring, 2015):

- RINEX, folder yang digunakan untuk menyimpan file-file RINEX observasi baik itu dari titik pengamatan ataupun titik kontrol.
- IGS, folder yang digunakan untuk menyimpan file orbit satelit. Pada umumnya file IGS yang digunakan bertipe final yaitu *precise ephemeris* dengan format *.sp3.
- Brdc, folder yang digunakan untuk menyimpan file navigasi global sesuai dengan *doy project* yang akan diolah.
- Tables, folder yang berisi file kontrol dari pengolahan GAMIT. Folder tables dibuat secara otomatis menggunakan perintah bawaan dari *software* GAMIT.

Terdapat juga folder yang berisi data tambahan yang bisa diikutkan dalam pengolahan, yaitu:

- Ionex, folder yang berisi file pemodelan ionosfer sesuai *doy* yang akan diolah
- Met, folder yang berisi file pemodelan meteorologi sesuai stasiun IGS dan *doy* yang diolah.



Gambar 3. 5 Struktur Direktori Kerja GAMIT (Taftazani, 2013)

Setelah direktori kerja selesai dibuat, maka langkah berikutnya adalah melakukan *editing* pada *file* kontrol. *Editing file* kontrol dilakukan untuk menyesuaikan skema pengolahan dengan data yang tersedia. *File* kontrol yang dapat dilakukan *editing* adalah:

- Lfile, koordinat apriori titik ikat maupun stasiun pengamatan yang belum tersedia perlu dimasukkan ke *file* ini. Untuk data stasiun pengamatan bisa mengambil dari RINEX observasi.
- Process.default, tentukan lokasi *file*-*file* yang akan dilakukan pengolahan GAMIT. *File* ini juga digunakan untuk menentukan tipe *file* navigasi serta apr *file* yang digunakan.

- Sestbl, untuk mengatur strategi pengolahan data pada GAMIT untuk data yang diolah.
- Sites.default, berisi nama stasiun yang akan diolah beserta opsi pengambilan data dan opsi pengolahannya.
- Station.info, berisi informasi stasiun seperti *session start* (awal pengamatan), *session stop* (akhir pengamatan), Ant Ht (tinggi antena), *receiver type* (tipe receiver), dan *antenna type* (tipe antena).

Hasil akhir dari proses pengolahan data pengamatan GPS dengan *software* GAMIT adalah sebagai berikut:

- Q-*file*, memuat semua informasi hasil pengolahan data pengamatan GPS dengan GAMIT.
- H-*file*, berisi hasil pengolahan berupa matriks varian kovarian sebagai input pada pengolahan lanjutan dengan GLOBK.
- Autcln.summary-*file*, berisi data statistik hasil editing dengan autcln.

Sebelum masuk ke pengolahan GLOBK perlu dilakukan *checking* ketelitian hasil GAMIT yaitu nilai *ambiguity narrow line* ≥ 70%, tidak ada prefit dan postfit, tidak ada *file excluded*, tidak ada fatal, tidak ada *xfiles*, dan nilai postfitnrms ≤ 0,25.

c. Pengolahan Data dengan GLOBK

Pengolahan dengan GLOBK merupakan langkah selanjutnya setelah sh_gamit. Pengolahan GLOBk membutuhkan persiapan beberapa folder tambahan yaitu folder /hgamit dan /hfiles. Adapun *file* yang akan di edit sesuai dengan kebutuhan penelitian adalah *file* kontrol globk_comb.cmd dan glorg_comb.cmd yang di copy dari ~gg/tables dan ditempatkan dalam folder gsoln. Setelah pengaturan *file-file* yang dibutuhkan telah dilakukan, maka dapat dilakukan perhitungan dan *plotting* koordinat *time series* yakni menggunakan perintah sh_glred lalu glred 6 atau sh_combine yang dilakukan di dalam folder kerja.

Beberapa parameter yang dihasilkan dari pengolahan GLOBK adalah:

- *Time series* titik-titik pengamatan
- Koordinat toposentrik dan kartesian 3D beserta simpangan baku untuk setiap stasiunnya
- Panjang baseline beserta ketelitiannya
- Besar dan arah pergeseran titik pengamatan

d. Deteksi *Outliers*

Pada pengolahan GLOBK, setelah dihasilkan *time series* titik pengamatan, perlu dilakukan deteksi *outliers*. *Outliers* adalah data yang menyimpang terlalu jauh dari data lainnya dalam suatu rangkaian data (*time series*). Agar analisis dari hasil tidak menjadi bias atau tidak sesuai dengan sebenarnya, maka *outliers* perlu dihilangkan. Dalam penelitian ini, untuk mengetahui data yang ditengarai sebagai *outliers* dapat dilihat pada *file* VAL.[expt] hasil keluaran *command* sh_glred dimana [expt] adalah nama *project* atau *file* .org hasil keluaran *command* glred 6. Selanjutnya dilakukan proses pengolahan ulang dengan tidak mengikutsertakan data *ouliers* sehingga menghasilkan data *time series* GPS yang telah bersih dari *noises* lalu dapat dilanjutkan pengolahan besar dan arah pergeserannya

e. *Plotting* Besar dan Arah Pergeseran

Data yang telah terbebas dari *outliers* akan digunakan untuk menghitung kecepatan pada setiap stasiun pengamatan dan setelah itu dapat dilakukan perhitungan regangan. *Software* yang digunakan adalah notepad ++ dan GMT. Notepad ++ digunakan untuk memasukkan dan editing data-data yang diperlukan seperti data koordinat, standar deviasi, dan kecepatan pergeseran yang diperoleh dari pengolahan GAMIT-GLOBK. Data-data yang telah dimasukkan di notepad ++ selanjutnya diplot dengan GMT untuk melihat gambaran besar dan arah pergeseran yang terjadi. Untuk memperindah hasil *plotting* perlu ditambahkan bentuk topografi, pemberian warna, arah mata angin, dan lain-lain.

f. Uji Hipotesis
   Uji hipotesis dilakukan terhadap nilai pergeseran dari setiap titik pengamatan untuk mengetahui apakah titik pengamatan GPS periodik memiliki pergeseran yang signifikan dengan CSBY yang dianggap stabil dan mewakili deformasi yang terjadi di Surabaya. Uji hipotesis yang digunakan adalah uji hipotesis *t-student* dengan menguji variabel pergeseran titik dari sesi pengamatan x ke sesi pengamatan y dan standar deviasinya.
g. Penentuan Regangan dan Analisis Potensi Gempa
   Setelah dilakukan penentuan besar dan arah pergeseran kemudian dilakukan *plotting*, maka hasil tersebut dapat digunakan untuk menentukan besar dan pola regangan yang terjadi. Metode yang digunakan dalam penentuan regangan adalah *delaunay triangle*, yaitu setiap titik pengamatan GPS dihubungkan membentuk segmen-segmen segitiga. Setelah didapatkan besar dan arah kecepatan pergeseran titik pengamatan serta besar dan pola regangan yang terjadi, selanjutnya dianalisis deformasi yang terjadi di Kota Surabaya dan potensi gempanya berdasarkan deformasi tersebut dan keberadaan Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru

5. Penyusunan Laporan
   Tahapan ini adalah tahapan akhir, yaitu proses penyajian penelitian dalam bentuk laporan

BAB IV
HASIL DAN ANALISIS

Proses pengolahan data GPS dalam penelitian ini menggunakan software GAMIT yang dikombinasikan dengan pengolahan GLOBK. Hasil pengolahan GLOBK selanjutnya digunakan untuk perhitungan regangan. Analisis deformasi dan potensi gempa yang dilakukan dalam penelitian ini berdasarkan hasil pergeseran dan regangan yang terjadi di Kota Surabaya serta keberadaan Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru.

4.1 Analisis Kecepatan Pergeseran

4.1.1 Kecepatan Pergeseran Horizontal

Hasil kecepatan pergeseran titik pengamatan diperoleh dari proses pengolahan GAMIT-GLOBK. Kecepatan pergeseran horizontal diperoleh dengan menghitung resultan kecepatan pergeseran pada komponen *easting* (V_e) dan *northing* (V_n). Besar kecepatan pergeseran arah *easting* dan *northing* dari kala 1 hingga kala 4 dapat dilihat pada Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1 Komponen Kecepatan Pergeseran Titik Pengamatan dan Standar Deviasinya (cm/tahun)

Titik Pengamatan	V_e	σ_e	V_n	σ_n	V_u	σ_u
CSMP	2,202	0,136	-1,016	0,112	-0,607	0,492
CPAS	2,509	0,139	-0,728	0,108	-0,249	0,485
BITS	1,571	0,417	-0,382	0,311	-1,709	4,403
KENJ	2,738	3,102	-1,926	2,916	-2,513	6,578
SB03	4,179	0,353	-0,083	0,288	-0,92	1,473
BM16	0,827	1,644	-0,62	1,168	-3,448	5,049
RGKT	1,635	0,378	-0,68	0,315	-3,418	1,653
WONO	3,61	0,533	-0,984	0,477	-3,402	2,438
WARU	2,323	1,786	-0,936	0,909	-3,002	6,376

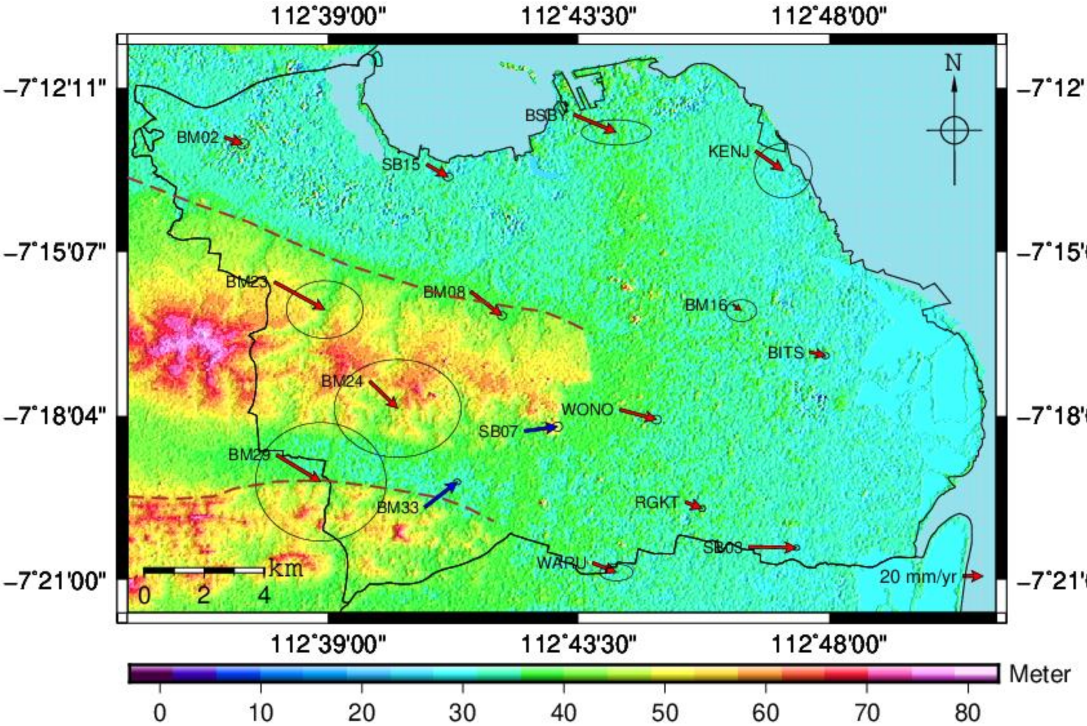
Titik Pengamatan	V_e	σ_e	V_n	σ_n	V_u	σ_u
CSBY	2,436	0,153	-1,349	0,121	-0,19	0,558
BSBY	4,177	3,759	-1,751	1,347	-3,578	7,89
SB07	3,282	0,387	0,441	0,291	-0,345	2,943
BM08	3,079	0,474	-2,384	0,438	-2,187	2,494
SB15	2,108	0,548	-1,221	0,431	-4,727	2,25
BM33	3,204	0,379	2,502	0,298	-3,076	1,495
BM24	2,762	6,803	-2,678	5,260	3,33	2,028
BM29	4,363	7,009	-2,653	6,377	2,844	2,314
BM23	4,979	4,120	-2,72	3,095	0,234	1,807
BM02	1,806	0,649	-0,655	0,548	-5,769	2,792
CMJT	2,646	0,144	-0,685	0,112	-0,615	0,515
CLMG	2,388	0,154	-0,869	0,120	-0,763	0,565

Pada Tabel 4. 1 dapat diketahui bahwa arah pergeseran semua titik pengamatan, kecuali BM33 dan SB07, mengarah ke tenggara. Hal ini dapat dilihat dari besar komponen *easting* yang bernilai positif dan *northing* yang bernilai negatif. Pada BM 33 dan SB07 besar komponen *easting* dan *northing* bernilai positif sehingga pergeseran ke arah timur laut.

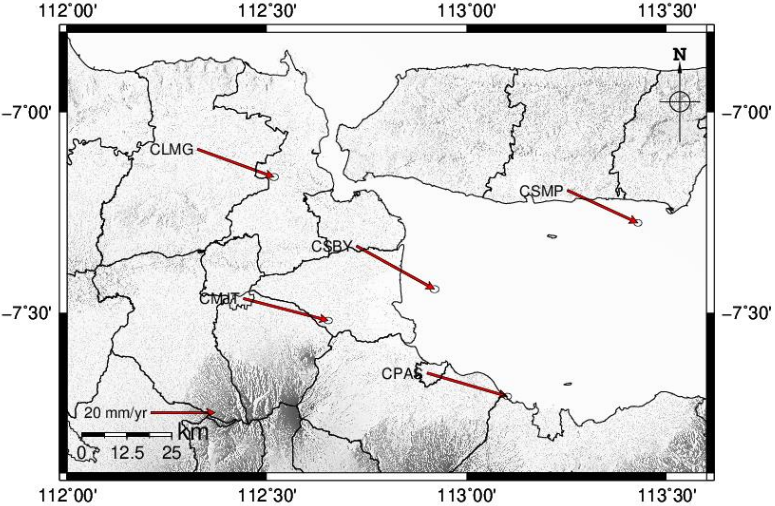
Langkah selanjutnya adalah mencari besar kecepatan pergeseran horizontal dengan menghitung resultan antara komponen *easting* dan *northing*. Hasil yang didapatkan adalah besar kecepatan pergeseran horizontal setiap titik pengamatan dari kala 1 hingga kala 4 yang dapat dilihat pada Tabel 4. 2. Apabila nilai kecepatan horizontal telah diperoleh maka dapat dilakukan *plotting* besar dan arah kecepatan horizontal dengan menggunakan *software* GMT seperti Gambar 4. 1 dan 4. 2.

Tabel 4. 2 Kecepatan Pergeseran Horizontal Titik Pengamatan (cm/tahun)

Titik Pengamatan	V Horizontal	σV Horizontal
CSMP	2,425	0,176
CPAS	2,612	0,176
BITS	1,617	0,520
KENJ	3,348	4,257
SB03	4,180	0,456
BM16	1,034	2,017
RGKT	1,771	0,492
WONO	3,742	0,715
WARU	2,504	2,004
CSBY	2,785	0,195
BSBY	4,529	3,993
SB07	3,311	0,753
BM08	3,894	0,645
SB15	2,436	0,697
BM33	4,065	0,482
BM24	3,847	8,599
BM29	5,106	9,476
BM23	5,674	5,153
BM02	1,921	0,849
CMJT	2,733	0,182
CLMG	2,541	0,195



Gambar 4. 1 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Horizontal Titik Pengamatan GPS Periodik



Gambar 4. 2 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Horizontal Titik Pengamatan GPS Kontinyu

Pada Tabel 4. 2, kecepatan pergeseran horizontal setiap titik pengamatan di Kota Surabaya dan sekitarnya berbeda-beda, berkisar antara 1,034 cm/tahun hingga 5,674 cm/tahun. Kecepatan pergeseran horizontal terkecil berada di titik pengamatan BM16. Sedangkan kecepatan pergeseran horizontal terbesar dengan nilai 5,674 cm/tahun berada di titik pengamatan BM23.

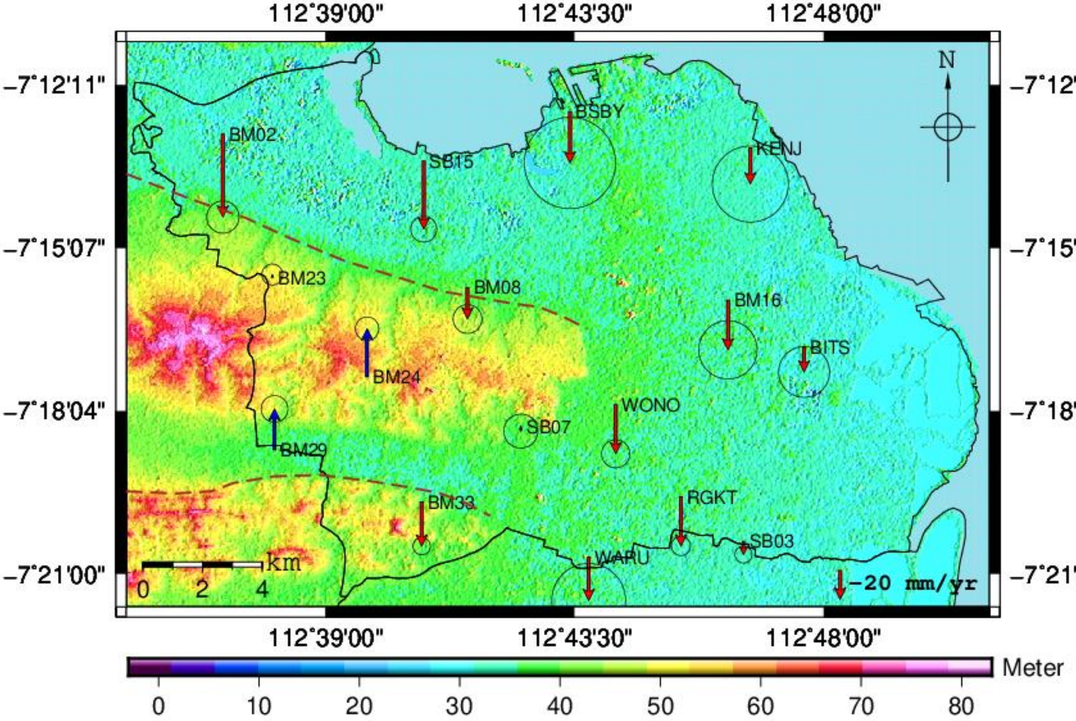
Pada Gambar 4. 1 dan 4. 2 yang merupakan *plotting* dengan GMT, skala yang digunakan pada panah pergeseran adalah 20 mm/tahun. Panah warna merah menunjukkan pergeseran titik mengarah ke tenggara, sedangkan panah warna biru menunjukkan pergeseran titik mengarah ke timur laut. Hal ini sesuai dengan nilai *easting* dan *northing* pada Tabel 4. 1. Arah pergeseran horizontal titik pengamatan GPS di Kota Surabaya dan sekitarnya dominan mengarah ke tenggara.

4.1.2 Kecepatan Pergeseran Vertikal

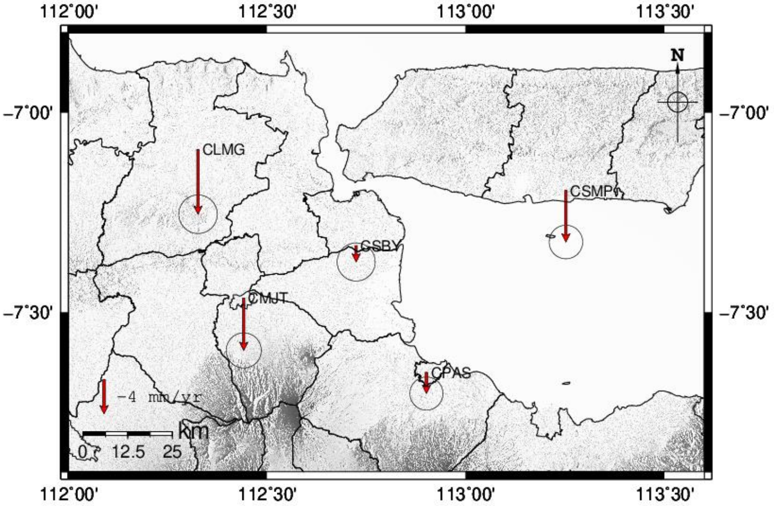
Kecepatan pergeseran vertikal (V_u) dihasilkan bersamaan dengan komponen kecepatan pergeseran horizontal melalui proses pengolahan GAMIT-GLOBK. Kecepatan pergeseran vertikal titik pengamatan di Surabaya dapat dilihat pada Tabel 4. 1.

Kecepatan pergeseran vertikal di titik-titik pengamatan di Kota Surabaya dan sekitarnya juga memiliki nilai yang berbeda-beda, berkisar antara -5,769 cm/tahun hingga 3,330 cm/tahun. Nilai positif menunjukkan bahwa pergeseran mengarah ke atas sedangkan nilai negatif mengarah ke bawah. Nilai positif mengarah ke atas yang mana mengindikasikan bahwa daerah tersebut mengalami kenaikan tanah atau *uplift*, sedangkan nilai negatif mengarah ke bawah yang mengindikasikan bahwa daerah tersebut mengalami penurunan tanah atau *subsidence*. Nilai pergeseran vertikal terbesar berada pada titik pengamatan BM02 dengan arah ke bawah.

Pada Gambar 4. 3 dan 4. 4 yang merupakan *plotting* dengan GMT, skala yang digunakan pada panah pergeseran adalah 20 mm/tahun dan 4 mm/tahun. Panah warna merah menunjukkan titik mengalami *subsidence*, sedangkan panah warna biru menunjukkan titik mengalami *uplift*. Arah pergeseran vertikal titik pengamatan di Kota Surabaya dan sekitarnya dominan mengalami *subsidence*. Hanya BM23, BM24, dan BM29 yang mengalami *uplift* atau kenaikan tenah.



Gambar 4. 3 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Vertikal Titik Pengamatan GPS Periodik



Gambar 4. 4 *Plotting* Kecepatan Pergeseran Vertikal Titik Pengamatan GPS Kontinyu

4.2 Uji Hipotesis

Uji Hipotesis dilakukan terhadap nilai pergeseran dari setiap titik pengamatan untuk mengetahui apakah titik pengamatan GPS periodik memiliki pergeseran yang signifikan dengan CSBY yang dianggap stabil dan mewakili deformasi yang terjadi di Surabaya. Uji hipotesis yang digunakan adalah uji hipotesis *t-student* dengan menguji variabel pergeseran titik dari sesi pengamatan x ke sesi pengamatan y dan standar deviasinya.

Hipotesis nol yang digunakan dalam uji hipotesis ini adalah CSBY telah mewakili deformasi yang terjadi di Kota Surabaya. Sedangkan hipotesis tandingan yang digunakan adalah CSBY belum mewakili deformasi yang terjadi di Kota Surabaya. Kedua hipotesis tersebut ditentukan melalui (Ghilani dan Wolf, 2006):

Hipotesis nol : $H_0 : T \leq C$

Hipotesis tandingan: $H_1 : T > C$

C adalah *critical value* sedangkan T adalah statistik uji. *Nilai C* dan T diperoleh melalui persamaan:

$$C = t_{\alpha,v} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \tag{4.1}$$

$$T = \frac{V_{periodik} - V_{CSBY}}{S / \sqrt{n}} \tag{4.2}$$

Keterangan:

$t_{\alpha,v}$ = t *table*

S = Standar deviasi GPS periodik

n = Jumlah pengamatan

$V_{periodik}$ = Kecepatan GPS periodik

V_{CSBY} = Kecepatan CSBY

Hasil uji hipotesis *t-student* titik pengamatan GPS Periodik dalam penelitian ini dapat dilihat dalam Tabel 4. 3 dan Tabel 4. 4.

Tabel 4. 3 Hasil Uji Hipotesis *T-Student* Pergeseran Horizontal

Titik Pengamatan	n	df	t table	S	V Periodik	C	T	H0
BITS	4	3	2,35	0,00520	0,01617	0,00611	-4,48982	Diterima
KENJ	4	3	2,35	0,04257	0,03348	0,05002	0,26447	Ditolak
SB03	4	3	2,35	0,00456	0,04180	0,00535	6,12513	Ditolak
BM16	4	3	2,35	0,02017	0,01034	0,02370	-1,73651	Diterima
RGKT	4	3	2,35	0,00492	0,01771	0,00578	-4,12081	Diterima
WONO	4	3	2,35	0,00715	0,03742	0,00840	2,67624	Ditolak
WARU	4	3	2,35	0,02004	0,02504	0,02355	-0,27954	Diterima
BSBY	4	3	2,35	0,03993	0,04529	0,04692	0,87381	Ditolak
SB07	4	3	2,35	0,00484	0,03311	0,00569	2,17643	Ditolak
BM08	4	3	2,35	0,00645	0,03894	0,00758	3,43819	Ditolak
SB15	4	3	2,35	0,00697	0,02436	0,00819	-0,99973	Diterima
BM33	4	3	2,35	0,00482	0,04065	0,00566	5,31227	Ditolak
BM24	4	3	2,35	0,08599	0,03847	0,10104	0,24712	Ditolak
BM29	4	3	2,35	0,09476	0,05106	0,11134	0,49002	Ditolak
BM23	4	3	2,35	0,05153	0,05674	0,06055	1,12126	Ditolak
BM02	3	2	2,92	0,00849	0,01921	0,01432	-1,76072	Diterima

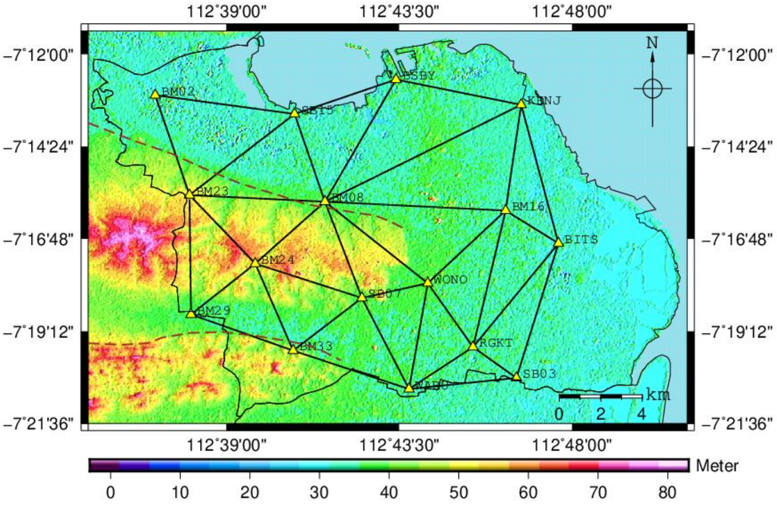
Tabel 4. 4 Hasil Uji Hipotesis *T-Student* Pergeseran Vertikal

Titik Pengamatan	n	df	t table	S	V Periodik	C	T	H0
BITS	4	3	2,35	0,04403	0,01709	0,05174	0,68998	Ditolak
KENJ	4	3	2,35	0,06578	0,02513	0,07729	0,70629	Ditolak
SB03	4	3	2,35	0,01473	0,00920	0,01731	0,99117	Ditolak
BM16	4	3	2,35	0,05049	0,03448	0,05933	1,29055	Ditolak
RGKT	4	3	2,35	0,01653	0,03418	0,01942	3,90563	Ditolak
WONO	4	3	2,35	0,02438	0,03402	0,02865	2,63495	Ditolak
WARU	4	3	2,35	0,06376	0,03002	0,07492	0,88206	Ditolak
BSBY	4	3	2,35	0,07890	0,03578	0,09271	0,85881	Ditolak
SB07	4	3	2,35	0,02943	0,00345	0,03458	0,10533	Ditolak
BM08	4	3	2,35	0,02494	0,02187	0,02930	1,60144	Ditolak
SB15	4	3	2,35	0,02250	0,04727	0,02644	4,03289	Ditolak
BM33	4	3	2,35	0,01495	0,03076	0,01757	3,86087	Ditolak
BM24	4	3	2,35	0,02028	0,03330	0,02383	3,09665	Ditolak
BM29	4	3	2,35	0,02314	0,02844	0,02719	2,29386	Ditolak
BM23	4	3	2,35	0,01807	0,00234	0,02123	0,04870	Ditolak
BM02	3	2	2,92	0,02792	0,05769	0,04707	3,46100	Ditolak

Hasil uji hipotesis *t-student* titik pengamatan GPS Periodik dalam penelitian ini dapat dilihat dalam Tabel 4. 3 dan Tabel 4. 4. Tingkat kepercayaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 95%. Berdasarkan hasil kecepatan uji hipotesis *t-student* pergeseran horizontal pada Tabel 4. 3, 10 dari 16 titik menunjukkan bahwa H_0 ditolak. Sedangkan pada pergeseran vertikal yang ditunjukkan Tabel 4. 4, semua titik menunjukkan bahwa H_0 ditolak. Dari hasil uji hipotesis ini menunjukkan bahwa CSBY saja belum dapat mewakili deformasi yang terjadi di Kota Surabaya.

4.3 Analisis Regangan

Hasil dari kecepatan pergeseran digunakan sebagai model perhitungan regangan. Metode yang digunakan adalah metode *delaunay triangle* atau segmen segitiga. Oleh karena itu, pertama-tama perlu dibuat segmen-segmen segitiga yang melalui setiap titik pengamatan GPS yang digunakan pada penelitian ini. Penelitian ini menggunakan 20 segmen segitiga yang dapat dilihat pada Tabel 4. 5 dan Gambar 4. 5.



Gambar 4. 5 Segmen Segitiga Titik Pengamatan GPS

Setelah dibuat segmen-segmen segitiga, dari data kecepatan pergeseran dapat dilakukan perhitungan awal regangan yang akan menghasilkan nilai parameter deformasi seperti Tabel 4. 5. Parameter ini selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai *principal strain*.

Tabel 4. 5 Nilai Parameter Deformasi Berdasarkan Segmen Segitiga

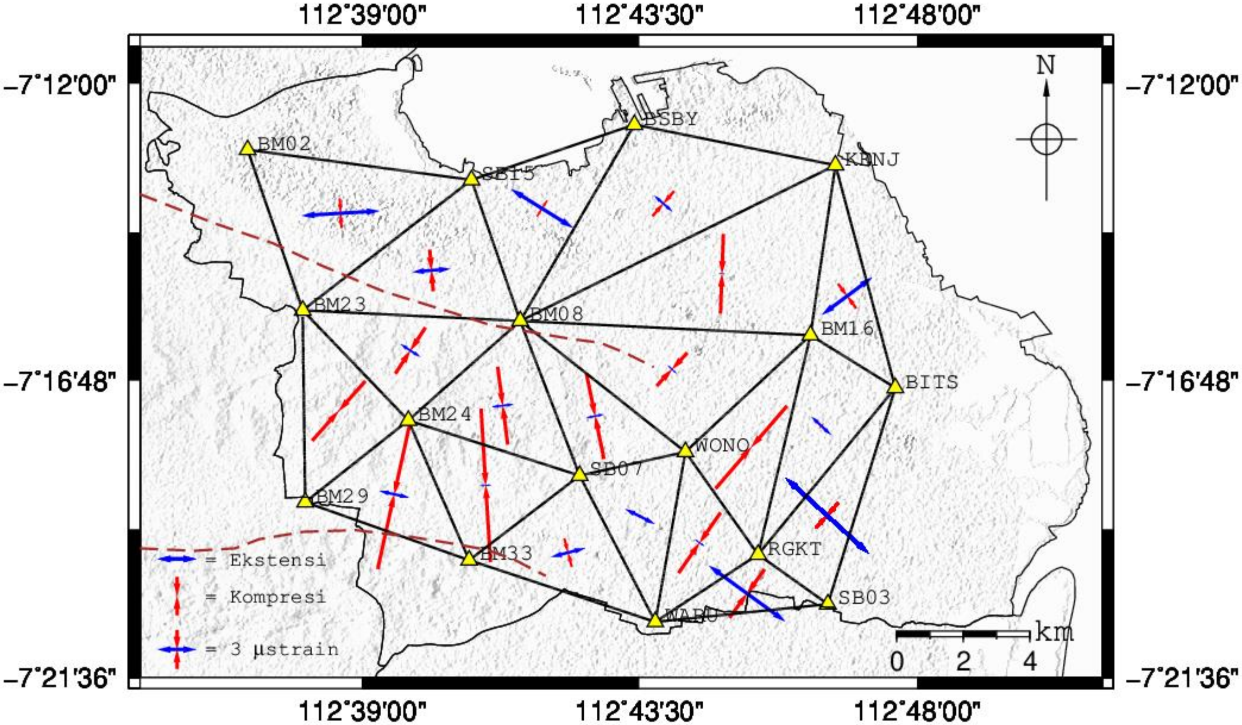
Segmen Segitiga	ε_x (µstrain)	ε_y (µstrain)	ε_{xy} (µstrain)
BM02-BM23-SB15	4,267	-3,452	-0,463
BM23-SB15-BM08	2,804	-0,943	-0,3091
BM23-BM24-BM08	0,256	2,652	-2,724
BM23-BM24-BM29	-0,119	1,241	-5,943
BM29-BM24-BM33	-11,02	2,78	-3,22
SB15-BSBY-BM08	2,599	-1,875	4,542
BM08-WONO-SB07	-6,501	-1,594	1,052
BM24-BM08-SB07	-5,419	2,207	0,999
BM24-BM33-SB07	-11,9	0,76	0,78
BM08-WONO-BM16	-1,563	-1,121	-2,833
BM08-BSBY-KENJ	1,129	1,653	-1,809
KENJ-BM08-BM16	-3,308	3,292	-0,2392
BM33-SB07-WARU	1,528	-2,151	-1,037
WARU-SB07-WONO	1,919	1,199	0,492
WARU-RGKT-WONO	-0,519	2,684	-4,329
KENJ-BM16-BITS	-2,323	0,617	4,842
BM16-WONO-RGKT	-0,453	1,881	-8,037
BM16-BITS-RGKT	-0,327	-0,634	1,9
WARU-RGKT-SB03	-1,975	-5,008	4,678
BITS-RGKT-SB03	-1,634	-3,117	7,757

Dari perhitungan parameter-parameter di atas, dapat dihitung nilai *principal strain* yaitu ekstensi dan kompresi (ε_1 dan ε_2) di segmen-segmen segitiga yang telah dibuat sehingga dapat dimodelkan besar dan pola regangan yang terjadi di Kota Surabaya. Hasil perhitungan nilai *principal strain* dapat dilihat pada Tabel 4. 6.

Tabel 4. 6 Nilai *Principal Strain* Berdasarkan Segmen Segitiga

Segmen Segitiga	ε_1 (µstrain)	ε_2 (µstrain)	θ (derajat)
BM02-BM23-SB15	6,086	-2,283	-3,420
BM23-SB15-BM08	2,951	-3,238	-4,684
BM23-BM24-BM08	1,808	-4,276	33,130
BM23-BM24-BM29	0,134	-6,196	41,736
BM29-BM24-BM33	2,33	-11,9	12,509
SB15-BSBY-BM08	5,682	-1,458	31,890
BM08-WONO-SB07	1,374	-6,823	-11,604
BM24-BM08-SB07	1,685	-6,105	-7,341
BM24-BM33-SB07	0,83	-11,95	-3,512
BM08-WONO-BM16	0,91	-3,486	42,770
BM08-BSBY-KENJ	1,872	-2,552	40,880
KENJ-BM08-BM16	0,474	-6,174	2,073
BM33-SB07-WARU	2,75	-2,259	-14,706
WARU-SB07-WONO	2,6	-0,19	26,903
WARU-RGKT-WONO	0,867	-5,716	34,850
KENJ-BM16-BITS	4,895	-2,376	-36,556
BM16-WONO-RGKT	0,012	-8,478	40,870
BM16-BITS-RGKT	2,067	-0,495	42,691
WARU-RGKT-SB03	7,364	-4,66	36,019
BITS-RGKT-SB03	8,697	-2,574	42,270

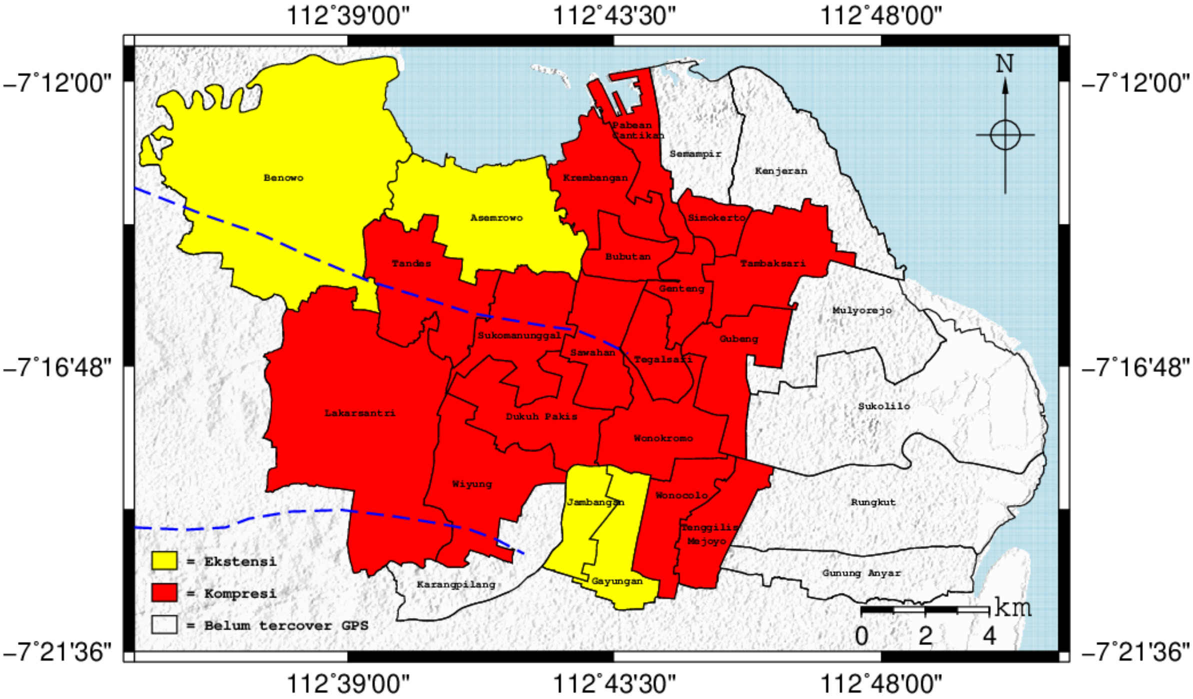
Terakhir adalah *plotting* hasil perhitungan di atas ke dalam segmen segitiga yang telah dibuat. Gambar 4. 6 merupakan hasil plot regangan menggunakan software GMT. Terlihat bahwa aktivitas regangan yang terjadi di daerah pengamatan cukup variatif dengan adanya ekstensi dan kompresi.



Gambar 4. 6 Hasil *Plotting* Regangan di Kota Surabaya

Tingkat ekstensi terkecil diantara segmen segitiga di titik pengamatan GPS terdapat pada segmen BM16-WONO-RGKT dengan nilai 0,012 µstrain sedangkan tingkat ekstensi terbesar terdapat pada segmen BITS-RGKT-SB03 dengan nilai 8,697 µstrain. Pada tingkat kompresi, daerah dengan tingkat kompresi terkecil terdapat pada segmen WARU-SB07-WONO dengan nilai 0,190 µstrain sedangkan tingkat kompresi terbesar terdapat pada segmen BM24-BM33-SB07 dengan nilai 11,950 µstrain. Berdasarkan total nilai ekstensi dan kompresi yang terjadi, Kota Surabaya didominasi oleh kompresi. Nilai kompresi menggambarkan bahwa pada daerah tersebut sedang terjadi pengumpulan energi yang nantinya energi tersebut akan dilepaskan. Pelepasan energi yang terjadi dapat berupa gempa bumi atau pergeseran.

Hasil regangan selanjutnya dapat dibuat zonasi pada tingkat kecamatan untuk melihat dan memperkirakan di daerah mana sajakah kompresi dan ekstensi terjadi. Hasil zonasi dengan menggunakan data shp administrasi desa dari BIG dapat dilihat pada Gambar 4. 7. Berdasarkan hasil zonasi pada Gambar 4. 7, 17 kecamatan di Kota Surabaya didominasi oleh kompresi, 4 kecamatan didominasi ekstensi, dan 7 kecamatan belum ter*cover* GPS. Kecamatan yang belum ter*cover* GPS menunjukkan bahwa metode segmen segitiga yang dibuat kurang menutupi suatu kecamatan karena kurang rapatnya data GPS di sekitar segmen segitiga tersebut sehingga tidak bisa diperkirakan apakah kecamatan tersebut didominasi kompresi atau ekstensi. Dari hasil zonasi ini dapat dilihat juga wilayah manakah yang perlu ditambah pengamatan GPS baru sehingga data GPS lebih rapat dan segmen segitiga yang dibuat dapat menutup atau meng*cover* wilayah tersebut untuk dilakukan penentuan regangan yang terjadi.



Gambar 4. 7 Hasil Zonasi Regangan di Kota Surabaya pada Tingkat Kecamatan

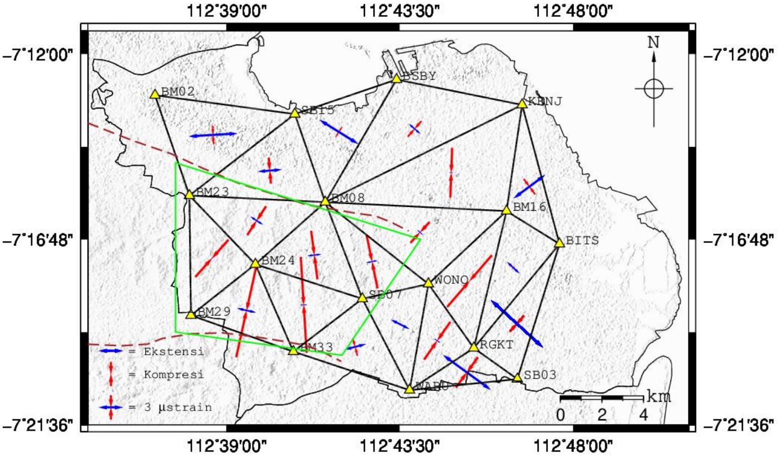
4.4 Analisis Potensi Gempa

Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, Kota Surabaya dilalui oleh Sesar Kendeng dengan dua segmen aktif, yaitu Segmen Surabaya dan Waru. Menurut ahli geologi dan geofisika, Sesar Kendeng Segmen Surabaya diperkirakan terletak di antara BM02 hingga BSBY dan BM23 hingga WONO atau lebih tepatnya melewati Kecamatan Benowo, Tandes, Sukomanunggal, Sawahan, dan Tegalsari. Sesar Kendeng Segmen Waru terletak di antara BM29 hingga SB07 dan BM33 atau lebih tepatnya melewati Kecamatan Lakarsantri, Wiyung, dan Karangpilang. Ilustrasi posisi Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru dapat dilihat pada Gambar 4. 5. Analisis potensi gempa yang dilakukan dalam penelitian ini berdasarkan hasil deformasi yang diperoleh serta keberadaan Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru.

Berdasarkan hasil kecepatan pergeseran horizontal, arah pergeseran titik-titik pengamatan GPS menuju ke tenggara, hanya BM33 dan SB07 yang mengarah ke timur laut. Sedangkan berdasarkan hasil kecepatan pergeseran vertikal, titik-titik pengamatan GPS selain BM23, BM29, dan BM24 mengalami *subsidence* atau penurunan tanah. Fenomena arah pergeseran yang berbeda semakin membuktikan bahwa terdapat suatu komponen yang menyebabkan arah pergeseran berbeda antar wilayah tersebut. Apabila dikorelasikan dengan keilmuan geodesi, geologi, dan geofisika hal ini disebabkan adanya pergerakan dari dalam bumi sehingga mempengaruhi posisi wilayah yang berada di permukaannya. Berdasarkan Gambar 4. 5 pergerakan tersebut dapat diasumsikan berasal dari Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru karena berada dalam lingkup lokasi titik-titik pengamatan GPS yang memiliki perbedaan arah pergeseran. Selanjutnya dilihat dari lokasi BM23, BM29, dan BM24 yang berada di antara dua segmen Sesar Kendeng, yaitu Segmen Surabaya dan Segmen Waru serta arah pergeseran daerah yang mengalami kenaikan tanah atau *uplift* mengindikasikan bahwa Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru tergolong ke dalam sesar naik. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh

Smyth, Hall, dan Nichols (2008) yang menyatakan bahwa Sesar Kendeng terdiri dari kumpulan sesar-sesar naik dan lipatan-lipatan (*blind faults*) yang dapat diamati dari adanya anomali Bouguer di daerah ini serta Marliyani (2016) yang menyatakan bahwa bukti pergerakan sesar ini dapat diamati dengan adanya teras-teras sungai yang terangkat seiring dengan pergerakan sesar-sesar di daerah ini. Sedangkan pada BM33 dan SB07 perlu adanya penelitan lebih lanjut apakah perbedaan arah pergeseran horizontal yang terjadi juga disebabkan oleh aktivitas Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru

Pada hasil pengolahan regangan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, menunjukkan bahwa Kota Surabaya didominasi oleh akumulasi energi atau kompresi. Energi yang terakumulasi suatu saat dapat dilepaskan dalam bentuk gempa bumi. Wilayah Surabaya yang didominasi oleh kompresi serta tingginya perbedaan nilai kompresi tertinggi dan terendah pada Tabel 4. 6 semakin menunjukkan aktifnya Sesar Kendeng sehingga dapat disimpulkan bahwa Kota Surabaya memiliki potensi gempa yang perlu diwaspadai. Gambar 4. 8 menunjukkan bahwa akumulasi energi pada wilayah Surabaya Barat paling besar daripada wilayah Surabaya yang lain. Terlihat bahwa regangan pada semua daerah segmen segitiga yang terletak diantara dua segmen Sesar Kendeng didominasi oleh kompresi yang dikelilingi garis warna hijau. Daerah dengan kompresi terbesar terletak pada segmen segitiga BM29-BM33-SB07 tepatnya di lingkup Kecamatan Wiyung, Dukuh Pakis, dan Lakarsantri yang mana segmen segitiga ini dilewati oleh Sesar Kendeng Segmen Waru. Hal ini semakin mengindikasikan adanya aktivitas sesar yang terjadi di Kota Surabaya terutama Surabaya bagian barat.



Gambar 4. 8 Wilayah Surabaya dengan kompresi tinggi yang ditunjukkan garis hijau

Dari hasil penelitian ini dapat diasumsikan di Kota Surabaya Sesar Kendeng Segmen Waru lebih aktif daripada Segmen Surabaya. Hasil pengolahan regangan di Kota Surabaya juga juga sejalan dengan analisis bahwa Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru adalah sesar naik berdasarkan pernyataan Turcotte dan Schubert (2002) yang menyatakan bahwa salah satu penciri sebuah sesar naik adalah apabila pada sesar tersebut banyak dijumpai regangan yang sifatnya kompresional.

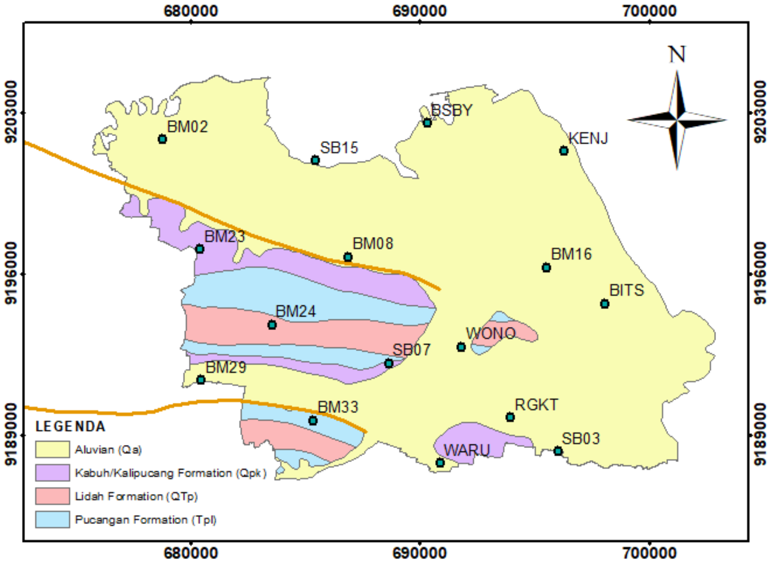
4.5 Analisis dengan Peta Geologi

Dari hasil besar dan arah kecepatan pergeseran horizontal, dapat dilihat pada Gambar 4. 1 bahwa titik-titik pengamatan GPS dominan bergeser ke arah tenggara. Karena Indonesia terletak di wilayah Lempeng Eurasia, pergeseran ke arah tenggara ini disebabkan oleh dorongan lempeng tersebut. Sedangkan pada kecepatan pergeseran vertikal, pada Gambar 4. 2 menunjukkan bahwa kota Surabaya dominan mengalami *subsidence* atau penurunan tanah. Secara garis besar, salah satu hal yang mempengaruhi *subsidence* adalah adanya proses-proses geologi

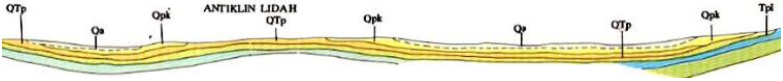
seperti aktifitas vulkanik dan tektonik, siklus geologi, adanya rongga di bawah permukaan tanah, dan sebagainya (Whittaker dan Reddish, 1989). Pada penelitian ini, analisis dengan peta geologi dilakukan pada titik yang menunjukkan bahwa Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru adalah sesar yang aktif, yaitu BM23, BM29, dan BM24.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Surabaya dan Sapulu, Jawa skala 1:100.000 (Supandjono dkk, 1992) dan telah dilakukan proses digitasi seperti Gambar 4. 9, Kota Surabaya memiliki empat jenis atau formasi tanah, yaitu Formasi Kabuh/Kalipucang, Formasi Lidah, Aluvial, dan Formasi Pucangan. BM23 terletak di Formasi Kabuh/Kalipucang, BM24 terletak di Formasi Lidah, dan BM29 terletak di Tanah Aluvial. Dari peta geologi tersebut juga menunjukkan suatu anomali dari segi lapisan tanah dan kecepatan pergeseran.

Berdasarkan umur di peta geologi tersebut, jenis Tanah Aluvial lebih muda daripada Formasi Kabuh/Kalipucang dan Formasi Lidah. Umur yang lebih muda juga menunjukkan urutan lapisan tanah dari yang atas. Namun pada peta tersebut menunjukkan pada BM23 dan BM24 yang terletak di Antiklin Lidah lapisan tanah atasnya adalah Formasi Kabuh/Kalipucang dan Formasi Lidah. Hal tersebut menunjukkan terdapat suatu anomali karena pengaruh dari dalam bumi sehingga Formasi Kabuh/Kalipucang, Lidah, dan Pucangan tersingkap ke atas dan tidak terdapat Tanah Aluvial di sana seperti yang ditunjukkan potongan peta geologi tersebut pada Gambar 4. 10. Pengaruh dari dalam bumi tersebut dapat diasumsikan berasal dari dua segmen Sesar Kendeng di Surabaya melihat lokasi ketiga formasi tersebut pada BM23 dan BM24 cukup luas dibanding formasi lain di Surabaya dan terletak di antara dua segmen sesar tersebut.



Gambar 4. 9 Hasil Digitasi Peta Geologi Surabaya



Gambar 4. 10 Potongan Peta Geologi Lembar Surabaya dan Sapulu, Jawa (Supandjono dkk, 1992)

Berdasarkan Tabel 4. 1, kecepatan pergeseran vertikal terbesar dialami oleh BM24, lalu BM29, dan BM23. BM23 memiliki *uplift* yang kecil karena dikelilingi paling banyak bangunan dibanding dua titik lain dan memungkinkan terjadinya pegambilan air tanah lebih besar. Kedua hal tersebut dapat menekan terjadinya laju *uplift* menjadi lebih kecil. BM29 memiliki nilai *uplift* lebih besar dari BM23 karena dikelilingi banyak tanah lapang dan sedikit bangunan sehingga nilainya lebih besar. Sedangkan pada BM24 terdapat suatu anomali dimana BM tersebut terletak di wilayah yang dikelilingi bangunan lebih banyak dari BM29 namun nilai *uplift*nya lebih kecil. Hal tersebut diasumsikan karena BM24 terletak di tengah-tengah antara Sesar

Kendeng Segmen Surabaya dan Waru dan nilai *uplift*nya yang paling besar dipengaruhi oleh kedua segmen tersebut.

4.6 Validasi menggunakan Metode *Synthetic Aperture Radar* (SAR)

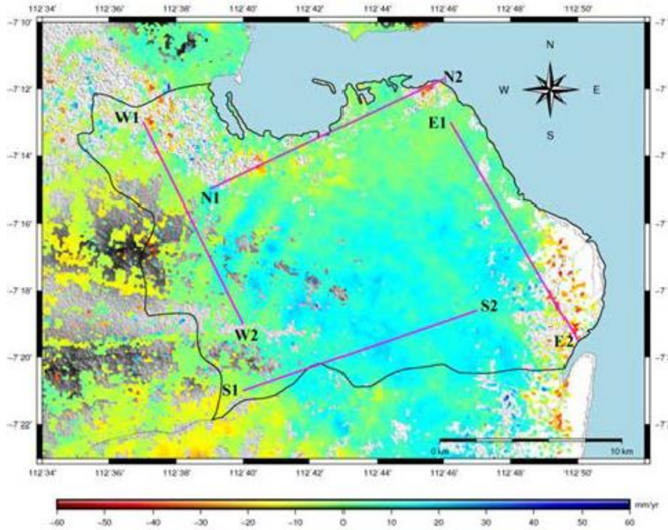
Hasil deformasi dari data GPS yang dilakukan pada penelitian ini selanjutnya dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian deformasi di Kota Surabaya sebelumnya pernah dilakukan oleh Anjasmara dkk (2018). Dalam jurnalnya dijelaskan bahwa penelitian tersebut menggunakan metode SAR dengan citra Sentinel-1A dari Mei 2015 hingga September 2017. Hasil dari penelitian tersebut adalah *Line of Sight* (LOS) kecepatan pergeseran vertikal yang tejadi di Kota Surabaya yang ditunjukkan Tabel 4. 7 dan Gambar 4. 11.

Tabel 4. 7 Hasil SBAS Mei 2015-September 2017 (Anjasmara dkk, 2017)

Wilayah Surabaya	Kecepatan Deformasi Mei 2015-September 2017 (mm/tahun)
Utara	-60 – +10
Selatan	-10 – +10
Barat	-10 – +25
Timur	-25 – 00

Berdasarkan Tabel 4. 7, *subsidence* terbesar terjadi di wilayah Surabaya Utara dengan nilai -60 mm/tahun sedangkan *uplift* terbesar terjadi di wilayah Surabaya Barat dengan nilai 25 mm/tahun. Dari hasil penelitian tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa wilayah di Kota Surabaya dominan mengalami *subsidence*, kecuali di wilayah Surabaya Barat yang dominan mengalami *uplift* karena nilainya yang lebih besar daripada nilai *subsidence*nya. Kesimpulan tersebut sama dengan hasil pemantauan deformasi menggunakan metode GNSS dimana titik-titik pengamatan GPS di Kota Surabaya dominan mengalami *subsidence* kecuali BM23,

BM29, dan BM24 yang mengalami *uplift* dan terletak di wilayah Surabaya Barat.



Gambar 4. 11 Pola Deformasi Mei 2015-September 2017 (Anjasmara dkk, 2017)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dalam penelitian ini berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan sebagai berikut:

1. Pergeseran horizontal titik-titik pengamatan GPS dominan menuju ke arah tenggara dengan rentang nilai kecepatan pergeseran antara 1,034 cm/tahun hingga 5,674 cm/tahun. Sedangkan pergeseran vertikal titik-titik pengamatan GPS selain BM23, BM29, dan BM24 mengalami subsidence dengan rentang nilai kecepatan pergeseran antara 0,190 cm/tahun hingga 5,769 cm/tahun.
2. Nilai ekstensi di Kota Surabaya berkisar antara 0,012 hingga 8,697 µstrain. Sedangkan Kota Surabaya dominan mengalami kompresi dengan rentang nilai antara 0,190 hingga 11,450 µstrain.
3. Kota Surabaya memiliki potensi gempa yang perlu diwaspadai terutama di wilayah Surabaya Barat karena adanya aktivitas sesar dan didominasi oleh kompresi dengan nilai kompresi yang lebih besar daripada wilayah lain

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengolahan data dan kesimpulan yang diperoleh, beberapa saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Pemilihan alat untuk pengamatan GPS sebaiknya memperhatikan *software* ilmiah yang akan digunakan untuk mengolah, karena ada beberapa alat yang tidak terdapat pada database *software* pengolah GPS sehingga dapat menyebabkan titik yang menggunakan alat tersebut tidak dapat diolah atau memiliki *error* yang besar. Selain itu setiap titik sebaiknya diamati minimal 24 jam atau 11 jam selama 3 hari berturut-turut, tidak memotong hari, dan menggunakan alat yang sama di setiap kala untuk mendapatkan ketelitian data yang lebih baik

dan mengetahui jika terjadi *error* yang besar di titik tersebut apakah disebabkan oleh pengaruh alat atau hal lain seperti strategi pengolahan, lokasi titik, atau kesalahan ketika melakukan pengamatan.

2. Penentuan regangan sebaiknya ditambahkan dengan metode *gridding* untuk mengetahui regangan yang terjadi di lokasi yang belum ter*cover* GPS
3. Setelah dilakukan pengamatan pada suatu kala sebaiknya langsung dilakukan pengolahan data untuk mengetahui kualitas data yang dihasilkan dan kekurangan atau kesalahan yang terjadi di kala tersebut, sehingga dapat dilakukan perbaikan pada kala berikutnya.
4. Perlunya melakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan data yang lebih banyak dengan menambah jumlah titik pengamatan terutama di sekitar Sesar Kendeng Segmen Surabaya dan Waru sehingga hasil yang diperoleh baik dalam hal kecepatan, regangan, maupun potensi gempa lebih akurat dan informasi potensi gempa yang diperoleh nantinya lebih mendalam seperti kecepatan sesar tersebut, *magnitude* maksimum, dan periode berulang gempa.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H. Z. 2007. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

Afrizal, Y. A. F. 2011. *Analisis Regangan dan Potensi Bahaya Gempa di Selat Sunda Berdasarkan Data Pengamatan GPS 2006-2011*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Anjasmara, I. M., Taufik, M., Cahyadi, M. N., Khomsin, dan Handoko, E. Y. 2018. Surface Deformation Monitoring in Surabaya by Using GNSS Survey Campaigns and Time-Series InSAR Analysis. In *International Symposium On GNSS 2018*. Bali, Indonesia.

Anjasmara, I. M., Yulyta, S. A., Cahyadi, M. N., Khomsin, Taufik, M., Jaelani, L. M. Land Subsidence Analysis in Surabaya Urban Area Using Time Series InSAR Method. 2017. In *International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation (ISEDM)*. Bandung, Indonesia.

Asikin, S. 1978. *Dasar-Dasar Geologi Struktur*. Bandung: Departemen Teknik Geologi ITB.

Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. 2018. *Statistik Daerah Kota Surabaya 2018*. Surabaya: Badan Pusat Statistik Kota Surabaya.

Bullen, K. E. 1965. *An Introduction to the Theory of Seismology*. 4th. Cambridge: Cambridge University Press.

Furqan. 2015. *Analisis Deformasi Sesar Lembang Jawa Barat Menggunakan Data GPS Periodik dan Kontinu Tahun 2006 – 2014*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Ghilani, C. D., dan Wolf, P. R. 2006. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis.* 4th. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Hadi, A. L. 2016. *Analisa Kecepatan Pergeseran di Wilayah Jawa Tengah Bagian Selatan Menggunakan GPS-CORS Tahun 2013-2015*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Herring, T. A., Floyd, M. A., King, R. W., dan McClusky, S. C. 2015. *GLOBK Reference Manual Release 10.6*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.

Hidayat, M. N. 2010. *Tingkat Regangan di Selat Sunda Berdasarkan Data Pengamatan GPS 2006 - 2010*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Kuang, S. 1991. *Optimization and Design of Deformation Monitoring Schemes*. Fredericton: University of New Brunswick.

Marliyani, G. I. 2016. *Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal Deformation in the Overriding Plate of an Orthogonal Subduction System*. Tempe: Arizona State University.

Natawidjaja, D. H., dan Daryono, M. R. 2016. Present-Day Tectonics and Earthquake History of Java, Indonesia. In *Proceedings GEOSEA XIV Congress and 45th IAGI Annual Convention 2016.*

Press, F., dan Siever, R. 1998. *Understanding Earth.* 2th. New York: W. H. Freeman.

Seeber, G. 2003. *Satellite Geodesy.* 2th. Berlin: Walter de Gruyter.

Smyth, H. R., Hall, R., dan Nichols, G. J. 2008. Cenozoic Volcanic Arc History of East Java, Indonesia: The Stratigraphic Record of Eruptions on an Active Continental Margin. *The Geological Society of America Special Paper, 436*(10), 199–222.

Supandjono, J. B., Hasan, K., Panggabean, H., Satria, D., Sukardi. 1992. *Peta Geologi Lembar Surabaya dan Sapulu, Jawa*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Taftazani, M. I. 2013. *Analisis Geodinamika Lima Stasiun Pasut Pulau Jawa Dengan Data Pengamatan GPS Tiga Epok*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung: Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Turcotte, D., dan Schubert, G. 2002. *Geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.

USGS, 1996. Focal Mechanism, <URL:https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/beachball.php>. Dikunjungi pada tanggal 9 Januari 2019, jam 09.47.

USGS, 1999. Illustration of the Main Types of Plate Boundaries, <URL: https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/Vigil.html>. Dikunjungi pada tanggal 24 Desember 2018, jam 07.52.

USGS, 2016. EarthWord–Subduction, <URL:https://www.usgs.gov/news/earthword-subduction>. Diakses pada tanggal 9 Januari 2019, jam 08.37.

Whittaker, B. N., dan Reddish, D. J. 1989. *Subsidence: Occurence, Prediction, and Control*. Inggris: Elsevier.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1
DATA ALAT

Catatan: Data alat dalam lampiran ini adalah yang digunakan pada station.info GAMIT

Kala 1

No.	Titik	Receiver	Receiver SN	Antenna	Antenna SN	Tinggi SHMM		Tinggi ARP
1	BM23	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,2360	1236	1,2031
2	SBY3	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,3460	1346	1,3133
3	BMPAKUWON	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,2620	1262	1,2291
4	BMWARU	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,1030	1103	1,0698
5	BM08	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,2170	1217	1,1840
6	BMPASARTURI	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,1670	1167	1,1339
7	SBY7	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,2770	1277	1,2441
8	BM16	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,1370	1137	1,1038
9	BM29	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	0,9190	919	0,8852
10	BMRUNGKUT	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,0200	1020	0,9865
11	BM19	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,3270	1327	1,2942
12	BM33	TPS HIPER_SR	1064-16240	TPSHIPER_SR	1064-16240	1,3100	1310	1,2766
13	BM01	TPS HIPER_SR	1064-16240	TPSHIPER_SR	1064-16240	1,3087	1308,7	1,2752
14	BM24	TPS HIPER_SR	1064-16240	TPSHIPER_SR	1064-16240	1,2390	1239	1,2054
15	BSBY	TPS HIPER_SR	1064-15874	TPSHIPER_SR	1064-15874	0,8190	819	0,7835
16	SBY15	TPS HIPER_SR	1064-15874	TPSHIPER_SR	1064-15874	1,4550	1455	1,4219
17	BMKENJERAN	TPS HIPER_SR	1064-15874	TPSHIPER_SR	1064-15874	1,5740	1574	1,5411
18	BMITS01	TRIMBLE NETR9		HITAT35101CR	2016110026	1,1600	1160	1,1177
19	BM21	TPS HIPER_SR	1064-16240	TPSHIPER_SR	1064-16240	1,4900	1490	1,4570
20	BMWONOKROMO	TPS HIPER_SR	1064-16240	TPSHIPER_SR	1064-16240	1,3060	1306	1,2725

Kala 2

No.	Titik	Receiver	Receiver SN	Antenna	Antenna SN	Tinggi Slant		Tinggi ARP
1	BMWARU	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,0950	1095	1,0617
2	SBY3	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,2250	1225	1,1920
3	BM24	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,0000	1000	0,9665
4	BM33	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,2600	1260	1,2271
5	BM02	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,2240	1224	1,1910
6	BM23	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,0990	1099	1,0657
7	BMWONOKROMO	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,0930	1093	1,0597
8	SBY7	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,2950	1295	1,2622
9	SBY5	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,0340	1034	1,0006
10	BMKENJERAN	TRIMBLE NETR9	5342K46486	TRM57971.00	50001153532	1,5390	1539	1,4853
11	BSBY	TRIMBLE NETR9	5342K46486	TRM57970.00	50001153532	0,7220	722	0,6574
12	BMPAKUWON	TRIMBLE NETR9	5342K46486	TRM57970.00	50001153532	1,3190	1319	1,2637
13	BM08	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,0700	1070	1,0367
14	BM16	TRIMBLE NETR9	5342K46486	TRM57971.00	50001153532	1,3023	1302,3	1,2468
15	BMRUNGKUT	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	0,9550	955	0,9213
16	SBY15	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,1520	1152	1,1189
17	SBY18	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,2120	1212	1,1790
18	BM15					1,1520		
19	BMITS01	TRIMBLE NETR9		HITAT35101CR	2016110026	1,5350	1535	1,4957
20	BM29	TPS HIPER_PRO	309-0700	TPSHIPER_PLUS	309-0700	1,0890	1089	1,0557

Kala 3

No.	Titik	Receiver	Receiver SN	Antenna	Antenna SN	Tinggi ARP
1	BMITS01	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	0,637
2	BMGEOMATIKA	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1,4445
3	BM02	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,0066
4	BM29	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	0,8079
5	BSBY	TPS GB-1000	T224255	TPSPG_A1	308-10353	0,7332
6	BMWONOKROMO	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1,0788
7	BMBATASRUNGKUT-GUNUNGANYAR	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1,0417
8	BM16	TPS GB-1000	T224255	TPSPG_A1	308-10353	1,2383
9	BM23	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,3373
10	BM33	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	0,9976
11	BM08	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,3774
12	BM15	TPS GB-1000	T224255	TPSPG_A1	308-10353	1,2534
13	SBY3	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1,2461
14	SBY7	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,3613
15	BMKENJERAN	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1,3072
16	BMRUNGKUT	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	0,9605
17	BMWARU	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	0,7486
18	BM24	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1,1239
19	BMPASARTURI	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	0,9564
20	SBY15	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1,2952

Kala 4

No.	Titik	Receiver	Receiver SN	Antenna	Antenna SN	Tinggi Slant (mm)	Tinggi ARP
1	SBY3	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1370	1,3373
2	BMKENJERAN	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1347	1,3143
3	BM15	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1161	1,1279
4	BMGEOMATIKA	TPS HIPER_PRO	309-0681	TPSHIPER_PLUS	309-0681	1608	1,5756
5	BMITS01	TPS HIPER_PRO	309-0705	TPSHIPER_PLUS	309-0705	1088	1,0547
6	BMWARU	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1038	1,0046
7	BMRUNGKUT	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1036	1,0026
8	SBY7	TPS HIPER_PRO	309-0701	TPSHIPER_PLUS	309-0701	1337	1,3042
9	BM08	TRIMBLE BD970	11016142	TRMR8_GNSS		1162	1,1368
10	BMPASARTURI	TRIMBLE BD970	11016168	TRMR8_GNSS		1503	1,4786
11	BM02	TRIMBLE BD970	11016142	TRMR8_GNSS		1254	1,2290
12	BMWONOKROMO	TRIMBLE BD970	10230601	TRMR8_GNSS		1683	1,6877
13	BM16	TRIMBLE BD970	11016168	TRMR8_GNSS		1490	1,4656
14	BM29	TRIMBLE BD970	10230601	TRMR8_GNSS		1350	1,3541
15	BM33	TRIMBLE BD970	10230601	TRMR8_GNSS		1395	1,3992
16	BSBY	TRIMBLE BD970	11016168	TRMR8_GNSS		1215	1,1899
17	BM23	TRIMBLE BD970	11016142	TRMR8_GNSS		1494	1,4696
18	BM24	TRIMBLE BD970	10230601	TRMR8_GNSS		1610	1,6146
19	SBY15	TRIMBLE BD970	11016168	TRMR8_GNSS		1586	1,5617

LAMPIRAN 2
CONTROL FILES GAMIT/GLOBK

Station.info

```
BAKO  bako            2018 302  0  0  0  2018 302 23 59 30   1.6480  DHPAB
0.0000   0.0000  LEICA GR50    4.11/7.102           0.00  1870540
LEIAR20          LEIM   21015023               mstinf: bako3020.18o?
BITS  BMITS01         2018 131 10 58  0  2018 131 23 28 30   0.6720  SLPAS
0.0000   0.0000  TPS HIPER_PRO 3.5 Mar,16,2011 p1     0.00  309-0701
TPSHIPER_PLUS    NONE   309-0701               mstinf: bits1310.18o?
BITS  BMITS01         2018 301  0  0  0  2018 301 23 59 30   1.0880  SLPAS
0.0000   0.0000  TPS HIPER_PRO 3.5 Mar,16,2011 p1     0.00  309-0705
TPSHIPER_PLUS    NONE   309-0705               mstinf: bits3010.18o?
BITS  BMITS01         2018 302  0  0  0  2018 302  5  1 30   1.0880  SLPAS
0.0000   0.0000  TPS HIPER_PRO 3.5 Mar,16,2011 p1     0.00  309-0705
TPSHIPER_PLUS    NONE   309-0705               mstinf: bits3020.18o?
BM02  BM02            2018 132  9 54 30  2018 132 22  0 30   1.0400  SLPAS
0.0000   0.0000  TPS HIPER_PRO 3.5 Mar,16,2011 p1     0.00  309-0701
TPSHIPER_PLUS    NONE   309-0701               mstinf: bm021320.18o?
BM02  BM02            2018 299 12 37  0  2018 299 23 59 30   1.2290  DHARP
0.0000   0.0000  TRIMBLE BD970 0.00  11016142
TRMR8_GNSS       NONE                          mstinf: bm022990.18o?
BM08  BM08            2018 133 16 48 30  2018 133 23 59 30   1.4100  SLPAS
0.0000   0.0000  TPS HIPER_PRO 3.5 Mar,16,2011 p1     0.00  309-0701
TPSHIPER_PLUS    NONE   309-0701               mstinf: bm081330.18o?
BM08  BM08            2018 134  0  0  0  2018 134  5  9  0   1.4100  SLPAS
0.0000   0.0000  TPS HIPER_PRO 3.5 Mar,16,2011 p1     0.00  309-0701
TPSHIPER_PLUS    NONE   309-0701               mstinf: bm081340.18o?
BM08  BM08            2018 301  0  0  0  2018 301 10 30 30   1.1368  DHARP
0.0000   0.0000  TRIMBLE BD970 0.00  11016142
TRMR8_GNSS       NONE                          mstinf: bm083010.18o?
BM16  BM16            2018 133  1 12 30  2018 133 14 42  0   1.2690  SLCGP
0.0000   0.0000  TPS GB-1000   3.4 May,13,2009        0.00  T224255
TPSPG_A1         NONE   308-10353              mstinf: bm161330.18o?
BM16  BM16            2018 301 12 49  0  2018 301 23 59 30   1.4656  DHARP
0.0000   0.0000  TRIMBLE BD970 0.00  11016168
TRMR8 GNSS       NONE                          mstinf: bm163010.18o?
BM16  BM16            2018 302  0  0  0  2018 302  5  0  0   1.4656  DHAR
0.0000   0.0000  TRIMBLE BD970          0.00  11016168
TRMR8_GNSS       NONE                          mstinf: bm163020.18o?
BM23  BM23            2018 133  4 12 30  2018 133 16  0  0   1.3700  SLPA
0.0000   0.0000  TPS HIPER_PRO          3.5 Mar,16,2011 p1     0.00  309-070
TPSHIPER_PLUS    NONE   309-0701               mstinf: bm231330.18o?
BM23  BM23            2018 300  4 47  0  2018 300 20  3  0   1.4696  DHAR
0.0000   0.0000  TRIMBLE BD970          0.00  11016142
TRMR8_GNSS       NONE                          mstinf: bm233000.18o?
```

Lfile.

```
ZOB1_2PS   650770.26060 -4754715.33035  4187420.46082  -0.01547   0.00024   0.00033 2005.0     0
ZOB1_3PS   650770.27458 -4754715.34048  4187420.45272  -0.01547   0.00024   0.00033 2005.0     0
ZOUF_GPS  4282709.95581   986659.53330  4609469.85336  -0.01527   0.01777   0.01181 2010.0     0
ZSE1_GPS -2308929.99683 -3668169.42001  4663526.18094  -0.01081  -0.00001  -0.00555 2005.0     0
ZSE1_2PS -2308930.01982 -3668169.42735  4663526.19195  -0.01081  -0.00001  -0.00555 2005.0     0
ZSE1_3PS -2308930.00999 -3668169.42701  4663526.20325  -0.01081  -0.00001  -0.00555 2005.0     0
ZSE1_4PS -2308930.00907 -3668169.42601  4663526.20222  -0.01081  -0.00001  -0.00555 2005.0     0
ZTL4_GPS   529840.47909 -5305248.41165  3489342.58824  -0.01289  -0.00015   0.00018 2005.0     0
ZTL4_2PS   529840.47178 -5305248.43279  3489342.60226  -0.01289  -0.00015   0.00018 2005.0     0
ZTL4_3PS   529840.48599 -5305248.44225  3489342.60058  -0.01289  -0.00015   0.00018 2005.0     0
ZYWI_GPS  3904632.89953  1360192.18053  4840631.02369  -0.01788   0.01619   0.00964 2010.0     0
ZYWI_2PS  3904632.89113  1360192.17880  4840631.01867  -0.01788   0.01619   0.00964 2010.0     0
ZYWI_3PS  3904632.89849  1360192.18157  4840631.02674  -0.01788   0.01619   0.00964 2010.0     0
BITS_GPS -2451240.86111  5832939.20582  -803080.95722    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3575
BM02_GPS -2433753.87592  5841226.38389  -796042.13137    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3603
BM08_GPS -2441014.36237  5837501.74125  -801104.79177    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3630
BM16_GPS -2448981.50747  5834103.89381  -801523.20780    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3630
BM23_GPS -2435044.21305  5840053.61403  -800789.82424    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3630
BM24_GPS -2437794.76034  5838462.70576  -804046.25161    0.00000   0.00000    0.00000 2018.8233
BM29_GPS -2434830.52852  5839344.89777  -806460.56665    0.00000   0.00000    0.00000 2018.8178
BM33_GPS -2439260.88672  5837258.53781  -808175.58597    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3630
BSBY_GPS -2444441.88469  5836864.77919  -795298.60269    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3603
CLMG_GPS -2404551.78110  5855181.10324  -782302.09808    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3575
CMJT_GPS -2414318.65990  5845521.62949  -823220.63588    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3575
CPAS_GPS -2460056.39165  5823475.15282  -843592.24462    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3575
CSBY_GPS -2443857.67017  5835257.98806  -808826.45248    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3575
CSMP_GPS -2498249.31295  5814287.73471  -793589.17899    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3575
KENJ_GPS -2449915.31804  5834403.94378  -796498.88600    0.00000   0.00000    0.00000 2018.8178
PSTR_GPS -2445052.45893  5836041.48904  -799422.32422    0.00000   0.00000    0.00000 2018.8233
RGKT_GPS -2447218.90557  5833943.04101  -808009.10900    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3658
SB03_GPS -2449064.74676  5832962.64517  -809474.21415    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3630
SB07_GPS -2442425.01111  5836279.73417  -805677.40600    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3630
SB15_GPS -2439874.27827  5838549.35199  -796935.42091    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3685
WARU_GPS -2444291.56373  5834894.66448  -809998.01509    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3658
WONO_GPS -2445370.41242  5835144.81017  -804974.69390    0.00000   0.00000    0.00000 2018.3603
```

Sestbl.

```
Update T/L files = L_ONLY        ; T_AND_L (default), T_ONLY, L_ONLY, NONE
Update tolerance = .3            ; minimum adjustment for updating L-file coordinates, default .3 m

Met obs source = GPT 50          ; hierarchical list with humidity value at the end; e.g. RNX UFL GPT 50 ; default GTP 50
                                    if [humid value] < 0, use RNX, UFL(VMF1), or GPT2 if available
Output met = N                   ; write the a priori met values to a z-file (Y/N)
Use met.list = N                 ; not yet supported
Use met.grid = N                 ; not yet supported
DMap = VMF1                      ; GMF(default)/VMF1/NMFH; GMF now invokes GPT2 if gpt.grid is available (default)
WMap = VMF1                      ; GMF(default)/VMF1/NMFW; GMF now invokes GPT2 if gpt.grid is available (default)
Use map.list = N                 ; VMF1 list file with mapping functions, ZHD, ZWD, P, Pw, T, Ht
Use map.grid = Y                 ; VMF1 grid file with mapping functions and ZHD
Yaw Model = Y                    ; Y/N  default = Y
Radiation Model for ARC = BERNE   ; BERNE/BERN2/UCLR1/UCLR2/NONE  default = BERNE
Earth radiation model = NCLE1     ; NCLE1/NCLE2/TUME1/TUME2/NONE  default = NONE; MIT repro2 = NCLE1
Antenna thrust model = ANTBK      ; ANTBK/NONE  default = NONE; MIT repro2 = ANTBK
Inertial frame = J2000            ; J2000/B1950 default = J2000
Reference System for ARC = EGM08 ; WGS84/EGM96/EGM08/EGR08  default = EGM008; MIT repro2 = EGR08 (relativity)

Tides applied = 63                ; Binary coded: 1 earth  2 freq-dep  4 pole  8 ocean  16 remove mean for pole tide
                                  ; 32 atmosphere ;  default = 31
Use otl.list = N                  ; Ocean tidal loading list file from OSO
Use otl.grid = Y                  ; Ocean tidal loading grid file, GAMIT-format converted from OSO
Etide model = IERS03              ; IERS96/IERS03
Earth Rotation = 11               ; Diurnal/Semidirunal terms: Binary coded: 1=pole 2=UT1 4=Ray model; 8=IERS2010 16=include
Apply atm loading = Y             ; Y/N for atmospheric loading
Use atml.list = N                 ; Atmospheric (non-tidal) loading list file from LU
Use atml.grid = Y                 ; Atmospheric (non-tidal) loading grid file from LU, converted to GAMIT format
Use atl.list = N                  ; Atmospheric tides, list file, not yet available
Use atl.grid = Y                  ; Atmospheric tides, grid file

Antenna Model = AZEL              ; NONE/ELEV/AZEL  default = ELEV   Use AZEL for IGS absolute ANTEX files
SV antenna model = ELEV           ; NONE/ELEV       default = NONE   Use ELEV for IGS ANTEX files
SV antenna off = N                ; Y/N to estimate satellite antenna offsets (default N)

Ion model = GMAP                 ; NONE/GMAP (default NONE) use 2nd/3rd order ionsopheric corrections
Mag field = IGRF12               : IGRF12/IGRF11/IGRF10/DIPOLE (default IGRF12)
```

Sites.default

```
# File to control the use of stations in the processing
#
# Format: site expt keyword1 keyword2 ....
#
#  where the first token is the 4- or 8-character site name (GAMIT uses only
#  4 characters, GLOBK allows only 4 unless there are earthquakes or renames),
#  the second token is the 4-character experiment name, and the remaining
#  tokens, read free-format, indicate how the site is to be used in the processing.
#  All sites for which there are RINEX files in the local directory will be used
#  automatically and do not need to be listed.
#
#  ftprnx = sites to ftp from rinex data archives.
#  ftpraw = sites to ftp from raw data archives.
#  localrx = site names used to search for rinex files on your local system.
#            (required in conjunction with rnxfnd path variable set in process.defaults).
#  xstinfo = sites to exclude from automatic station.info updating.
#  xsite   = sites to exclude from processing, all days or specified days
#
# Replace 'expt' with your experiment name and edit the following to list sites needed
from external archive
 all_sites expt  xstinfo
 brus_gps expt ftprnx
 graz_gps expt ftprnx
 sofi_gps expt ftprnx
# templates for removing sites
 ttth_gps  expt xsite:1999_256-1999_278 glreps xsite:1999_300-1999_365
 thht_gps  expt xsite glreps
```

Process.default

```
##GAMIT
# Set sampling interval, number of epochs, and start time for processing
 set sint = '30'
 set nepc = '2880'
 set stime = '0 0'
# Variables for updating tables
 set stinf_unique = "-u"
 set stinf_nosort = "-nosort"
 set stinf_slthgt = "2.00"
# Set "Y" to use RINEX header coordinates not in lfile or apr file
 set use_rxc      = "N"
# Broadcast orbits
 set brdc = 'brdc'
# Minimum x-file size to be processed (Def. 300 blocks; most OS use 1 Kb blocks)
 set minxf = '300'
# Set search window for RINEX files which might contain data for day - default check the previous day
 set rx_doy_plus = 0
 set rx_doy_minus = 1
# Default globk .apr file
 set aprf = itrf14.apr
# Set compress (copts), delete (dopts) and archive (aopts) options. (Don't forget to set the archivepth.)
# Possible d-, c-, and a- opts: D, H, ao, ac, as, b, c, d, e, g, h, i, j, k, l, m, o, p, q, t, x, ps, all"
 set dopts = ( c )
 set copts = ( x k ao )
 set aopts = ''
# Set the rinex ftp archives (defined in ftp_info) you would like to look for data in.
# (Default archives searched are: sopac, cddis and unavco).
```

Globk_long.cmd

```
* GLOBK command file for multiyear times series and velocity solution from combination h-files

* For velocity, set VEL as a globk command-line option; since these commands
* follow the commands for repeatabilities, they will take precedence when invoked.

* Lasted edited 130701

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

* This group of commands must appear before any others:
# The @ wildcard sets the name of the file to be the same as the gdl file
VEL com_file @.com
 srt_file @.srt
 srt_dir +1
 eq_file ../tables/itrf14.eq
# Optionally add a second eq_file for analysis-specific renames
* End commands that must appear first

* Solution file pointed to by the com file, if used
VEL sol_file @.sol

* ITRF2008 augmented by now-defunct sites and recent IGS solutions;
* matched to itrf08_comb.eq
 apr_file ../tables/itrf14.apr
# Optionally add additional apr files for other sites

* Set maximum chi2, prefit coordinate difference (m), and rotation (mas) for an h-file to be used;
 max_chii 13 3 100
# increase tolerances to include all files for diagnostics
x  max_chi  100  5.0 20000

# Do not used an a priori rotation file with multi-day H-files
  in_pmu ../tables/pmu.usno

* Invoke glorg
 org_cmd glorg_long.cmd
* Print file options
 crt_opt NOPR
 prt_opt NOPR GDLF CMDS BLEN UTM
 org_opt PSUM CMDS GDLF FIXA RNRP BLEN UTM
VEL org_opt ERAS PSUM CMDS GDLF VSUM FIXA RNRP
# Set an explicit name for the glorg print file; otherwise will use the
# globk print file name from the globk command line
 org_out globk_rep.org
VEL org_out globk_vel.org

* Coordinate parameters to be estimated and a priori constraints
 apr_neu  all 10 10 10  0 0 0
VEL apr_neu  all 10 10 10  1 1 1

* Rotation parameters to be estimated and a priori constraints
 apr_wob  10 10 0 0
 apr_utl  10 0
VEL apr_wob  10 10 10 10
VEL apr_utl  10 10
VEL mar_wob    3650 3650  0 0
VEL mar_utl    365 0
# EOP tight if tanslation-only stabilization in glorg (also comment out mar_wob, mar_utl)
x apr_wob .25 .25 .1 .1
x apr utl .25 .1
```

```
# Allow translation and scale variations for pre-1995 data and
# for data analyses that feature a a change in SV PCVs (e.g.
# operational, pre-reprol MIT or SOPAC h-files before Week 1400, Nov 2006)
x apr_tran 1 1 1 0 0 0
xVEL apr_tran 1 1 1 1 1 1
xVEL mar_tran   3.65  3.65  3.65     0  0  0
x apr_scale 10 0
xVEL apr_scale 10 1.
xVEL mar_scale  365   0

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

* Remove scracth files for repeatability runs
  del_scra yes
VEL del_scra no
```

Glorg_long.cmd

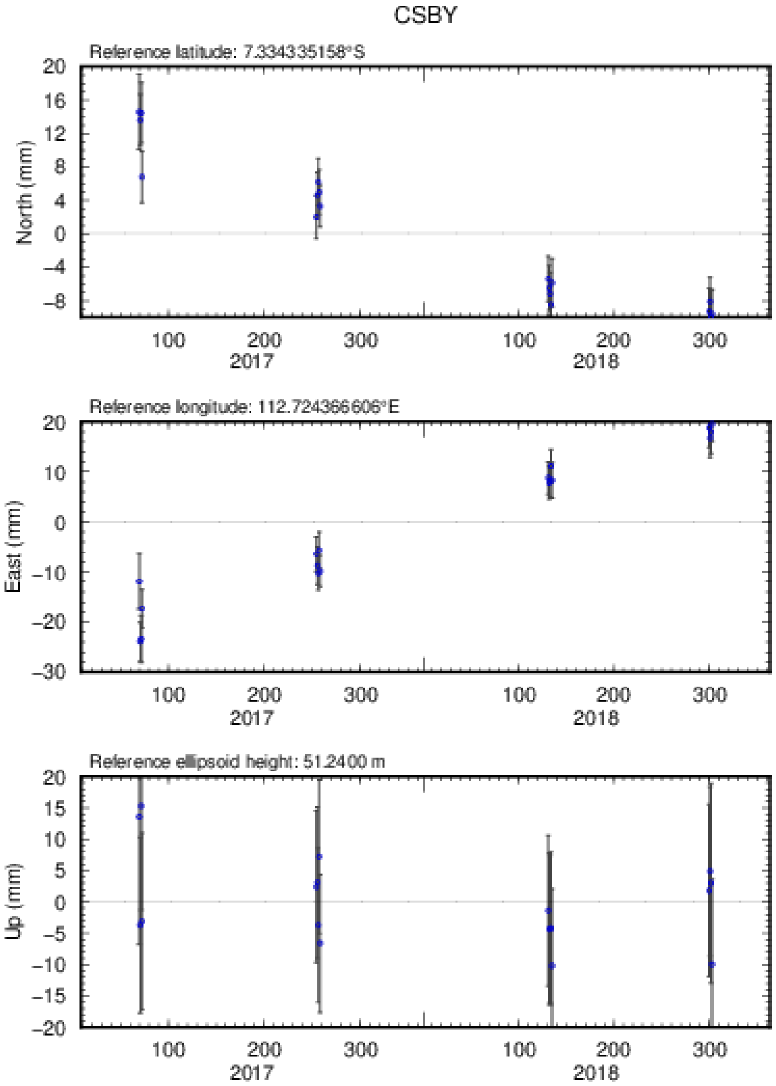
```
* Glorg command file for multi-year time series and velocity solution

* For velocity, set VEL as a globk or glorg command-line option

* Last edited by rwk 130707

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

* Parameters to be estimated
 pos_org  xtran ytran ztran xrot yrot zrot
VEL rate_org  xtran ytran ztran xrot yrot zrot
# Optionally, if estimated scale in GLOBK:
x pos_org xtran ytran ztran xrot yrot zrot scale

#   or if translation-only
x pos_org xtran ytran ztran
xVEL rate_org xtran ytran ztran

* Downweight of height relative to horizontal (default is 10 10)
#   Heavy downweight if reference frame robust and heights suspect
x  cnd_hgt  1000 1000

* Controls for removing sites from the stabilization
#   Vary these to make the stabilization more robust or more precise
 stab_it 4 0.8 3.0
x stab_it 4 0.5 4.0

* A priori coordinates to define the analysis reference frame
 apr_file ../tables/itrf14.apr
# Use a regional stablization if available from a prior solution (comment out the itrf08 file)
x apr_file ../tables/regional.apr
```

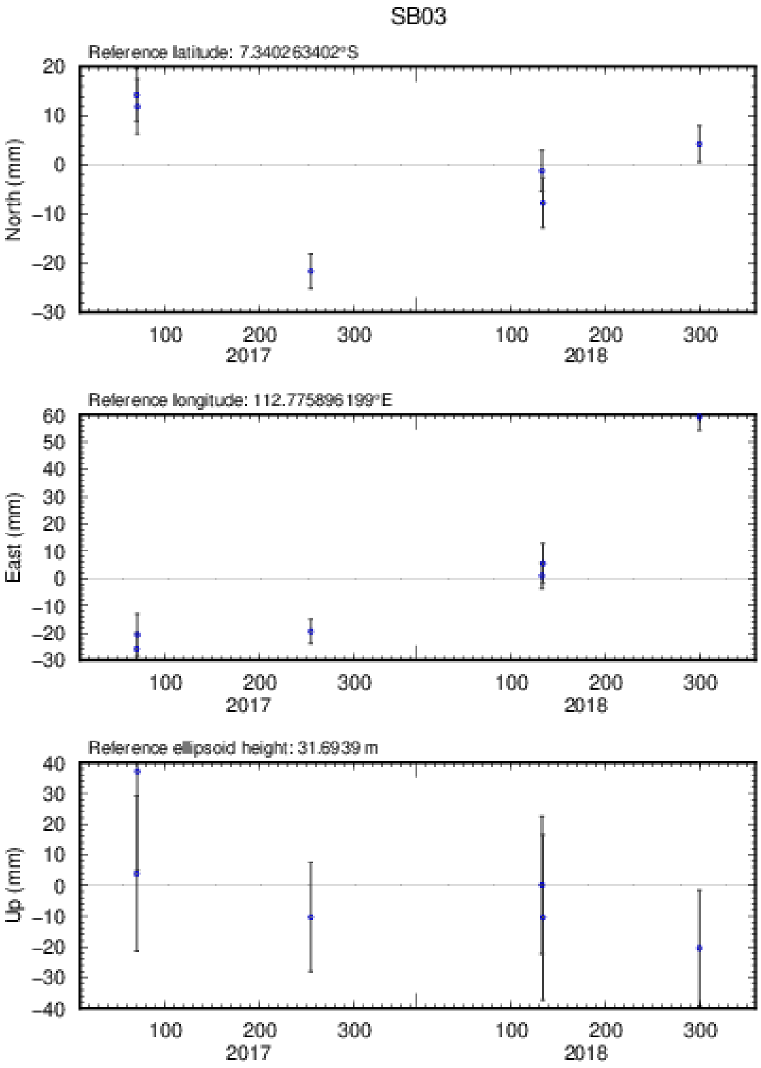
```
* List of stabilization sites
#   This should match the well-determined sites in the apr_file
 stab_site clear
 stab_site +ALIC
 stab_site +COCO
 stab_site +DARW
 stab_site +DGAR
 stab_site +GUAM
 stab_site +GUUG
 stab_site +HYDE
 stab_site +IISC
 stab_site +KIT3
 stab_site +TNML
# Use a regional stabililization if available from a prior solution
x source ../tables/regional_stab_site

* Estimate rotation (Euler) vectors to be used with sh_org2vel to
* to rotate the solution to a block- or region-specific reference frame
xVEL plate eurasia kosg_2ps onsa_2ps nyal_4ps graz_2ps tlse_2ps kit3_2ps
xVEL plate eurasia vill_3ps mars_3ps cbre
xVEL plate weura kosg_2ps tlse_2ps vill_3ps mars_3ps
xVEL plate aegean milo kyra xris dioa leon mkn2 bodr roml omal koun seva
xVEL# Constrain the center-of-mass to the apr-file in plate estimate (comment out for global solutions)
xVEL NOPLATETRAN

* Equate the velocities of co-located sites
VEL eq_dist 1000 ndot
VEL eq_dist 1000 edot
VEL eq_dist 1000 udot

* Equate a few horizontal velocities for sites farther apart
VEL equate trab_gps ndot akto_gps ndot
VEL equate trab_gps edot akto_gps edot
```

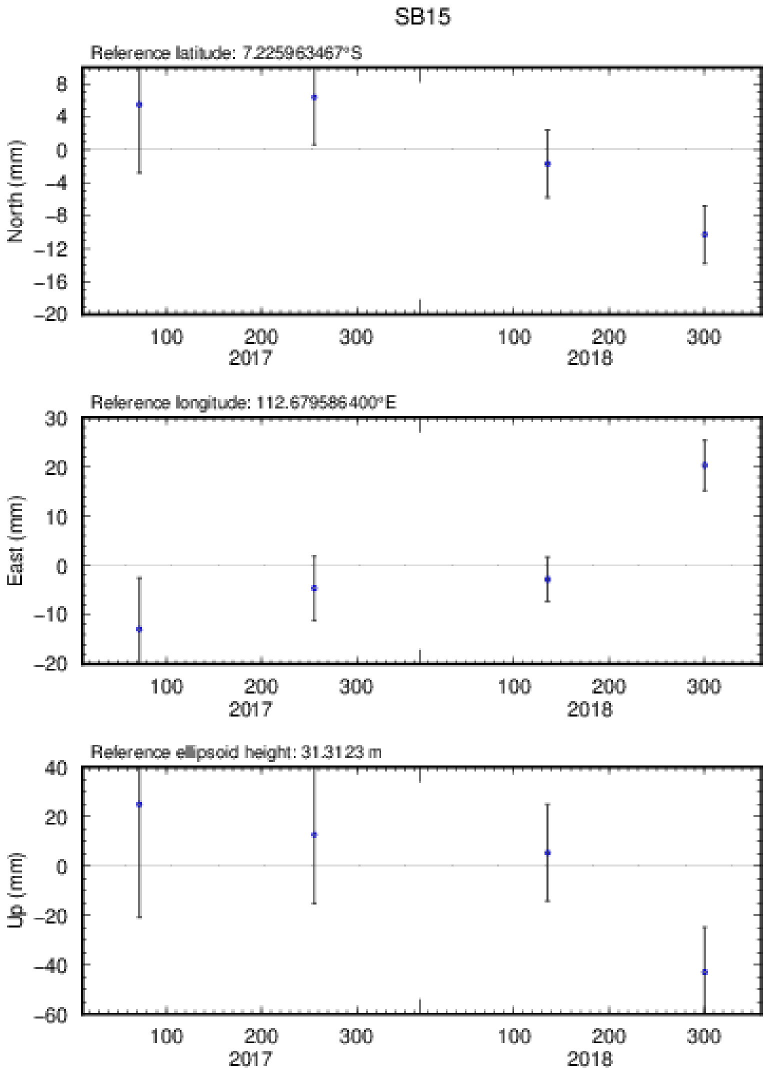

```
* Equate the velocities of co-located sites
VEL eq_dist 1000 ndot
VEL eq_dist 1000 edot
VEL eq_dist 1000 udot

* Equate a few horizontal velocities for sites farther apart
VEL equate trab_gps ndot akto_gps ndot
VEL equate trab_gps edot akto_gps edot
```

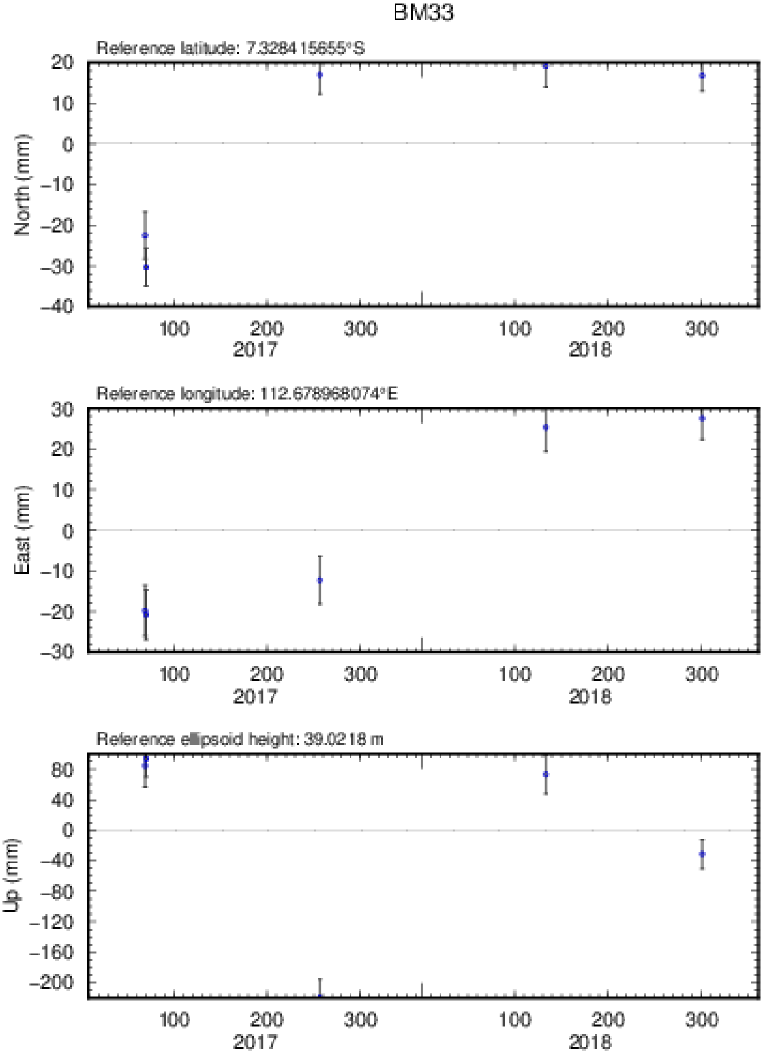

```
* Unequate velocities that are incompatible
VEL unequate mad2_gps ndot
VEL unequate mad2_gps edot
VEL unequate mad2_gps udot
```

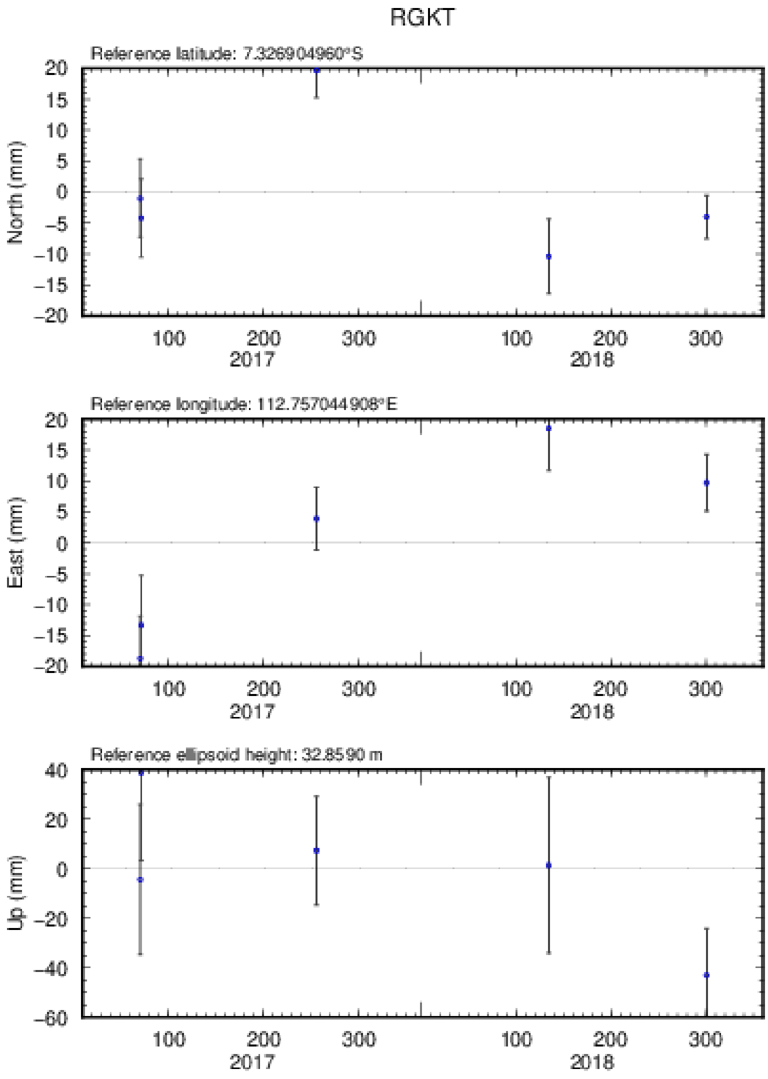
LAMPIRAN 3
TIME SERIES TITIK PENGAMATAN GPS

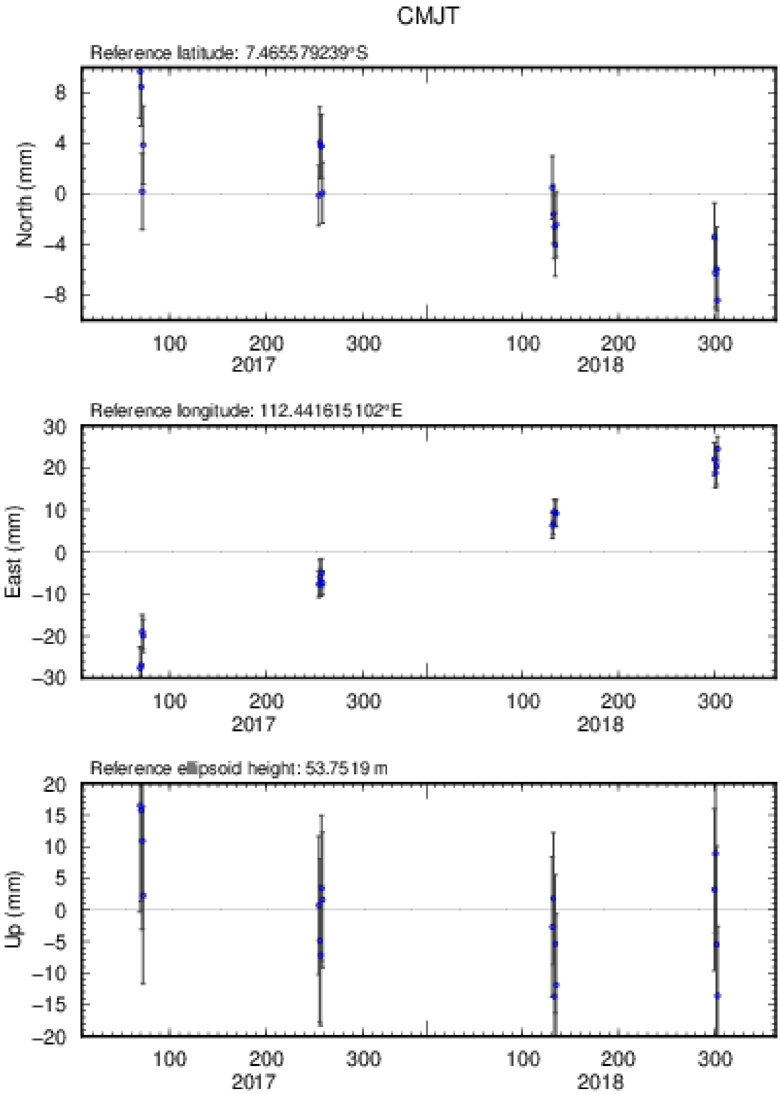



SB03
Reference latitude: 7.340263402°S
North (mm)
Reference longitude: 112.775896199°E
East (mm)
Reference ellipsoid height: 31.6939 m
Up (mm)
100
200
300
2017
2018


SB15
Reference latitude: 7.225963467°S
North (mm)
8
4
0
−4
−8
−12
−16
−20
100
200
300
100
200
300
2017
2018
Reference longitude: 112.679586400°E
East (mm)
30
20
10
0
−10
−20
100
200
300
100
200
300
2017
2018
Reference ellipsoid height: 31.3123 m
Up (mm)
40
20
0
−20
−40
−60
100
200
300
100
200
300
2017
2018


BM33
Reference latitude: 7.328415655°S
North (mm)
20
10
0
−10
−20
−30
−40
100
200
300
100
200
300
2017
2018
Reference longitude: 112.678968074°E
East (mm)
30
20
10
0
−10
−20
−30
100
200
300
100
200
300
2017
2018
Reference ellipsoid height: 39.0218 m
Up (mm)
80
40
0
−40
−80
−120
−160
−200
100
200
300
100
200
300
2017
2018


RGKT
Reference latitude: 7.326904960°S
North (mm)
Reference longitude: 112.757044908°E
East (mm)
Reference ellipsoid height: 32.8590 m
Up (mm)
100
200
300
2017
100
200
300
2018


CMJT
Reference latitude: 7.4655579239°S
North (mm)
8
4
0
−4
−8
100
200
300
100
200
300
2017
2018
Reference longitude: 112.441615102°E
East (mm)
30
20
10
0
−10
−20
−30
Reference ellipsoid height: 53.7519 m
Up (mm)
20
15
10
5
0
−5
−10
−15
−20

LAMPIRAN 4
SCRIPT PERHITUNGAN REGANGAN

```
clc
clear
filename='23.txt';
A=importdata(filename);

X=[A(:,1:2)]
n=[A(:,5:6)]
v=[A(:,3:4)]
% calculate mean x and y positions
meanX = 1/3 * (sum(X(:,1)));
meanY = 1/3 * (sum(X(:,2)));

% remove mean position to create local coordinate
X=[X(:,1)-meanX, X(:,2)-meanY];

% create diagonal covariance matrix (assuming all errors independent)
w =[1/((n(1,1)/1000)^2) 1/((n(1,2)/1000)^2)
1/((n(2,1)/1000)^2) 1/((n(2,2)/1000)^2)
1/((n(3,1)/1000)^2) 1/((n(3,2)/1000)^2)]
covd=diag(w)

% get velocity data and reformat into column vector d
d = v'; % velocities by row then column
d = d(:)/1000; % make column vector
% set up coefficient matrix
G = [1, 0, -X(1,2), X(1,1), X(1,2), 0;...
     0, 1, X(1,1), 0, X(1,1), X(1,2);...
     1, 0, -X(2,2), X(2,1), X(2,2), 0;...
     0, 1, X(2,1), 0, X(2,1), X(2,2);...
     1, 0, -X(3,2), X(3,1), X(3,2), 0;...
     0, 1, X(3,1), 0, X(3,1), X(3,2)]
 % solve for model parameters (tx, ty, w, exx, exy, eyy)
 m=G\d
 % assemble strain tensor
 E=[m(4) m(5); m(5) m(6)]

 % find principal strains and axes
 [paxes, pvals]=eig(E)
 prin=[pvals(1), paxes(:,1)', pvals(4),
 paxes(:,2)']

% estimate model error
covm=inv(G'*covd*G);

% extract diagonal elements and take square root to estimate error in model
% parameters
msigs=diag(covm,0).^(0.5)
```

BIODATA PENULIS

Andika Mauradhia lahir di Surakarta pada tanggal 13 Desember 1996 dan merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Indro Prihatmoko dan Yamti Rakhmani. Pendidikan formal yang ditempuh penulis antara lain SD Al-Azhar Syifa Budi Solo, SMP Al-Azhar Syifa Budi Solo, dan SMA Negeri 3 Surakarta. Tahun 2015, penulis yang biasa dipanggil Kaka ini diterima di Program Studi Teknik Geomatika FTSLK-ITS. Selama menjalani perkuliahan, penulis cukup aktif di organisasi. Penulis pernah menjadi staf (2016/2017) dan Kepala Departemen Sosial Masyarakat Himpunan Mahasiswa Geomatika ITS (2017/2018), anggota Divisi Bakti Alam Bakti Masyarakat Pencinta Lingkungan Hidup SIKLUS-ITS (2016/2017), serta anggota Departemen Jaringan (2016/2017) dan Badan Pelayanan Umat Jamaah Masjid Manarul Ilmi ITS (2017/2018). Penulis juga pernah melaksanakan Program Kreativitas Mahasiswa dan terdanai Dikti dengan judul karya tulis "Pembuatan Model Geoid Kota Surabaya dengan Mengkombinasikan Pengukuran Gravimeter dan GPS". Penulis juga aktif dalam beberapa proyek atau penelitian seperti pengamataan deformasi Kota Surabaya secara berkala, pengamatan deformasi di wilayah longsor Gubeng yang terjadi di Kota Surabaya, dan pengukuran volume pasir untuk pembangunan penampungan air di Kota Mojokerto. Penulis mengambil penelitian tugas akhir di bidang Geodinamika dengan judul "Analisis Deformasi dan Potensi Gempa di Kota Surabaya menggunakan Data GPS".