

Mekanisme Sumber Gempa Dangkal Frekuensi Tinggi di Gunung Soputan, Sulawesi Utara

Mechanism of High Frequency Shallow Earthquake Source in Mount Soputan, North Sulawesi

Y. SUPARMAN, E. KRISWATI, dan Y. E. PAMITRO

Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Jln. Diponegoro 57 Bandung

SARI

Analisis tensor momen telah dilakukan untuk mengetahui mekanisme sumber gempa di Gunung Soputan pada Oktober - November 2010. Gempa yang terekam merupakan gempa-gempa dangkal dengan frekuensi sekitar 5 - 9 Hz. Distribusi polaritas *onset* awal gelombang P menunjukkan bahwa dominasi gempa yang terekam di hampir seluruh stasiun mempunyai arah polaritas awal gelombang P yang sama. Pada tulisan ini, mekanisme sumber dideskripsikan sebagai turunan kedua tensor momen, yang didekati dengan inversi amplitudo gerak awal gelombang P di beberapa stasiun seismik. Hasil dekomposisi tensor momen didominasi oleh gempa dengan persentase yang besar pada komponen ISO dan CLVD. Mekanisme fokal menunjukkan bahwa gempa-gempa yang terekam mempunyai arah jurus yang sama, yaitu arah timur laut-barat daya dengan *dip* sekitar 40° - 60° . Sumber gempa dangkal frekuensi tinggi adalah berupa *tensile-shear crack* atau kombinasi antara rekahan dan sesar geser.

Kata kunci: tensor momen, mekanisme sumber, frekuensi, gelombang P, polaritas, gerak awal

Abstract

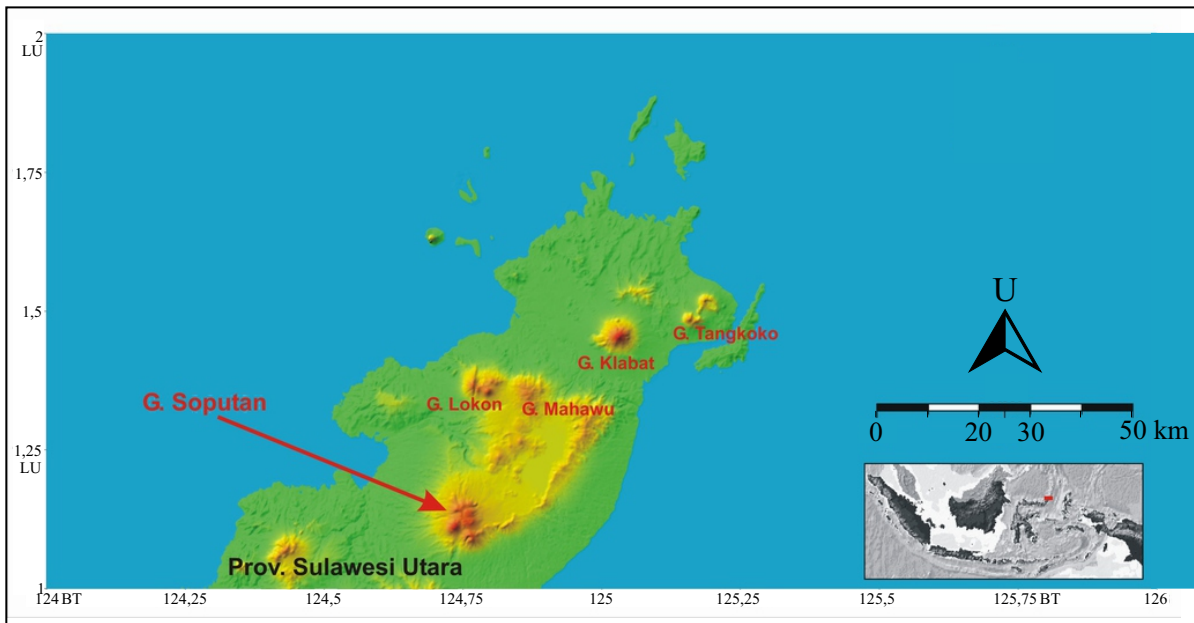
Moment tensor analysis had been conducted to understand the source mechanism of earthquakes in Soputan Volcano during October - November 2010 period. The record shows shallow earthquakes with frequency about 5 - 9 Hz. Polarity distribution of P-wave first onset indicates that the recorded earthquakes are predominated by earthquakes where almost at all stations have the same direction of P-wave first motions, and earthquakes with upward first motions. In this article, the source mechanism is described as the second derivative of moment tensor, approached with first motion amplitude inversion of P-wave at some seismic stations. The result of moment tensor decomposition are predominated by earthquakes with big percentage in ISO and CLVD component. Focal mechanism shows that the recorded earthquakes have the same strike in northeast-southwest direction with dip about 40° - 60° . The sources of the high frequency shallow earthquakes are in the form of tensile-shear cracks or a combination between crack and tensile faulting.

Keywords: moment tensor, source mechanism, frequency, P-wave, polarity, first motion

PENDAHULUAN

Gunung Soputan merupakan salah satu gunung api aktif yang kegiatannya ditandai dengan terjadi-

nya guguran-guguran pada kubah lavanya. Gunung api tipe strato ini terletak di Kabupaten Minahasa Selatan, Sulawesi Utara, dengan posisi koordinat pada $01^{\circ}06' 30$ LU dan $124^{\circ}43' BT$ (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi Gunung Soputan, Provinsi Sulawesi Utara.

Dalam sejarah kegiatannya, Gunung Soputan mulai meletus pada tahun 1785. Saat itu erupsi berasal dari kawah utama, kemudian berturut-turut terjadi pada tempat yang sama pada tahun 1786, 1833, 1845, dan 1890. Selain kawah utama, pusat kegiatan lainnya adalah di dua kerucut parasit yang dinamakan Gunung Aesopot dan Aesopot Weru. Berbeda dengan kawah utama, produk kegiatan dari kedua sumber erupsi tersebut terutama leran lava (bersifat efusif). Bentuk tubuh Gunung Soputan berubah-ubah selama beberapa tahun terakhir. Pada tahun 1990, Gunung Soputan berbentuk kerucut terpancung dengan lereng licin tertutup bahan lepas hasil erupsi. Mulai tahun 1991 hingga tahun 2006 terjadi pertumbuhan kubah lava yang mengakibatkan tertutupnya kawah lama oleh material lava. Pada tahun 2007, puncak Gunung Soputan kembali menjadi kerucut terpancung setelah terjadi erupsi pada bulan Agustus dan Oktober 2007, bersambung hingga bulan Juni dan Oktober 2008.

Setelah berlangsungnya rangkaian erupsi yang dimulai pada bulan Mei 2000 hingga Oktober 2008, rekaman gempa Gunung Soputan didominasi oleh gempa guguran. Untuk dapat mengetahui aktivitas kegempaan di Gunung Soputan saat ini, pada Oktober - November 2010 dilakukan pemasangan empat stasiun seismik temporer untuk

menambah jaringan dua seismik permanen yang telah ada. Penentuan frekuensi, hiposentrum, dan analisis momen tensor dilakukan untuk mengetahui mekanisme sumber gempa yang terekam selama survei dilakukan.

METODOLOGI

Pada tulisan ini, mekanisme sumber dideskripsikan sebagai turunan kedua tensor momen yang didekati dengan inversi dari amplitudo gerak awal (*first motion*) gelombang P di beberapa stasiun seismik, memasukkan atenuasi inelastis dan penyebaran geometris ke dalam perhitungan. *Displacement* gelombang P yang diperoleh dari momen tensor pada medan-jauh dirumuskan oleh Aki dan Richard (1980) sebagai berikut:

$$u^p(x,t) = \left[\frac{\gamma \cdot M \left(t - \frac{r}{V_p} \right) \cdot \gamma}{4\pi\rho V_p^3 r} \right] l \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan

ρ : densitas

V_p : cepat rambat gelombang P
 r : jarak
 t : waktu
 l : arah perambatan gelombang P
 γ : arah kedatangan pada sumber
 M : tensor momen

Karena hanya amplitudo gerak awal yang diperhitungkan di sini, maka bentuk fase diabaikan. Kemudian amplitudo kecepatan partikel (Iguchi, 1994) diperoleh sebagai berikut:

$$\dot{u}^p(x) = \frac{F_p \exp(-\omega r / 2V_p Q_p)}{\pi \rho V_p^3 r} l \quad (2)$$

F_p adalah fungsi yang mewakili pola radiasi (*radiation pattern*) dan turunan kedua momen tensor (Iguchi, 1994), yang dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F_p = & (\ddot{M}_{xx} \cos^2 \theta + \ddot{M}_{yy} \sin^2 \theta) \sin^2 \xi \\
 & + \ddot{M}_{zz} \cos^2 \xi \\
 & + 2\ddot{M}_{xy} \sin^2 \xi \sin \theta \cos \theta \\
 & + 2(\ddot{M}_{xz} \cos \theta + \ddot{M}_{yz} \sin \theta) \sin \xi \cos \xi \dots (3)
 \end{aligned}$$

M_{yz} adalah komponen kartesian suatu tensor momen. Sistem koordinat x, y, dan z secara berurutan mewakili timur, utara, dan arah vertikal ke atas. θ dan ξ adalah azimuth sumber ke stasiun dan *take-off angle* gelombang dari sumber. Kecepatan amplitudo adalah kombinasi linier enam komponen turunan kedua tensor momen. Komponen-komponen ini diperoleh dengan mengaplikasikan metode *least-square* menggunakan amplitudo pada semua stasiun.

Tensor momen dapat didekomposisi menjadi komponen isotropik (ISO), *compensated linear vector dipole* (CLVD), dan *double-couple* (DC) (Knopoff dan Randall, 1970; Jost dan Hermann, 1989; Vavrycuk, 2001; Triastuty drr., 2006),

$$M = M^{ISO} + M^{CLVD} + M^{DC} \quad (4)$$

Penjumlahan komponen ISO dan CLVD disebut komponen non-DC M. Penjumlahan komponen CLVD dan DC disebut deviatorik momen (M^*). Perhitungan persentase ISO, CLVD, dan DC dituliskan sebagai berikut (Dahm, 1996; Vavrycuk, 2001; Triastuty drr., 2006):

$$c^{ISO} = \frac{1}{3} \frac{\text{tr}(M)}{|M_{\max}|} 100\% \quad (5)$$

$$c^{CLVD} = 2\varepsilon \left(100\% - |c^{ISO}| \right) \quad (6)$$

$$c^{DC} = 100\% - |c^{ISO}| - |c^{CLVD}| \quad (7)$$

$M_{\max}$ adalah *eigen value* M ; menunjukkan ukuran relatif Parameter CLVD terhadap DC (Sipkin, 1986; Julian drr., 1997) dan didefinisikan sebagai berikut:

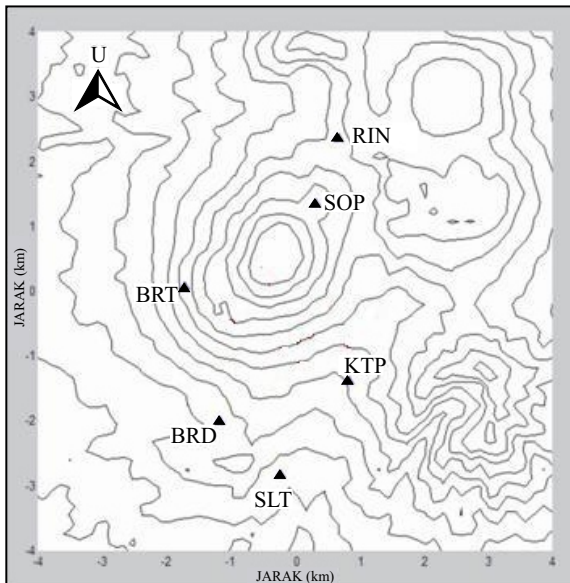
$$\varepsilon = -\frac{M_{\min}^*}{M_{\max}^*} \quad (8)$$

$M_{\max}$ dan $M_{\min}^*$ secara berurutan adalah *eigen values* deviatorik momen (M^*) dengan nilai absolut maksimum dan minimum. Persentase DC selalu positif, sementara persentase ISO dan CLVD positif untuk sumber *tensile*, tetapi negatif untuk sumber yang bersifat kompresif.

Tensor momen yang diperoleh dari data aktual dapat dianalisis untuk mengetahui parameter-parameter: bidang normal (n), arah perpindahan (v), dan stress (sumbu P, T, dan B) yang terjadi di sumber, yang dapat ditentukan dari *eigen vectors* dan *eigen values*. *Eigen vector* dari tensor sumber berhubungan dengan geometri sesar dan *eigen value* dari tensor momen berhubungan dengan *stress* yang ditimbulkan oleh proses pensesaran (Vavrycuk, 2005).

DATA

Data yang digunakan untuk analisis mekanisme sumber gempa Gunung Soputan diperoleh dari survei yang berlangsung pada Oktober - November 2010. Pada kegiatan penelitian ini dipasang tiga stasiun seismik temporer untuk menambah jaringan seismik permanen, yaitu BRT, BRD, SLT, dan KTP (Gambar 2) yang masing-masing terletak di lereng barat, barat daya, dan selatan Gunung Soputan. Stasiun BRT menggunakan seismometer tiga komponen, seismik permanen RIN juga dilengkapi dengan seismometer tiga komponen, sementara empat stasiun seismik lainnya menggunakan seismometer satu komponen. Pengamatan kegempaan pada stasiun seismik temporer di Gunung Soputan



Gambar 2. Peta lokasi stasiun seismik di Gunung Soputan.

menggunakan seismometer L4C dengan sensitivitas alat 270 V/m/dt dan frekuensi natural (f_0) 1 Hz. Datalogger yang digunakan adalah Datamark LS-7000XT dengan gain 20 dB. Nilai damping yang digunakan adalah 0,7. Koreksi instrumen terhadap sinyal gempa dilakukan melalui proses FFT dan iFFT dengan memasukkan fungsi transfer sebagai berikut:

$$T(j\omega) = \frac{\omega^2 \cdot (\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\varepsilon^2 \omega^2} - j \frac{\omega^2 \cdot 2\varepsilon\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\varepsilon^2 \omega^2} \dots (9)$$

$\varepsilon = h/\omega_0$; h = damping; $\omega_0 = 2\pi f_0$ dan $\omega = 2\pi f$.

Selama survei dilakukan sering terekam gempa yang terjadi secara menerus selama hampir 1 jam dengan durasi masing-masing gempa berkisar 10 - 30 detik. Gempa-gempa tersebut berbentuk lensa tipis dan mempunyai onset gelombang P yang jelas. Untuk memperjelas jenis dan mekanisme sumber gempa yang terekam di Gunung Soputan, maka dilakukan analisis spektral, penentuan hiposentrum, dan tensor momen.

FREKUENSI GEMPA GUNUNG SOPUTAN

Analisis frekuensi gempa Soputan dilakukan dengan cara mengubah sinyal menjadi sinyal *velocity* dan *displacement* untuk menganalisis *spectral*

velocity dan *spectral displacement*. Kandungan frekuensi sinyal pada domain *displacement* diplot dalam skala log-log untuk melihat pola amplitudo spektrum gempa. Analisis spektrum dilakukan dari onset awal gelombang P dengan *time windows* 10,24 detik. Analisis spektral menunjukkan bahwa kandungan frekuensi sinyal gempa yang terekam mempunyai beberapa puncak (*peak*) dan mempunyai kandungan frekuensi tinggi dengan kisaran sekitar 5 - 9 Hz. Spektra *displacement* menunjukkan amplitudo spektrum yang tidak bersifat datar untuk frekuensi rendah (Gambar 3a).

Analisis spektrum juga dilakukan pada *windows* yang berbeda dengan masing-masing *time windows* 10,24 detik untuk melihat kandungan frekuensi dan pola amplitudo masing-masing *window* pada gempa (Gambar 3b). Kandungan frekuensi pada masing-masing *window* umumnya sama, yaitu pada kisaran 5 - 9 Hz dan amplitudo spektrum pada *spectral displacement* yang tidak bersifat datar untuk frekuensi rendah.

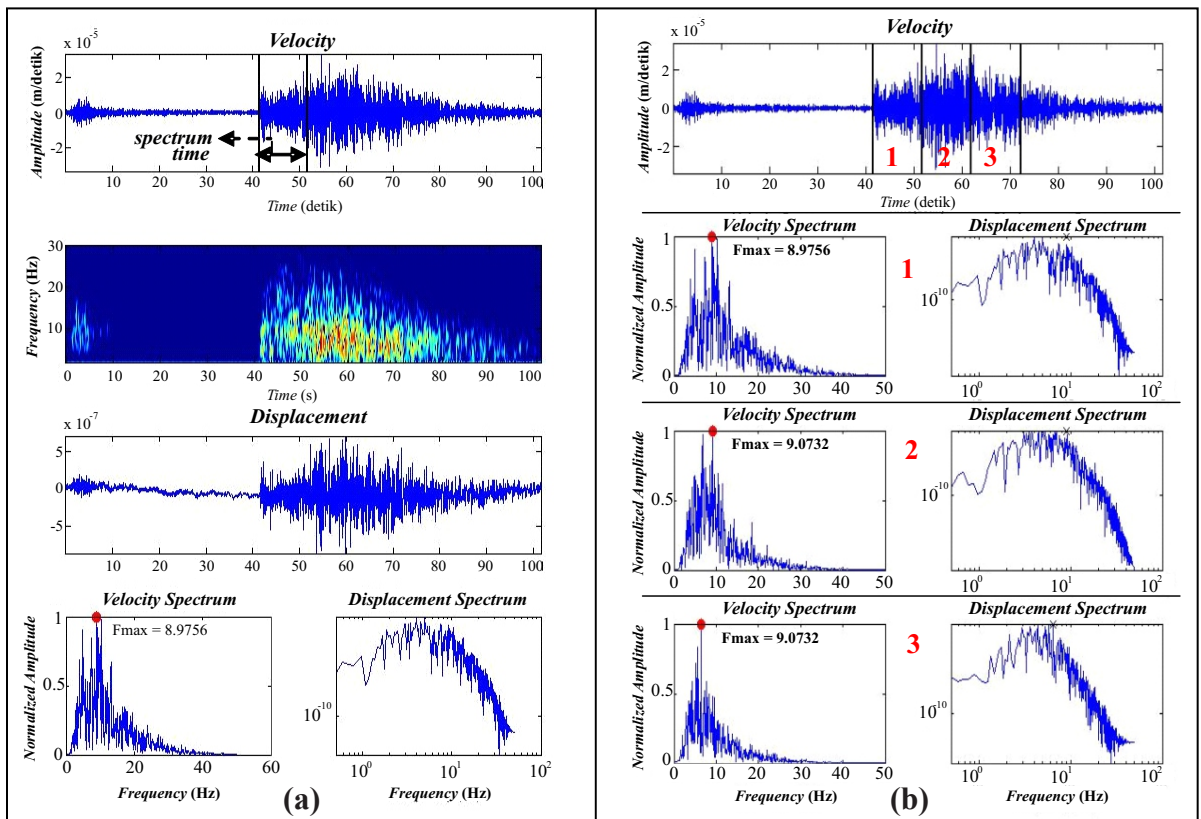
HIPOSENTRUM GEMPA

Hiposentrum gempa Soputan dianalisis menggunakan program GAD (Nishi, 2001) yang hasilnya diperlihatkan pada Gambar 4. Penentuan hiposentrum dilakukan dengan menggunakan data waktu tiba gelombang P pada media homogen dengan kecepatan gelombang P 3,3 km/detik karena tidak ada informasi mengenai struktur kecepatan media (*velocity structure*) Gunung Soputan. Sumber gempa tersebar di puncak Gunung Soputan dan sekitarnya pada radius 0 - 2 km dan kedalaman 0,5 - 2 km di bawah puncak Gunung Soputan.

MEKANISME SUMBER

Distribusi Polaritas

Polaritas dari onset awal gelombang P diplot pada *hemisphere focal sphere* bagian atas sebagai awal penentuan mekanisme fokal. Distribusi polaritas gempa-gempa yang terekam menunjukkan adanya gempa yang mempunyai polaritas berbeda-beda (*up* dan *down*) dan gempa yang mempunyai polaritas seragam (Gambar 5). Distribusi polaritas menunjukkan bahwa solusi mekanisme dengan



Gambar 3. Analisis spektral gempa Gunung Soputan 01 November 2010 Pukul 02.06 dengan *time windows* 10,24 detik (a) dari *onset* awal gelombang P (b) pada tiga *window* yang berbeda.

asumsi *double couple* kurang tepat digunakan terutama untuk gempa dengan distribusi polaritas yang seragam. Untuk itu maka digunakan solusi mekanisme dengan tensor momen.

Tensor Momen

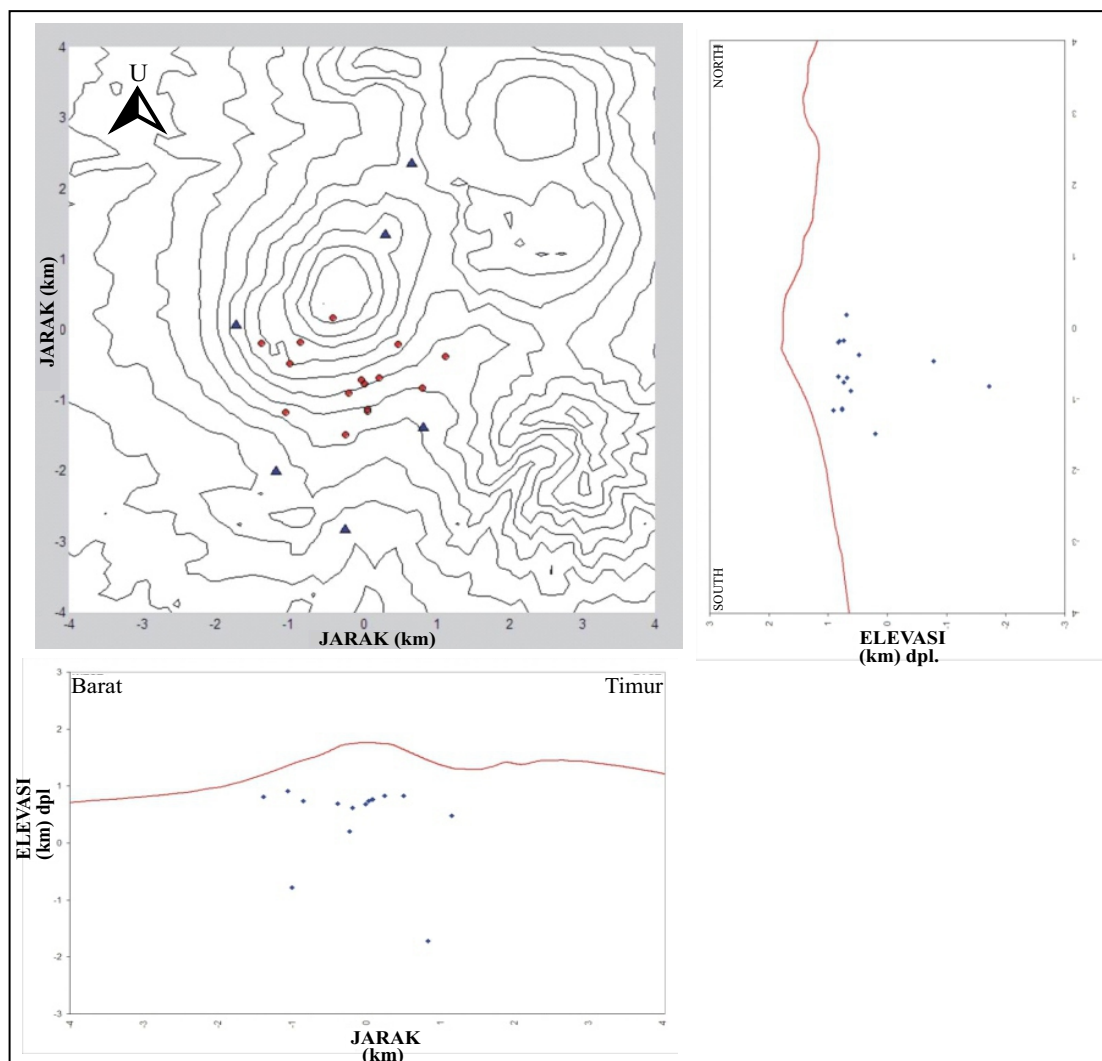
Mekanisme sumber dilakukan dengan melakukan inversi terhadap amplitudo *onset* awal gelombang P melalui turunan kedua tensor momen (Iguchi, 1994). Inversi ini dilakukan karena tidak ada informasi mengenai struktur kecepatan media (*velocity structure*) Gunung Soputan sehingga tensor momen dari inversi bentuk gelombang (*waveform*) tidak dapat dilakukan. Komponen turunan kedua tensor momen (Tabel 1) gempa-gempa Gunung Soputan dihitung melalui amplitudo *onset* awal gelombang P pada domain *velocity* di beberapa stasiun seismik dengan memperhitungkan atenuasi inelastis dan penyebaran geometris (Iguchi, 1994; Triastuty drr, 2006).

Solusi mekanisme sumber gempa-gempa yang terekam ditunjukkan pada Gambar 6. Gempa-gempa yang terekam pada umumnya mempunyai arah jurus yang sama, yakni arah timur laut - barat daya (N40° - N70°E) dengan *dip* 40° - 60°.

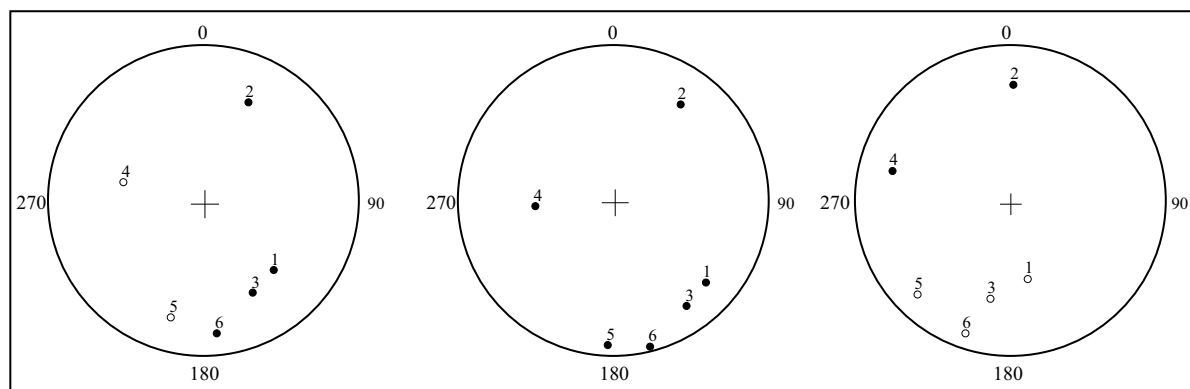
DISKUSI

Kebanyakan gempa disebabkan oleh pergeseran (*shear faulting*) dan mekanisme fokalnya diperlihatkan sebagai *double-couple* (DC). Sementara itu mekanisme *non-double-couple* (non-DC) sangat jarang ditemui dan berasal dari berbagai macam sumber. Mekanisme non-DC dilaporkan terjadi di daerah *geothermal* dan daerah gunung api yang disebabkan oleh intrusi magma dan fluida (Shimizu drr., 1987; Julian drr., 1997; Vavrycuk, 2001).

Kegiatan seismik di Gunung Soputan didominasi gempa dangkal yang memiliki frekuensi tinggi. Anali-



Gambar 4. Hiposentrum dan episentrum gempa Gunung Soputan. Segitiga menunjukkan stasiun seismik.



Gambar 5. Distribusi polaritas gempa Gunung Soputan. Bulat hitam menunjukkan polaritas ke atas (*up*)/kompresi, bulat putih polaritas ke bawah (*down*) dilatasi. Angka menunjukkan stasiun seismik.

Tabel 1. *Second Derivative of Moment Tensor* dan Persentase DC, CLVD, ISO

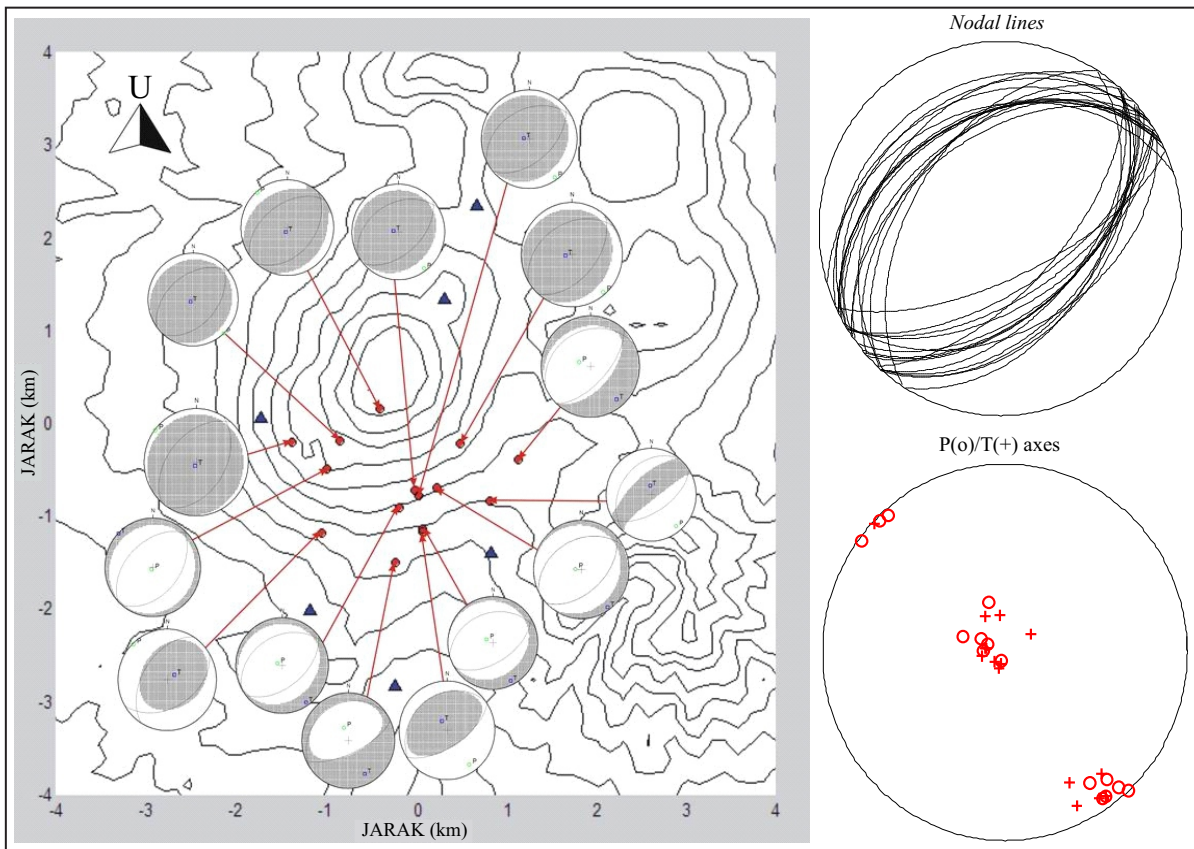
<i>Second Derivative of Moment Tensor (x 10¹⁴ Nm/s²)</i>						DC	CLVD	ISO
<i>M_{xx}</i>	<i>M_{yy}</i>	<i>M_{zz}</i>	<i>M_{yz}</i>	<i>M_{xz}</i>	<i>M_{xy}</i>	%	%	%
0,41	-0,03	-9,36	1,67	-0,15	-0,21	5,0	-640	-31,0
1,14	0,02	-14,45	2,95	-1,80	-0,16	8,1	-62,8	-29,1
-0,05	-0,04	1,63	-0,13	-0,11	0,06	5,9	63,0	31,1
0,42	0,48	-11,98	0,33	0,74	-0,33	5,1	-64,2	-30,7
0,94	0,36	-9,66	1,46	-0,73	-0,43	11,4	-60,5	-28,1
0,00	0,00	0,08	0,00	-0,01	0,01	15,6	54,8	29,6
-1,84	-1,68	4,22	1,11	0,66	1,23	47,8	47,0	5,1
1,13	0,41	-3,25	1,56	-0,89	-0,76	52,5	-32,9	-14,6
-0,53	-0,06	10,74	-2,02	-0,23	0,46	7,4	62,2	30,5
-19,14	-22,42	0,10	24,33	-6,10	18,84	48,9	-23,4	-27,6
-0,19	-0,13	0,04	-0,06	0,08	0,17	12,6	-61,5	-25,9
-0,02	-0,05	2,55	-0,08	-0,23	0,04	2,4	65,4	32,2
2,16	1,03	-3,11	1,15	-2,78	-0,96	78,1	-21,2	0,6
-1,16	-0,37	15,61	-2,47	0,57	0,62	9,2	61,5	29,3
-1,96	-1,04	3,15	-1,10	1,81	1,20	84,7	14,1	1,2

sis spektral pada domain *displacement* menunjukkan amplitudo spektrum yang tidak bersifat datar untuk frekuensi rendah. Jika amplitudo spektrum pada *spectral displacement* tidak bersifat datar untuk frekuensi rendah, maka kita dapat menganggap bahwa gempa bukan disebabkan oleh proses *faulting* atau *fracturing* (Aki dan Richards, 1980; Ratdomopurbo, 1992).

Distribusi polaritas *onset* awal gelombang P menunjukkan bahwa gempa yang terekam didominasi oleh gerak awal turun (*downward first motion*) pada hampir seluruh stasiun dan gerak awal naik (*upward first motion*) pada hampir seluruh stasiun. Tipe yang pertama dikenal sebagai *dilatational earthquakes* dan tipe yang kedua disebut dengan *compressional earthquakes* (Shimizu drr., 1987). Shimizu drr., (1987) menginterpretasikan *compressional earthquakes* (dengan contoh kasus di Miyakejima) disebabkan oleh terbukanya *tensile crack* secara tiba-tiba karena adanya pelepasan tekanan magma yang mengisi rekahan. Karena intrusi magma tidak mencapai permukaan, tekanan magmatis terjaga pada tingkat yang tinggi. Tekanan

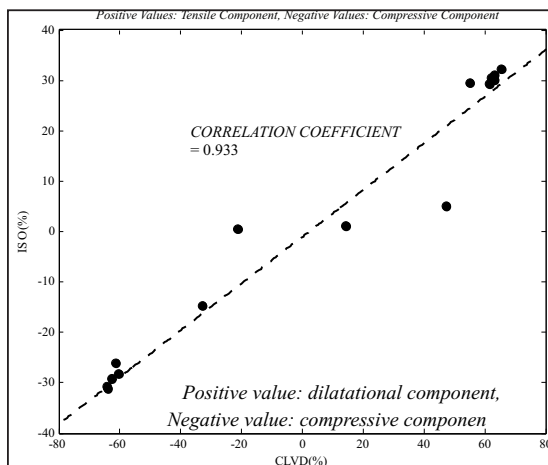
magmatis di bawah rekahan meningkat dan membentuk banyak retakan terbuka sepanjang rekahan. Sementara itu, *dilatational earthquakes* diinterpretasikan terjadi karena tertutupnya *tensile crack* yang tiba-tiba sebagai akibat berkurangnya tekanan magmatis dan/atau magma turun kembali. Perbedaan kedua tipe gempa tersebut bukan dari segi waktu terjadinya, tetapi dari penyebarannya. Pada gempa Gunung Soputan, tipe kompresional terjadi pada lokasi yang lebih dekat dengan kawah/kubah lava Soputan, sementara yang dilatasional di lokasi yang lebih jauh dari kawah Soputan. Hal ini mungkin disebabkan oleh perbedaan *stress* lokal.

Hasil dekomposisi tensor momen gempa Gunung Soputan didominasi oleh gempa dengan persentase yang besar pada komponen ISO dan CLVD. Vavrycuk (2001) menginterpretasikan mekanisme sumber berupa kombinasi antara rekahan dan pergeseran (*tensile faulting*) berdasarkan hubungan linier antara komponen ISO dan CLVD hasil dekomposisi tensor momen. Korelasi komponen ISO dan CLVD pada gempa-gempa Gunung Soputan menunjuk-



Gambar 6. Mekanisme fokal gempa Gunung Soputan.

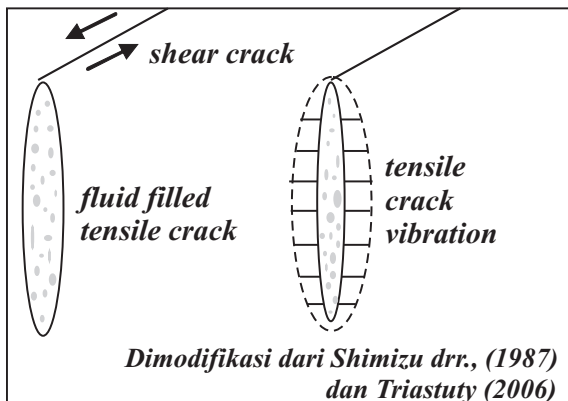
kan adanya hubungan yang linier dengan koefisien korelasi sebesar 93% (Gambar 7).



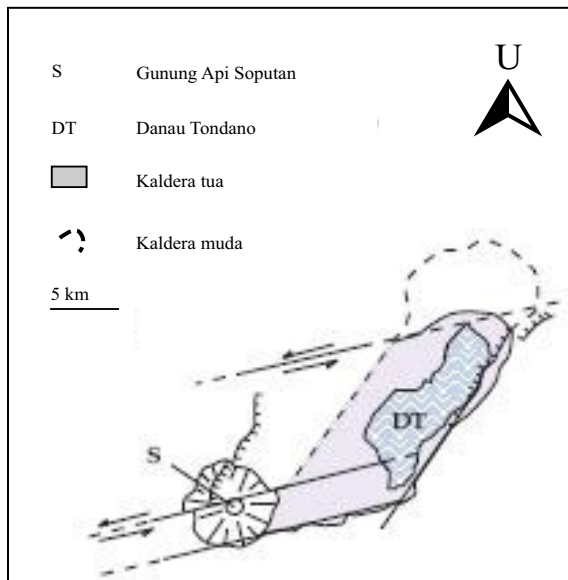
Gambar 7. Hubungan antara komponen ISO dan CLVD gempa-gempa Gunung Soputan.

Berdasarkan hal tersebut di atas, maka penulis menginterpretasikan bahwa gempa yang terekam di Gunung Soputan mempunyai mekanisme non-DC yang merupakan hasil dari sumber gempa berupa *tensile-shear crack* atau kombinasi antara rekahan dan pergeseran dengan arah pergeseran (*shear*) pada timur laut-barat daya dengan *dip* 40° - 60° (Gambar 8). *Vibrasi tensile crack* ditunjukkan dengan bukaan (*opening*) danutupan (*closing*) yang diinterpretasikan disebabkan oleh naik dan berkurangnya tekanan magmatis.

Gunung Soputan terletak di dalam sistem Kaldera Danau Tondano dengan struktur regional seperti terlihat di Gambar 9. Arah jurus mekanisme gempa dangkal Gunung Soputan sesuai dengan arah struktur regional yang digambarkan memotong daerah Soputan. Dari hasil tersebut terlihat bahwa *tensile faulting* yang terjadi di Gunung Soputan dikontrol oleh aktivitas struktur regional.



Gambar 8. Ilustrasi *tensile-shear crack* dengan pergeseran (*shear*) pada arah timur laut-barat daya.



Gambar 9. Peta geologi Cekungan Danau Tondano (Dam, 2001 dalam Moechtar drr., 2007).

KESIMPULAN

- Gempa-gempa yang terekam di Gunung Soputan merupakan gempa dangkal dengan frekuensi tinggi.
- Hasil dekomposisi tensor momen menunjukkan bahwa gempa Gunung Soputan didominasi oleh gempa dengan persentase yang besar pada komponen ISO dan CLVD
- Mekanisme fokal menunjukkan bahwa gempa-gempa tersebut mempunyai arah jurus yang

sama pada arah timur laut-barat daya dengan *dip* $40^{\circ} - 60^{\circ}$. Arah jurus gempa yang sesuai dengan arah struktur regional di sekitar Gunung Soputan memperlihatkan kontrol struktur regional berpengaruh besar terhadap mekanisme gempa Soputan.

- Gempa yang terekam di Gunung Soputan mempunyai mekanisme non-DC yang merupakan hasil sumber gempa berupa *tensile-shear crack* atau kombinasi antara rekahan dan pergeseran (*tensile faulting*).

Ucapan Terima Kasih—Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi atas kesempatan melakukan penelitian di Gunung Soputan. Terima kasih yang mendalam penulis haturkan kepada pengamat pos PGA Gunung Soputan dan Lokon yang membantu terlaksananya penelitian ini, Sandy, Fandy, Farid T. Bina, dan semua pihak yang telah membantu hingga selesainya penulisan makalah ini.

Acuan

- Aki, K. dan Richards, P.G., 1980. *Quantity Seismology: Theory and Methods*. W.H. Freeman, New York.
- Dahm, T., 1996. Relative moment tensor inversion based on ray theory: Theory and synthetic test. *Geophysical Journal International*, 124, h.245-257.
- Iguchi, M., 1994. A vertical expansion source model for mechanism of earthquakes originated in the magma conduit of andesitic volcano: Sakurajima, Japan. *Bulletin of Volcanological Society of Japan*.
- Julian, B.R., Miller, A.D., dan Foulger, G.R., 1997. Non-double-couple earthquake mechanisms at the Hengill-Greisdalur volcanic complex, southwest Iceland. *Geophysical Research Letters*, 24, h.743-746.
- Jost, M.L. dan Hermann, R.B., 1989. A student's guide to and review of moment tensor. *Seismology Research Letters*, 60.
- Knopoff, L., dan Randall, M. J. 1970. The compensated linear vector dipole: A possible mechanism for deep earthquakes. *Journal of Geophysical Resources*, 75, h. 4957-4963.
- Moechtar, H., Pratomo, I., dan Mulyana, H., 2007. Gerakan struktur dan kaitannya dengan faktor kendali tektonik, berdasarkan analisis stratigrafi; Studi kasus geologi kuarter terhadap fase perkembangan Danau Tondano purba sepanjang Remboken - Kakas, Kec. Remboken dan Kec. Kakas, Kab. Tomohon, Sulawesi Utara. *Jurnal Geologi Indonesia*, 2(3), h.182.
- Nishi, K., 2001. A three-dimensional robust seismic ray tracer for volcanic regions. *Earth Planet Space*, 53, h. 101-109.
- Ratdomopurbo, A., 1992. *Étude de séismes de type-A du volcan Merapi (Indonésie)*. DEA Report, Univ. Joseph Fourier Grenoble I, Grenoble, 60 h.

- Shimizu, H., Ueki, S., dan Koyama, J., 1987. A tensile-shear crack model for mechanism of volcanic earthquakes. *Tectonophysics*, 144, h.287-300.
- Sipkin, S.A., 1986. Interpretation of non-double couple earthquake mechanisms derived from moment tensor inversion. *Journal of Geophysical Research*, h.531-547.
- Triastuty, H., Iguchi, M., dan Tameguri, T., 2006. Source mechanism of monochromatic and low-frequency events at Papandayan volcano, West Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Physics*, 17(3), h.63-72.
- Vavrycuk, V., 2001. Inversion for parameters of tensile earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, h. 106.
- Vavrycuk, V., 2005. Focal mechanisms in anisotropic media. *Geophysical Journal International*, 161, h.334-336.