



# Pengaruh Ketebalan Terhadap Deformasi Akibat Gempa Bumi Besar (Studi Kasus: Gempa Bumi dengan Kekuatan Mw 8,5)

Erlan Sumanjaya, Rida Samdara dan Ashar Muda Lubis\*

\*corresponding author. Email: asharmudalubis@yahoo.com

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Bengkulu, Indonesia

Diterima 23 November 2015; Disetujui 20 Desember 2015

**Abstrak** - Pengaruh ketebalan terhadap deformasi telah dilakukan pada lapisan litosfer dengan nilai ketebalan mulai dari 35 km hingga 70 km. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh ketebalan terhadap pola deformasi. Penelitian ini menggunakan *grid search method*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai ketebalan pada komponen  $x$  semua bergerak kearah barat sedangkan komponen  $y$  semua bergerak kearah selatan. Akan tetapi besar pergerakan antara ketebalan satu dengan ketebalan yang lain berbeda-beda. Selain itu hal serupa ditunjukkan pada komponen  $z$  atau komponen vertikal dimana pola yang didapat menunjukkan mayoritas bergerak turun dengan tajam sekali namun pada ketebalan 35 km terlihat bergerak naik walaupun cukup kecil. Perlakuan diatas menunjukkan bahwa setiap nilai ketebalan yang diestimasi mempunyai pola dan besar deformasi yang berbeda-beda. Oleh karena itu terlihat adanya pengaruh ketebalan terhadap deformasi

**Kata Kunci:** ketebalan litosfer, deformasi, *grid search method*.

## 1. Pendahuluan

Peristiwa gempa bumi besar merupakan suatu peristiwa dimana bergetarnya bumi akibat pelepasan energi didalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempa bumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan di pancarkan kesegala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga dampaknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi [1]. Sementara itu, akibat energi yang ditimbulkan sangat luar biasa sehingga menimbulkan deformasi elastik saat terjadi gempa bumi. Seiring bertambahnya waktu, perubahan deformasi yang dihasilkan pasca gempa bumi diikuti dengan deformasi post-seismic [2].

Perubahan deformasi yang demikian sangat penting dalam mengetahui proses atau mekanisme terjadinya gempa bumi serta dapat menggambarkan kondisi material suatu daerah. Sebelumnya [3] telah melakukan penelitian mengenai pengaruh viskositas pada bagian astenosfer terhadap deformasi akibat gempa bumi dengan kekuatan Mw 8,5. Mereka mengestimasi viskositas dari  $1 \times 10^{17}$  Pa.s sampai  $1 \times 10^{21}$  Pa.s. Berdasarkan estimasi

tersebut diperoleh bahwa betapa signifikannya viskositas dalam mempengaruhi deformasi hal ini terlihat dari pola yang terbentuk pasca gempa bumi. Dalam penelitian ini difokuskan untuk melihat pengaruh ketebalan terhadap deformasi mengingat bahwa bumi terdiri dari struktur atau susunan yang berlapis-lapis. Keberadaan lapisan ini berkaitan erat dengan perubahan temperatur dan tekanan yang semakin tinggi kearah pusat bumi.

Disamping itu, menurut [4] yang erat kaitannya dengan proses gempa bumi adalah pada lapisan litosfer dan dibagian ini suhu bumi tidak melebihi dari 300-400°C yang menjadi persyaratan utama untuk terjadi proses deformasi elastik yang menimbulkan gempa bumi. Oleh karena ketebalan pada lapisan litosfer memiliki peranan dalam terbentuknya deformasi sehingga perlu dilakukan penelitian bagaimana pengaruh ketebalan terhadap deformasi pada kasus gempa bumi besar dengan kekuatan Mw 8,5.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh ketebalan terhadap perubahan deformasi mengingat setiap tempat mempunyai susunan atau struktur pembentuk material yang berbeda-beda. Hasil dari penelitian ini juga dapat

digunakan sebagai dasar referensi dalam penentuan ketebalan yang baik pada suatu daerah disekitar zona subduksi.

### 2. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menggunakan metode *grid search method* dalam menentukan model untuk beberapa nilai viskositas terhadap pola deformasi. Penelitian ini mengikuti garis besar dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Membuat model struktur lapisan dengan menginput kecepatan gelombang primer, gelombang sekunder, densitas batuan dan ketebalan lapisan litosfer.

Untuk lapisan elastik

$$\begin{cases} u_r^E(r, \varphi, z, t; j; \mu_1, \gamma_1) = H(t) \frac{\Delta u}{4\pi} \left[ \int_0^\infty Y_1^E(z; \xi; j; \mu_1, \gamma_1) \partial_r J(r, \varphi; \xi) d\xi + \int_0^\infty Y_1^E(z; \xi; j; \mu_1) \frac{1}{r} \partial_\varphi J'(r, \varphi; \xi) d\xi \right] \\ u_\varphi^E(r, \varphi, z, t; j; \mu_1, \gamma_1) = H(t) \frac{\Delta u}{4\pi} \left[ \int_0^\infty Y_1^E(z; \xi; j; \mu_1, \gamma_1) \frac{1}{r} \partial_\varphi J(r, \varphi; \xi) d\xi - \int_0^\infty Y_1^E(z; \xi; j; \mu_1) \partial_r J'(r, \varphi; \xi) d\xi \right] \\ u_z^E(r, \varphi, z, t; j; \mu_1, \gamma_1) = H(t) \frac{\Delta u}{4\pi} \int_0^\infty Y_2^E(z; \xi; j; \mu_1, \gamma_1) J(r, \varphi; \xi) d\xi \end{cases} \quad (1)$$

Untuk lapisan viskoelastik

$$\begin{cases} u_r^\square(r, \varphi, z, s; j) = \frac{\Delta u}{4\pi} \left[ \int_0^\infty Y_1^\square(z, s; j) \partial_r J(r, \varphi) d\xi + \int_0^\infty Y_1^\square(z, s; j) \frac{1}{r} \partial_r J'(r, \varphi) d\xi \right] \\ u_\varphi^\square(r, \varphi, z, s; j) = \frac{\Delta u}{4\pi} \left[ \int_0^\infty Y_1^\square(z, s; j) \frac{1}{r} \partial_\varphi J(r, \varphi) d\xi - \int_0^\infty Y_1^\square(z, s; j) \partial_r J'(r, \varphi) d\xi \right] \\ u_z^\square(r, \varphi, z, s; j) = \frac{\Delta u}{4\pi} \int_0^\infty Y_2^\square(z, s; j) J(r, \varphi) d\xi \end{cases} \quad (2)$$

Dimana sudut kemiringan  $\theta$  dan *slip angle*  $\chi$ . Disini,  $H(t)$  merupakan *unit step function*. Sementara itu deformasi untuk komponen elastik  $u_i^E (i = r, \varphi, z)$  dan deformasi viskoelastik  $\tilde{u}_i (i = r, \varphi, z)$ .  $J_k(\xi r)$  merupakan fungsi Bessel dan  $Y^E$  dan  $Y'^E$  merupakan kernel matriks yang dapat dilihat pada Lampiran 1.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil-hasil yang diperoleh pada penelitian ini ditampilkan pada gambar 1. Pada gambar 1 terlihat bahwa bagian a dan b merupakan komponen horizontal kemudian bagian c merupakan komponen vertikal. Estimasi ketebalan yang diperlihatkan mulai dari 35 km sampai 70 km yang dapat dilihat dari pola warna yang ditampilkan pada Gambar 1.

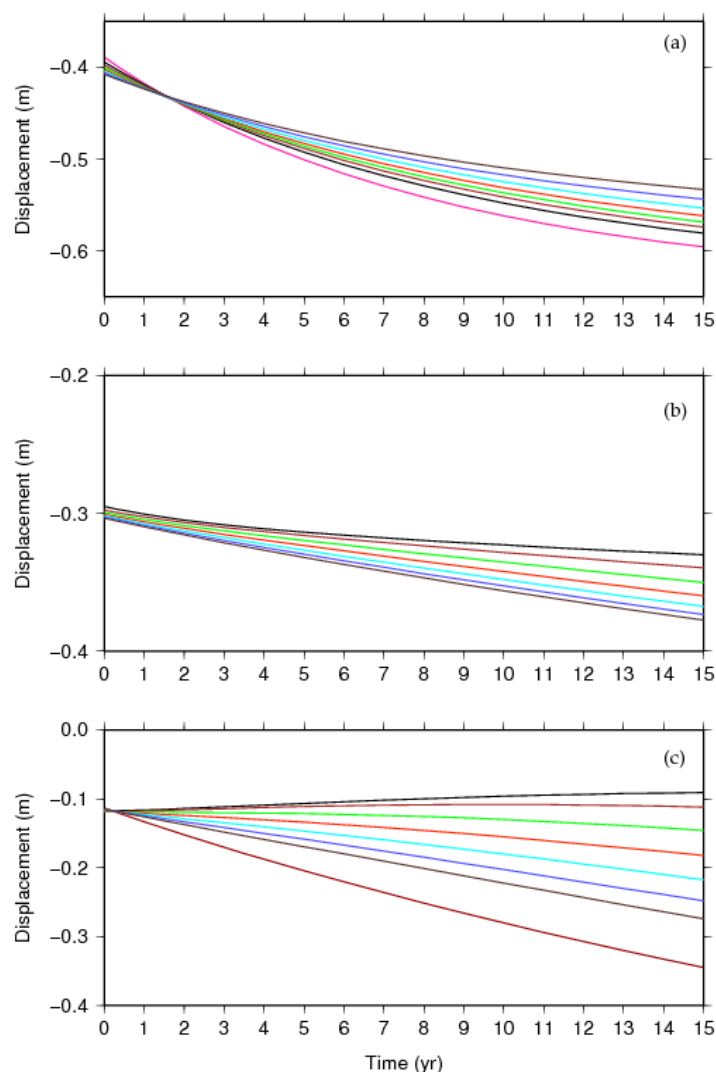
2. Menginput source model seperti *strike, slip, rake* dan *dip*.
3. Membuat estimasi ketebalan dari 30-70 km dan dengan nilai viskositas sebesar  $5 \times 10^{18}$  Pa.s.
4. Menggunakan *source model* GNS Broadband dimana source model tersebut meliputi beberapa parameter seperti *dip, slip, rake* dan *strike*.

Untuk menghitung deformasi digunakan persamaan yang telah diungkapkan oleh [5]

Berdasarkan gambar tersebut dapat dicermati bahwa untuk setiap ketebalan yang diestimasi mempunyai besar deformasi yang berbeda-beda. Untuk komponen arah  $x$ , pola deformasi yang terbentuk bergerak kearah barat sedangkan untuk komponen arah  $y$ , pola deformasi yang terbentuk seluruhnya bergerak kearah selatan. Sementara itu, pada komponen vertikal atau komponen  $z$  yang menandakan permukaan naik atau turun dapat diketahui bahwa hampir semua estimasi bergerak turun mencapai 25 cm, namun ada juga yang bergerak naik walaupun cukup kecil sekitar 3 hingga 5 cm yang terdapat pada ketebalan 35 km dan 40 km. Melihat kenyataan tersebut dapat dicermati bahwa setiap ketebalan mempunyai pola dan besarnya tersendiri sehingga dapat mempengaruhi pola deformasi yang diakibatkan gempa bumi besar.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa deformasi *post-seismic* sangat dipengaruhi oleh ketebalan seperti [6,7], dimana mereka mengestimasi nilai ketebalan dari 50 km hingga 62 km untuk kasus gempa bumi 2004 Sumatra-Andaman Mw 9,2. Hasil model yang mereka dapatkan bahwa pada ketebalan 50 km yang memiliki konstrain yang baik dengan data observasi. Adapun [8] mengamati deformasi *post-seismic* dengan menggunakan data GRACE dan GPS untuk kasus gempa Sumatra-Andaman. Hasil yang mereka peroleh menunjukkan bahwa ketebalan yang didapatkan sebesar 60 km. Kemudian ketebalan 30 km di estimasi juga oleh [5] untuk melihat deformasi yang disebabkan oleh pergeseran sumber pada banyak lapisan.

Hal serupa dilakukan oleh [9], mereka memodelkan *post-seismic* deformation dengan membuat reologi lapisan menjadi 3 lapis. Lapisan pertama mereka sebut dengan *upper crust* (kerak bagian atas) [10] dengan tebal 0-15 km, kemudian *lower crust* (kerak bagian bawah) [11] 15-40 km dan *lithospheric mantle* [12] dengan ketebalan diatas 40-50 km. Hal ini mereka lakukan karena menganggap untuk dapat mengstimasi viskositas dari kerak bumi berdasarkan data inversi deformasi *post-seismic* tidak hanya terbatas pada ketebalan lapisan yang homogen namun perlu diperhitungkan juga pada lapisan yang lebih lunak.



Gambar 1. Pengaruh ketebalan terhadap deformasi. Warna garis pada gambar yang ditampilkan merupakan deskripsi dari variasi ketebalan yang digunakan. Merah muda = 35 km, hitam = 40 km, coklat = 45 km, hijau = 50 km, orange red = 55 km, cyan = 60 km, neon blue = 65 km dan dark brown = 70 km.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan estimasi ketebalan yang diterapkan pada kasus gempa bumi besar maka dapat dilihat bahwa ketebalan pada lapisan litosfer merupakan salah satu parameter yang sangat krusial menentukan pola deformasi. Hal ini ditandai dengan adanya perbedaan antara ketebalan satu dengan ketebalan yang lain secara signifikan yang dapat dilihat dari besar deformasi yang dihasilkan baik dalam arah horizontal maupun vertikal.

#### Daftar Pustaka

- [1] Natawidjaja, D.H., Sieh, K., Galetzka, J., Suwargadi, B.W., Cheng, H., Edwards, R.L., Chlieh, M., 2007. Interseismic deformation above the Sunda Megathrust recorded in coral microatolls of the Mentawai islands, West Sumatra, *J. Geophys. Res.*, 112, B02404, doi: 10.1029/2006JB004450.
- [2] Lubis, A.M., Hashima, A. dan Sato, T., 2013. *Analysis of afterslip distribution following the 2007 September Southern Sumatra earthquake using poroelastic and viscoelastic media. Geophys. J. Int.*, 192,18-37. doi: 10.1093/gji/ggs020.
- [3] Sumanjaya, E., Rida, S., dan Lubis, A.M., 2016. Pengaruh viskositas terhadap deformasi akibat gempa bumi besar (studi kasus: gempa bumi dengan kekuatan  $M_w$  8,5). *J. Gradien. vol 11 no. 2*.
- [4] Natawidjaja, D.H., Sieh, K., Galetzka, J., Suwargadi, B.W., Cheng, H., Edward, R.L., Chlieh, M., 2006. *Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls, J. Geophys. Res.*, 111, B06403, doi:10.1029/2005JB004025.
- [5] Fukahata, Y., dan Matsu'ura, M., 2006. *Quasi-static intrnal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and equivalence theorem. Geophys. J. Int.*, 166, 418-433. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02921.x.
- [6] Pollitz, F.F., Burgmann, R dan Banerjee, P ., 2006. *Post-seismic relaxation following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake on a compressible self-gravitating Earth*, *Geophys. J. Int.*, 167(1), 397-420, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03666.x.
- [7] Pollitz, F.F., Banerjee, P., Grijalva, K., Nagarajan, B dan Burgmann, R., 2008. *Effect of 3-D viscoelastic structure on post-seismic relaxation from the 2004  $M_w = 9,2$  Sumataraearthquake*, *Geophys. J. Int.*, 173(1), 189-204, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03666.x.
- [8] Panet, I., Pollitz, F.F., Mikhailov, V., Diament, M., Banerjee, P. dan Grijalva, K., 2010. *Upper mantle rheology from GRACE dan GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake*, *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 11, Q06008, doi: 10.1029/2009GC002905.
- [9] Riva, R.E.M., dan Gover, R., 2000. *Relating viscosities from post-seismic relaxation to a realistic viscosity structure for the litosphere. Geophys. J. Int.*, 142, 000-000.
- [10] Shelton, G.L., Tullis, J., dan Tullis, T., 1981. *Experimental high-temperature and high- pressure faults. J. Geophys. Res. Lett.*, 8(1). 55-58.
- [11] Kirby, S.H., 1983. *Rheology of the litosphere, Rev. Geophys.*, 21(6). 1458-1487.
- [12] Karato, S.I., Paterson, M.S dan Fitzgerald, J.D. 1986. *Rheology of synthetic olivine aggregates: influence of grain size and water, J. Geophys. Res.*, 91. 8151-8176.

**Lampiran 1**

Pers. (1) yang telah diungkapkan oleh [5] dapat diketahui bahwa huruf E yang ditulis diatas menunjukkan jumlah

penyelesaian elastik terkait.  $J$  dan  $J'$  yang tidak bergantung- $z$  dapat didefinisikan sebagai:

$$J(r, \varphi; \xi) = \begin{pmatrix} a_0(\varphi)J_0(\xi r) \\ a_1(\varphi)J_1(\xi r) \\ a_2(\varphi)J_2(\xi r) \end{pmatrix}, J'(r, \varphi; \xi) = \partial_\varphi \begin{pmatrix} a_1(\varphi)J_1(\xi r) \\ a_2(\varphi)J_2(\xi r) \end{pmatrix} \tag{3}$$

dengan

$$\begin{cases} a_0(\varphi) = \frac{1}{4} \sin \chi \sin 2\theta \\ a_1(\varphi) = -\sin \chi \cos 2\theta \sin \varphi + \cos \chi \cos \theta \cos \varphi \\ a_2(\varphi) = \frac{1}{4} \sin \chi \sin 2\theta \cos 2\varphi + \frac{1}{2} \cos \chi \sin \theta \sin 2\varphi \end{cases} \tag{4}$$

disini,  $J_k(\xi r)$  merupakan fungsi Bessel dalam  $k.Y_k^E(k = 1,2,3,4)$  dan  $Y_k'^E(k = 1,2)$  merupakan kernel vectors yang bergantung- $z$  dengan mengubah  $4 \times 3$  dan

$2 \times 2$  perubahan matriks  $Y^E$  dan  $Y'^E$ , masing-masing menjadi:

$$Y^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) = \begin{pmatrix} Y_1^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) \\ Y_2^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) \\ Y_3^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) \\ Y_4^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) \end{pmatrix}, Y'^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) = \begin{pmatrix} Y_1'^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) \\ Y_2'^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) \end{pmatrix} \tag{5}$$

Selanjutnya faktor  $\xi$  dihilangkan agar menjadi lebih sederhana. Untuk memperoleh matriks deformasi seperti ini digunakan *downgoing algorithm* untuk  $z <$

*dan upgoing algorithm* untuk  $z > d$  untuk menekan ketidakstabilan. Kemudian, matriks deformasi dapat diungkapkan sehingga membentuk:

$$\begin{cases} Y^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) = \exp(-q\xi) s_{jm}(z; \mu_1, \gamma_1) + \delta_{nj} \delta_{nm} \exp(-|z-d|\xi) Y^s(z; \gamma_n) \\ Y'^E(z; j; \mu_1) = \exp(-q\xi) s'_{jm}(z; \mu_1) + \delta_{nj} \delta_{nm} \exp(-|z-d|\xi) Y'^s(z) \end{cases} \tag{6}$$

dengan

$$q = \begin{cases} |z-d| & (j \neq n) \text{ atau } (m \neq n) \\ z+d-2H_{n-1} & (j = m = n) \end{cases} \tag{7}$$

Dimana  $\delta_{nj}$  dan  $\delta_{nm}$  sebagai *Kronecker delta*.

Berdasarkan pers.(2) diketahui bahwa:

$$\begin{cases} Y_k^\square(z, s; j) = \frac{1}{s} Y_k^E(z; j; \mu_1, \gamma_1) & (k = 1, 2, 3, 4) \\ Y_k'^\square(z, s; j) = \frac{1}{s} Y_k'^E(z; j; \mu_1) & (1, 2) \end{cases} \tag{8}$$

dengan

$$\gamma(s) = \frac{\gamma_l s + k_l}{s + k_l} \tag{9}$$

dan

$$k_l = \frac{4\gamma_l - 1}{3\tau_l} \tag{10}$$

Disini, dapat diasumsikan lapisan  $ke-j$  merupakan elastik. Diperlihatkan pada bagian

selanjutnya,  $Y_k^E(z; j; \hat{\mu}_l, \hat{\gamma}_l)$  dan

$Y_k^{(l)E}(z; \hat{\mu}_l, \hat{\gamma}_l)$  dalam pers. (2.14) dapat

diungkapkan sebagai fungsi rasional dari transformasi Laplace dengan variabel dalam domain  $s$  pada bentuk berikut:

$$Y_k^{(l)E}(z; j; \hat{\mu}_l, \hat{\gamma}_l) = \frac{\sum_{i=0}^M a^{(i)} s^i}{\sum_{i=0}^M b^{(i)} s^i} \quad (11)$$

dengan

$$\frac{a^{(M)}}{b^{(M)}} = Y_k^{(l)E}(z; j; \hat{\mu}_l, \hat{\gamma}_l) \quad (12)$$

$$Y_k^{(l)E}(z, s; j) = \frac{1}{s} Y_k^{(l)E}(z; j; \mu_l, \gamma_l) - \sum_{i=1}^M c_i \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s-d_i} \right) \quad (13)$$

dimana

$$c_i = \frac{1}{b^{(m)} d_i} \prod_{l=1(l \neq i)}^M \frac{1}{(d_i - d_l)} \sum_{l=0}^M a^{(l)} d_i^l \quad (14)$$

dan  $d_i$  merupakan akar-akar dari pers. aljabar  $\sum_{i=0}^M b^{(i)} s^i = 0$ , yang selalu bernilai negatif.

Operasi dari invers transformasi Laplace pada  $\tilde{Y}_k^{(l)}$  diperoleh:

$$Y_k^{(l)}(z, t; j) = H(t) \left[ Y_k^{(l)E}(z; j; \mu_l, \gamma_l) - \sum_{i=1}^M c_i \{1 - \exp(d_i t)\} \right] \quad (15)$$

dengan mengganti  $\tilde{Y}_k^{(l)}(z, s; j)$  ke dalam pers.

(2) dan  $Y_k^{(l)}(z, t; j)$  ke dalam pers. (15) maka diperoleh komponen deformasi viskoelastik  $u_i(i = r, \varphi, z)$  dalam domain waktu.