

KARAKTERISTIK DEFORMASI GUNUNG MURIA PERIODE 2010-2014

Ari Nugroho¹⁾ dan Irwan Gumilar²⁾

¹⁾ Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN) - BATAN
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710
Telp./Fax: (021)5204243, E-mail: ari_nugroho@batan.go.id

²⁾ Fakultas Geodesi Institut Teknologi Bandung
Gedung LabTek IX C Lantai 4, E-mail: igumilar78@gmail.com

Diterima	Diterima dalam bentuk revisi	Disetujui
10 September 2015	17 Nopember 2015	30 Nopember 2015

ABSTRAK

KARAKTERISTIK DEFORMASI GUNUNG MURIA PERIODE 2010-2014. Kegiatan pemantauan deformasi di Gunung Muria direkomendasikan oleh IAEA untuk dilakukan selama lima tahun. Tujuan dari kegiatan ini untuk mengetahui deformasi tanah di sekitar Muria yang terdiri dari pergeseran regional maupun lokal serta nilai regangan tanah, data ini bermanfaat untuk mendukung aspek keamanan dan keandalan calon tapak dalam rencana pembangunan PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) di Semenanjung Muria, Jawa Tengah. Sejak tahun 2010 sampai dengan 2014 telah dilakukan pemantauan pada 5 lokasi BM (Benchmark), yaitu di Mijen, Rahtawu, Perdopo, Cranggang, dan Ketek Putih. Pemantauan dilakukan dengan metode survei GPS secara periodik bekerjasama dengan Fakultas Teknik Jurusan Geodesi ITB. Hasil analisis menggunakan software GAMIT 10.4 dapat disimpulkan bahwa sampai dengan tahun 2014 terjadi pergeseran regional di sekitar Muria yang didominasi oleh pergerakan lempeng (rotasi blok Sunda) dengan kecepatan 2,2 cm/tahun. Pergeseran lokal terjadi di 5 lokasi BM dengan kecepatan 2-3 mm/tahun. Perhitungan regangan diperoleh nilai sebesar 2×10^{-2} microstrain/tahun terjadi di wilayah Utara Muria, nilai tersebut lebih tinggi dari nilai regangan yg konsisten (5×10^{-8} microstrain/tahun), artinya ada indikasi gerakan tanah.

Kata Kunci : deformasi, global positioning system, metode diferensial.

ABSTRACT

THE CHARACTERIZATION OF MURIA MOUNTAIN DEFORMATION IN THE PERIOD OF 2010-2104. Deformation monitoring activity for Muria Mountain is recommended by the IAEA to be carried out in five years. The goal of this activity is to identify the soil deformation and strain surrounding Muria regionally and locally, this data is beneficial to support safety and reliability aspect of candidate site for constructing the Nuclear Power Plant in Muria Peninsula. Since the year of 2010 to 2014 the deformation monitoring had been applied in five benchmarks which are Mijen, Rahtawu, Perdopo, Cranggang, and Ketek Putih. The monitoring has been done successfully in collaboration with the faculty of Geodesy ITB. Based on the analysis by using GAMIT 10.4 it can be concluded that until the year of 2014 the regional deformation surrounding the Muria is dominated by plate movement namely Sunda block which has the acceleration as fast as 2.2 cm/year. The local deformation at the 5 Benchmark indicates the presence of deformation as fast as 2-3 mm/year. The strain measurement demonstrates the presence of the strain rate at Northern Muria as big as 2×10^{-2} microstrain/year, which is higher than the number of consistent strain (5×10^{-8} microstrain/year), this mean there is an indication of deformation.

Keywords: deformation, global positioning system, differensial method.

1. PENDAHULUAN

Salah satu kegiatan yang dilakukan dalam aspek keselamatan calon tapak PLTN adalah kajian aktivitas vulkanik Gunung Api. Kegiatan ini mengacu pada kriteria keselamatan yang ditetapkan oleh IAEA (*International Atomic energy Agency*), dalam dokumen "*Review of Status of Site Evaluation Studies at Muria Peninsula NPP Site*" Tahun 2006, yang menyebutkan bahwa perlu dilakukan pemantauan deformasi untuk mengetahui aktifitas vulkanik di wilayah Gunung Muria selama lima tahun dengan menggunakan metode survei GPS (*Global Positioning System*)^[1].

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan adanya nilai deformasi lokal yang telah dimonitor selama periode 2010-2014 sehingga diperoleh informasi terkini tentang status aktifitas Gunung Muria, yang selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan untuk menganalisis bahaya Gunung Muria terhadap calon tapak PLTN.

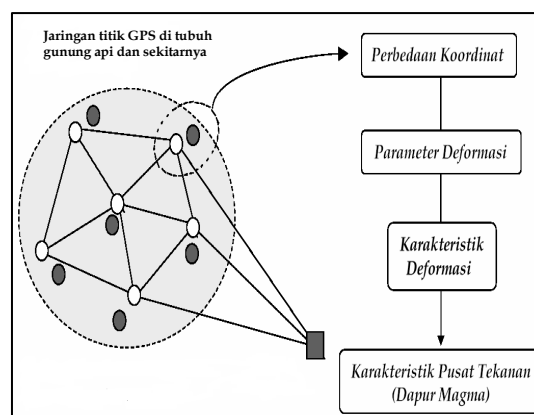
2. METODOLOGI

2.1. Deformasi

Deformasi didefinisikan sebagai perubahan bentuk, posisi dan dimensi dari suatu materi atau perubahan kedudukan (pergerakan) suatu materi atau benda baik secara absolut maupun relatif dalam suatu kerangka referensi tertentu akibat suatu gaya yang bekerja pada materi tersebut. Ada dua sifat deformasi, sifat elastik, yaitu apabila suatu materi yang mengalami deformasi akan kembali ke bentuk semula setelah gaya deformasinya tidak bekerja lagi pada materi tersebut dan sifat plastik, yaitu suatu materi yang mengalami deformasi tidak akan kembali ke bentuk semula setelah terdeformasi karena efek-efek yang terjadi menempel pada materi tersebut^[2].

2.2. Metode Penelitian

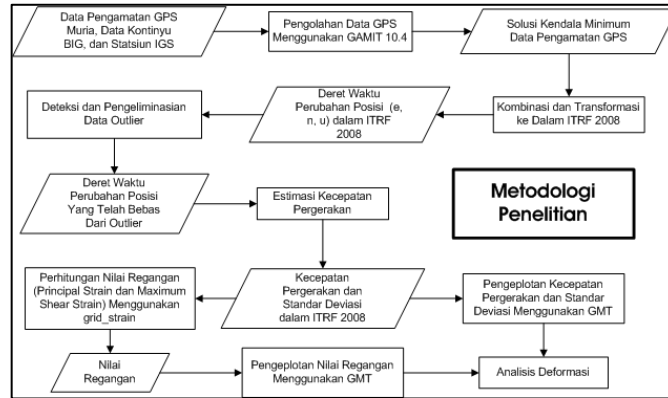
Prinsip dari metode pemantauan aktivitas gunung berapi dengan metode Survei GPS yaitu pemantauan terhadap perubahan koordinat dari beberapa titik yang mewakili gunung tersebut secara periodik. Pada metode ini, beberapa alat penerima sinyal (*receiver*) GPS ditempatkan pada beberapa titik pantau yang ditempatkan pada punggung dan puncak gunung yang akan dipantau, serta pada suatu stasiun referensi yang dianggap sebagai titik stabil. Koordinat dari titik-titik pantau tersebut kemudian ditentukan secara teliti dengan GPS, relatif terhadap stasiun referensi, dengan menggunakan metode penentuan posisi diferensial menggunakan data pengamatan fase^[3].



Gambar 1. Pemantauan Deformasi Gunungapi Secara Episodik Dengan Metode Survei GPS

Selanjutnya dengan mempelajari perubahan koordinat titik-titik pantau tersebut, baik terhadap stasion referensi maupun di antara sesama titik pantau secara periodik, maka karakteristik deformasi dan magmatik gunung berapi yang bersangkutan dapat dipelajari dan dianalisis, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.

Alir metodologi yang digunakan di dalam penelitian ini seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Metodologi

Data pengamatan GPS Muria, beberapa data GPS kontinyu yang berada di sekitarnya, dan data stasiun IGS (*International Global Navigation Satellite System Service*), diolah bersama dengan menggunakan pengolah data GPS GAMIT 10.4. Selanjutnya pada tahap pertama pengolahan data GPS dengan GAMIT 10.4 diperoleh solusi kendala minimum harian untuk semua posisi BM. Proses pendeteksian dan pengeliminasian data *outlier* dibutuhkan agar deret waktu perubahan posisi terbebas dari *outlier* sehingga hasil dari pengestimasi kecepatan pergerakan lebih realistis. Kemudian dari hasil vektor kecepatan pergerakan ini digunakan untuk menghitung nilai regangan wilayah muria. Dari kedua informasi ini (vektor kecepatan pergerakan dan nilai regangan) dapat dianalisis pola deformasi yang ada^[4].

2.3. Teknologi *Global Positioning System* (GPS)

GPS adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang dimiliki dan dikelola oleh Amerika Serikat. Sistem ini didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga-dimensi serta informasi mengenai waktu, secara kontinyu di seluruh dunia tanpa bergantung waktu dan cuaca. Prinsip penentuan posisi dengan GPS menggunakan metode reseksi jarak, yaitu pengukuran jarak dilakukan secara simultan ke beberapa satelit yang telah diketahui koordinatnya^[5].

Metode penentuan posisi dengan GPS terbagi dua, yaitu metode absolut, dan diferensial. Masing-masing metode kemudian dapat dilakukan dengan cara *real time* dan atau *post-processing*. Apabila obyek yang ditentukan posisinya diam, maka metodenya disebut statik. Sebaliknya apabila obyek yang ditentukan posisinya bergerak, maka metodenya disebut kinematik. Ada 3 macam tipe alat GPS, dengan masing-masing memberikan tingkat ketelitian (posisi) yang berbeda-beda. Tipe alat GPS pertama adalah tipe navigasi (*Handheld, Handy GPS*) dengan ketelitian mencapai 3 sampai 6 meter. Tipe alat yang kedua adalah tipe geodetik single frekuensi (tipe pemetaan), yang biasa digunakan dalam survei dan pemetaan dengan ketelitian posisi sekitar sentimeter sampai dengan beberapa desimeter. Tipe terakhir adalah tipe Geodetik dual frekuensi dengan ketelitian hingga mencapai milimeter.

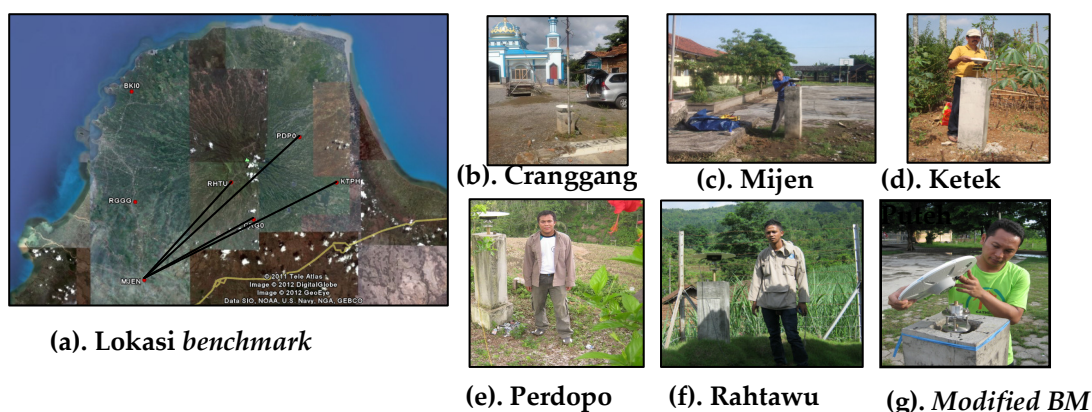
Ketelitian posisi yang diperoleh akan tergantung pada beberapa faktor yaitu metode penentuan posisi, geometri satelit, tingkat ketelitian data, dan metode pengolahan datanya. GPS memancarkan dua sinyal yaitu frekuensi L1 (1575.42 MHz) dan L2 (1227.60 MHz). Ketika sinyal melalui lapisan atmosfer, maka sinyal tersebut akan terganggu oleh konten dari atmosfer tersebut.

Besarnya gangguan disebut bias, apabila bias diabaikan maka dapat memberikan kesalahan posisi sampai dengan orde meter. Kesalahan-kesalahan tersebut contohnya kesalahan orbit satelit, kesalahan jam satelit, kesalahan jam receiver, kesalahan pusat fase antenna, dan *multipath*. Hal-hal lainnya juga ada yang mengiringi kesalahan sistem seperti efek *imaging*, dan *noise*^[6].

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Lingkup dan Jadwal Pekerjaan Lapangan

Lingkup dari pekerjaan lapangan diantaranya pengukuran GPS di 5 *benchmark* (BM) yang menyebar di wilayah Gunung Muria. Gambar 3 (a) menunjukkan sebaran BM yang telah diukur menggunakan GPS.



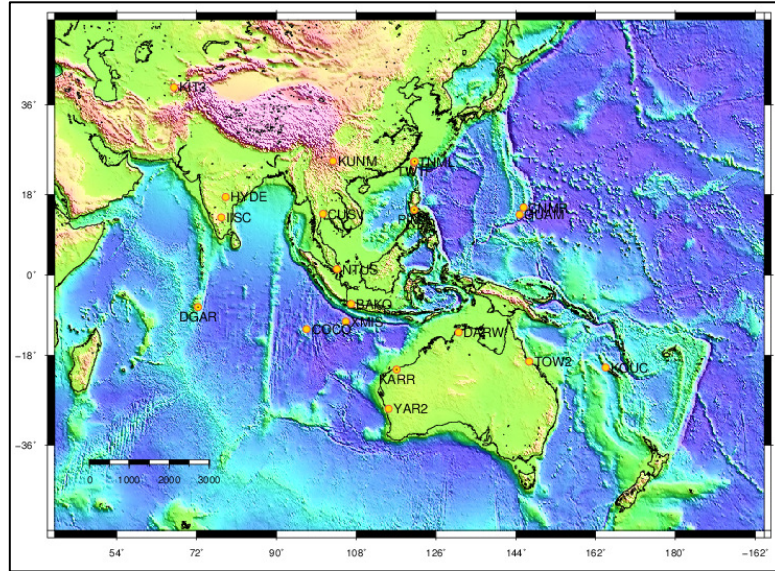
Gambar 3. *Benchmark* (BM)

Masing-masing BM sudah dilengkapi dengan *modified tribrach*^[7], sehingga dapat mengurangi kesalahan akibat *centring* (Gambar 3 (g)).

Survei GPS dilakukan dengan menggunakan *receiver* GPS tipe geodetik dua frekuensi dengan lama pengamatan secara umum sekitar 12 jam di tiap BM atau stasiun pengamatan. Masing-masing BM diukur selama 2 hari untuk melihat konsistensi hasil pengukuran. Survei telah dilakukan selama 5 kali, yaitu pada Bulan Mei dan Desember 2010 bersama dengan *vendor* dari *Trimble*, sedangkan Bulan November 2011, Januari 2013, September 2013 dan Desember 2014 dengan Institut Teknologi Bandung^[8].

Proses pelaksanaan suatu survei GPS secara umum akan meliputi beberapa tahapan yaitu: perencanaan dan persiapan, pengamatan (pengumpulan data), pengolahan data, dan pelaporan. Patut ditekankan disini bahwa tingkat kesuksesan pelaksanaan suatu survei GPS akan sangat tergantung dengan tingkat kesuksesan pelaksanaan setiap tahapan pekerjaannya. Di antara tahapan-tahapan tersebut, tahap perencanaan dan persiapan adalah suatu tahap yang sangat menentukan, karena kualitasnya akan sangat menentukan kualitas dari tahap-tahap selanjutnya. Oleh sebab itu tahapan awal ini perlu dilakukan secara baik, sistematis, dan menyeluruh^[9].

3.2. Pengolahan Data Dan Hasil



Gambar 4. Jumlah Dan Sebaran Stasiun IGS

Secara geodetik, berdasarkan penelitian sebelumnya dihasilkan lempeng-lempeng utama dan blok di sekitar wilayah penelitian. Hasil tersebut tidak dapat didefinisikan sebagai zona yang bersifat diam atau stabil. Setiap lempeng atau blok memiliki kecepatan pergerakan *a priori* tertentu yang konsisten setiap tahunnya^[10]. Tidak adanya zona yang stabil ini menyebabkan tidak memungkinkannya diletakkan suatu stasiun pengamatan GPS pada suatu zona yang stabil sebagai titik ikat bagi stasiun GPS yang lainnya. Dengan alasan ini, strategi pengolahan GPS tipe radial tidak dapat diterapkan pada kasus penelitian ini. Strategi pengolahan yang tepat yang dapat diterapkan dalam penelitian ini adalah strategi pengolahan GPS tipe jaring. Strategi tipe jaring melibatkan stasiun-stasiun pengamatan GPS regional dan global ke dalam jaring pengamatan GPS. Secara praktis, stasiun-stasiun pengamatan GPS ini adalah stasiun GPS pada jaring IGS. Jumlah dan sebaran stasiun IGS yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.

Sebanyak 19 stasiun IGS di sekitar wilayah Indonesia digunakan untuk memperkuat jaring pengamatan GPS. Data stasiun IGS yang dipilih adalah berdasarkan kriteria bahwa stasiun IGS merepresentasikan zona yang belum terwakili oleh stasiun pengamatan GPS pada objek penelitian (setiap lempeng atau blok yang berada di sekitar obyek penelitian terwakili oleh minimum 2 stasiun IGS), Stasiun IGS dapat memperkuat jaring pengamatan GPS yang telah ada dan deret waktu stasiun IGS memiliki *repeatibilitas* yang baik^[11].

3.3. Data Pengamatan GPS Yang Digunakan

Data pengamatan GPS yang digunakan di dalam penelitian ini merupakan data pengamatan GPS episodik tahun 2010 hingga 2014. Secara rinci, data pengamatan GPS ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Durasi Pengamatan Stasiun GPS Muria Tahun 2010-2014

Kode Stasiun GPS *	Waktu Mulai	Waktu Berakhir	Durasi Pengamatan GPS (jam)	Pengamatan ke:
MJEN	3:31:45	11:46:45	8:15:00	Pengamatan ke 1 tahun 2010
	4:39:45	7:15:00	2:35:15	Pengamatan ke 2 tahun 2010
	5:43:00	8:15:00	2:32:00	Pengamatan ke 3 tahun 2010
	3:24:00	14:44:00	11:20:00	Pengamatan ke 1 tahun 2011
	0:17:30	11:31:30	11:14:00	Pengamatan ke 2 tahun 2011
	2:43:15	14:43:15	12:00:00	Pengamatan ke 1 tahun 2013
	0:57:15	14:00:15	13:03:00	Pengamatan ke 2 tahun 2013
	0:57:00	13:57:30	13:00:30	Pengamatan ke 3 tahun 2013
	3:55:00	14:19:30	10:24:30	Pengamatan ke 4 tahun 2013
	0:0:00	14:19:15	14:19:15	Pengamatan ke 1 tahun 2014
	0:0:00	14:16:15	14:16:19	Pengamatan ke 2 tahun 2014
CRGO	7:32:45	10:03:15	2:30:30	Pengamatan ke 1 tahun 2010
	6:21:45	9:08:15	2:46:30	Pengamatan ke 2 tahun 2010
	2:03:15	4:14:30	2:11:15	Pengamatan ke 3 tahun 2010
	5:45:00	8:14:45	2:29:45	Pengamatan ke 4 tahun 2010
	4:03:30	14:30:30	10:27:00	Pengamatan ke 1 tahun 2011
	0:46:00	11:57:45	11:11:45	Pengamatan ke 2 tahun 2011
	1:39:30	13:02:00	11:22:30	Pengamatan ke 1 tahun 2013
	1:06:45	14:17:15	13:10:30	Pengamatan ke 2 tahun 2013
	1:28:15	13:39:30	12:11:15	Pengamatan ke 1 tahun 2014
	0:14:45	12:27:15	12:12:30	Pengamatan ke 2 tahun 2014
KTPH	2:02:00	4:38:45	2:36:45	Pengamatan ke 1 tahun 2010
	7:28:15	10:10:15	2:42:00	Pengamatan ke 2 tahun 2010
	2:02:45	4:37:45	2:35:00	Pengamatan ke 3 tahun 2010
	4:14:00	14:42:00	10:28:00	Pengamatan ke 1 tahun 2011
	0:30:30	11:33:00	11:02:30	Pengamatan ke 2 tahun 2011
	1:58:15	14:12:15	12:14:00	Pengamatan ke 1 tahun 2013
	1:00:30	14:08:45	13:08:15	Pengamatan ke 2 tahun 2013
	1:49:00	13:17:15	11:28:15	Pengamatan ke 3 tahun 2013
	0:56:30	14:26:00	13:29:30	Pengamatan ke 4 tahun 2013
	1:19:00	13:31:45	12:12:45	Pengamatan ke 1 tahun 2014
	0:54:15	13:16:30	12:22:15	Pengamatan ke 1 tahun 2014
PDPO	1:53:15	4:55:30	3:02:15	Pengamatan ke 1 tahun 2010
	8:00:45	11:01:15	3:00:30	Pengamatan ke 2 tahun 2010
	6:03:30	9:05:30	3:02:00	Pengamatan ke 3 tahun 2010
	2:06:45	4:42:45	2:36:00	Pengamatan ke 4 tahun 2010
	2:50:00	13:01:15	10:11:15	Pengamatan ke 1 tahun 2011
	1:20:00	13:03:00	11:43:00	Pengamatan ke 1 tahun 2013
	0:31:30	14:16:30	13:45:00	Pengamatan ke 2 tahun 2013
	0:59:00	13:03:30	12:04:30	Pengamatan ke 1 tahun 2014
	2:32:30	13:03:30	10:31:00	Pengamatan ke 2 tahun 2014
RHTU	6:38:00	9:40:00	3:02:00	Pengamatan ke 1 tahun 2010
	2:04:00	5:05:00	3:01:00	Pengamatan ke 2 tahun 2010
	3:06:00	6:01:15	2:55:15	Pengamatan ke 3 tahun 2010

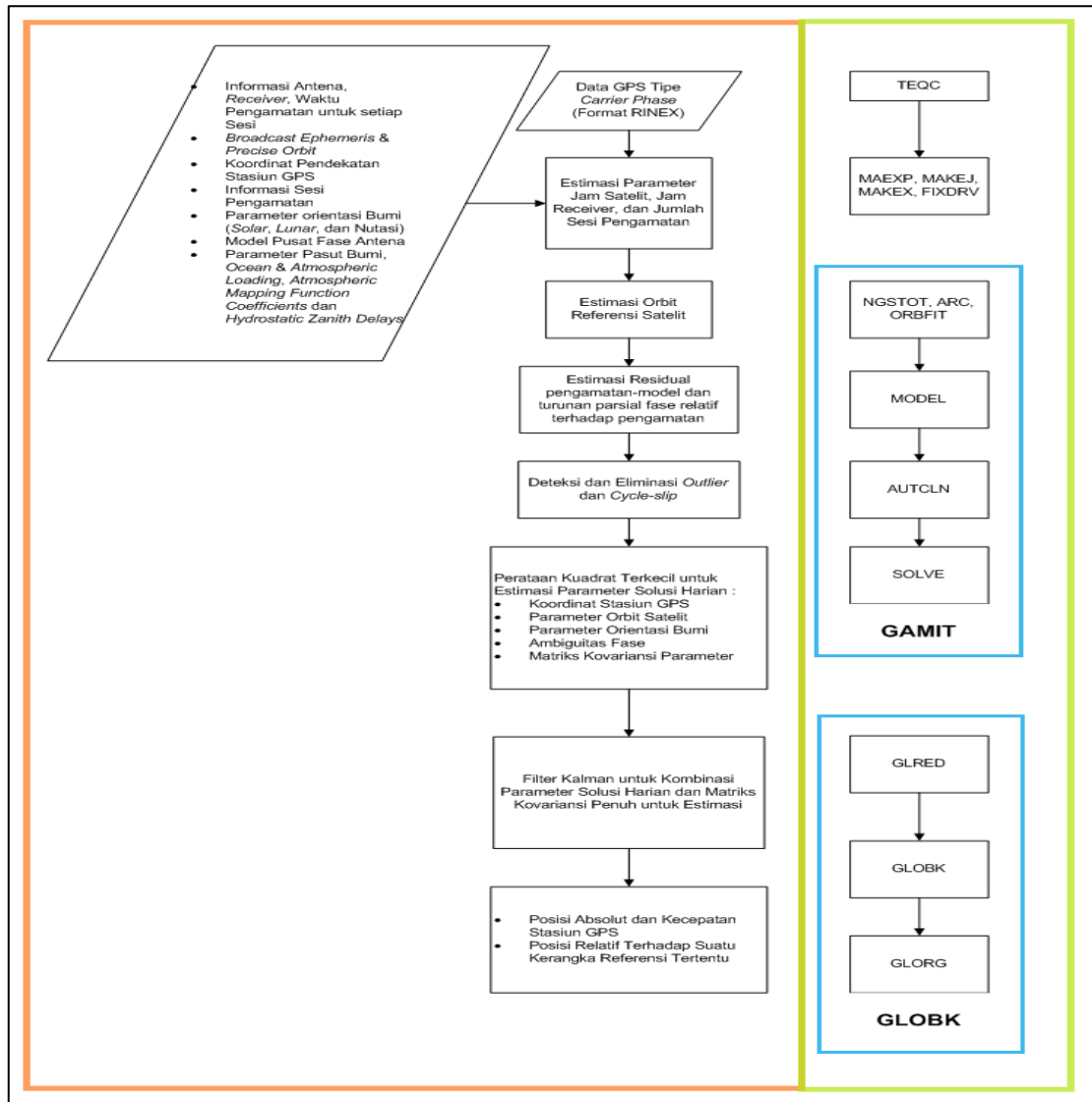
Kode Stasiun GPS *	Waktu Mulai	Waktu Berakhir	Durasi Pengamatan GPS (jam)	Pengamatan ke:
	2:05:15	4:43:30	2:38:15	Pengamatan ke 4 tahun 2010
	6:23:00	9:08:30	2:45:30	Pengamatan ke 5 tahun 2010
	3:59:00	14:59:00	11:00:00	Pengamatan ke 1 tahun 2011
	1:36:00	14:11:15	12:35:15	Pengamatan ke 1 tahun 2013
	1:46:15	14:00:00	12:13:45	Pengamatan ke 2 tahun 2013
	1:48:00	13:48:00	12:00:00	Pengamatan ke 3 tahun 2013
	0:53:30	14:11:30	13:18:00	Pengamatan ke 4 tahun 2013
	1:15:00	13:18:30	12:03:30	Pengamatan ke 1 tahun 2014
	0:06:30	12:13:30	12:07:00	Pengamatan ke 2 tahun 2014

* Keterangan MJEN, CRGO, KTPH, PDPO RHTW merupakan singkatan dari nama stasiun pengamatan, masing-masing yaitu Mijen, Cranggang, Ketekputeh, Perdopo dan Rahtawu.

3.4. Pengolahan Data GPS

Pengolahan data GPS hasil pengamatan GPS episodik dari tahun 2010 hingga 2014 menggunakan perangkat pengolah data GPS yang bernama GAMIT 10.4. Secara garis besar, parameter solusi yang merupakan hasil pengolahan GAMIT ini di antaranya parameter koordinat stasiun GPS dan matriks kovariansi, algoritma pengestimasi parameter-parameter yang ada di dalam pengolahan data pengamatan GPS ditunjukkan pada Gambar 5. Koordinat stasiun GPS diestimasi di dalam sistem koordinat kartesian dengan dua buah solusi yaitu solusi terkendala dan solusi tanpa kendala. Solusi terkendala digunakan sebagai kontrol kualitas sedangkan solusi tanpa kendala digunakan untuk mengeliminasi bias^[2].

Hasil utama dari pengolahan data GPS dengan menggunakan GAMIT adalah solusi kendala minimum estimasi parameter dan matriks kovariansinya yang kemudian data dikombinasikan dalam GLOBK untuk mengestimasi posisi stasiun GPS dan kecepatannya serta parameter rotasi bumi dan orbit. Setidaknya terdapat beberapa data yang harus disiapkan pada tahap awal pemrosesan data meliputi koordinat stasiun (*L-file*), *broadcast ephemeris* (RINEX *navigation file*) untuk satelit yang diamati, data pengamatan *pseudo-range* dan fase, serta informasi pendukung lainnya seperti data meteorologi, tinggi antena, dan skenario penjejukan. Apabila menggunakan opsi parameter *orbit-fixed* maka diperlukan juga data *precise ephemeris* (*sp3-file*).



Gambar 5. Estimasi Parameter Pemodelan dan Parameter Solusi dari Data Pengamatan GPS

Pada tahap awal pemrosesan data GPS dalam GAMIT, koordinat stasiun GPS diestimasi sebagai solusi kendala minimum harian (*h-file*). Solusi dari koordinat stasiun GPS ini tidak didefinisikan dengan baik dalam suatu kerangka referensi. Tetapi, panjang *baseline* ditentukan secara presisi dalam solusi kendala minimum sehingga jaring GPS dapat dirotasikan dan ditranslasikan sebagai obyek *rigid*. Solusi harian dari data pengamatan GPS dapat diperoleh dengan menerapkan strategi-strategi pengolahan yang efektif.

Di dalam pengolahan data GPS dengan GAMIT, terdapat tiga parameter yang dapat diestimasi yaitu koordinat satelit, koordinat stasiun pengamatan GPS, dan parameter orientasi bumi. Dalam penelitian ini digunakan strategi *baseline* yaitu informasi orbit dinyatakan *fix*. Informasi orbit ini terdiri dari parameter orbit dan parameter orientasi bumi. Maka dalam hal ini kendala minimum hanya diterapkan pada parameter koordinat stasiun pengamatan GPS. Kendala yang diberikan untuk perubahan koordinat pada komponen *north*, *east*, dan *up* sebesar 10 m dan untuk kecepatan sebesar 1 m/tahun^[13].

Solusi harian koordinat stasiun pengamatan dihitung dengan menggunakan metode perataan kuadrat terkecil dengan pembobotan berdasarkan data pengamatan *double*

differenced dan kombinasi linier bebas ionosfer dari pengamatan fase L1 dan L2. Parameter yang diestimasi untuk solusi harian adalah koordinat stasiun GPS dalam sistem koordinat geosentrik (X,Y,Z) dan ambiguitas fase. Perintah AUTCLN digunakan dalam solusi residual *postfit* untuk mengkoreksi *cycle slip* dan mendeteksi *outlier* untuk setiap interval 30 detik pengamatan (setiap 2 menit untuk solusi akhir). Solusi ambiguitas fase diperoleh dengan menggunakan kendala ionosfer dan data *pseudorange*. Pada Tabel 2 dapat digambarkan ringkasan strategi analisis pemrosesan data GPS dalam GAMIT :

Tabel 2. Ringkasan Strategi Pengolahan Data GPS Menggunakan GAMIT 10

	<i>Experiment</i>	<i>Baseline</i>
Measurement Models	<i>Basic Observable</i>	<i>Double differenced carrier phase, elevation cut off 10°, sampling rate 30 detik, dan pembobotan stasiun dengan model elevasi</i>
	<i>Modeled observable</i>	<i>Ambiguity-free dan ambiguity-fixed solutions with LC (using ionospheric constraints)</i>
	<i>Ground antenna phase center calibration</i>	Model IGS05_1421.ATX
	<i>Troposphere a priori model</i>	<i>Zenith delay per 2 jam dan Global Mapping Function (GMF)</i>
	<i>Ionosphere</i>	Tidak dimodelkan
	<i>Tidal displacement</i>	<i>Ocean loading (FES2004), Pole tide dan Solid Earth tidal (IERS 2003)</i>
	<i>Earth orientation variations</i>	<i>Fix</i>
	<i>GPS attitude model</i>	<i>Yaw attitude model</i>
	Orbit Models	<i>Orbit estimation</i>
<i>Solar radiation pressure</i>		<i>Direct radiation : Berne Model (IERS 1992)</i>
Estimated parameters	<i>Stasiun coordinates</i>	Strategi jaring bebas (tidak ada stasiun yang di-fix)
	<i>Receiver clock</i>	Dimodelkan dengan hitung perataan "cubic"
	<i>Troposphere</i>	<i>Zenith delay per-stasiun diestimasi per 2 jam, aplikasi model Saastamoinen (1972) untuk nilai a priori model hydrostatic dan wet, model estimasi : piece-wise linier (standar deviasi a priori adalah 50 cm)</i>

Untuk mendapatkan perubahan posisi dari setiap stasiun pengamatan GPS, dilakukan transformasi solusi kendala minimum ke dalam suatu kerangka referensi yang konsisten yaitu ITRF 2008. Kerangka referensi mendefinisikan acuan, skala, dan orientasi dari koordinat geodetik. Kerangka referensi dari solusi harian sebelum ditransformasi adalah kerangka orbit dari epok pengamatan yang dipilih sebagai referensi.

3.5. Hasil Pengolahan Data GPS

Hasil pengolahan data GPS untuk setiap stasiun pengamatan GPS dari tahun 2010 hingga 2014, masing-masing diberikan di dalam koordinat kartesian tiga dimensi, koordinat geodetik, dan koordinat toposentrik beserta standar deviasinya (Tabel 3, 4, 5).

Tabel 3. Koordinat Kartesian 3D Stasiun Pengamatan GPS Hasil GAMIT 10.4 Dalam ITRF 2008

Solusi GAMIT Dalam Sistem Koordinat Kartesian 3D Datum WGS 84 ITRF 2008									
Nama	Tahun	Bulan	Hari	X (m)	Y (m)	Z (m)	sd.X (m)	sd.Y (m)	sd.Z (m)
RHTU	2010	3	5	-2256711.136	5920465.440	-734042.926	0.01453	0.03182	0.00878
RHTU	2010	3	6	-2256711.110	5920465.399	-734042.922	0.01606	0.03907	0.01081
KTPH	2010	5	26	-2273791.875	5913492.474	-734036.908	0.0955	0.08816	0.02598
KTPH	2010	5	26	-2273791.723	5913492.025	-734036.877	0.02603	0.05292	0.01041
RHTU	2010	5	27	-2256711.127	5920465.412	-734042.929	0.01511	0.02874	0.00737
KTPH	2011	11	12	-2273792.198	5913493.078	-734037.012	0.0107	0.02299	0.00638
PDPO	2011	11	12	-2268120.575	5916798.128	-726156.036	0.00724	0.01415	0.00414
CRGO	2011	11	12	-2260027.140	5918134.330	-740479.242	0.01351	0.03278	0.00872
RHTU	2011	11	12	-2256711.530	5920466.389	-734043.051	0.01127	0.02506	0.0062
MJEN	2011	11	12	-2241582.579	5923558.498	-750994.643	0.01085	0.0234	0.00569
RGGG	2011	11	12	-2240681.631	5925636.123	-737397.496	0.01101	0.02382	0.00562
BKIO	2011	11	12	-2240882.642	5927930.821	-718186.698	0.00954	0.02042	0.00481
KTPH	2011	11	13	-2273792.200	5913493.066	-734037.015	0.0113	0.02187	0.00578
PDPO	2011	11	13	-2268120.574	5916798.110	-726156.036	0.00895	0.01539	0.00449
CRGO	2011	11	13	-2260027.137	5918134.324	-740479.244	0.01399	0.02931	0.00771
MJEN	2011	11	13	-2241582.583	5923558.504	-750994.653	0.01424	0.02787	0.00676
RGGG	2011	11	13	-2240681.628	5925636.126	-737397.498	0.01461	0.03065	0.00723
BKIO	2011	11	13	-2240882.639	5927930.802	-718186.695	0.01213	0.02479	0.00595
KTPH	2013	1	25	-2273792.232	5913493.054	-734037.023	0.00771	0.01628	0.00497
RHTU	2013	1	25	-2256711.118	5920465.183	-734042.916	0.00748	0.01691	0.00491
MJEN	2013	1	25	-2241582.600	5923558.454	-750994.649	0.00903	0.01968	0.00503
KTPH	2013	1	26	-2273792.233	5913493.048	-734037.021	0.00692	0.01516	0.00458
RHTU	2013	1	26	-2256711.116	5920465.175	-734042.918	0.00791	0.01832	0.00527
MJEN	2013	1	26	-2241582.601	5923558.456	-750994.654	0.00767	0.01689	0.00442
PDPO	2013	9	25	-2268120.618	5916798.057	-726156.053	0.00948	0.01873	0.00476
RHTU	2013	9	25	-2256711.591	5920466.377	-734043.076	0.0113	0.02357	0.00586
MJEN	2013	9	25	-2241582.622	5923558.459	-750994.665	0.00927	0.01825	0.00451
PDPO	2013	9	26	-2268120.631	5916798.080	-726156.052	0.0128	0.03043	0.00658
RHTU	2013	9	26	-2256711.590	5920466.345	-734043.072	0.01149	0.0238	0.00602
MJEN	2013	9	26	-2241582.620	5923558.450	-750994.657	0.01273	0.02502	0.0062
CRGO	2014	12	16	-2260027.197	5918134.284	-740479.274	0.01920	0.04475	0.0110
PDPO	2014	12	16	-2268120.658	5916798.121	-726156.066	0.01151	0.02782	0.00631
RHTU	2014	12	16	-2256711.621	5920466.415	-734043.092	0.01134	0.02653	0.00650
KTPH	2014	12	16	-2273791.802	5913491.811	-734036.886	0.00911	0.02153	0.00589
MJEN	2014	12	16	-2241582.660	5923558.504	-750994.688	0.00942	0.01916	0.00448
CRGO	2014	12	17	-2260027.173	5918134.242	-740479.266	0.01712	0.03863	0.00941
PDPO	2014	12	17	-2268120.656	5916798.087	-726156.071	0.00997	0.02442	0.00567
RHTU	2014	12	17	-2256711.613	5920466.402	-734043.087	0.01718	0.04182	0.00937
KTPH	2014	12	17	-2273791.799	5913491.824	-734036.890	0.01060	0.02303	0.00646
MJEN	2014	12	17	-2241582.652	5923558.490	-750994.683	0.01062	0.02281	0.00502

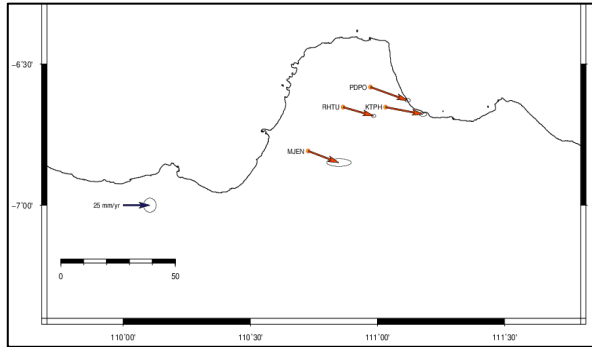
Tabel 4. Koordinat Geodetik Stasiun Pengamatan GPS Hasil GAMIT 10.4 Dalam ITRF 2008

Solusi GAMIT Dalam Sistem Koordinat Geodetik Datum WGS 84 ITRF 2008									
Nama Stasiun	Tahun	Bulan	Hari	Lintang (derajat)	Bujur (derajat)	Tinggi Ellipsoid (m)	Sd.Lintang (mili-second)	sd.Bujur (mili-second)	sd.Tinggi Ellipsoid (m)
RHTU	2010	3	5	-6.6525677456	110.8654076101	507.548	75	91.6	0.0336
RHTU	2010	3	6	-6.6525677543	110.8654075206	507.501	78.9	103.2	0.04115
KTPH	2010	5	26	-6.6529380671	111.0322076652	104.463	203.6	915.4	0.08252
KTPH	2010	5	26	-6.6529382846	111.0322078378	103.990	89.5	188.4	0.05525
RHTU	2010	5	27	-6.6525678004	110.8654076239	507.520	54	77.1	0.03162
KTPH	2011	11	12	-6.6529382924	111.0322084290	105.150	47.5	61.8	0.02468
PDPO	2011	11	12	-6.5810544618	110.9736169105	242.671	32.5	51.4	0.01498
CRGO	2011	11	12	-6.7114168702	110.9009412038	267.291	60.5	70.5	0.03503
RHTU	2011	11	12	-6.6525677916	110.8654078837	508.583	45.5	61.1	0.02687
MJEN	2011	11	12	-6.8074178674	110.7275566849	31.366	44.1	62.1	0.02502
RGGG	2011	11	12	-6.6835929291	110.7132854314	47.484	44.4	63.6	0.02542
BKIO	2011	11	12	-6.5087270894	110.7076474931	43.550	38.1	58.1	0.02172
KTPH	2011	11	13	-6.6529383281	111.0322084859	105.140	43.9	71.5	0.02351
PDPO	2011	11	13	-6.5810544845	110.9736169561	242.654	35	63.2	0.01653
CRGO	2011	11	13	-6.7114169001	110.9009411959	267.285	55.7	79.5	0.0316
MJEN	2011	11	13	-6.8074179546	110.7275567052	31.374	52.4	82.4	0.03014
RGGG	2011	11	13	-6.6835929422	110.7132853931	47.486	57.9	86	0.03276
BKIO	2011	11	13	-6.5087270844	110.7076475263	43.531	46.6	74.3	0.02651
KTPH	2013	1	25	-6.6529383968	111.0322087991	105.141	37.3	42.3	0.0176
RHTU	2013	1	25	-6.6525679102	110.8654082796	507.302	38	45	0.01798
MJEN	2013	1	25	-6.8074179577	110.7275570046	31.333	39.1	46.3	0.02118
KTPH	2013	1	26	-6.6529383867	111.0322088264	105.136	35.3	39.9	0.01624
RHTU	2013	1	26	-6.6525679379	110.8654082952	507.294	40.4	46.4	0.01948
MJEN	2013	1	26	-6.8074180057	110.7275570079	31.335	34.4	40.3	0.01815
PDPO	2013	9	25	-6.5810546748	110.9736175020	242.623	36	59.7	0.02009
RHTU	2013	9	25	-6.6525680031	110.8654084369	508.597	42.4	64.8	0.02538
MJEN	2013	9	25	-6.8074180945	110.7275571746	31.348	35.7	60.3	0.01947
PDPO	2013	9	26	-6.5810546380	110.9736175389	242.649	48.1	73.6	0.03223
RHTU	2013	9	26	-6.6525679955	110.8654085324	508.566	44.8	73	0.02539
MJEN	2013	9	26	-6.8074180332	110.7275571919	31.337	47.3	76.2	0.02697
CRGO	2014	12	16	-6.7114171818	110.9009418402	267.273	76.5	78.3	0.04843
PDPO	2014	12	16	-6.5810547166	110.9736176371	242.698	51.4	61.9	0.02943
RHTU	2014	12	16	-6.6525681016	110.8654085659	508.644	49.5	56.4	0.02838
KTPH	2014	12	16	-6.6529385438	111.0322092014	103.820	45.4	52.1	0.02286
MJEN	2014	12	16	-6.8074182417	110.7275573533	31.405	32.8	28.0	0.02077
CRGO	2014	12	17	-6.7114171648	110.9009417697	267.225	65.5	69.7	0.04197
PDPO	2014	12	17	-6.5810547963	110.9736177252	242.667	47.2	57.1	0.02570
RHTU	2014	12	17	-6.6525680747	110.8654085438	508.629	70.0	74.6	0.04475
KTPH	2014	12	17	-6.6529385686	111.0322091343	103.832	49.9	58.4	0.02474
MJEN	2014	12	17	-6.8074182150	110.7275573320	31.38979	27.8	31.9	0.02458

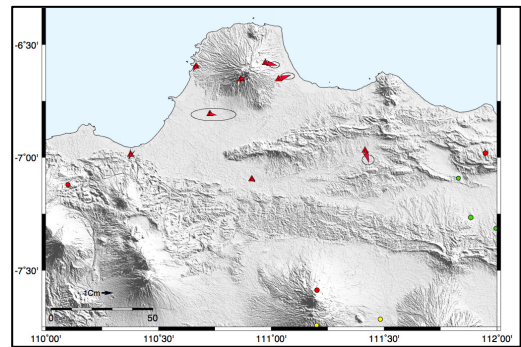
Tabel 5 . Koordinat Toposentrik Stasiun Pengamatan GPS Hasil GAMIT 10.4 dalam ITRF 2008

Solusi GAMIT Dalam Sistem Koordinat Toposentrik Datum WGS 84 ITRF 2008									
Nama Stasiun	Tahun	Bulan	Hari	Utara (m)	Timur (m)	Up (m)	sd.Utara (m)	sd.Timur (m)	sd.Up (m)
RHTU	2010	3	5	-740560.454	12258392.153	507.548	0.00835	0.01013	0.0336
RHTU	2010	3	6	-740560.455	12258392.143	507.501	0.00879	0.01141	0.04115
KTPH	2010	5	26	-740601.678	12276835.241	104.463	0.02267	0.10121	0.08252
KTPH	2010	5	26	-740601.702	12276835.260	103.990	0.00997	0.02084	0.05525
RHTU	2010	5	27	-740560.460	12258392.154	507.520	0.00601	0.00853	0.03162
KTPH	2011	11	12	-740601.703	12276835.326	105.150	0.00528	0.00683	0.02468
PDPO	2011	11	12	-732599.632	12272136.109	242.671	0.00361	0.00568	0.01498
CRGO	2011	11	12	-747111.508	12260812.705	267.291	0.00673	0.0078	0.03503
RHTU	2011	11	12	-740560.459	12258392.183	508.583	0.00507	0.00676	0.02687
MJEN	2011	11	12	-757798.291	12239250.029	31.366	0.00491	0.00686	0.02502
RGGG	2011	11	12	-744014.162	12240784.905	47.484	0.00494	0.00703	0.02542
BKIO	2011	11	12	-724548.185	12244479.454	43.550	0.00424	0.00643	0.02172
KTPH	2011	11	13	-740601.707	12276835.332	105.140	0.00488	0.00791	0.02351
PDPO	2011	11	13	-732599.634	12272136.115	242.654	0.00389	0.00699	0.01653
CRGO	2011	11	13	-747111.512	12260812.704	267.285	0.0062	0.00879	0.0316
MJEN	2011	11	13	-757798.300	12239250.031	31.374	0.00583	0.00911	0.03014
RGGG	2011	11	13	-744014.163	12240784.900	47.486	0.00644	0.00951	0.03276
BKIO	2011	11	13	-724548.185	12244479.457	43.531	0.00519	0.00822	0.02651
KTPH	2013	1	25	-740601.715	12276835.366	105.141	0.00415	0.00468	0.0176
RHTU	2013	1	25	-740560.472	12258392.227	507.302	0.00423	0.00497	0.01798
MJEN	2013	1	25	-757798.301	12239250.064	31.333	0.00436	0.00512	0.02118
KTPH	2013	1	26	-740601.713	12276835.369	105.136	0.00393	0.00442	0.01624
RHTU	2013	1	26	-740560.475	12258392.229	507.294	0.0045	0.00512	0.01948
MJEN	2013	1	26	-757798.306	12239250.065	31.335	0.00383	0.00446	0.01815
PDPO	2013	9	25	-732599.655	12272136.175	242.623	0.00401	0.0066	0.02009
RHTU	2013	9	25	-740560.483	12258392.244	508.597	0.00472	0.00717	0.02538
MJEN	2013	9	25	-757798.316	12239250.083	31.348	0.00397	0.00667	0.01947
PDPO	2013	9	26	-732599.651	12272136.179	242.649	0.00535	0.00814	0.03223
RHTU	2013	9	26	-740560.482	12258392.255	508.566	0.00499	0.00807	0.02539
MJEN	2013	9	26	-757798.309	12239250.085	31.337	0.00527	0.00842	0.02697
CRGO	2014	12	16	-747111.543	12260812.775	267.274	0.00851	0.00866	0.04843
PDPO	2014	12	16	-732599.653	12272136.175	242.632	0.00572	0.00684	0.02943
RHTU	2014	12	16	-740560.494	12258392.258	508.566	0.00551	0.00624	0.02838
KTPH	2014	12	16	-740601.731	12276835.410	103.821	0.00505	0.00576	0.02286
MJEN	2014	12	16	-757798.316	12239250.082	31.349	0.00416	0.00524	0.02077
CRGO	2014	12	17	-747111.541	12260812.767	267.225	0.00729	0.00771	0.04197
PDPO	2014	12	17	-732599.651	12272136.177	242.643	0.00525	0.00632	0.02570
RHTU	2014	12	17	-740560.491	12258392.256	508.629	0.00780	0.00825	0.04475
KTPH	2014	12	17	-740601.733	12276835.403	103.832	0.00555	0.00647	0.02474
MJEN	2014	12	17	-757798.310	12239250.082	31.335	0.00468	0.00567	0.02458

Untuk mendapatkan pergerakan yang sebenarnya dari setiap stasiun pengamatan GPS, maka dilakukan konversi dari koordinat (utara, timur, dan *up*) menjadi kecepatan pergerakan (utara, timur, dan *up*). Pada Gambar 6 ditampilkan vektor kecepatan pergerakan di setiap stasiun pengamatan yang merupakan gradien dari model linier deret waktu perubahan posisi dengan elips kesalahan 5 mm^[13].



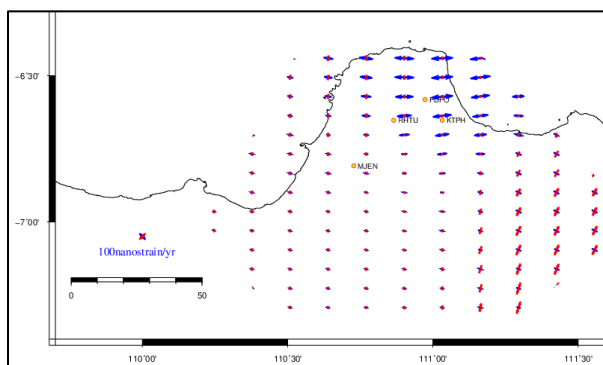
Gambar 6. Vektor Kecepatan Pergerakan Stasiun Pengamatan.



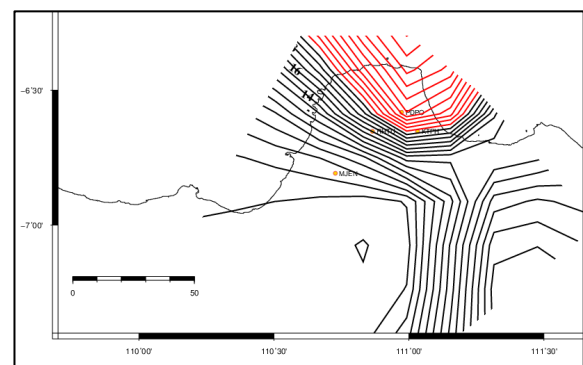
Gambar 7. Vektor Kecepatan Pergerakan Tanpa Pengaruh Pergerakan Lempeng.

Untuk mengetahui pola deformasi lokal, vektor kecepatan pergerakan pengamatan dikoreksi dengan vektor kecepatan pergerakan model. Kecepatan pergerakan model merupakan kecepatan pergerakan yang merepresentasikan pergerakan rotasi blok Sunda^[14], sehingga, vektor kecepatan akan terlihat seperti Gambar 7. Hasil analisis menggunakan *software* GAMIT 10.4 dapat disimpulkan bahwa sampai dengan tahun 2014 pergeseran di sekitar Muria didominasi oleh pergerakan lempeng (rotasi blok Sunda) dengan kecepatan 2,2 cm/tahun, dan ketelitian pengamatan GPS selama 3 tahun berkisar 3-8 mm.

Dari nilai kecepatan pergerakan, dapat ditentukan distribusi nilai regangan untuk wilayah Muria. Distribusi nilai regangan meliputi regangan *principal* (Gambar 8) dan regangan geser maksimum (Gambar 9). Pergeseran yang sangat lokal mengindikasikan adanya deformasi di sekitar tengah dan utara dari Muria dengan nilai pergeseran sebesar 2-3 mm/tahun. Perhitungan regangan menunjukkan adanya regangan di wilayah utara Muria dengan nilai sebesar 2×10^{-2} *microstrain*/tahun, nilai ini masih diatas nilai regangan yg konsisten sebesar 5×10^{-8} *microstrain*/tahun^[15].



Gambar 8. Distribusi Regangan Principal Wilayah Muria.



Gambar 9. Distribusi Regangan Geser Maksimum Wilayah Muria.

4. KESIMPULAN

Karakteristik deformasi Gunung Muria periode tahun 2010 – 2014 menunjukkan bahwa terdapat pergeseran regional di sekitar Muria yang didominasi oleh pergerakan lempeng (rotasi blok Sunda) dengan kecepatan 2,2 cm/tahun, serta pergeseran lokal di tiap 5 lokasi BM dengan kecepatan 2-3 mm/tahun. Perhitungan regangan menunjukkan regangan di wilayah Utara Muria dengan nilai sebesar 2×10^{-2} microstrain/tahun, dan nilai ini masih di atas nilai regangan yg konsisten (5×10^{-8} microstrain/ tahun), hal ini mengindikasikan adanya aktivitas gerakan tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Review Of Status Of Site Evaluation Studies At Muria Peninsula NPP Site", Jakarta, Indonesia 13 – 17 February 2006.
- [2]. KUANG, S., "Geodetic Network Analysis and Optimal Design : Concept and Applications", Ann Arbor Press Inc., Chelsea, Michigan, 1996.
- [3]. ABIDIN Z. HASANUDDIN, dkk., "Karakteristik Deformasi Gunungapi Ijen dalam periode 2002- 2005 Hasil Estimasi Metode Survei GPS", PROC. ITB sains & Tek, Vol 39 A, No 1&2, 2007.
- [4]. _____, "Pengukuran Global Positioning System Untuk Pemantauan Deformasi Gunung Muria Dalam Rangka Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir", Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2011.
- [5]. ABIDIN, Z. HASANUDDIN, "Penentuan Posisi Dengan GPS Dan Aplikasinya", PT.Pradnya Paramita, Cetakan Ketiga, Jakarta, 2006.
- [6]. ABIDIN, Z. HASANUDDIN, "Modul 7 Pendahuluan Metode Survey GPS", Jakarta, 2007.
- [7]. NUGROHO, A., "Modifikasi Benchmark Dan Pengaruhnya Terhadap Ketelitian Pengukuran Deformasi Di Muria" Jurnal Pengkajian Sistem Energi Nuklir volume 15, nomor, Juni 2013.
- [8]. NUGROHO, A., dkk., "Laporan Teknis Pengukuran Deformasi Muria", BATAN, Jakarta, 2014.
- [9]. _____, "Jaring Kontrol Horizontal, Standard Nasional Indonesia SNI 19-6724-2002", Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2002.
- [10]. McBIRNEY A. R., LEONELLO SERVA, M. GUERRAB, CHARLES B. CONNORS, "Volcanic and seismic hazards at a proposed nuclear power site in central Java", Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003.
- [11]. GUNAWAN, DEDE, "Pemodelan Mekanisme Deformasi Post-Seismic Gempa Bengkulu 2007", Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, 2008.
- [12]. CHRZANOWSKI, "Geotechnical and Other Non-Geodetic Method in Deformation Measurement", Technical Report, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 1986.
- [13]. ANDREAS, HERI dkk., "Implikasi Co-Seismic dan Post-Seismic Horizontal Displacement Gempa Aceh 2004 Terhadap Status Geometrik Data Spasial Wilayah Aceh dan Sekitarnya", Kelompok Keahlian Geodesi Departemen Teknik Geodesi Institut Teknologi Bandung, 2007.
- [14]. _____, "Pengukuran Global Positioning System Untuk Pemantauan Deformasi Gunung Muria Dalam Rangka Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir", Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2014.

- [15]. BOCK, YEHUDA et al., "Crustal Motion in Indonesia From Global Positioning System Measurements", *Journal of Geophysical Research* Vol. 108, No.B8, 2367, doi: 10.1029/2001JB000324, 2003.