

Karakterisasi sumber gempa Yogyakarta 2006 berdasarkan data GPS

CECEP SULAEMAN¹, LESTARI CENDEKIA DEWI² dan WAHYU TRIYOSO²

¹Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi,
Jl. Diponegoro No. 57 Bandung

²Program Studi Sains Kebumihan Fakultas Ilmu Kebumihan
dan Teknik Mineral ITB, Jl. Ganesa No. 10 Bandung

SARI

Jawa Tengah bagian selatan merupakan salah satu wilayah rawan gempa bumi di Indonesia. Pada 27 Mei 2006 Yogyakarta dan sekitarnya diguncang gempa bumi dengan kekuatan Mw 6,3.

Studi ini mengkaji karakterisasi gempa bumi Yogyakarta 2006 tentang posisi sumber gempa dan penyebabnya berdasarkan data pengamatan *Global Positioning System (GPS)*. Karakterisasi tersebut didapatkan dengan cara mengestimasi vektor perpindahan (*displacement*) dan *strain* di sekitar titik pengukuran dengan menggunakan metode *simple kriging* yang dipadukan dengan simulasi sekuensial gaussian.

Pola arah perpindahan dan pola arah anomali positif *strain* geser maksimum menunjukkan bahwa sesar berarah barat daya - timur laut. Pola perpindahan tersebut menunjukkan jenis sesar mendatar mengiri. Episentrum gempa bumi diduga berlokasi lebih kurang 10 km sebelah timur Bantul yang ditunjukkan oleh anomali positif *strain* geser maksimum. Berdasarkan luas *strain* geser maksimum, diperoleh nilai momen seismik sebesar $8,1385 \times 10^{25}$ dyne cm, dan momen magnitudo 6,5.

Kata kunci: data GPS, *simple kriging*, simulasi sekuensial gaussian, perpindahan, *strain*, posisi sumber gempa, momen seismik, momen magnitudo

ABSTRACT

The southern part of Central Java is one of earthquake hazard prone areas in Indonesia an earthquake occurred on May 27, 2006 and had the moment magnitude 6.3.

Base on the GPS observation, the characterization of the epicenter and source of this Yogyakarta earthquake can be estimated using the displacement estimation and strain at the measurement point by using a simple kriging and sequential gaussian simulation method.

The direction of the displacement and maximum shear strain anomaly in this research was shown by the fault of SW – NE direction and the displacement pattern shows that this fault is left lateral strike slip movement. The positive anomaly of the maximum shear strainis located about 10 km east of Bantul, which suggests as the position of Yogyakarta 2006 earthquake source, with the moment seismic and moment magnitude values are 8.1385×10^{25} dyne cm, and 6.5 respectively.

Keywords: *GPS data, simple kriging, sequential gaussian simulation, displacement, strain, earthquake source, moment seismic, moment magnitude*

PENDAHULUAN

Jawa Tengah bagian selatan, termasuk kota Yogyakarta dan sekitarnya, merupakan salah satu wilayah rawan gempa bumi. Tanggal 27 Mei 2006 terjadi gempa bumi di Yogyakarta dan sekitarnya,

termasuk di dalamnya wilayah Kabupaten Bantul, Klaten, Gunung Kidul, dan Kulon Progo. USGS mencatat gempa bumi tersebut terjadi pada pukul 05:53:58 WIB dengan posisi episentrum $7,97^{\circ}$ Lintang Selatan dan $110,44^{\circ}$ Bujur Timur, kedalaman 10 km, serta momen magnitudo 6,3 (<http://>

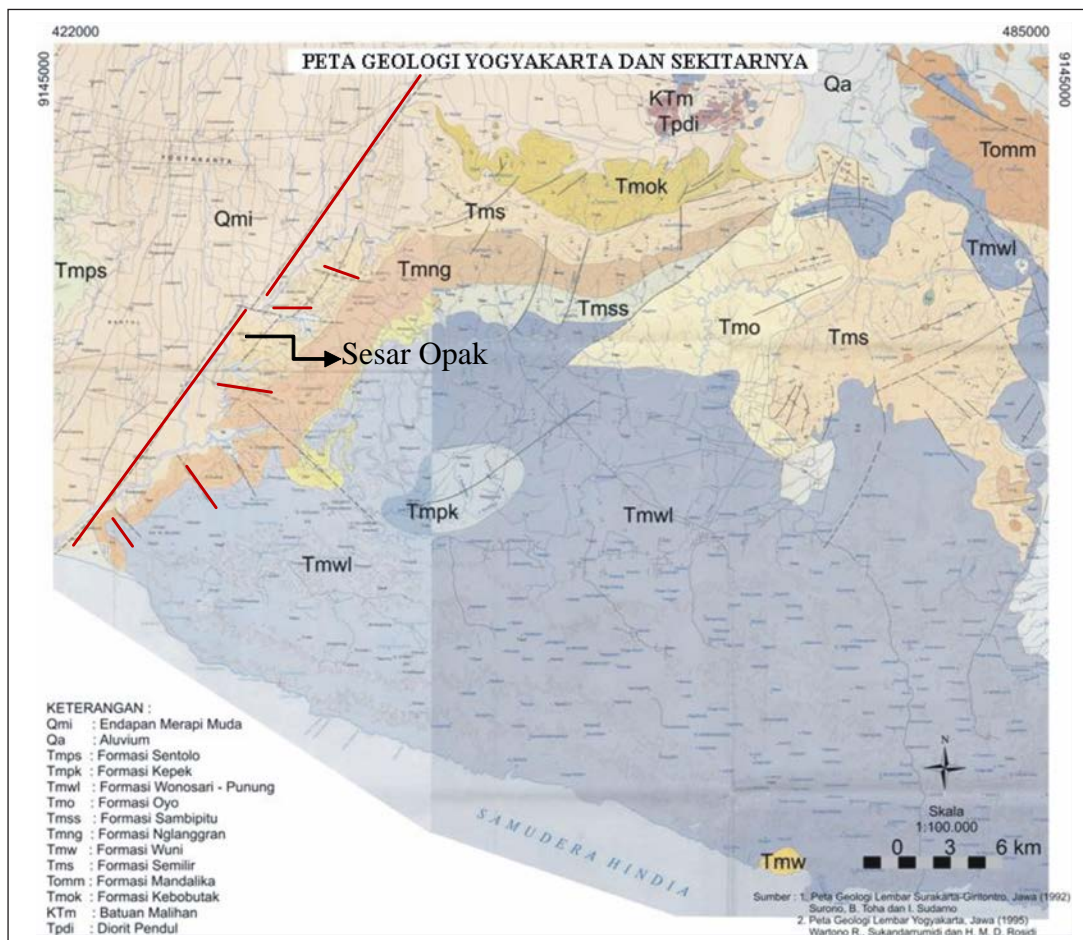
earthquake.usgs.gov/). Sementara lembaga lainnya, seperti BMG, mencatat gempa bumi tersebut terjadi pada pukul 05:53:58 dengan posisi episentrum 8,04° Lintang Selatan dan 110,43° Bujur Timur, kedalaman 33 km serta magnitudo 5,9 Mb (<http://www.bmg.go.id>). Sejarah mencatat sedikitnya empat kali gempa bumi merusak terjadi di wilayah Yogyakarta, yaitu tahun 1867, 1943, 1981, dan 2006 dengan intensitas maksimum antara VII hingga IX MMI (<http://vsi.esdm.go.id>).

Studi ini bertujuan membahas karakterisasi gempa bumi Yogyakarta 2006 tentang kisaran posisi sumber gempa bumi dan penyebabnya berdasarkan data GPS dengan metode geostatistik. Lokasi penelitian berada di Daerah Istimewa Yogyakarta bagian selatan sampai timur laut meliputi Kabupaten Bantul, Kabupaten Gunung Kidul hingga ke Kabupaten Klaten. Daerah tersebut berada pada

posisi geografi antara 110°15'BT–110°45'BT dan 7°45'LS – 8°5'LS.

Struktur yang berkembang di daerah penelitian adalah sesar utama berarah barat daya - timur laut yang dikenal dengan nama Sesar Opak (Gambar 1). Di sebelah timur Sesar Opak terdapat beberapa sesar berarah barat - timur. Daerah penelitian tersusun oleh batuan endapan Gunung Api Merapi Muda yang dilalui Sesar Opak, sedangkan di timur sesar tersebut tersusun oleh Formasi Semilir dan Formasi Nglanggran. Formasi Semilir terdiri atas perselingan antara breksi-tuf, breksi-batuapung, tuf dasit, dan tuf andesit serta batu lempung. Sementara Formasi Nglanggran terdiri atas formasi gunung api, breksi aliran, lava, dan tufaan (Wartono, 1995).

Penelitian meliputi estimasi vektor perpindahan dan *strain* di sekitar titik pengukuran memakai metode *simple kriging* yang dipadukan dengan simulasi



Gambar 1. Peta geologi Yogyakarta dan sekitarnya (Sumber: Wartono, 1995).

sekuensial gaussian. Selain itu, dilakukan estimasi nilai momen seismik dan magnitudo luas *strain* geser maksimum. Data yang diolah berupa vektor perpindahan hasil pengukuran GPS yang dilakukan seminggu setelah terjadi gempa (Abidin, 2006). Data ini merupakan medan vektor dua dimensi, yaitu perpindahan secara spasial mendatar sepanjang wilayah studi dengan komponen barat - timur disebut "u" dan komponen selatan - utara disebut "v". Data ini diasumsikan bersifat isotropis, artinya tidak bergantung pada arah.

Estimasi Vektor Perpindahan dan *Strain*

Titik estimasi di daerah penelitian ditentukan dengan cara membuat *grid* titik dengan jarak *grid* 2 km dalam arah horizontal. Di setiap titik *grid* tersebut diestimasi vektor perpindahan dan *strain* menggunakan metode *simple kriging* (geostatistik) yang dipadukan dengan teknik simulasi sekuensial gaussian. Pada teknik simulasi sekuensial gaussian, setiap titik yang sudah diestimasi dengan urutan acak selanjutnya dijadikan data baru untuk estimasi berikutnya. Estimasi dilakukan terhadap semua titik *grid* secara acak. Simulasi dilakukan berulang, kemudian hasilnya dirata-ratakan.

Secara matematis estimasi dengan *simple kriging* dapat ditulis:

$$Z_0 = w_1 Z_1 + w_2 Z_2 + \dots + w_n Z_n = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (1)$$

dengan Z_0 adalah nilai sebuah datum yang akan diestimasi, Z_i adalah nilai datum pada titik ke- i yang diketahui dari observasi, dan w_i adalah bobot untuk datum Z_i terhadap Z_0 , dengan $i = 1, 2, \dots, n$.

Nilai bobot w_i ditentukan dari kovarian. Dalam studi ini model kovarian yang paling cocok dengan data adalah model *Spherical*. Khusus untuk pasangan titik ukur berjarak nol, model kovarian yang dipilih adalah model Gaussian.

Strain didefinisikan sebagai gradien spasial medan perpindahan. *Strain* terdiri atas *strain* normal dan *strain* geser. Estimasi *strain* dapat diturunkan dari formula yang digunakan untuk mendapatkan estimasi perpindahan (Persamaan 1). Hal ini dilakukan setelah bobot untuk estimasi perpindahan dihitung terlebih dahulu. Formula estimasi *strain* hasil turunan dari estimasi perpindahan adalah sebagai berikut:

Strain normal untuk komponen vektor u dalam arah sumbu-x:

$$e_{xx} = \epsilon_{xx} = \frac{\partial Z_0^u}{\partial(x_i - x_j)} = \frac{\partial w_1^u}{\partial(x_i - x_j)} Z_1^u + \frac{\partial w_2^u}{\partial(x_i - x_j)} Z_2^u + \dots + \frac{\partial w_n^u}{\partial(x_i - x_j)} Z_n^u \quad (2)$$

Strain normal untuk komponen vektor v dalam arah sumbu-y:

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial Z_0^v}{\partial(y_i - y_j)} = \frac{\partial w_1^v}{\partial(y_i - y_j)} Z_1^v + \frac{\partial w_2^v}{\partial(y_i - y_j)} Z_2^v + \dots + \frac{\partial w_n^v}{\partial(y_i - y_j)} Z_n^v \quad (3)$$

Strain geser:

$$e_{xy} = \epsilon_{xy} = \frac{\partial Z_0^u}{\partial(y_i - y_j)} = \frac{\partial w_1^u}{\partial(y_i - y_j)} Z_1^u + \frac{\partial w_2^u}{\partial(y_i - y_j)} Z_2^u + \dots + \frac{\partial w_n^u}{\partial(y_i - y_j)} Z_n^u \quad (4)$$

$$\epsilon_{yx} = \frac{\partial Z_0^v}{\partial(x_i - x_j)} = \frac{\partial w_1^v}{\partial(x_i - x_j)} Z_1^v + \frac{\partial w_2^v}{\partial(x_i - x_j)} Z_2^v + \dots + \frac{\partial w_n^v}{\partial(x_i - x_j)} Z_n^v \quad (5)$$

$$e_{yx} = e_{yx} = \frac{1}{2} (\epsilon_{xy} + \epsilon_{yx}) \quad (6)$$

Sedangkan *strain* geser maksimumnya dihitung berdasarkan persamaan:

$$e_{shear \max} = \sqrt{(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + \frac{1}{4} (\epsilon_{xy} - \epsilon_{yx})^2} \quad (7)$$

Momen Seismik dan Momen Magnitudo

Momen seismik adalah jumlah energi yang dilepaskan oleh suatu gempa. Berdasarkan teori Reid mengenai *elastic rebound*, gempa bumi bermula dari gerakan slip yang terjadi secara tiba-tiba pada sesar aktif karena akumulasi *strain elastic* dalam periode panjang mencari kestabilan baru. Berdasarkan konsep ekuivalensi antara slip dan gaya bodi, Aki (1986) memperkenalkan model momen seismik (M_0) yang dirumuskan sebagai:

$$M_0 = \mu \int_A D(A) dA = \mu \bar{D} A \quad (8)$$

dengan M_0 adalah momen seismik (dyne cm); μ adalah konstanta rigiditas (dyne/cm²); D adalah vektor perpindahan rata-rata (cm); dan A adalah

luas sesar (cm^2). Pada penelitian ini, nilai momen seismik dihitung dari besarnya *strain* maksimum (Kostrov, 1974) yaitu:

$$M_0 = 2\mu AH e_{\text{shear max}} \quad (9)$$

dengan H adalah ketebalan lempeng (cm); dan $e_{\text{shear max}}$ adalah *strain* maksimum. Sementara, momen magnitudo menggunakan persamaan yang dirumuskan oleh Kanamori (1977), yaitu:

$$M_w = (\log M_0/1,5) - 10,73 \quad (10)$$

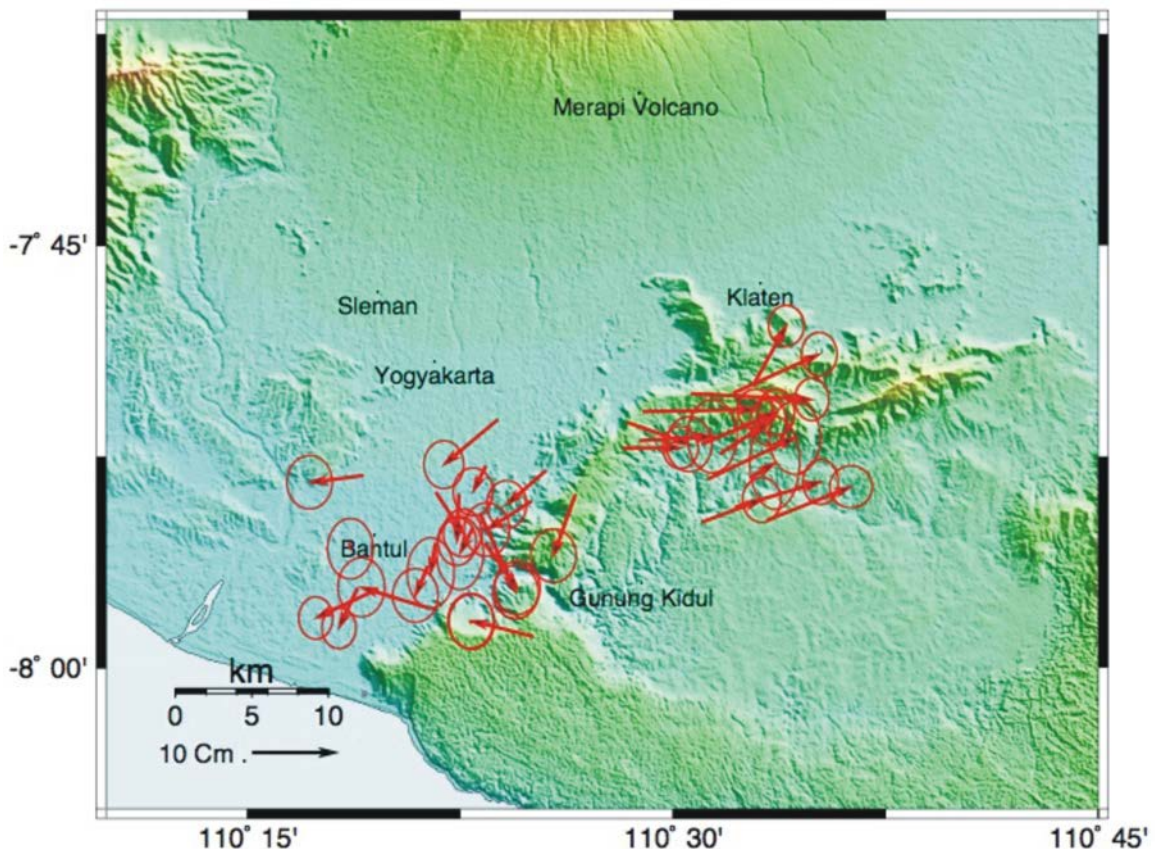
Data GPS

Data yang diolah berupa peta vektor perpindahan dari 33 titik ukur di wilayah Kabupaten Bantul, Gunung Kidul, dan Kabupaten Klaten. Peta vektor perpindahan tersebut diperoleh dari hasil penguku-

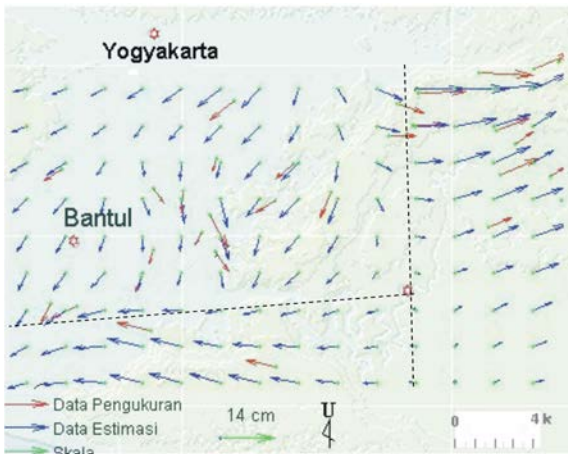
ran GPS (Gambar 2), pada Juni 2006 (setelah terjadi gempa bumi) yang dibandingkan dengan hasil pengukuran sebelum terjadi gempa bumi (Abidin, 2006). Pengukuran posisi GPS setelah terjadi gempa bumi dilakukan oleh tim Teknik Geodesi ITB dan beberapa instansi lain termasuk Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi.

Hasil Estimasi Vektor Perpindahan

Secara umum pola perpindahan adalah sebagai berikut; di bagian timur daerah studi arah perpindahan ke arah timur laut yang tampak seragam, dan di bagian barat arah perpindahan ke barat daya, namun tidak begitu tegas dibandingkan dengan di bagian timur, sedangkan di bagian selatan arah perpindahan ke barat (Gambar 3). Pola perpindahan tersebut memperlihatkan bahwa di daerah studi terdapat tiga blok yang bergerak masing-masing ke arah timur laut, barat daya, dan barat.



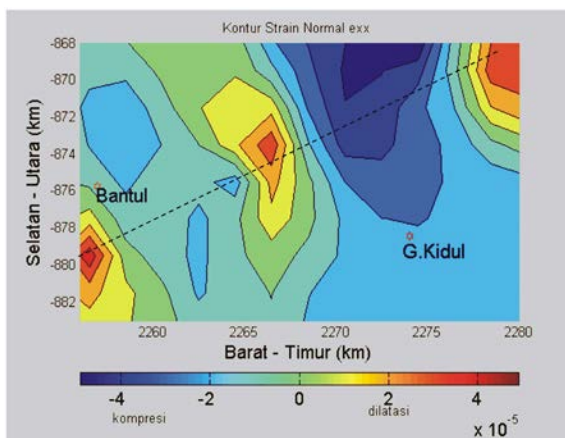
Gambar 2. Peta vektor perpindahan hasil pengukuran GPS Juni 2006 (Abidin, 2006).



Gambar 3. Hasil estimasi vektor perpindahan.

Hasil Estimasi Strain

Hasil estimasi *strain* normal komponen vektor e_{xx} yang berorientasi dalam arah barat - timur (e_{xx}) memperlihatkan bahwa terdapat daerah-daerah yang mengalami peregangan (dilatasi) dan pemampatan (kompresi). Daerah yang mengalami peregangan terdapat di tiga lokasi, masing-masing terletak 4 km selatan Bantul, 10 km sebelah timur Bantul, dan di timur laut daerah penelitian. Ketiga lokasi peregangan tersebut membentuk pola kelurusan dengan arah barat daya - timur laut (garis putus-putus pada Gambar 4). Daerah pemampatan terdapat di sekitar 10 km dari utara Gunung Kidul. Daerah peregangan dan pemampatan tersebut masing-masing ditunjukkan oleh nilai anomali *strain* positif dan negatif



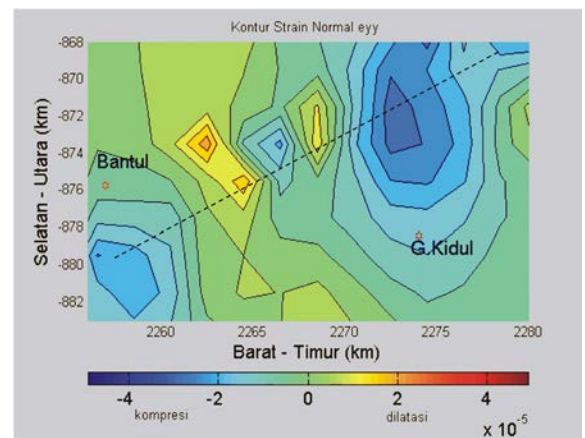
Gambar 4. Peregangan dan pemampatan dalam arah barat - timur.

(Gambar 4). Kisaran nilai *strain* normal e_{xx} berkisar antara -5×10^{-5} hingga 5×10^{-5} .

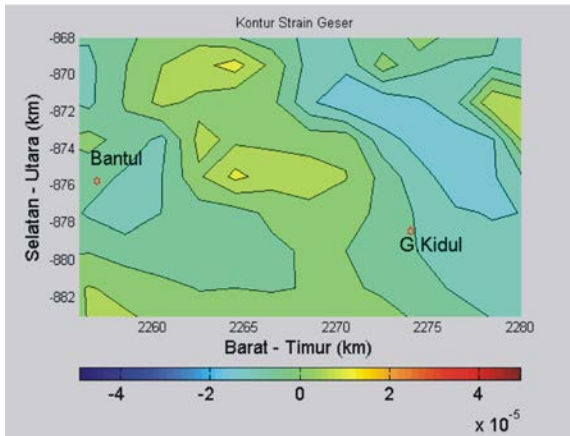
Hasil estimasi *strain* normal komponen vektor v yang berorientasi dalam arah selatan-utara (e_{yy}) memperlihatkan bahwa daerah pemampatan (kompresi) terdapat di tiga lokasi, yaitu lebih kurang 4 km selatan Bantul, lebih kurang 10 km sebelah timur Bantul, dan di utara Gunung Kidul (Gambar 5). Dua daerah pemampatan yang disebutkan pertama merupakan daerah peregangan dalam arah barat-timur. Daerah pemampatan dan peregangan terlihat berselang-seling dan membentuk pola kelurusan berarah barat daya - timur laut (garis putus-putus). Nilai peregangan dalam arah barat - timur lebih besar dibandingkan dengan nilai peregangan dalam arah selatan - utara. Sementara hasil estimasi *strain* geser (e_{shear}) memperlihatkan bahwa daerah yang mengalami distorsi sudut positif terdapat di dua lokasi, yaitu di tengah dan barat laut daerah penelitian, dan daerah yang mengalami distorsi sudut negatif terdapat di sekitar 1 km sebelah timur Bantul dan di utara Gunung Kidul (Gambar 6).

Posisi Sumber Gempa dan Momen Magnitudo

Posisi sumber gempa dianalisis dari nilai *strain* geser maksimum yang diperoleh dari nilai *strain* normal dan *strain* geser (Persamaan 7). Anomali *strain* geser maksimum positif terdapat di tiga lokasi, yaitu di barat daya, di tengah, dan di timur laut daerah penelitian. Anomali *strain* geser maksimum yang berlokasi di tengah memanjang dengan arah barat daya - timur laut (Gambar 7). Arah pola anomali



Gambar 5. Peregangan dan pemampatan dalam arah selatan - utara.



Gambar 6. *Strain geser* (e_{shear}).

tersebut diduga sebagai arah sesar, yaitu Sesar Opak dengan arah barat daya - timur laut. Anomali positif yang berlokasi di tengah daerah studi tersebut diduga pula sebagai posisi sumber gempa bumi utama pada 27 Mei 2007.

Nilai momen seismik 27 Mei 2007 dihitung dari luas anomali *strain* geser maksimum. Dalam luas yang diarsir (Gambar 7) terdapat delapan blok (delapan titik estimasi) yang masing-masing blok luasnya 4 km². Nilai *strain* geser maksimum dalam 8 blok = 2,3999 x 10⁻⁴. Dengan mengasumsikan nilai μ dan H masing-masing sebesar 3 x 10¹¹ dyne cm dan 15 km untuk batuan granit (Bath, 1979), maka diperoleh nilai momen seismik sebagai berikut:

$$M_0 = 2\mu HA \sum_{i=1}^8 e_{shear\ max\ i}$$

$$M_0 = 2 (3 \times 10^{11}) (15 \times 10^5) (8) (4 \times 10^{11}) (2,3999 \times 10^{-4})$$

$$M_0 = 8,1385 \times 10^{25} \text{ dyne cm}$$

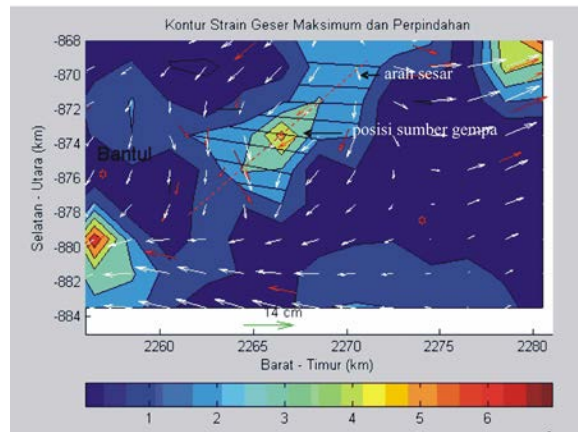
Dengan demikian nilai momen magnitudo dapat dihitung sebagai berikut:

$$M_w = ((3/2) \times \log (8,1385 \times 10^{25})) - 10,73$$

$$M_w = 6,54$$

Validasi

Validasi hasil estimasi perpindahan diperoleh dengan cara mengestimasi di setiap posisi data pengukuran dengan tidak melibatkan nilai pengukuran di posisi tersebut. Nilai *error* dihitung dari selisih absolut nilai estimasi dengan nilai data pengukuran untuk masing-masing komponen u dan v, yang



Gambar 7. *Strain geser maksimum* ($e_{shear\ max}$) dan perpindahan.

kemudian dirata-ratakan, sehingga *error* di titik estimasi dapat ditulis sebagai berikut:

$$er_i = (er_i^u + er_i^v) / 2$$

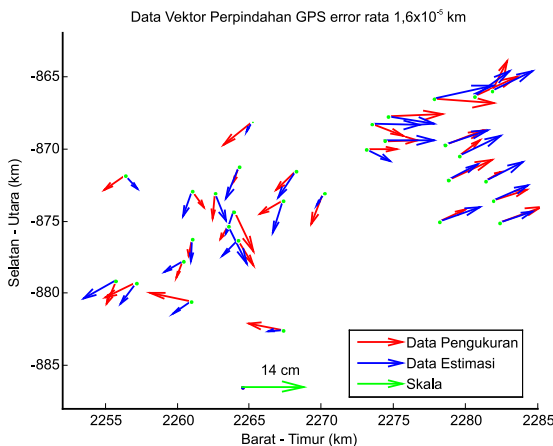
dengan er_i^u dan er_i^v adalah *error* untuk komponen u dan komponen v, yaitu;

$$er_i^u = |Z_i^{u\ cal} - Z_i^{u\ obs}| \text{ dan } er_i^v = |Z_i^{v\ cal} - Z_i^{v\ obs}|$$

dengan $Z_i^{u\ cal}$ dan $Z_i^{v\ cal}$ berturut-turut adalah nilai estimasi vektor perpindahan komponen u dan v di titik i; $Z_i^{u\ obs}$ dan $Z_i^{v\ obs}$ berturut-turut adalah nilai data pengukuran vektor perpindahan komponen u dan v di titik i. Sementara nilai *root mean square error* untuk semua titik estimasi adalah:

$$er_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N er_i^2}$$

Hasil estimasi di titik ukur sebelah timur tampak lebih baik dibandingkan dengan tempat lainnya. Nilai dan arah data pengukuran di sebelah timur hampir seragam, dan nilai estimasinya mirip dengan data pengukuran dengan *error* relatif kecil. Sementara di tempat lainnya, data perpindahan tidak seragam dan nilai estimasinya juga tidak begitu mirip dengan *error* relatif lebih besar (Gambar 8). Dengan demikian hasil estimasi di bagian timur lebih valid dibandingkan dengan tempat lainnya.



Gambar 8. Perbandingan data pengukuran dan estimasi vektor perpindahan.

PEMBAHASAN

Pola perpindahan di daerah studi memperlihatkan terdapat tiga blok yang bergerak masing-masing ke arah timur laut, barat daya, dan barat. Namun, bila dilihat sebaran data pengukuran dan validasi estimasi, data yang lebih lengkap berada di timur laut dan di tengah daerah studi, sehingga dapat dikatakan bahwa perpindahan yang dominan adalah di sebelah timur ke timur laut dan di sebelah barat ke barat daya. Pola perpindahan tersebut menunjukkan jenis sesar di daerah studi adalah sesar mendatar mengiri dengan arah barat daya - timur laut. Berdasarkan data geologi, di daerah penelitian terdapat sesar yang dikenal dengan Sesar Opak berarah barat daya - timur laut (Wartono, 1995), sedangkan jenis sesar hasil penelitian ini sama dengan yang dilaporkan USGS, yaitu sesar mendatar mengiri.

Jenis sesar dan nilai *strain* normal dalam arah barat - timur terlihat lebih besar dibandingkan dengan nilai *strain* normal dalam arah selatan - utara. Hal tersebut karena daerah penelitian mendapat gaya dalam arah selatan - utara yaitu subdaksi. Oleh karena Sesar Opak berarah barat daya - timur laut, maka blok timur bergerak ke arah timur laut dan blok barat ke arah barat daya.

Hasil analisis *strain* geser maksimum memperlihatkan terdapat anomali positif di tiga lokasi, namun anomali yang berlokasi di timur Bantul dianalisis sebagai posisi sumber gempa utama 27 Mei 2006.

Hal tersebut karena letak anomali positif tersebut membentuk pola yang berarah barat daya - timur laut yang dianalisis sebagai arah sesar. Persamaan *strain* geser maksimum untuk menentukan posisi sumber gempa tersebut mirip dengan metode lingkaran Mohr dalam mekanika batuan untuk menganalisis pecahnya suatu batuan.

Anomali positif *strain* normal dan *strain* geser maksimum di tiga lokasi yang membentuk pola kelurusan dapat ditafsirkan juga sebagai tingkat rapuhnya batuan di lokasi tersebut dan diduga berhubungan pula dengan tingkat kerusakan di lokasi tersebut. Berdasarkan peta kerusakan yang dilaporkan oleh Abidin (2006) dan Pramumijoyo dr. (2006) lokasi kerusakan berat relatif sama dengan lokasi anomali positif tersebut.

Menentukan nilai momen seismik dalam studi ini sangat bergantung pada pemilihan luas *strain*, sehingga berpengaruh pada penentuan nilai momen magnitudo. Nilai momen magnitudo hasil studi ini lebih besar dibandingkan dengan yang dilaporkan USGS dengan selisih 0,2.

Secara umum, hasil estimasi perpindahan memperlihatkan bahwa vektor perpindahan hasil estimasi lebih mirip dengan nilai data pengukuran terdekatnya dibandingkan dengan data yang lebih jauh. Hal tersebut menandakan bahwa metode yang dipakai sudah sesuai dengan prinsip *kriging* yang dinyatakan dengan kovarian, yaitu sebagai fungsi jarak dan nilai data pengukuran. Metode *simple kriging* merupakan metode yang paling sederhana dalam geostatistik. Hasil estimasi dengan metode *simple kriging* yang dipadukan dengan teknik simulasi sekuensial gaussian cukup baik. Sebelumnya telah dicoba pula dengan beberapa metode yang lain, yaitu *simple kriging*, *ordinary kriging*, dan *kriging with trend* tanpa dipadukan dengan simulasi sekuensial gaussian, namun hasilnya kurang baik.

KESIMPULAN

Pola perpindahan dan pola arah anomali *strain* geser maksimum di daerah penelitian menunjukkan adanya sesar berarah barat daya - timur laut dengan jenis sesar mendatar mengiri. Sesar tersebut dikenal dengan nama Sesar Opak. Aktivitas Sesar Opak tersebut sebagai penyebab gempa bumi tanggal 27 Mei 2006. Posisi sumber gempa bumi 27 Mei 2006

diperkirakan berlokasi pada jarak 10 km sebelah timur Bantul.

Nilai momen seismik (M_0) gempa bumi Yogyakarta 2006 adalah $8,1385 \times 10^{25}$ dyne cm dan momen magnitudo (M_w) adalah 6,5. Nilai *strain* normal yang berorientasi dalam barat - timur lebih besar dibandingkan dengan nilai *strain* normal yang berorientasi dalam arah selatan - utara.

Metode *simple kriging* yang dipadukan dengan simulasi sekuensial gaussian memberikan hasil cukup baik dibandingkan dengan tanpa dipadukan dengan simulasi sekuensial gaussian.

Ucapan Terima kasih—Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Kepala Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung, yang telah mengizinkan melakukan penelitian. Selain itu ucapan terima kasih ini juga ditujukan kepada Ketua Program Studi Sains Kebumihan, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, Institut Teknologi Bandung, yang telah memberikan fasilitas selama melakukan penelitian. Ucapan terima kasih ini juga ditujukan kepada semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran dan kemudahan melakukan penelitian.

ACUAN

- Abidin, H.Z., 2006. *Co-Seismic Deformation of the 2006 Yogyakarta Earthquake as Detected by GPS Surveys*. Power Point, Merapi Workshop Yogyakarta.
- Aki, K., 1968. *Seismic displacements near a fault*. J. Geophys. Res. 73., h. 5359 – 5375
- Asdani, 2006. *Gempa bumi Yogyakarta 27 Mei 2006*. Powerpoint, Pusat Survei Geologi.
- Bath, M., 1979. *Intruduction to Seisology*. Birkhauser Verlag Basel, h.61-78.
- Bohling, G., 2005. *Introduction to Geostatistics and Variogram Analysis*. Kansas Geological Survey, <http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Variograms.pdf>.
- Kanamori, H., 1977. *The energy release in great earthquakes*. J. Geophys. Res. 82., h. 2981 – 2987
- Kostrov B.V., 1974. *Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rock*. Izv. Acad. Sci USSR, Phys. Solid Earth, 1, h. 23-40.
- Oware, E.N., 1988. *A New Tectonic View of The Japanese Islands based on GPS Dense Array data*. A Thesis, Departement of Earth and Planetary Physics. University of Tokyo, Japan, h. 20-38.
- Russell. H., 1997. *Geostatistical Analysis of Well log and Seismic Data*. Hamson Russel Sofware Service, Central Hongkong, h. 4-49.
- Seth, S., Michael, W., 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and earth Structure*. Blackwell Publishing, h. 39-49, h. 263-266.
- Thorne, L., Terry, C., dan Wallace, 1995. *Modern Global Seismology*. Academic Pres, 34-46, 383-395.
- Triyoso, W., 1991. *Konsep-Konsep Dasar Seismologi*. Institut Teknologi Bandung, h. 2-13, h. 48-55.
- Tyson, S., 2006. *Advanced Geostatistics in Reservoir Modeling*. Australian School of Petroleum, Adelaide, h. 1-3.
- Pramumijoyo, S., Sudarno, I., and Wartono, 2006. *Yogyakarta Earthquake 2006*. Geological Engineering Department Faculty of Engineering University of Gadjah Mada.
- Wartono, R., (1995). *Peta Geologi Lembar Yogyakarta*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Gempa bumi Merusak*. <http://merapi.vsi.esdm.go.id/>
- Gempa bumi Merusak di Yogyakarta 27 Mei 2006*. <http://www.bmg.go.id/>
- Magnitude 6.3-Java*. <http://earthquake.usgs.gov/>