Bulletin of Scientific Contribution
GEOLOGY

Fakultas Teknik Geologi
UNIVERSITAS PADJADJARAN
homepage: http://jurnal.unpad.ac.id/bsc
p-ISSN: 1693-4873; e-ISSN: 2541-514X

Volume 17, No.3
Desember 2019

PENENTUAN DISTRIBUSI SLIP DAN ASPERITAS GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE INVERSI GELOMBANG BADAN TELESEISMIK STUDI KASUS: GEMPABUMI LOMBOK M_w 6,9 (9 AGUSTUS 2018)

Ramadhan Priadi [1,3], Admiral Musa Julius[2,3], dan Iman Suardi[1,3]
1) Program Studi Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)
2) Program Studi Manajemen Bencana, Fakultas Keamanan Nasional, Universitas Pertahanan (UNHAN)
3) Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)

ABSTRACT

On August 9, 2018, there was a significant earthquake with a magnitude of M_w 6.9 (14:56:28 UTC). The earthquake was one of the earthquakes in the series of Lombok earthquakes in the July-August 2019 period. It was suspected that the Lombok earthquake was caused by back-arc thrust activity but it was still difficult to interpret the main cause. One way that can be done to find out what is happening is sourced by doing moment tensor inversion. Inversion moment tensor is performed to separate the waveform recorded on the seismogram from the ray path function and the instrument function so that the waveform is obtained at the source. The method used in performing moment tensor inversion is the tele seismic body wave inversion method. Tele seismic waves are chosen because tele seismic waves have low frequencies as a result of distant propagation so that high frequencies are attenuated during earthquake wave propagation. The BHZ component is used because the P wave is recorded clearly in component Z. The seismic station used is a seismic station with the distance between stations to the source ranging from 30^0-90^0 so a tele seismic wave signal is obtained. From the processing results obtained fault parameters namely strike 266^0, dip 70^0, and *rake 96^0. The comparison between the observed signal and the synthesis signal produces a variance of 0.1687. The extent of the fault plane from the inversion results is estimated at strike 48 km × dip 42 km. In this earthquake, a seismic moment of M_0* 0.428E+20 Nm *was obtained. The moment magnitude generated from the inversion process is M_w* 7,02 *with a depth of 28 km. From the inversion results obtained if the type of fault that occurs is a reverse fault with source duration for 45 s. The maximum slip generated from the inversion process is 1.05 m. From the slip results, it is known that in the Lombok earthquake M_w* 6,9 *there was pressure from south to north. This was also reinforced by the high assumptions in the northern region of Lombok. The area around Mount Agung has areas with high asperity. Areas with high asperity indicate if the region is an area with a high locking zone. The locked zone has great energy when released. Because the largest aspiration zone is north of Lombok and receives pressure from the south, it is indicated that back-arc thrust is the main cause of the Lombok earthquake.*
Keywords*: asperity, slip distribution, finite fault*

ABSTRAK

Pada tanggal 9 agustus 2018 terjadi gempa signifikan dengan magnitude M_w 6,9 (14:56:28 UTC). Gempa bumi tersebut merupakan salah satu gempa dari rangkaian gempabumi Lombok pada periode bulan Juli-Agustus 2019. Diduga jika gempabumi Lombok disebabkan oleh adanya aktivitas *back-arc thrust* namun masih sulit untuk menginterpretasikan penyebab utamanya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui apa yang terjadi disumber dengan melakukan inversi moment tensor. Inversi moment tensor dilakukan untuk memisahkan *waveform* yang tercatat di seismogram dari fungsi raypath dan instrument sehingga diperoleh *waveform* di sumber. Metode yang digunakan dalam melakukan inversi moment tensor adalah metode *teleseismic body wave inversion*. Gelombang teleseismik dipilih karena gelombang teleseismic

memiliki frekuensi gelombang rendah akibat dari penjalaran yang jauh sehingga frekuensi tinggi sudah teratenuasi selama penjalaran gelombang gempabumi. Komponen BHZ digunakan karena gelombang P terekam jelas di komponen Z. Stasiun seismik yang digunakan merupakan stasiun seismik dengan jarak antara stasiun ke sumber berkisar antara 30°-90° sehingga diperoleh rekaman sinyal gelombang teleseismik. Dari hasil pengolahan diperoleh parameter sesar yaitu *strike* 266°, *dip* 70°, dan *rake* 96°. Perbandingan antara sinyal observasi dan sinyal sintesis menghasilkan varian sebesar 0,1687. Luasan bidang sesar dari hasil inversi diestimasikan sebesar *strike* 48 km × *dip* 42 km. Pada gempabumi ini diperoleh momen seismik sebesar M_o 0.428E+20 Nm. Magnitudo moment yang dihasilkan dari proses inversi adalah M_w 7,02 dengan kedalaman 28 km. Dari hasil inversi diperoleh jika jenis patahan yang terjadi merupakan merupakan jenih patahan *reverse* (naik) dengan *source duration* selama 45 s. Slip maksimum yang dihasilkan dari proses inversi adalah 1,05 m. Dari hasil *slip* diketahui jika pada gempabumi Lombok M_w 6,9 terjadi desakan dari arah selatan ke utara. Hal tersebut juga diperkuat dengan adanya asperitas tinggi di wilayah utara Lombok. Wilayah sekitar gunung Agung memiliki daerah-daerah dengan asperitas tinggi. Daerah dengan asperitas tinggi mengindikasikan jika wilayah tersebut merupakan wilayah dengan zona kuncian yang tinggi. Zona kuncian tersebut memiliki energi yang besar ketika *release*. Karena zona asperitas terbesar berada di utara Lombok dan menerima desakan dari arah selatan maka diindikasikan jika memang *back-arc thrust* merupakan penyebab utama gempa bumi Lombok.

Kata kunci: asperitas, distribusi slip*, finite fault*

PENDAHULUAN

Aktivitas seismik pulau Lombok dihasilkan oleh penujaman lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia (Ibrahim dkk., 2010). Selain penujaman subduksi terdapat sesar Flores *back-arc thrust* yang memberikan pengaruh terhadap aktivitas seismik di pulau Lombok. Hamilton (1979) menemukan adanya Flores *back-arc thrust* berdasarkan penelitian aktivitas seismisitas pada daerah Sumbawa. Flores *back-arc thrust* merupakan sesar aktif di sebelah utara pulau Lombok yang memanjang dari utara pulau Bali hingga pulau Sumbawa (Silver dkk., 1986). Pada tanggal 9 Agustus 2018 terjadi gempabumi signifikan di Lombok dengan magnitudo M_w 6,9 (14:56:28 UTC). Gempabumi signifikan yang terjadi di Lombok masih belum bisa dijelaskan secara pasti penyebabnya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mempelajari penyebab gempabumi Lombok adalah dengan menggunakan mekanisme sumber. Parameter orientasi bidang sesar dapat diperoleh menggunakan inversi *waveform* pada gelombang badan. Spektrum dan bentuk sinyal seismik dari gelombang badan memberikan informasi penting tentang detail proses *rupture* di sumber (Kikuchi dkk., 2003).

Pada penentuan mekanisme sumber gempabumi digunakan *waveform* yang tercatat pada stasiun lokal untuk memperoleh parameter mekanisme sumber secara cepat, namun terdapat kekurangan dalam penggunaan *waveform* pada stasiun lokal yaitu pengaruh *noise* yang masih sangat besar. Kikuchi dan Kanamori (1982) menyelesaikan masalah tersebut dengan membuat perumusan untuk mengurangi *noise waveform* menggunakan data *waveform* teleseismik. Kikuchi dan Kanamori telah menyatukan perumusan tersebut dalam program *Teleseismic Body-Wave Inversion* yang dapat digunakan untuk menginversi sinyal observasi pada seismogram menjadi fungsi waktu sumber sehingga diperoleh interpretasi terhadap asperitas, distribusi *slip* dan orientasi pada bidang sesar.

Program *Teleseismic Body-Wave Inversion* menggunakan fase gelombang P, SH, SV, dan PP secara bersamaan dalam proses inversi kemudian struktur *multi-layer* digunakan untuk menghitung respon dari sumber. Gelombang teleseismik digunakan untuk mengurangi pengaruh *noise* lokal sehingga dapat memperoleh sinyal dengan frekuensi rendah yang baik untuk dilakukan interpretasi mekanisme sumber (Kikuchi dan Kanamori, 1991). Pada penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan oleh Yamanaka dan Kikuchi (2003) dari inversi gelombang badan menggunakan data teleseismik diperoleh jika gempabumi Tokachi-oki tahun 2003 merupakan perulangan dari gempabumi Tokachi-oki 1952. Hal tersebut dibuktikan berdasarkan proses *rupture*, nilai asperitas, dan arah *slip* dengan asumsi jika asperitas muncul pada wilayah dengan *aftershock* yang paling sedikit.

Selain itu Kikuchi dkk. (2003) membuktikan jika jumlah *slip* dan energi terbesar tidak selalu berada di posisi hiposenter melainkan berada pada zona asperitas. Zona asperitas

merupakan area pada bidang sesar yang saling mengunci akibat kekasaran permukaan pada dua bidang batuan dalam kontak yang *rigid.* Wilayah kuncian tersebut memiliki *released* momen seismik yang besar dan menghasilkan gempabumi signifikan (Yamanaka dan Kikuchi, 2004). Karakterisasi mekanisme sumber dengan menggunakan inversi gelombang teleseismik memiliki keakuratan yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan gelombang *near-field*. Inversi gelombang teleseismik dapat digunakan untuk interpretasi terhadap asperitas, distribusi *slip*, dan orientasi pada bidang sesar. Berdasarkan penjelasan tersebut maka proses mekanisme sumber yang terjadi pada gempabumi besar di Lombok dapat dipelajari secara rinci.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data *waveform* teleseismik gempabumi lombok pada tanggal 9 Agustus 2018 dengan luasan daerah penelian 8° LS - 9,13° LS hingga 115,76° BT - 116,79° BT. Data *waveform* diperoleh dari laman *IRIS* (*Incorporated Research Institution for Seismilogy*). Komponen seismogram yang digunakan dalam penelitian ini adalah komponen Z dari seismometer broadband. Komponen BHZ digunakan karena gelombang P terekam jelas di komponen Z. Stasiun seismik yang digunakan merupakan stasiun seismik dengan jarak antara stasiun ke sumber berkisar antara 30^0-90^0 sehingga diperoleh rekaman sinyal gelombang teleseismik. Data kordinat stasiun seismik yang digunakan dalam penelitian diperlihatkan oleh Tabel 1.

Tabel 2. Data kordinat stasiun seismik penelitian

No	Nama Stasiun	Latitude	Longitude	Elevasi
1	ABPO	-19.02°	47.23°	1528 m
2	MAKZ	46.81°	81.98°	600 m
3	KBL	34.54°	69.04°	1920 m
4	SNZO	-41.31°	174.70°	120 m
5	MSVF	-17.74°	178.05°	801 m
6	YSS	46.96°	142.76°	150 m
7	CASY	-66.28°	110.54°	10 m
8	HIA	49.27°	119.74°	620 m
9	MCQ	-54.50°	158.96°	14 m
10	WAKE	19.28°	166.65°	20 m
11	ERM	42.02°	143.16°	40 m
12	MDJ	44.62°	129.59°	290 m
13	KWJN	9.29°	167.54°	0 m
14	TAU	-42.91°	147.32°	132 m
15	DGAR	-7.41°	72.45°	1 m

Kikuchi dan Kanamori (1993), menemukan solusi untuk melakukan inversi moment tensor menggunakan data teleseismik untuk mengurangi pengaruh *noise* lokal sehingga diperoleh data sinyal gelombang dengan frekuensi rendah yang baik. Pertama-tama dilakukan pengecekan terhadap fase gelombang P dan SH. Pada semua stasiun seismik yang digunakan dilakukan perhitungan *power spectral*. Selanjutnya perbedaan atenuasi antara fase gelombang P dan gelombang SH dengan mengalikannya dengan faktor berikut:

$$exp\left[2\pi f(t_s^* - t_p^*)\right] \qquad (1)$$

Dalam faktor tersebut t_s^* dan t_p^* merupakan konstanta atenuasi untuk gelombang P dan gelombang S. Terdapat beberapa kriteria parameter yang digunakan untuk perhitungan inversi *waveform.* Selanjutnya menyiapkan komputasi *Green function* dengan menghitung fungsi sumber dan fungsi penerima menggunakan matriks Haskell.Bidang sesar diasumsikan memiliki distribusi *slip* yang temporal dan spasial disetiap arah pada masing-masing bidang sesar yang diperluas secara spasial oleh persamaan yang dikembangkan oleh Kikuchi dan Kanamori (1993) sebagai berikut:

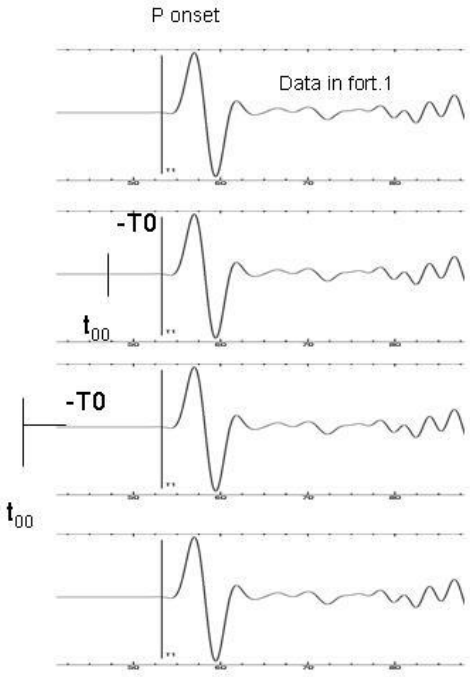
$$\Delta\dot{u}_i(x,t) = \sum_{j=1}^{J} P^j \hat{u}_t^j(t) \phi^j(x) f^j(x,t) \quad (2)$$

Unit vektor yang merepresentasikan arah *slip* dinotasikan oleh $\hat{u}_t^j(t)$. Arah *slip* selalu sejajar dengan bidang sesar dan merupakan fungsi terhadap waktu. $\phi^j(x)$ merupakan fungsi basis spasial dan $f^j(x,t)$ merupakan fungsi waktu *slip*. Dilakukan integral pada persamaan 2 untuk *t*= ∞ sehingga akan diperoleh hasil akhir distribusi *slip* yang dirumukan sebagai:

$$\Delta\dot{u}_i(x) = \sum_{j=1}^{J} P^j \hat{u}_t^j \phi^j(x) \quad (3)$$

$$\hat{u}_t^j = v_i^1 cos\hat{\theta}^j + v_i^2 sin\hat{\theta}^j \quad (4)$$

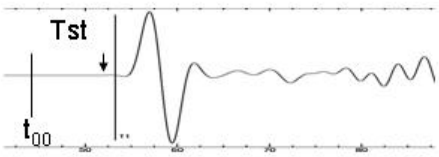
Notasi $\hat{u}_t^j$ menunjukkan arah *rake* pada hasil akhir distribusi *slip* yang dijabarkan pada persamaan 2. Pada penentuan hasil akhir distribusi *slip* digunakan dua unit vektor *pendicular* pada bidang sesar yaitu v^1 dan v^2. Besaran sudut *rake* dinotasikan sebagai $\hat{\theta}^j$ yang diukur dari v^1 dan v^2.



Gambar 1. Penentuan waktu awal data (*T0*) yang digunakan untuk (Kikuchi dan Kanamori, 2003)

Distribusi *slip* ditentukan berdasarkan *T0* (*Start-time*) dan T_{st} (*Rupture start time*), *T0* menentukan awal data yang akan digunakan untuk inversi sedangkan T_{st} menentukan awal mulai terjadinya *rupture*. Waktu mulai dari data yang akan digunakan dipilih pada -*T0* beberapa detik sebelum waktu tiba gelombang P, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Misalnya, jika *T0* = -10 detik, maka 10 detik sebelum waktu P ditetapkan sebagai awal data yang akan digunakan untuk inversi. Awal waktu data yang ditetapkan menjadi t_{00}. Waktu ketika *rupture* dimulai pada pemilihan titik awal *rupture* (x_0, y_0) diukur dari awal data yang ditentukan yaitu t_{00}. Sehingga bentuk

gelombang dimulai pada t_{00} yang ditambahkan T_{st}.

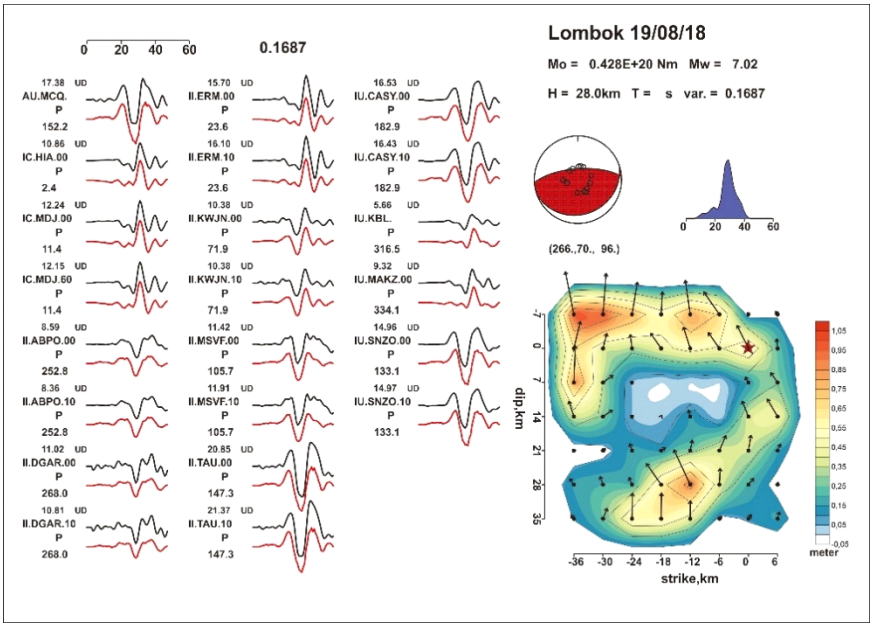


Gambar 2. Penentuan t_{00} dan T_{st} yang digunakan untuk menentukan *slip* pada titik x_0, y_0 (Kikuchi dan Kanamori, 2003)

Gambar 2 memperlihatkan data antara data t_{00} dan T_{st} yang digunakan untuk menentukan *slip* pada titik x_0,y_0. jika T_{st} terlalu besar (seperti, T_{st} = 30 detik), maka bagian awal dari gelombang diabaikan. Sebaliknya, jika T_{st} terlalu kecil, tidak ada *slip* yang dapat ditempatkan pada (x_0, y_0).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan pada gempabumi Lombok M_w 6,9 tanggal 9 Agustus 2018 (14:56:28 UTC) diperoleh parameter mekanisme sumber baru dari hasil *fitting waveform* untuk memperoleh sebuah parameter *finite fault*. Sebelum mendapatkan parameter finite fault, maka terlebih dahulu menentukan parameter *point source* dari hasil inversi gelombang badan. Pada inversi *point source* sebuah gempabumi dianggap sebagai sebuah titik. Dari hasil pengolahan *point source* diketahui jika *strike* 96^0, *dip* 21^0, dan *rake* 98^0 pada bidang nodal 1 sedangkan *strike* 267^0, *dip* 69^0, dan *rake* 87^0 pada bidang nodal 2. Untuk penentuan *fault plane* dan *auxiliaty plane* diperoleh hasil jika jarak antara nodal 1 ke hiposenter sebesar 3,25 km dan jarak antara nodal 2 ke hiposenter sebesar 2,57 km. Pada gempabumi Lombok M_w 6,9 memiliki jarak antara hiposenter ke centroid sebesar 6,57 km. Sehingga nodal 2 merupakan *fault plane* dan nodal 1 merupakan *auxiliary plane* karena nodal 2 memiliki jarak yang lebih dekat terhadap hiposenter.



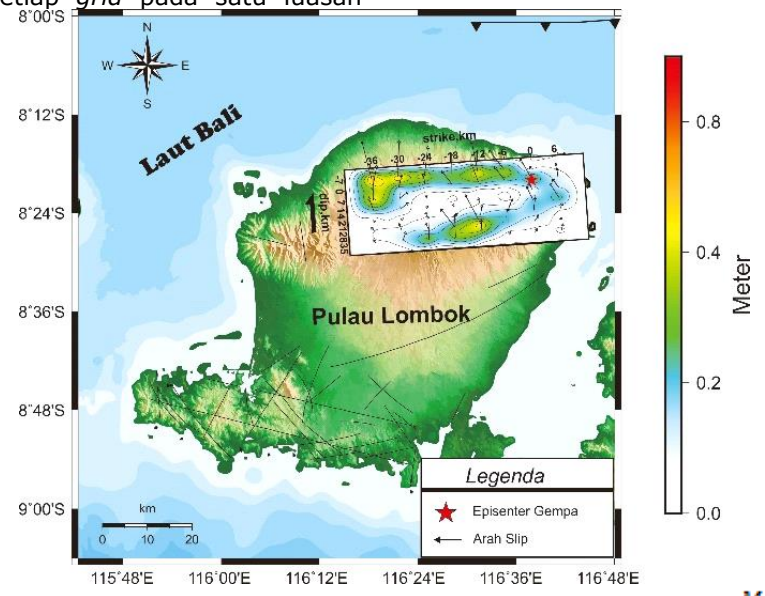
Gambar 3. Hasil inversi gelombang teleseismik dan distribusi slip pada gempabumi Lombok M_w 6,9 (14:56:28 UTC)

fault plane yang dipilih dari hasil *point source* dilakukan inversi kembali untuk memperbaiki kesalahan pada proses *point source.* Gambar 3 menunjukkan parameter sumber *finite fault strike* 266^0, *dip* 70^0, dan *rake* 96^0 yang merupakan hasil inversi menggunakan gelombang teleseismik.

Frekuensi filter yang digunakan dalam proses inversi merupakan filter *bandpass* berkisar antara 0,022 Hz – 0,16 Hz. Perbandingan antara sinyal observasi dan sinyal sintesis menghasilkan varian sebesar 0,1687. Luasan bidang sesar dari hasil inversi diestimasikan sebesar *strike* 48 km × *dip* 42 km.

Diasumsikan jika hiposenter tidak berada di zona asperitas terbesar. Pada hasil pengolahan terlihat jika hiposenter tidak berada pada zona asperitas terbesar. Zona asperitas terbesar berada di strike -36 km dan dip -7 km. Asperitas tersebut berada disebelah kiri dari letak hiposenter dengan luasan *co-sesimic* hingga menyelimuti wilayah hiposenter. Pada gempabumi ini diperoleh momen seismik sebesar M_0 0.428E+20 Nm. Magnitudo moment yang dihasilkan dari proses inversi adalah M_w 7,02 dengan kedalaman 28 km.

Dari hasil inversi diperoleh jika jenis patahan yang terjadi merupakan merupakan jenih patahan *reverse* (naik) dengan *source duration* selama 45 s. Setiap *grid* pada satu luasan bidang sesar memiliki besaran dan arah *slip* yang berbeda masing-masing. Dalam menentukan arah slip gempabumi maka dapat dilakukan dengan melihat arah dominan *slip* yang terbentuk dari keselurusan *grid* pada luasan bidang sesar. Pada gempabumi Lombok M_w 6,9 slip maksimum yang dihasilkan dari proses inversi adalah 1,05 m. Dari hasil *slip* diketahui jika pada gempabumi Lombok M_w 6,9 terjadi desakan dari arah selatan ke utara. Hal tersebut juga diperkuat dengan adanya asperitas tinggi di wilayah utara Lombok. *Source time function* yang digunakan merupakan *sorce time boxcar*. *Sorce time function* tersebut dipilih karena dapat menentukan awal terjadinya *rupture* dan durasi pelepasan energi yang terjadi di sumber. Dilakukan proyeksi orthogonal untuk dapat memetatakan secara pasti zona asperitas di wilayah Lombok. Hasil yang diperoleh berupa panjang dan lebar sesar dalam satuan km maka perlu dikonversi menjadi derajat, kemudian panjang dan lebar yang sudah dikonversi akan diproyeksikan ke permukaan menggunakan proyeksi orthogonal. Proyeksi ini dilakukan agar dapat memastikan sebaran distribusi *slip* yang dilihat dari permukaan. gambar 4 memperlihatkan peta distribusi *slip* dan zona asperitas dari hasil proyeksi orthogonal.



Gambar 4. Peta distribusi slip dan zona asperitas pada gempabumi Lombok M_w 6,9 (14:56:28 UTC)

Distribusi *slip* dominan mengarah ke utara timur laut wilayah Lombok meskipun terdapat bebesapa *slip* yang mengarah ke barat laut. Hiposenter gempabumi tidak pernah berada di sekitar daerah dengan asperitas tertinggi. Zona aspertitas tertinggi berada disebelah barat laut dari hiposenter gempabumi. Dari hasil proyeksi yang dipetakan di permukaan terlihat jika

asperitas berada pada bagian *up-dip*. Asperitas pada bagian *up-dip* menyebabkan akumulasi energi berada pada bagian atas bidang sesar sehingga ketika *release* gempabumi ini sangat dirasakan dipermukaan.

Daerah dengan asperitas tinggi mengindikasikan jika wilayah tersebut merupakan wilayah dengan zona kuncian yang tinggi. Zona kuncian tersebut memiliki energi yang besar ketika release. Energi terserbar dari sebuah gempabumi tidak berada di hiposenter, melainkan wilayah dengan aspertitas tinggi yang mengindikasikan akumulasi energi dari proses kuncian batuan (Kikuchi dkk., 2003).

Pada gempabumi Lombok M_w 6,9 asperitas tunggal tidak terbentuk yang mengindikasikan jika wilayah Lombok memiliki sifat batuan yang *brittle.*

KESIMPULAN

Gempabumi Lombok M_w 6,9 (14:56:28 UTC) merupakan patahan *reverse fault* (sesar naik). Hasil inversi gelombang body telesismik diperoleh luas bidang sesar sebesar 48 km × 42 km pada arah *strike* dan *dip.* Moment rate dari gempabumi Lombok sebesar M_0 0.428E+20 Nm atau setara dengan magnitude M_w 7,02. Distribusi *slip* dominan mengarah ke utara timur laut dengan asperitas berada pada bagian *up-dip*. Asperitas pada bagian *up-dip* menyebabkan akumulasi energi berada pada bagian atas bidang sesar sehingga ketika *release* gempabumi ini sangat dirasakan dipermukaan. Dalam menginterpretasikan proses di sumber diperlukan gelombang dengan frekuensi rendah yang bagus. Sehingga inversi gelombang body teleseismik sangat baik dilakukan untuk menginterpretasikan sumber karena gelombang dengan frekuensi tinggi sudah berkurang akibat propagasi gelombang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada STMKG dan BMKG, serta bantuan dan dukungan sehingga tulisan ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

Bormann, P., 2002, New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), vol. 1. *GeoForschungs Zentrum Potsdam, Potsdam*.

Dahm, T., dan Kruger, F., 2014, Moment tensor inversion and moment tensor interpretation. *New Manual of Seismological Observatory Practice*, *2*, 1–37.

Goldstein, Peter., Dodge, D., Firpo, M., Minner, L., Lee, W. H. K., Kanamori, H., … dan Kisslinger, C., 2003, SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers. *The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, *81*, 1613–1620.

Hamada, N., 2003, Re-examination of focal area of the 1952 Tokachi-oki earthquake. *Prog. Abstr. Seismol. Soc. Jpn.*, *2*, A044.

Hamilton, W. B., 1979, *Tectonics of the Indonesian region*. US Govt. Print. Off.

Hayes, G. P., Wald, D. J., & Johnson, dan R. L., 2012, Slab1. 0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *117*(B1).

Ibrahim, G., Subardjo, dan Senjaya, P., 2010, Tektonik dan Mineral di Indonesia. *Jakarta, Puslitbang BMKG*.

Suardi, I., Yagi, Y., Widiyantoro, S., dan Meilano, I., 2013, Analysis of Source Rupture Process of the September 2, 2009 Tasikmalaya Earthquake by using The Joint Inversion Method of Near Field and Teleseismic Data. *Study Program of Earth Sciences, Institut Teknologi Bandung, Bandung*.

Ide, S., 2015, 4.09-slip inversion. *Treatise on Geophysics, 2nd Edn. Elsevier, Oxford*, 215–241.

Kikuchi, M., dan Kanamori, H., 1982, Inversion of complex body waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *72*(2), 491–506.

Kikuchi, M., dan Kanamori, H. 1986, Inversion of complex body waves-II. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *43*(3), 205–222.

Kikuchi, M., dan Kanamori, H., 1991, Inversion of complex body waves—III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *81*(6), 2335–2350.

Kikuchi, M., Kanamori, H., dan Satake, K., 1993, Source complexity of the 1988 Armenian earthquake: Evidence for a slow after-slip event. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *98*(B9), 15797–15808.

Kikuchi, M., dan Kanamori, H, 1996, Rupture process of the Kobe, Japan, earthquake of Jan. 17, 1995, determined from teleseismic body waves. *Journal of Physics of the Earth*, *44*(5), 429–436.

Kikuchi, M., Nakamura, M., dan Yoshikawa, K., 2003, Source rupture processes of the 1944

Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms. *Earth, Planets and Space*, *55*(4), 159–172.

Lay, T., dan Wallace, T. C., 1995, Modern global seismology. Academic. *Inc. San Diego, CA*.

Silver, E. A., Breen, N. A., Prasetyo, H., dan Hussong, D. M., 1986, Multibeam study of the Flores backarc thrust belt, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *91*(B3), 3489–3500.

Yamanaka, Y., dan Kikuchi, M., 2003, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves. *Earth, Planets and Space*, *55*(12), e21–e24.

Yamanaka, Y., dan Kikuchi, M., 2004, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *109*(B7).