

PEMODELAN TINGKAT AKTIVITAS SESAR BERDASARKAN ANALISIS DEFORMASI MENGUNAKAN PENGAMATAN GPS

Joko HARTADI, Sugeng RAHARJO, Oktavia Dewi ALFIANI
Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, UPN “Veteran” Yogyakarta
Jl. SWK 104 Condongcatur Yogyakarta 55285
e-mail : geologi@upnyk.ac.id

Abstrak

Metode pengamatan GPS adalah salah satu cara yang dapat digunakan untuk menentukan ada tidaknya sesar aktif di suatu tempat. Metode tersebut diawali dengan melakukan survei GPS secara episodik. Survei GPS dilaksanakan dengan menggunakan kerangka jaring pengamatan relatif dengan memasang titik pengamatan sebanyak mungkin di area yang teridentifikasi. Pengamatan GPS dilakukan dengan cara, alat ukur dan metoda pengolahan yang sama di titik yang sama secara berkala dan konsisten. Dengan mengikuti teori statistik akan diperoleh hasil hitungan yang konsisten yang diketahui sebagai besaran pergerakan tanah. Hasil tersebut diperoleh dari pengamatan GPS yang dilakukan paling sedikit 5 tahun lamanya dengan pengukuran GPS dari stasiun permanen yang dilakukan minimal tiap tahun untuk menghasilkan nilai yang teliti. Berdasarkan analisis deformasi tersebut diharapkan dapat memodelkan tingkat aktivitas sesar di lokasi penelitian dengan memberikan informasi kuantitatif untuk menentukan arah, besar, serta model pergerakan deformasinya.

Kata kunci: pengukuran GPS, sesar aktif, analisis deformasi.

PENDAHULUAN

Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia (Gambar 1) dan membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks (Bird, 2003). Keberadaan interaksi antar lempeng-lempeng ini menempatkan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi (Milson *et al.*, 1992). Tingginya aktivitas kegempaan ini terlihat dari hasil pencatatan dimana dalam rentang waktu 1897-2009 terdapat lebih dari 14.000 kejadian gempa dengan magnituda $M > 5.0$. Kejadian gempa-gempa utama (*main shocks*) dalam rentang waktu tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2. Dalam enam tahun terakhir telah tercatat berbagai aktifitas gempa besar di Indonesia, yaitu Gempa Aceh disertai tsunami tahun 2004 ($M_w = 9,2$), Gempa Nias tahun 2005 ($M_w = 8,7$), Gempa Jogja tahun 2006 ($M_w = 6,3$), Gempa Tasik tahun 2009 ($M_w = 7,4$) dan terakhir Gempa Padang tahun 2009 ($M_w = 7,6$). Gempa-gempa tersebut telah menyebabkan ribuan korban jiwa, keruntuhan dan kerusakan ribuan infrastruktur dan bangunan, serta dana trilyunan rupiah untuk rehabilitasi dan rekonstruksi.

Permasalahan utama dari peristiwa-peristiwa gempa adalah: 1) sangat potensial mengakibatkan kerugian yang besar, 2) merupakan kejadian alam yang belum dapat diperhitungkan dan diperkirakan secara akurat baik kapan dan dimana terjadinya serta magnitudanya, dan 3) gempa tidak dapat dicegah. Karena tidak dapat dicegah dan tidak dapat diperkirakan secara akurat, usaha-usaha yang biasa dilakukan adalah: a) menghindari wilayah dimana terdapat *fault rupture*, kemungkinan tsunami, dan *landslide*, serta b) bangunan sipil harus direncanakan dan dibangun tahan gempa.

Pengalaman telah membuktikan bahwa sebagian besar korban dan kerugian yang terjadi akibat gempa disebabkan oleh kerusakan dan kegagalan infrastruktur. Kerusakan akibat gempa dapat dibagi dalam dua jenis, yaitu: 1) kerusakan tidak langsung pada tanah yang menyebabkan terjadinya likuifaksi, *cyclic mobility*, *lateral spreading*, kelongsoran lereng, keretakan tanah



subsidence, dan deformasi yang berlebihan, serta 2) kerusakan struktur sebagai akibat langsung dari gaya inersia yang diterima bangunan selama guncangan.

METODOLOGI

Pergerakan bumi yang dinamis menghasilkan deformasi yang terjadi pada lempeng. Pergerakan yang terjadi pada distribusi titik pengamatan diatas permukaan bumi dalam rentang waktu tertentu sehingga menghasilkan nilai tertentu. Analisis deformasi digunakan untuk menentukan kuantitas pergeseran dan parameternya yang mempunyai ciri khas dan karakteristik dalam ruang dan waktu dan dimanifestasikan dengan pergeseran koordinat suatu titik pengamatan yang dilakukan secara episodik dan kontinyu.

Dalam studi deformasi akibat pergerakan kerak bumi, perubahan posisi titik pengamatan adalah perubahan atau pergerakan titik-titik pengamatan yang diletakkan di sekitar daerah-daerah patahan aktif yang diperkirakan berpotensi terjadi gempa bumi.

Penggunaan dua *receiver* GPS atau lebih secara statik (*static differential*) akan memberikan hasil kualitas ketelitian yang tinggi. Salah satu metode yang diterapkan guna melihat deformasi adalah menggunakan pengamatan GPS baik secara episodik maupun kontinyu yang memiliki ketelitian dan presisi yang tinggi hingga beberapa milimeter.

Prinsip penentuan aktivitas sesar dengan menggunakan metode survei GPS adalah dengan cara menempatkan beberapa titik di beberapa lokasi yang dipilih, secara periodik ditentukan koordinatnya secara teliti dengan menggunakan metode survei GPS. Dengan mempelajari pola dan kecepatan perubahan koordinat dari titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, kemudian bersama data-data penunjang lainnya di modelkan secara matematis maka karakteristik aktivitas sesar akan dapat dilihat dan dipelajari lebih lanjut guna pembuatan model potensi bencana alam gempa bumi.

Model yang dapat dibuat diantaranya yaitu: model deformasi elastis, yang kemudian memperlihatkan parameter-parameter sesar seperti lokasi sesar, geometri sesar dan tingkat akumulasi deformasi pada sesar. Kemudian dari model ini dapat menentukan akumulasi strain, locking depth, prediksi energi gempa yang mungkin terjadi di daerah sesar tersebut. Dengan kata lain melalui input data GPS dan output model aktivitas sesar, maka dapat menentukan model potensi bencana alam gempa bumi di wilayah sesar yang diteliti.

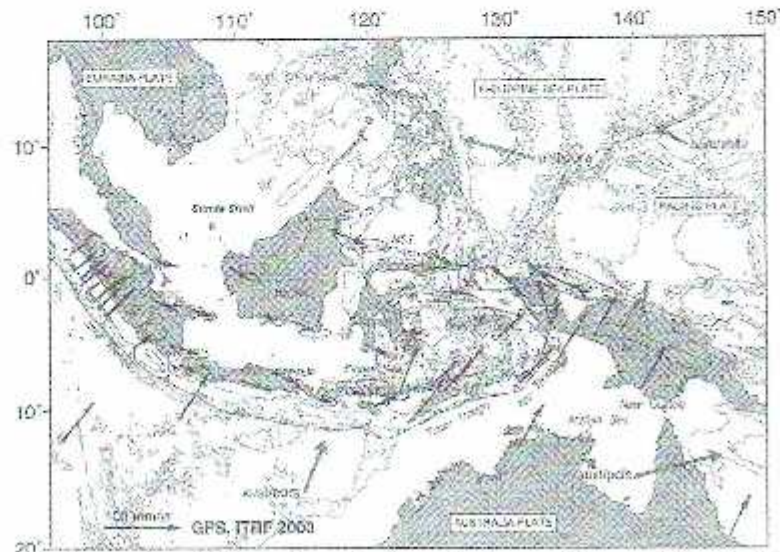
Tatanan Tektonik

Sebagaimana terlihat dalam Gambar 1, kepulauan Indonesia merupakan tipe struktur busur kepulauan dengan fisiografi yang unik, yaitu *trenches*, *arc-trench gaps*, *gravity anomalies*, busur vulkanik dan rangkaian pegunungan muda dengan karakteristik sebaran kedalaman gempa sepanjang zone penunjaman. Fisiografi unik tersebut ditunjukkan dalam bentuk kondisi tektonik dimana di bagian barat laut dan bagian tenggara berturut-turut ditempati oleh lempeng Benua Asia (Paparan Sunda) dan lempeng Benua Australia dimana kedua paparan tersebut membentuk daerah stabil. Di bagian timur laut dan barat daya berturut-turut ditempati oleh lempeng Samudera Pasifik dan Samudera Hindia, sementara di bagian tengah didominasi oleh keratan-keratan benua dan samudera serta oleh kerak bumi *intermediate* (*intermediate crust*). Daerah di bagian tengah tersebut dikenal juga sebagai daerah transisi.

Sementara itu, Pulau Sulawesi merupakan pusat benturan ketiga lempeng kerak bumi. Pulau ini seakan cirobek oleh berbagai patahan (*faulting*) dan sesar (*thrusting*) dimana berbagai jenis batuan tercampur sehingga posisi stratigrafinya menjadi sangat rumit. Oleh karena itu, pulau ini memiliki empat buah lengan yang dikenal dengan sebutan Lengan Selatan, Lengan Utara, Lengan Timur, dan Lengan Tenggara. Lengan Utara merupakan Sulawesi *volcanic arc* yang terbentuk sejak zaman neogen akhir (5,44 juta tahun lalu) hingga sekarang dan berkaitan dengan palung subduksi. Lengan Timur dan Lengan Tenggara ditempati oleh jalur batuan ophiolit (*Eastern Sulawesi ophiolite*) dan juga terdapat batuan lain yaitu mandala benua



pindahan (*allocthonous continental terrains*) sekalipun dengan ukuran yang kecil. Dengan kata lain, keempat lengan tersebut memiliki sejarah geologi yang kompleks dimana dicirikan oleh proses tektonik yang berbeda satu dengan yang lainnya. Pulau ini dan kepulauan Banggai-Sula merupakan kesatuan mosaik geologi yang disatukan oleh proses tumbukan (*collision*). (Bock, 2003).



Gambar 1. Peta tektonik kepulauan Indonesia dan sekitarnya (Bock et al., 2003)

Dampak dari benturan antar lempeng kerak bumi yang berbeda jenis tersebut menimbulkan terjadinya penimbunan energi (*stress energy*) di dalam fitur-fitur geologi dan dalam kurun waktu tertentu dimana akan dilepaskan secara tiba-tiba dengan nilai besaran gempa yang beragam. Potensi-potensi gempa bumi yang besar (> 7.5) tersebut dapat terjadi di sepanjang batas lempeng kerak bumi (Ruff dan Kanamori, 1983 dan McCann et al., 1987).

Provinsi Papua yang terletak di bagian barat Pulau Nugini sering dipertimbangkan sebagai salah satu daerah yang memiliki kondisi tektonik yang kompleks di dunia. Hal ini diakibatkan benturan dengan sudut miring antara lempeng Samudera Pasifik-Lempeng Caroline yang bergerak ke selatan dengan kecepatan antara 110 mm – 125 mm/thn terhadap tepian lempeng Benua Australia. Dengan kata lain, dapat disimpulkan bahwa Parit Nugini merupakan fitur tektonik utama yang dapat menggambarkan batas antara Lempeng Pasifik dan Lempeng Australia. (Irsyam et al., 2010)

Deformasi

Deformasi adalah perubahan kedudukan/pergerakan secara absolut atau relatif dari posisi suatu materi atau perubahan kedudukan dalam dimensi yang linier. Deformasi merupakan perubahan bentuk materi yang terbagi dalam tiga fenomena, yaitu:

- (1) Sekular (perubahan linier, lambat dan merambat)
- (2) Periodik (perubahan mempunyai selang waktu antara detik sampai perubahan tahun)
- (3) Episodik (perubahan secara tiba-tiba dan cepat)

Reaksi materi bumi terhadap gaya deformasi adalah sebagai medium visco-elastic yang bergantung dari frekuensi gaya deformasi. Untuk periode yang pendek dan cepat, reaksi materi bumi akan bersifat elastis. Sedangkan untuk perubahan sekular, reaksi materi bumi akan bersifat viscous/plastis (melekat). Gaya-gaya yang menyebabkan deformasi baik dalam arah vertikal, horizontal maupun medan gravitasi bumi meliputi gaya pasang surut, rotasi bumi serta



gerakan polar, deformasi muatan kerak bumi, deformasi tektonik, deformasi episodik dan deformasi *ground compaction* yang terjadi pada atau dekat permukaan (Barian, 2006). Yang menjadi parameter-parameter deformasi yaitu :

- (1) Translasi
- (2) Rotasi
- (3) Dilatasi (regangan)

Survei Geodetik untuk sesar aktif

Survei deformasi dapat dilakukan dalam berbagai metoda seperti metoda fotogrametri, metoda terestrik, atau dengan metoda GPS positioning. Metode GPS positioning menggunakan jaringan kerangka dasar horizontal dan vertical. Untuk pemantauan deformasi tersebut terdapat dua jenis jarring yang dapat digunakan, yaitu :

- (1) Jaring Absolut
Titik-titik ikat yang digunakan sebagai titik acuan terletak di luar area objek pengamatan deformasi, dimana posisinya dianggap stabil.
- (2) Jaring Relatif
Titik-titik ikat yang digunakan sebagai titik acuan terletak di dalam area objek pengamatan deformasi

Pada jaring absolut pencentuan perubahan status geometri dari suatu materi beracuan pada hasil pengamatan geodetik objek terhadap titik ikat yang sifatnya stabil. Keuntungan dari jaring absolut ini adalah kemudahan perhitungan perubahan yang terjadi. Sedangkan hambatannya adalah dibutuhkan survei penentuan titik ikat yang dianggap stabil. Sedangkan untuk jaring relatif, masalah yang dihadapi untuk perhitungan perubahan yang ada lebih kompleks. Hal ini disebabkan posisi titik ikat yang digunakan terletak di dalam area pengamatan, sehingga titik ikat tersebut mengalami perubahan pola. Keuntungan dari jaring ini adalah tidak diperlukannya survei tambahan untuk penentuan titik ikat.

Dalam kaitannya dengan potensi kegempaan yang diakibatkan aktivitas patahan aktif di daratan karena adanya dinamika bumi (geodinamika), maka survei GPS merupakan salah satu metode yang sering digunakan dalam analisa deformasi. Dengan metoda tersebut mencoba untuk mempelajari dan mengamati pola serta kecepatan pergerakan yang terjadi pada sebuah blok kerak bumi. Dan untuk menghasilkan pola dan kecepatan pergerakan tersebut diperlukan informasi posisi yang teliti dan akurat dari titik-titik pengamatan di permukaan bumi. Salah satu perangkat teknologi yang dapat memberikan informasi tersebut adalah teknologi *Global Positioning System (GPS)*. Sehingga survei GPS dapat menjadi salah satu acuan dalam studi geodinamika untuk mengamati pola dan perubahan arah pergerakan blok kerak bumi dalam menganalisa karakteristik patahan aktif di permukaan bumi.

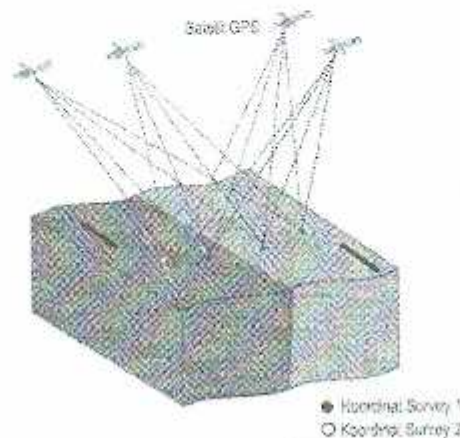
Dengan pengamatan satelit GPS (Gambar 2), para pengguna GPS dapat memperoleh informasi mengenai posisi secara akurat di permukaan bumi. Informasi lainnya yang dapat diperoleh dari pengamatan GPS adalah informasi mengenai kecepatan, arah, jarak dan waktu. Pada dasarnya sinyal GPS terdiri dari 3 komponen [Abidin, 2000], yaitu :

- Penginformasian jarak (kode) berupa kode-P dan kode-C/A
- Pesan navigasi yang berisi informasi mengenai satelit dan orbit
- Gelombang pembawa (L1 dan L2) yang berfungsi membawa data kode dan pesan navigasi

Dari ketiga komponen tersebut di atas terdapat dua data pengamatan dasar GPS yaitu waktu tempuh dari kode-P dan kode-C/A dan fase dari gelombang L1 dan L2. Waktu tempuh tersebut akan menghasilkan jarak *pseudorange*, sedangkan fase adalah data pengamatan GPS



berupa jumlah gelombang penuh yang terhitung sejak saat pengamatan dimulai dan data fase ini yang digunakan dalam aplikasi-aplikasi yang menuntut ketelitian posisi yang sangat tinggi. Dalam kaitannya dengan deformasi akibat pergerakan kerak bumi, perubahan atau pergerakan yang dimaksud adalah perubahan atau pergerakan titik-titik pengamatan yang diletakkan di sekitar daerah-daerah patahan aktif yang diperkirakan berpotensi terjadi gempa bumi.



Gambar 2. Ilustrasi pengamatan GPS (Abidin, 2000)

Dalam proses pengamatan deformasi untuk mengetahui pola dan kecepatan perubahan blok kerak bumi dapat dilakukan dengan survei GPS terhadap titik-titik pengamatan baik secara episodik maupun kontinu. Pengamatan dengan metode episodik adalah pengamatan yang dilakukan secara berkala dalam selang waktu tertentu sedangkan dengan metode kontinu pengamatan dilakukan terus-menerus secara otomatis, dimana perangkat GPS disimpan di lokasi titik pengamatan.

Model Sumber Gempa Sesar (*Fault*)

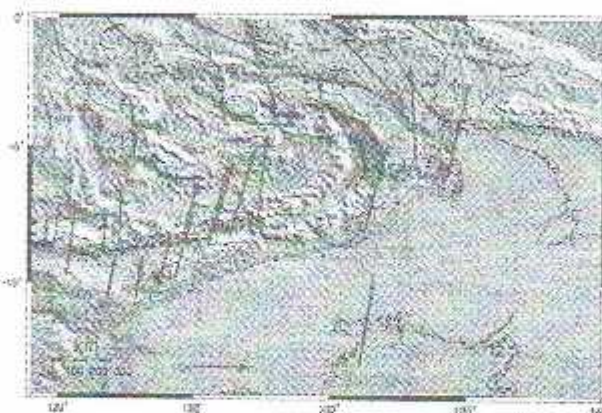
Model sumber gempa *fault* ini juga disebut sebagai sumber gempa tiga dimensi karena dalam perhitungan probabilitas jarak, yang dilibatkan adalah jarak dari *site* ke *hypocenter*. Jarak ini memerlukan data *dip* dari *fault* yang akan dipakai sebagai perhitungan probabilitas tersebut. Parameter-parameter yang diperlukan untuk analisis probabilitas dengan model sumber gempa sesar adalah *fault trace*, mekanisme pergerakan, *slip-rate*, *dip*, panjang dan lebar *fault*.

Penentuan lokasi sesar (*fault trace*) ini berdasarnya dari data-data peneliti yang sudah dipublikasi yang kemudian di *trace* ulang dengan menggunakan data *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) yang berbentuk peta geomorfologi dan data gempa historis yang sudah direlokasi. Dari hasil *trace* ini didapatkan panjang dari sesar yang dicari. Data-data yang lain didapatkan dari referensi yang sudah dipublikasi dan hasil diskusi dengan para ahli geologi, geofisika, geodinamika dan seismologi.

Besar dan arah pergeseran permukaan (*slip-rate*) bisa didapat melalui metoda survei GPS dengan pengamatan secara teliti di posisi titik-titik dalam suatu jaring secara kontinu ataupun berkala. Contoh model analisis pergeseran permukaan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu di sekitar laut Banda. (Gambar 3).

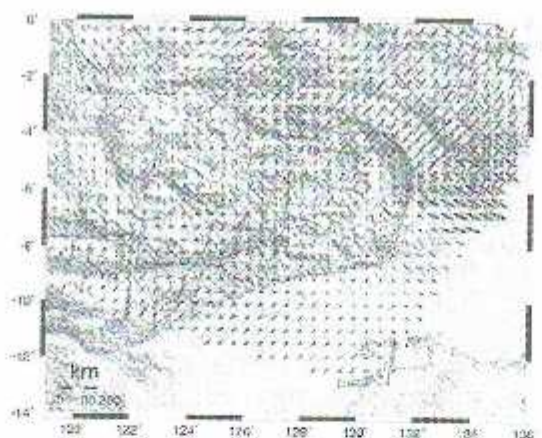
Dengan memilih konsep model yang dibuat Okada, 1985, memodelkan hubungan antara pergeseran pada bidang sistem *fault* dengan pergeseran yang terjadi di permukaan bumi, dengan mengasumsikan kerak bumi sebagai medium homogen dan *isotropic*, dengan menggunakan formulasi matematis yang menggunakan teori *elastic half space model*.





Gambar 3. Pergeseran permukaan di sekitar Laut Banda (Genrich *et al.*, 1996, Rangin *et al.*, 1999, Stevent *et al.*, 2002, Socquet *et al.*, 2006 dan Nugroho *et al.*, 2009)

Data-data yang diperoleh dari hasil pengukuran GPS pada titik-titik yang telah dipilih dapat digunakan untuk memahami pola dan kecepatan perubahan koordinat dari titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, sehingga dari hasil ini dapat diketahui karakteristik deformasi dan geodinamika sesar yang dikaji berdasarkan hasil hitungan dan model matematis yang berupa analisis regangan tektonik (Gambar 4).



Gambar 4. Regangan Tektonik di sekitar Laut Banda yang diturunkan dari data pergeseran permukaan (meilano, 2010).

Sistem Sesar (*Fault System*)

Batas lempeng dalam skala yang lebih kecil dikenal sebagai sesar yang merupakan suatu batas yang menghubungkan 2 Blok tektonik yang berdekatan [Puspito, 2000]. Bidang sesar (*fault plane*) adalah sebuah bidang yang merupakan bidang kontak antara 2 blok tektonik. Pergeseran bidang sesar dapat berkisar dari antara beberapa meter sampai mencapai ratusan kilometer. Sesar merupakan jalur lemah, dan lebih banyak terjadi pada lapisan yang keras dan rapuh. Bahan yang hancur pada jalur sesar akibat pergeseran, dapat berkisar dari *gouge* (suatu bahan yang halus/lumat akibat gesekan) sampai breksi sesar, yang mempunyai ketebalan antara beberapa centimeter sampai ratusan meter (lebar zona hancuran sesar).



Terdapat dua unsur pada sesar yaitu *hanging Wall* (atap sesar) dan *Foot Wall* (alas sesar). *Hanging Wall* (atap sesar) adalah bongkah sesar yang terdapat di bagian atas bidang sesar, sementara itu *foot Wall* (alas sesar) adalah bongkah sesar yang berada di bagian bawah bidang sesar. Bidang sesar terbentuk akibat adanya rekahan yang mengalami pergeseran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan aktivitas sesar dapat diketahui dengan menggunakan teori dislokasi elastis dengan asumsi bahwa kerak bumi adalah bersifat homogen, isotropis, linier dan elastis dengan metode *half space solution* (Segall, 2010).

Pada studi deformasi kerak bumi (geodinamika), metode survei GPS memberikan beberapa keunggulan, antara lain :

- (1) GPS mampu memberikan nilai vektor pergeseran dalam tiga dimensi sehingga dapat memberikan informasi pergerakan titik-titik pengamatan baik dalam arah horizontal maupun dalam arah vertikal
- (2) GPS memberikan nilai vektor pergeseran dalam suatu sistem referensi yang tunggal
- (3) GPS mampu memberikan nilai vektor pergeseran yang teliti sampai dengan fraksi millimeter

KESIMPULAN

Dimana tempat biasa terjadinya gempa bumi alamiah yang cukup besar, berdasarkan hasil penelitian, para peneliti kebumihan menyimpulkan bahwa hampir 95 persen lebih gempa bumi terjadi di daerah batas antar lempeng kerak bumi dan di daerah sesar [Mori, 2004]. Gempa bumi yang terjadi di daerah sesar dapat melahirkan sejumlah bencana, misalnya korban jiwa, kerusakan pada berbagai struktur bangunan, longsor, dan lain-lain. Korban jiwa bisa mencapai puluhan bahkan ratusan ribu jiwa, dan kerugian materi.

Penentuan waktu datangnya gempa bumi, peramalan kapan gempa akan datang, masih merupakan impian para ilmuwan. Bahkan sebagian dari mereka sudah tidak begitu optimis manusia dapat meramalkan datangnya gempa bumi. Namun demikian, bekal informasi dimana daerah potensi gempa, dan perkiraan besarnya gempa yang terjadi merupakan suatu pencapaian yang cukup berarti dalam upaya mitigasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Brahmantyo, B., 2005, *Geologi Cekungan Bandung*, Departemen Teknik Geologi Institut Teknologi Bandung.
- Fajriyanto dkk., 2013, *Estimasi Laju Geser dan Pembuatan Model Deformasi di Selat Sunda dengan menggunakan GPS Kontinyu*. Departemen Teknik Sipil Universitas Lampung.
- Dewi, Oktavia., 2010, *Tingkat Regangan dan Implikasinya terhadap Potensi Kegempaan di Jawa Bagian Barat berdasarkan Pengamatan GPS tahun 200-2010*, Departemen Teknik Geodesi Institut Teknologi Bandung.
- Hasanuddin, Z. Abidin, Meilano, i., 2009, *Crustal Deformation Studies in Java (Indonesia Using GPS, Journal of Earthquake and Tsunami*.
- Zulfakriza., 2010, *Estimasi Laju Geser dan Kedalaman Sumber Gempa pada Patahan Aktif berdasarkan Survey GPS untuk Analisis Bahaya Kegempaan di Provinsi Aceh*, Departemen Teknik Geodesi Institut Teknologi Bandung

