

KAJIAN REGANGAN SELAT BALI BERDASARKAN DATA GNSS KONTINU TAHUN 2009-2011

Gina Andriyani ¹⁾, Sutomo Kahar ²⁾, Moehammad Awaluddin ³⁾, Irwan Meilano ⁴⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

²⁾ Program Studi Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

³⁾ Program Studi Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

⁴⁾ Kelompok Keilmuan Geodesi & Geomatika FITB Institut Teknologi Bandung

ABSTRAK

Indonesia bagian barat terdiri dari *Sunda Shelf* (landas kontinen Asia Tenggara), yang meliputi pulau-pulau Sumatera, Jawa, Bali, Kalimantan, dan barat daya bagian dari Sulawesi. Sunda Shelf adalah bagian dari lempeng Eurasia yang luas, tetapi tabrakan dari India dengan Asia Tengah memungkinkan terjadinya gerakan yang signifikan dari Asia Tenggara dan *Sunda Shelf* relatif terhadap Eurasia.

Selat Bali terletak diantara pulau Jawa dan Bali yang termasuk ke dalam blok Sunda. Blok Sunda meliputi Sumatera, Jawa, Bali, Kalimantan dan Sulawesi bagian barat [Hamillton, 1979]. Saat Lempeng Indo-Australia bergerak kebawah Lempeng Eurasia, terjadi kontak bidang antar lempeng sehingga terakumulasi regangan. Regangan yang telah melewati batas elastisitas akan dilepaskan sebagai gempa bumi. Namun demikian berdasarkan *Journal of Geophysical Research* tahun 2003 hasil penelitian Bock mengenai *Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System Measurements* disebutkan bahwa regangan yang terjadi di Blok Sunda adalah kecil yaitu 5×10^{-8} per tahun.

Berdasarkan hasil pengolahan data hasil pengamatan GNSS di Selat Bali menggunakan *software* Bernese versi 5 dapat diketahui bahwa Selat Bali mengalami pergeseran ke arah tenggara yang mengindikasikan adanya proses *inter-seismic*. Besar regangan (*strain*) yang terjadi di Selat Bali dihitung menggunakan metode perhitungan regangan (*strain*) garis sehingga dapat ditentukan besar regangan antara ke dua titik pengamatan GNSS CORS yang digunakan pada penelitian ini.

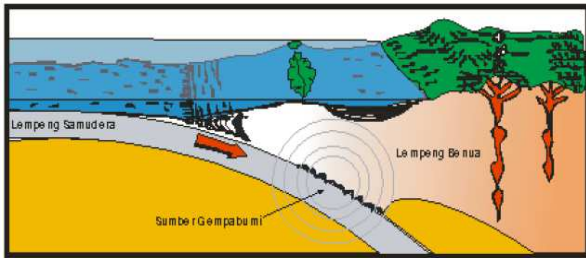
Kata Kunci : *Sunda Shelf*, Selat Bali, Regangan (*Strain*), Pergeseran, Bernese

PENDAHULUAN

Indonesia terletak diantara tiga lempeng utama dunia, yaitu Lempeng Samudra Pasifik yang bergerak ke arah barat-barat laut dengan kecepatan sekitar 10 cm per tahun, Lempeng Samudra India-Benua Australia (Indo-Australia) yang bergerak ke arah utara-timur laut dengan kecepatan sekitar 7 cm per tahun, serta Lempeng Benua Eurasia yang relatif diam, namun *resultan* sistem kinematiknya menunjukkan gerakan ke arah barat daya dengan kecepatan mencapai 13 cm per tahun. [Badan Geologi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, 2009]

Kepadatan material pada kerak samudera (Lempeng Indo-Australia) lebih tinggi dibanding kepadatan material pada kerak benua (Lempeng

Eurasia) dan elemen-elemen zat pada kerak samudera (*mafik*) lebih berat dibanding elemen-elemen zat pada kerak benua (*felsik*), saat lempeng tektonik ini saling bertumbukan, maka akan terjadi penunjaman dimana lempeng yang berat jenisnya lebih tinggi atau massanya lebih besar (Lempeng Indo-Australia), akan menujam ke bawah lempeng yang lebih ringan (Lempeng Eurasia). Peristiwa yang terjadi di dalam permukaan bumi (di dasar lautan) ini disebut **subduksi**. Gambar 1. menunjukkan terjadinya subduksi pada pertemuan lempeng yang saling bertumbukan.



Gambar 1. Subduksi antara Lempeng Samudera dan Lempeng Benua (Katili, 1995)

Saat lempeng samudera terdorong ke bawah lempeng benua terjadi gesekan yang menghambat terdorongnya lempeng samudera, perlambatan gerak tersebut menyebabkan adanya akumulasi energi di zona subduksi. Akibatnya, di zona tersebut akan terjadi tekanan dan regangan yang sifatnya temporal dan spasial. Apabila zona tersebut mengalami kondisi dimana bidang temu antar lempeng terkunci (*locked zone*) maka akumulasi energi tekanan atau tarikan yang telah melewati batas elastisitas menyebabkan lempeng yang bertemu akan melepaskan energi. Energi inilah sebagai penyebab utama gempa bumi tektonik yang menimbulkan bahaya. Untuk mencegah banyaknya korban gempa bumi dikarenakan tidak adanya mitigasi bencana sebelumnya diperlukan adanya suatu metode pengukuran untuk mengamati tekanan dan regangan lempeng bumi. Salah satu yang bisa digunakan adalah metode pengukuran GPS geodetik yang dipasang pada tempat yang dianggap mengalami pergeseran. Metode ini dapat mendokumentasikan dengan baik hampir semua tahapan yang terjadi dalam suatu siklus gempa bumi berikut besar dan arah pergeseran titik-titik dipermukaan bumi dari setiap tahapan gempa tersebut. Dengan demikian, pada penulisan tugas akhir ini akan diteliti regangan tektonik di Selat Bali berdasarkan pengamatan GNSS kontinu tahun 2009-2011.

RUANG LINGKUP

Batasan masalah dalam tugas akhir ini yaitu :

1. Daerah penelitian Tugas Akhir adalah Selat Bali

2. Data pengamatan GNSS kontinu tahun 2009 sampai tahun 2011
3. Stasiun GNSS CORS yang digunakan adalah CBRN, CCAK, CDNP, CJEM, CMCB, CNYU, CPBI, CSIT dan CSRJ yang terletak di Jawa timur dan Bali
4. Model analisis regangan yang digunakan adalah metode hitungan segmen garis
5. Penelitian terbatas pada pola pergeseran dan regangan yang terjadi di Selat Bali.

RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana pola dan kecepatan vektor pergeseran di daerah Selat Bali
2. Apakah terjadi regangan (*strain*) di Selat Bali

MAKSUD DAN TUJUAN

Maksud dari tugas akhir ini yaitu :

1. Mengetahui pola dan kecepatan pergeseran yang terjadi di Selat Bali
2. Mengestimasi besar regangan tektonik di Selat Bali berdasarkan data pengamatan GNSS tahun 2009 - 2011.

Tujuan Tugas Akhir ini adalah Untuk mendapatkan variasi regangan tektonik di Selat Bali secara spasial dan temporal.

METODOLOGI PENELITIAN

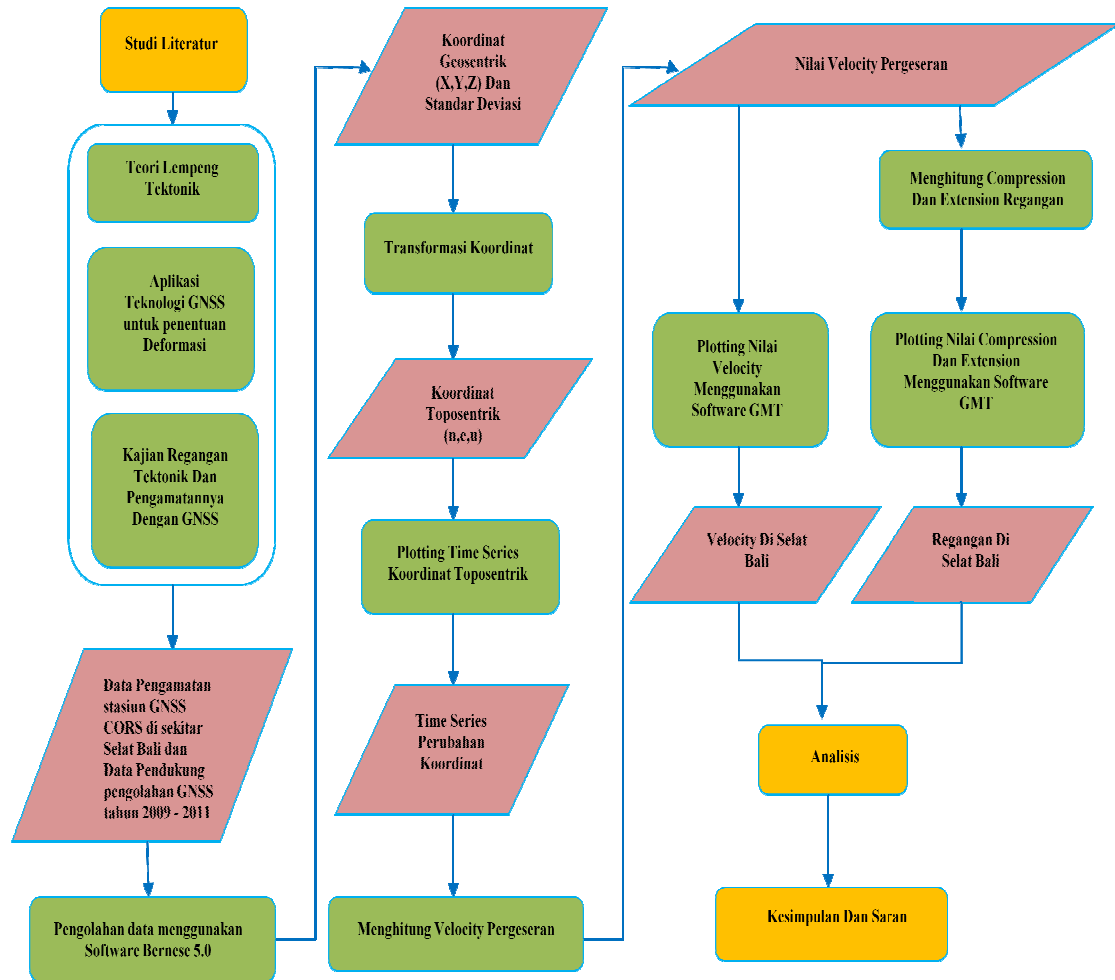
Metodologi penelitian pada penulisan Tugas Akhir ini yaitu :

1. Studi literatur ilmiah mengenai semua informasi yang terkait penyusunan tugas akhir
2. Pengadaan data dengan *men-download* rekaman data semua stasiun GNSS CORS tahun 2009 dan mengajukan permohonan data ke Badan Informasi Geospasial untuk data stasiun GNSS CORS tahun 2010 sampai dengan 2011.
3. Melakukan pengolahan data menggunakan perangkat lunak ilmiah Bernese versi 5.0

sehingga dihasilkan koordinat titik pengamatan GNSS dan vektor pergeserannya.

Secara umum metodologi penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 2. berikut.

- Analisis regangan dari pergeseran hasil pengolahan data GNSS.



Gambar 2. Alur metodologi penelitian

DASAR TEORI

TEORI LEMPENG TEKTONIK

Teori Tektonik Lempeng adalah teori dalam bidang geologi yang dikembangkan untuk memberi penjelasan terhadap adanya bukti-bukti pergerakan skala besar yang dilakukan oleh *lithosphere* bumi.

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.

GEMPABUMI

Gempabumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempabumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang

dihasilkan dipancarkan kesegala arah berupa gelombang gempabumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi. Gempabumi mempunyai sifat berulang, dalam arti bahwa suatu gempabumi di suatu daerah akan terjadi lagi di masa yang akan datang dalam periode waktu tertentu (biasanya ratusan tahun). Istilah perulangan gempabumi ini dinamakan *earthquake cycle*. [http://www.bmkg.go.id/BMKG_Pusat/Geofisika/Gempabumi.bmkg, di akses 1 Maret 2012]

Menurut teori lempeng tektonik, permukaan bumi terpecah menjadi beberapa lempeng tektonik besar. Lempeng tektonik adalah segmen keras kerak bumi yang mengapung di atas *asthenosphere* yang cair dan panas. Oleh karena itu, maka lempeng tektonik ini bebas untuk bergerak dan saling berinteraksi satu sama lain. Daerah perbatasan lempeng-lempeng tektonik, merupakan tempat-tempat yang memiliki kondisi tektonik yang aktif, yang menyebabkan gempa bumi, gunung berapi dan pembentukan dataran tinggi. Teori lempeng tektonik merupakan kombinasi dari teori sebelumnya yaitu: Teori Pergerakan Benua (*Continental Drift*) dan Pemekaran Dasar Samudra (*Sea Floor Spreading*).

Lapisan paling atas bumi, yaitu *lithosphere*, merupakan batuan yang relatif dingin dan bagian paling atas berada pada kondisi padat dan kaku. Di bawah lapisan ini terdapat batuan yang jauh lebih panas yang disebut mantel. Lapisan ini sedemikian panasnya sehingga senantiasa dalam keadaan tidak kaku, sehingga dapat bergerak sesuai dengan proses pendistribusian panas yang kita kenal sebagai aliran konveksi. Lempeng tektonik yang merupakan bagian dari *lithosphere* padat dan terapung di atas mantel ikut bergerak satu sama lainnya. Ada tiga kemungkinan pergerakan satu lempeng tektonik relatif terhadap lempeng lainnya, yaitu apabila kedua lempeng saling menjauhi (*spreading*), saling mendekati (*collision*) dan saling geser (*transform*).

Jika dua lempeng bertemu pada suatu sesar, keduanya dapat bergerak saling menjauhi, saling mendekati atau saling bergeser. Umumnya, gerakan ini berlangsung lambat dan tidak dapat dirasakan oleh manusia namun terukur sebesar 0-15 cm pertahun. Kadang-kadang, gerakan lempeng ini macet dan saling mengunci, sehingga terjadi pengumpulan energi yang berlangsung terus sampai pada suatu saat batuan pada lempeng tektonik tersebut tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut sehingga terjadi pelepasan mendadak yang kita kenal sebagai gempabumi.

Selanjutnya di dalam satu *earthquake cycle* terdapat beberapa fase atau tahapan mekanisme terjadinya gempabumi yaitu fase *interseismic*, *pre-seismic*, *co-seismic*, dan *post-seismic*. tahapan-tahapan ini biasanya disertai dengan terjadinya deformasi pada sebagian kerak bumi.

1. Tahapan *interseismic* merupakan tahapan awal dari suatu siklus gempabumi. Pada tahap ini, energi dari dalam bumi menggerakkan lempeng kemudian terjadi akumulasi energi di beberapa bagian lempeng tempat biasanya terjadi gempabumi (batas antar lempeng dan sesar)
2. gempabumi (batas antar lempeng dan sesar)
3. Tahapan *pre-seismic* adalah tahapan sesaat sebelum terjadinya gempabumi
4. Tahapan *co-seismic* adalah tahapan ketika terjadinya gempabumi
5. Tahapan *afterslip* adalah tahapan ketika sisa-sisa energi gempa terlepas melalui gempa susulan yang kekuatannya lebih kecil dari kekuatan gempa utama
6. Tahapan *post-seismic* adalah tahapan ketika sisa-sisa energi gempa terlepas secara perlahan dalam kurun waktu yang lama sampai kondisi kembali ke tahap kesetimbangan awal yang baru.

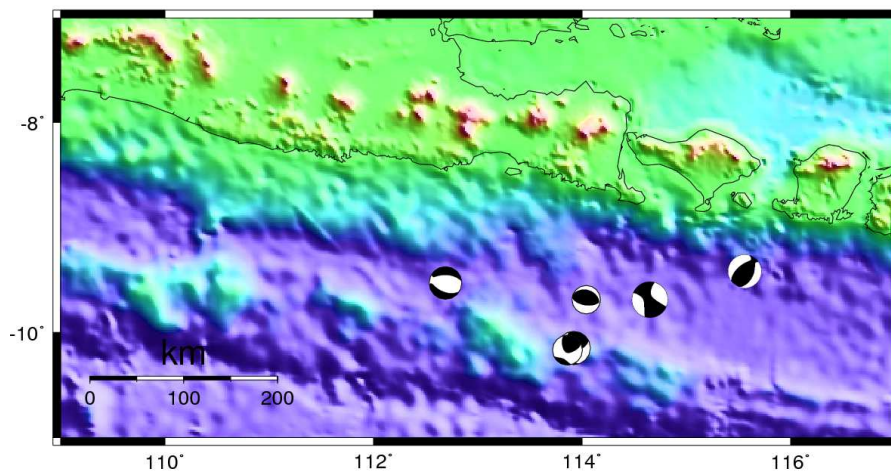
AKTIVITAS KEGEMPAAN DAERAH SEKITAR SELAT BALI

Tabel 1. merupakan data gempa yang terjadi disekitar lokasi penelitian tugas akhir selama

rentang tahun 2009 sampai dengan 2011 sementara gambar 3. menunjukkan lokasi gempa. (Global CMT, di akses 19 Juni 2012)

Tabel 1. Data Gempa Yang Terjadi Pada Rentang Tahun 2009-2011

YEAR	MONTH	DAY	CENTEROID TIME	LAT	LONG	DEPTH	MAGNITUDE
2009	9	18	230658,2	-9,42	115,56	70,1	5,7
2010	2	11	184310,0	-10,15	113,92	49,7	5,8
2011	2	8	15271,1	-10,17	113,86	47,9	5,2
2011	3	23	0733,9	-9,69	114,04	47,0	5
2011	5	17	0151,1	-9,53	112,69	40,6	5,7
2011	10	13	31634,3	-9,69	114,65	57,8	6,2



Gambar 3. Lokasi Gempa Pada Rentang Tahun 2009-2011

DEFORMASI

Deformasi didefinisikan sebagai perubahan bentuk, posisi dan dimensi dari suatu materi atau perubahan kedudukan (pergerakan) suatu materi baik secara absolut maupun relatif dalam suatu kerangka referensi tertentu akibat suatu gaya yang bekerja pada materi tersebut. [Kuang, 1996 dalam Rino, 2010]

METODE ANALISIS REGANGAN

Regangan merupakan gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda yg meregangkan benda tersebut. Perubahan fraksional suatu benda elastik baik bentuk maupun dimensinya dinamakan dengan regangan (*strain*). Dengan pengukuran berulang jaring geodesi pada waktu yang berbeda,

dapat dimungkinkan untuk memonitor perpindahan dari stasiun pengamatan yang di sebabkan oleh kekuatan tektonik yang bekerja pada kerak bumi.

Pengukuran perpindahan horizontal dan vertikal dalam jaring geodetik dilakukan dengan metode yang berbeda dan analisis- analisis tersebut biasanya dilakukan secara terpisah untuk *strain* horizontal dan vertikal. Konsep *strain* untuk deformasi tidak hanya dalam dua dimensi, tapi formulasi tersebut dapat diperluas ke tiga dimensi. [Kurt Lambach, 1988]

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

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

..... (1)

Keterangan :

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

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

Setelah diketahui vektor pergeserannya nilai *strain* bisa di dapatkan, contoh dua titik terdekat P, Q semula terletak pada X_i dan $X_i + \delta X_i$ ($i, j=1,2$) masing-masing dipindahkan oleh u_i dan $u_i + \delta u_i$, dimana kerak bumi terdeformasi, maka pergeseran Q relative terhadap P adalah sebagai berikut.

$$\delta u_i = \sum_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta x_j \dots\dots\dots (2)$$

Ditambah jangka waktu lainnya $(\partial u_i / \partial x_i)^2$, jika perpindahan terjadi dengan lambat dengan posisi sedemikian rupa *square* dan hasil dari $\partial u_i / \partial x_j$ dapat di abaikan, maka rumus (II-2) dapat dituliskan kembali sebagai berikut

$$\delta u_i = \sum_j \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\} \delta x_j,$$

$$= \sum_j (\varepsilon_{ij} - \xi_{ij}) \delta x_j \dots\dots\dots (3)$$

Principal strain (δu_i) menyatakan perubahan elemen panjang terhadap panjang awal (mm/mm) dan dinyatakan dengan satuan *strain*. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk memantau regangan lempeng tektonik yaitu *Global Positioning System* (GPS).

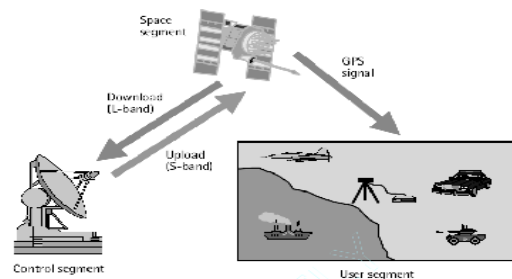
GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

GPS merupakan salah satu pengukuran dalam geodesi yang telah banyak digunakan oleh banyak kalangan baik militer maupun sipil di seluruh dunia. Selain digunakan untuk penentuan posisi, GPS juga dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi. 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 kontinu di seluruh dunia tanpa bergantung waktu dan cuaca, kepada banyak orang secara simultan. [Abidin, 2004]

GPS memiliki tiga segmen utama, yaitu :

1. Segmen angkasa (*Space Segmen*), terdiri dari satelit-satelit GPS yang memancarkan sinyal dalam dua frekuensi modulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4. pemancaran sinyal tersebut dikontrol secara teliti oleh jam atom yang relatif stabil di dalam satelit. Satelit juga memancarkan pesan navigasi yang menginformasikan posisi setiap satelit.



Gambar 4. Segmen Satelit
(Abidin, 2004)

2. Segmen Kontrol (*Control System*), yaitu *Master Control Station* yang berlokasi di Colorado Spring Amerika Serikat dan beberapa *monitor station* yang tersebar di seluruh dunia (Gambar 5).



Gambar 5. Segmen Kontrol

(http://www.kowoma.de/en/gps/control_segment.htm di akses 2 Mei 2012)

3. Segmen Pemakai (*User Segmen*), yaitu pemakai GPS termasuk alat-alat penerima

serta pengolah sinyal dan data GPS (Gambar 6).



Gambar 6. Segmen Pemakai (Abidin, 2003)

GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GNSS)

Perkembangan teknologi penentuan posisi dengan satelit *Global Navigation Satellite System* (GNSS) memunculkan sistem pengadaan titik kontrol dasar moderen sebagai referensi penentuan posisi untuk pengukuran dan pemetaan yang bersifat aktif, terus menerus dan dapat diakses secara *real time*. Sistem titik kontrol moderen tersebut adalah *Continuosly Operating Reference Stations* (CORS).

Continuosly Operating Reference Stations (CORS) yang merupakan jalinan beberapa stasiun referensi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) permanen (*base station*), dapat merekam data ephemeris GNSS secara kontinu, lalu disimpan dalam *server* dan dihitung secara teliti menghasilkan koreksi-koreksi yang dapat diberikan secara *real time* kepada *receiver* GNSS. Di berbagai negara, CORS telah berkembang pesat dan pemanfaatannya selain untuk titik control atau referensi yang bersifat aktif dalam survei pemetaan juga dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi.

PENGOLAHAN DATA

PENGOLAHAN DATA GNSS PADA SOFTWARE BERNESE 5.0

Data pengamatan GNSS biasanya akan dipengaruhi oleh kesalahan dan bias yang

umumnya terkait dengan satelit (kesalahan orbit dan kesalahan jam satelit), *receiver* (kesalahan jam *receiver*, kesalahan pusat antena dan *noise*) dan data pengamatan (ambiguitas fase serta kesalahan dan bias lingkungan sekitar pengamatan GNSS). *Software* Bernese 5.0 dapat memberikan hasil olahan data yang teliti karena kemampuannya dalam mengestimasi kesalahan dan bias yang optimal, diantaranya adalah :

1. Kesalahan orbit direduksi menggunakan informasi orbit yang teliti (*precise ephemeris*)
2. Kesalahan akibat media propagasi (bias ionosfer dan troposfer) direduksi dengan melakukan pemodelan tertentu atau mengestimasi parameter bias tersebut. Pemodelan bias troposfer pada *software* Bernese 5.0 antara lain *Saastamoinen, Niell, Hopfield, Essen and Frome* dan *Marini-Murray*. Sedangkan bias ionosfer dapat dilakukan dengan pemodelan ionosfer global atau regional
3. Kesalahan akibat antena *receiver* dapat direduksi menggunakan model-model tertentu terkait dengan variansi pusat fase antena yang digunakan
4. Pemecahan ambiguitas fase, metodenya antara lain *Round, Sigma, Search* dan *QIF (Quasi Ionosphere Free)*. Metode terakhir ini yang digunakan dalam pengolahan data GPS.

TRANSFORMASI KOORDINAT GEOSENTRIK KE TOPOSENTRIK

Koordinat hasil pengolahan *software* Bernese 5.0 masih dalam sistem koordinat geosentrik (X,Y,Z), koordinat ini kemudian ditransformasikan kedalam sistem koordinat toposentrik (n,e,u) yang pusat sumbunya berada dipermukaan bumi dan sifatnya lokal sehingga dapat memperlihatkan besarnya pergeseran

permukaan bumi. Persamaan yang digunakan dalam proses transformasi adalah [Kosasih & Wedyanto, 2005]

$$\begin{pmatrix} n_A \\ e_A \\ u_A \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\varphi_0, \lambda_0) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A - X_0 \\ Y_A - Y_0 \\ Z_A - Z_0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mathbf{R}(\varphi_0, \lambda_0) = \begin{pmatrix} -\sin\varphi_0 \cos\lambda_0 & -\sin\varphi_0 \sin\lambda_0 & \cos\varphi_0 \\ -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ \cos\varphi_0 \cos\lambda_0 & \cos\varphi_0 \sin\lambda_0 & \sin\varphi_0 \end{pmatrix} \dots\dots (6)$$

Keterangan :

- n_A, e_A, u_A = koordinat toposentrik titik A
- φ_0, λ_0 = koordinat geodetik titik O
(origin sistem koordinat toposentrik)
- X_0, Y_0, Z_0 = koordinat geosentrik titik O
(origin sistem koordinat toposentrik)
- X_A, Y_A, Z_A = koordinat geosentrik titik A
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ = selisih antara koordinat titik geosentrik titik A dan titik O
- R = matrik rotasi

PROSES PERHITUNGAN REGANGAN (STRAIN) GARIS

Nilai *velocity* yang di dapat masih menggunakan sistem koordinat toposentrik yang bersifat lokal, oleh karena itu untuk menghitung regangan (*strain*) sistem koordinat toposentrik tersebut harus dirubah ke dalam sistem yang bersifat global. Dalam penelitian ini digunakan sistem proyeksi UTM (*Universal Transver Mercator*) untuk menghitung besar nilai regangan (*strain*) pada setiap segmen garis. Hasil konversi data Bernese menggunakan *software* Arr-Bernese menghasilkan koordinat pada sistem geosentrik dan geodetik sehingga proses konversi koordinat dilakukan dari sistem koordinat geodetik ke sistem

proyeksi UTM. Persamaan yang digunakan dalam proses konversi adalah [Umaryono, 2002]

Setelah di peroleh *time series* koordinat UTM pada setiap stasiun, dilakukan perhitungan regangan (*strain*) dengan rumus umum regangan sebagai berikut.

$$Strain = \frac{\Delta L}{L}$$

Persamaan di atas menyatakan perubahan elemen panjang terhadap panjang awal (mm/mm) dan dinyatakan dengan satuan *strain*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

TIMESERIES LINIER

Beberapa tahapan yang dilakukan sampai didapatkan *time series* linier adalah membuang data *outlier* kemudian *plotting time series* linier menggunakan *software* MATLAB. Tahapan pertama membuang data *outlier*, yaitu membuang data pengamatan yang tidak dianggap sebagai anggota sampel dari suatu distribusi sehingga tidak diikutsertakan dalam proses pengolahan data selanjutnya. Tugas akhir ini menggunakan selang kepercayaan 95 %, artinya data pengamatan yang berada diluar \pm tiga kali standar deviasi untuk selang kepercayaan 95% dianggap sebagai data *outlier* dan dibuang.

KECEPATAN VEKTOR PERGESERAN

Kecepatan pergeseran adalah besaran yang menyatakan perubahan suatu titik pantau dalam selang waktu tertentu sehingga bisa menjadi indikator terjadinya deformasi di daerah pengamatan. Salah satu cara untuk menghitung besarnya kecepatan vektor pergeseran masing-masing titik adalah dengan metode *linier fit*, yaitu memanfaatkan pendekatan fungsi linier. Sistem koordinat toposentrik lokal dipilih sebagai format data yang dipakai dalam proses hitungan *linier fit* untuk menghitung pola dan kecepatan pergeseran. Titik acuannya adalah sesi pertama pengamatan

masing-masing stasiun, sehingga pergeseran titik yang sama pada sesi selanjutnya mengacu kepada pengamatan sesi pertama. Adapun fungsi liniernya dirumuskan sebagai berikut :

$$y = ax + b$$

Keterangan :

x = waktu (tahun + sesi/365)

y = data pada waktu t

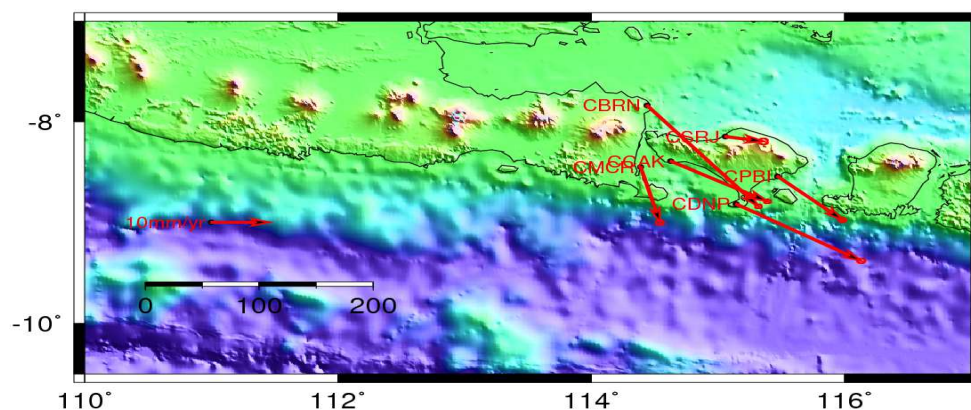
a dan b = nilai yang ditentukan berdasarkan kumpulan data pengamatan

Tahapan untuk mendapatkan nilai a dan b adalah menggunakan metode analisis kuadrat terkecil.

Tabel 2. Kecepatan pergeseran pada titik-titik pengamatan GNSS CORS tahun 2009 - 2011

No	Stasiun GNSS	Ve (m/tahun)	Vn (m/tahun)
1	CBRN	0,0192 ± 0,0013	-0,0219 ± 0,001
2	CCAK	0,0166 ± 0,0013	-0,0087 ± 0,001
3	CDNP	0,0215 ± 0,0015	-0,0123 ± 0,001
4	CJEM	-	-
5	CMCR	0,0033 ± 0,0016	-0,0121 ± 0,001
6	CNYU	-	-
7	CPBI	0,0112 ± 0,0014	-0,0095 ± 0,001
8	CSIT	NaN	NaN
9	CSRJ	0,0066 ± 0,0017	-0,0010 ± 0,001

Berikut ini, Gambar 7 merupakan hasil *plotting* kecepatan pergeseran (*velocity*) stasiun pengamatan berdasarkan data GNSS CORS tahun 2009-2011 pada *software* GMT (*Generic Mapping Tools*). Garis berwarna merah menunjukkan besar kecepatan pergeseran yang terjadi dengan skala 10 mm, sementara arah yang di tunjukkan merupakan arah dari pergeseran tiap stasiun.



Gambar 7. Kecepatan Pergeseran (*Velocity*) Stasiun Pengamatan

KECEPATAN REGANGAN

Besaran regangan dihitung dengan metode hitungan garis yang terlihat seperti hubungan *baseline*. Perhitungan regangan (*strain*) dilakukan

secara manual. Hasil perhitungan manual regangan (*strain*) dua dimensi (2D) segmen garis di tunjukkan pada Tabel 3. dibawah ini.

Tabel 3. Nilai Regangan (*Strain*) per-tahun berdasarkan 2D segmen garis

No	Segmen Garis	Panjang Segmen (km)	Regangan	
			<i>Strain</i>	ppm (<i>part per milion</i>)
1	CBRN-CCAK	61,4243	-6,29117433025304E-08	-0,06291
2	CBRN-CDNP	155,6992	2,89856729801222E-07	0,28986
3	CBRN-CMCR	67,8200	-6,51532560847105E-08	-0,06515
4	CBRN-CPBI	135,6342	-8,56673988676853E-08	-0,08567
5	CBRN-CSRJ	116,7609	-3,05423200904788E-07	-0,30542
6	CCAK-CDNP	120,9093	2,76912865031432E-07	0,27691

7	CCAK-CMCR	6,4352	6,94039793488894E-07	0,69404
8	CCAK-CPBI	111,8417	3,72119265194150E-08	0,03721
9	CCAK-CSRJ	114,4266	-5,794552787231E-07	-0,57946
10	CDNP-CMCR	119,2394	6,76297328452327E-07	0,67630
11	CDNP-CPBI	30,4108	-4,89885378396765E-09	-0,00490
12	CDNP-CSRJ	73,9412	-4,16965908280456E-07	-0,41697
13	CMCR-CPBI	111,7823	-9,79203506263371E-08	-0,09792
14	CMCR-CSRJ	116,7816	7,81546062375890E-07	0,78155
15	CPBI-CSRJ	43,5449	6,90671115606200E-07	0,69067

ANALISIS KECEPATAN PERGESERAN

Gambar 7. menunjukkan arah vektor pergeseran (*velocity*) menuju ke tenggara, kecepatan vektor pergeseran selama tiga tahun pengamatan yang telah dihitung perlu dilakukan uji statistik agar secara kualitatif mengindikasikan baik atau tidaknya hasil pengolahan. Uji statistik ini dilakukan dengan cara menguji variabel pergeseran titik (P_{ij}) dari sesi pengamatan i ke sesi j yang nilainya dapat dihitung menggunakan rumus :

$$P_{ij} = (dn_{ij}^2 + de_{ij}^2)^{0.5} \dots\dots\dots(23)$$

Adapun standar deviasi dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Std P_{ij} = (sd dn_{ij}^2 + sd de_{ij}^2)^{0.5} \dots\dots\dots(24)$$

Hipotesa nol yang digunakan pada uji statistik ini adalah titik pengamatan tidak bergeser dalam selang i dan j sehingga :

Hipotesa nol $H_0 : P_{ij} = 0$

Hipotesa Alternatif $H_a : P_{ij} \neq 0$

Statistik yang digunakan dalam menguji pergeseran titik-titik pengamatan adalah :

$$T = P_{ij} / Std P_{ij} \dots\dots\dots(25)$$

Pergeseran dinyatakan signifikan atau hipotesa nol ditolak jika (Wolf and Ghilani, 1997 dalam Rino, 2010) :

$$T > t_{df, \alpha/2} \dots\dots\dots(26)$$

Keterangan :

P_{ij} = Pergeseran titik pengamatan

$Std P_{ij}, Sd dn_{ij}^2, Sd de_{ij}^2$ = Standar deviasi

P_{ij} , standar deviasi komponen n dan e

T = Besaran yang menunjukkan signifikansi pergeseran

df = derajat kebebasan

α = level signifikan yang digunakan

df diasumsikan tak terhingga karena data yang diamati sangat banyak, oleh karena itu digunakan tabel distribusi normal dengan selang kepercayaan 95 % sehingga nilai $T > t_{df, \alpha/2}$ adalah 2.576. Tabel 4. menunjukkan terjadi pergeseran signifikan di semua stasiun pengamatan.

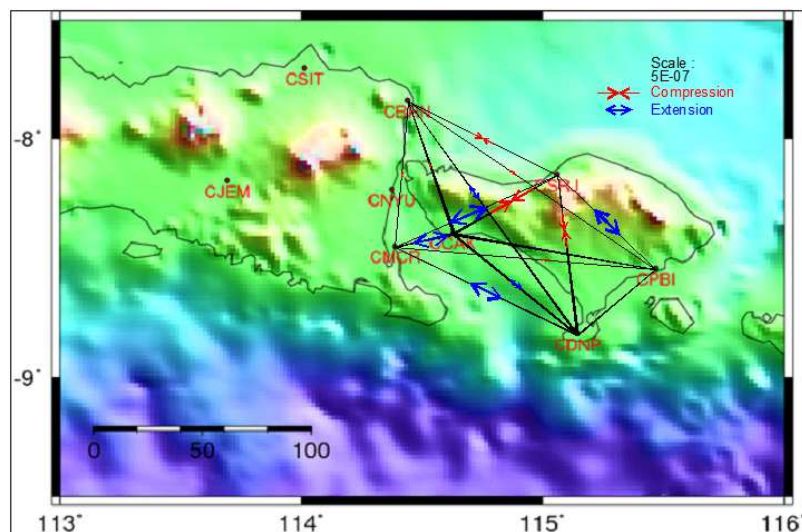
Tabel 4. Hasil uji statistik vektor pergeseran

No	Stasiun	de (m/tahun)	dn (m/tahun)	sd e (m)	sd n (m)	P	std P	T	Pergeseran
1	CBRN	0,0192	-0,0219	0,0013	0,001	0,02912473	0,0016	18,16450779	Ya
2	CCAK	0,0166	-0,0087	0,0013	0,001	0,01874166	0,0016	12,03686393	Ya
3	CDNP	0,0215	-0,0123	0,0015	0,001	0,02476974	0,0019	13,27822913	Ya
4	CMCR	0,0033	-0,0121	0,0016	0,001	0,01254193	0,0019	6,502986911	Ya
5	CPBI	0,0112	-0,0095	0,0014	0,001	0,01468639	0,0018	8,265888764	Ya
6	CSRJ	0,0066	-0,0010	0,0017	0,001	0,00667533	0,0022	3,025519432	Ya

ANALISIS REGANGAN (STRAIN)

Tabel 3. menunjukkan besar regangan (*strain*) per-tahun berdasarkan segmen garis dengan nilai regangan (*strain*) rata-rata tiap segmennya $1,21875988713454E-07$ atau 0,12188 ppm. Berikut ini, gambar 8. merupakan *plotting* hasil perhitungan regangan (*strain*) manual pada *software* GMT (*Generic Mapping Tools*). Dari

gambar tersebut dapat terlihat bahwa aktifitas *inter-seismic* terjadi di Selat Bali dengan komponen ekstensi dan kompresi yang cukup variatif di daerah tersebut. Garis warna hitam menunjukkan segmen regangan garis yang di bentuk pada proses hitung manual, tanda panah merah menunjukkan komponen ekstensi (*extension*), sementara tanda panah biru menunjukkan komponen kompresi (*compression*).



Gambar 8. Regangan (*Strain*) Stasiun Pengamatan

KESIMPULAN

1. Vektor pergeseran di daerah antara Bali dan Jawa Timur mengarah ke tenggara. Pergeseran terbesar terjadi pada stasiun CBRN dengan nilai $V_e = 0,0192 \pm 0,0013$ m/tahun dan $V_n = -0,0219 \pm 0,001$ m/tahun. Sementara pergeseran terkecil terjadi pada stasiun CSRJ dengan nilai $V_e = 0,0066 \pm 0,0017$ m/tahun dan $V_n = -0,0010 \pm 0,001$ m/tahun. Berdasarkan Uji Statistik vektor pergeseran pada daerah penelitian menunjukkan terjadi adanya pergeseran.
2. Regangan tektonik di Selat Bali didominasi oleh adanya kompresi yang dominan dengan nilai regangan (*strain*) rata-rata per-tahun tiap segmennya $1,21875988713454E-07$ atau 0,12188 ppm. Pola kompresi terbesar terjadi

pada segmen CCAK-CSRJ dengan nilai regangan (*strain*) $-5,794552787231E-07$ atau -0,57946 ppm. Sementara nilai ekstensi terbesar terjadi pada segmen CMCR-CSRJ dengan nilai regangan (*strain*) $7,81546062375890E-07$ atau 0,78155 ppm.

SARAN

1. Dalam hal *men-download* data GNSS dari *website* SOPAC pilih data pada DOY (*Day Of Year*) yang memiliki hasil perekaman data di atas 20%, untuk menghindari buruknya hasil pengolahan data
2. Memperbanyak stasiun pengamatan dan jumlah data untuk mengantisipasi adanya data RINEX yang kosong (*error*) atau terbuang karena dianggap sebagai data *outlier*

3. Sebaiknya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai kecepatan vector pergeseran dengan menggunakan referensi ITRF dan kecepatan blok sunda
4. Sebagai perbandingan hasil regangan (*strain*) sebaiknya dilakukan perhitungan regangan (*strain*) menggunakan metode lain (metode segitiga)
5. Memperbanyak data stasiun IGS sebagai referensi agar hasil pengolahan tetap stabil walaupun salah satu stasiun mati pada DOY (*Day Of Year*) tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. 2007. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Jakarta : PT Pradnya Paramita.
- Abidin, H.Z., A.Jones, J.Kahar. 2002. *Survei dengan GPS*. Jakarta : PT Pradnya Paramita
- Awaluddin, Moehammad. 2010. *Hitungan Distribusi Slip Gempa Bengkulu Tahun 2007 Dari Data Pengamatan GPS Dengan Teknik Inversi Kuadrat Terkecil*. Tesis Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Institut Teknologi Bandung
- Batas Konvergen . 2012. Address : http://id.wikipedia.org/wiki/Batas_konvergen, access date : 30 April 2012
- Bock, Y., L.Prawirodirdjo, J. F. Genrich, C. W. Stevens, R. McCaffrey, C. Subarya, S. S. O. Puntodewo, and E. Calais, *Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System Measurements*, J. Geophys. Res., 108 (B8), 2367, doi:10.1029/2001JB000324, 2003
- Dach,Rolf, Hugentobler,Urs, Walser,Peter. 2011. *Bernese GPS Software Version 5.0 Tutorial Processing Example Introductory Course Terminal Session*. Astronomical Institute, University of Bern
- Deformasi . 2012. Address : <http://www.Gedbinlink's Weblog.htm>, access date : 28 Februari 2012
- Gempabumi . 2012. Address : http://www.bmkg.go.id/BMKG_Pusat/Geofisika/Gempabumi.bmkg, access date : 1 Maret 2012
- Gunawan, Dede. 2008. *Pemodelan Mekanisme Deformasi Post-Seismic Gempa Bengkulu 2007*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Institut Teknologi Bandung
- Lapisan Bumi . 2012. Address : <http://nurainiajeeng.wordpress.com/2011/03/27/lapisan-lapisan-bumi/> access date : 2 Mei 2012
- Lambeck, Kurt. 1988. *The Slow Deformations of The Earth*. Oxford : Clarendon Press
- Rino. 2010. *Regangan Tektonik di Sumatra berdasarkan Pengamatan Kontinu Sumatran GPS Array (SUGAR) Tahun 2007 - 2008*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Institut Teknologi Bandung
- Scripps Orbit and Permanent Array Center. 2012. Address : <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataBySite.cgi>, access date : Februari – Maret 2012
- Server Data Orbit. 2010. Address : <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>, access date : Maret 2012
- Soedomo, Agus S. 2004. *Sistem Dan Transformasi Koordinat*. Modul Kuliah Departemen Teknik Geodesi Fakultas Sipil Dan Perencanaan Institut Teknologi Bandung
- Tektonik Lempeng . 2012. Address : http://id.wikipedia.org/wiki/Tektonika_lempeng, access date : 29 Februari 2012
- Turcotte,Donald L., Schubert, Gerald. 1982. *Geodynamics Applications Of Continuum Physics To Geological Problems*. USA : Jhon Wiley and Sons, Inc
- Purworahardjo, Umaryono. 2002. *GD-216 Hitung Dan Proyeksi Geodesi*. Catatan Kuliah Departemen Teknik Geodesi. Bandung : ITB
- Yusfania, Meiriska. 2008. *Pemodelan Gempa Bengkulu 2007 Berdasarkan Data GPS*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Institut Teknologi Bandung