

JURNAL LINGKUNGAN DAN BENCANA GEOLOGI Journal of Environment and Geological Hazards

ISSN: 2086-7794, e-ISSN: 2502-8804 Akreditasi LIPI No. 692/AU/P2MI-LIPI/07/2015 e-mail: jlbg\_geo@yahoo.com - http://jlbg.geologi.esdm.go.id/index.php/jlbg

# Relokasi Gempa Bumi *Teleseismic Double-Difference* di Wilayah Bali - Nusa Tenggara dengan Model Kecepatan 3D

Teleseismic Double-Difference Relocation of Earthquake in Bali - Nusa Tenggara Region with A 3D Velocity Model

Tio Azhar Prakoso Setiadi, Supriyanto Rohadi

Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG Jl. Angkasa, 1 No. 2, Kemayoran, Jakarta - Indonesia *e-mail*: tio.prakoso@bmkg.go.id

## ABSTRAK

Bali dan Nusa Tenggara memiliki kondisi tektonik yang kompleks. Aktivitas kegempaan di wilayah penelitian bersumber dari Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dan pensesaran naik busur belakang. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi tektonik dan kegempaan di wilayah Bali hingga Nusa Tenggara berdasarkan metode relokasi *Teleseismic Double-Difference* dengan model kecepatan 3D. Data yang digunakan adalah katalog gempa bumi BMKG pada periode pengamatan Januari 2010 - Februari 2017 sebanyak 4.201 kejadian gempa bumi. Hasil relokasi menunjukkan pola sebaran gempa bumi didominasi oleh gempa-gempa dangkal di wilayah barat daerah penelitian. Semakin ke arah timur semakin dalam, yang mengindikasikan bahwa gempa bumi tersebut berasosiasi dengan zona subduksi.

Kata kunci: gempa bumi, relokasi, hiposentrum, Teleseismic Double-Difference

## ABSTRACT

Bali and Nusa Tenggara has a complex tectonic condition. Seismic activity on the regions is generally derived by Indo-Australia Subduction Activity (Sunda Arc) and the back-arc thrust. The objective of this research is to analyze the condition of tectonic setting and the seismicity of these regions using the Teleseismic Double-Difference method with a 3D velocity model. The data are derived from BMKG catalog with the period of observation from Januari 2010 - Februari 2017 with 4201 earthquake events. The result of hypocentre relocation showed the earthquake distribution pattern is dominated by shallow earthquake in the west region of the studied area, and the depths increased to the east of the studied area and mainly indicated by the subduction earthquake activity.

Keywords: earthquake, relocation, hypocentre, Teleseismic Double-Difference

#### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah tektonik dan kegempaan yang sangat aktif. Tiga lempeng tektonik saling bertemu dan membentuk jalurjalur lempeng tektonik yang aktif dan kompleks (Bird, 2003). Salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki tingkat aktivitas seismik tinggi adalah wilayah Bali hingga Nusa Tenggara.

Wilayah selatan Bali hingga Nusa Tenggara merupakan bagian dari tunjaman lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia yang bergerak dengan kecepatan 6 - 7,3 cm/tahun ke arah utara (DeMets drr., 2010). Selain disebabkan oleh tunjaman antara lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia, aktivitas kegempaan di wilayah ini juga disebabkan oleh adanya pensesaran naik busur belakang (Back-arc thrusting) di bagian utara Bali dan Nusa Tenggara (Hamilton, 1979). Hal ini didukung oleh beberapa penelitian tentang aktivitas kegempaan pada patahan naik busur belakang. Widiyantoro dan Fauzi (2005) menyebutkan bahwa gempa bumi dengan hiposentrum kurang dari 50 km banyak terjadi di wilayah utara Bali hingga utara Flores dengan mekanisme sumber sesar naik.

Dalam mempelajari aktivitas kegempaan dan tektonik di suatu wilayah, penentuan parameter hiposentrum gempa bumi secara akurat sangatlah penting, terutama dalam analisis yang berkaitan dengan kondisi tektonik. Penentuan hiposentrum yang akurat diperlukan untuk analisis tektonik secara lebih terperinci, seperti identifikasi tektonik dan bidang patahan tunjaman (Rohadi drr., 2012). Metode relokasi hiposentrum yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Teleseismic Double-Difference (TeletomoDD). Metode ini dapat menghitung banyak data gempa bumi secara bersaman dengan akurasi tinggi, walaupun struktur dalam bumi sangat beragam dan sebaran stasiun tidak merata (Pesicek, 2010). Setiadi drr. (2016) yang menggunakan metode TeletomoDD telah mendapatkan hasil relokasi hiposentrum gempa bumi yang teliti dan mampu memberikan gambaran pola tektonik di wilayah Lempeng Laut Maluku.

#### METODE PENELITIAN

Data dalam penelitian ini adalah data waktu tiba gelombang P yang di-*download* dari katalog BMKG untuk wilayah Bali dan Nusa Tenggara dengan batasan wilayah penelitian 6° LS - 12° LS dan 113° BT - 124° BT. Rentang waktu data kegempaan yang dipakai adalah dari Januari 2010 sampai Februari 2017, sedangkan rentang magnitudo (M) 1 - 9,5 dan hiposentrum 1 - 1.000 km. Jumlah data yang diperoleh adalah 6.547 kejadian gempa bumi (Gambar 1).



Gambar 1. Kegempaan wilayah Bali dan Nusa Tenggara tahun 2010 - 2017.

# Metode Teleseismic Double-Difference (TeletomoDD)

Pada saat ini telah dikembangkan teknik relokasi hiposentrum untuk mendapatkan data yang akurat, salah satunya yaitu menggunakan metode TeletomoDD. Metode TeletomoDD merupakan pengembangan dari metode Double-Difference (DD). Prinsip metode DD menganggap bahwa pada setiap gempa bumi yang berpasangan, yaitu dua gempa yang memiliki jarak hiposentrum yang sangat kecil dibandingkan jarak terhadap stasiun, raypath kedua gempa dapat dianggap mendekati sama. Dengan demikian, selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terekam pada satu stasiun yang sama dianggap hanya sebagai fungsi jarak antara kedua hiposentrum. Residual relatif waktu tempuh antara dua gempa, i dan j, terhadap stasiun k adalah:

$$\frac{\partial t_{k}^{i}}{\partial m} \Delta \boldsymbol{m}^{i} - \frac{\partial t_{k}^{j}}{\partial m} \Delta \boldsymbol{m}^{j} = dr_{k}^{ij} \tag{1}$$

\*k waktu tempuh dari hiposentrum gempa i ke stasiun k

 $t_k^j$  waktu tempuh dari hiposentrum gempa bumi j ke stasiun k

 $\Delta m^i$  dan  $\Delta m^j$  adalah selisih model awal dengan model hasil inversi untuk *event* i dan j

Pada awalnya metode *DD* digunakan dalam koordinat kartesian, kemudian dikembangkan

untuk koordinat *spherical* oleh Waldhauser dan Schaff (2007) serta Pesicek (2009). Ilustrasi metode *DD* untuk jarak teleseismik dapat dilihat pada Gambar 2.

Fungsi pembobotan (w) dalam metode DD bergantung pada jarak antar gempa bumi dan opening angle ( $\alpha$ ) yang merupakan *take-off angle* dari titik tengah pasangan gempa bumi (Gambar 2b). Fungsi w berbanding terbalik dengan jarak antar gempa bumi dan opening angle. Pesicek drr. (2010) mengembangkan metode DD untuk kasus teleseismik dengan mengadopsi metode penjejakan sinar gelombang Pseudo-Bending untuk kasus spherical earth (Koketsu dan Sekine, 1998). Model kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah model kecepatan 3D untuk wilayah Indonesia (Widiyantoro dan van der Hilst, 1997) dengan ukuran grid 1°x1° dan model 1D ak135 (Kennett drr., 1995) untuk area di luar Indonesia. Model kecepatan 3D digunakan untuk mengakomodasi keragaman struktur bawah permukaan Indonesia seperti adanya slab dan magma. Lapisan model 3D yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. (a) Skema metode DD pada dua gempa bumi i dan j yang berjarak d dan direkam oleh stasiun k1 dan k2 serta  $\alpha$  merupakan opening angle, dan (b) Permukaan 3D yang menyatakan hubungan antara d,  $\alpha$ , dan bobot (w) (Pesicek, 2009).

Tabel 1. Rentang Kedalaman untuk Model Kecepatan 3D (Widiyantoro dan van der Hilst, 1997)

No Lapisan	Rentang K e d a l a m a n (km)	No Lapisan	Rentang Ke- dalaman (km)
1	0 - 35	11	570-660
2	35 - 70	12	660-750
3	70 - 110	13	750-840
4	110 - 160	14	840-930
5	160 - 220	15	930-1020
6	220 - 280	16	1020-1130
7	280 - 340	17	1130-1250
8	340 - 410	18	1250-1400
9	410 - 490	19	1400-1600
10	490 - 570		



Gambar 3. Model kecepatan ak135 (Kennet drr., 1995).

## HASIL DAN PEMBAHASAN Validasi Hasil Relokasi *TeletomoDD*

Untuk menguji hasil relokasi *TeletomoDD*, pada penelitian ini dilakukan pengujian distribusi frekuensi residual waktu tempuh untuk sebelum dan sesudah relokasi menggunakan grafik histogram. Hasil relokasi yang baik dapat dilihat pada histogram yang menunjukkan frekuensi tinggi yang mendekati angka nol (0). Distribusi frekuensi *residual time* pada saat sebelum dan sesudah relokasi hiposentrum menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan (Gambar 4). Hal ini mengindikasikan setelah dilakukan relokasi, dihasilkan perubahan posisi hiposentrum yang lebih baik dan mendekati posisi episentrum yang sebenarnya.



Gambar 4. Histogram residual waktu tempuh sebelum dan setelah relokasi.



Gambar 6. (a) Histogram perubahan kedalaman hiposentrum dari proses relokasi dalam interval 5 km, (b) diagram mawar untuk menunjukkan frekuensi arah dominan pergeseran episentrum gempa bumi, dan (c) diagram kompas untuk menunjukkan arah dan jarak pergeseran episentrum gempa bumi.

Perubahan hiposentrum gempa bumi setelah dilakukan relokasi dapat dilihat dalam Gambar 5a. Perubahan hiposentrum tersebut dominan bernilai positif, dan ini berarti hiposentrum menjadi lebih dalam dengan pergeseran hiposentrum dominan sejauh 5 - 10 km. Analisis diagram mawar (Gambar 5b) menunjukkan arah dominan pergeseran episentrum adalah utara dan selatan. Hasil ini sesuai dengan pola subduksi di wilayah Bali dan Nusa Tenggara yang didominasi subduksi Busur Sunda di bagian Selatan, dan Back-arc thrusting di bagian utara. Besarnya pergeseran episentrum beserta arahnya dapat dilihat dalam diagram kompas (Gambar 5c). Panah berwarna merah menggambarkan pergeseran episentrum antara 0 -0,4 km. Perubahan yang cukup besar pada pusat gempa bumi dan hiposentrum dari hasil relokasi disebabkan oleh kurang akuratnya picking waktu tiba gelombang gempa bumi, ditambah dengan sebaran stasiun yang kurang rapat di wilayah tersebut.

#### Hasil Relokasi TeletomoDD

Data awal yang digunakan pada pengolahan relokasi *TeletomoDD* terdiri atas 6.547 *events* yang diperoleh dari katalog gempa bumi BMKG (2017). Dari hasil pengolahan relokasi *teletomoDD* hingga mendapatkan hasil relokasi gempa bumi yaitu sebanyak 6.526 *events*. Berkurangnya jumlah *events* gempa bumi karena pada saat proses relokasi terdapat *events* yang tidak memenuhi kriteria yang sesuai dengan input yang diberikan.

Sebaran episentrum gempa bumi di wilayah Bali dan Nusa Tenggara sebelum dan setelah relokasi dapat dilihat pada Gambar 7a dan 7b. Jika dilihat secara horizontal, seismisitas sebelum dan setelah





Gambar 7. Peta seismisitas sebelum relokasi (a), dan setelah relokasi TeletomoDD (b)

relokasi tidak menunjukkan perubahan posisi *episentrum* yang signifikan. Karena itu, dilakukan analisis irisan penampang tegak untuk melihat pola penunjaman dan sebaran posisi hiposentrum gempa bumi dari A-A' hingga D-D'. Panjang masing-masing segmen 700 km dengan lebar tiap satu irisan sebesar 110 km.

#### Segment Irisan Vertikal Sebelum dan Setelah Relokasi

Segmen irisan penampang vertikal yang ditunjukkan oleh Gambar 8 memberikan gambaran tektonik yang lebih jelas setelah dilakukan relokasi hiposentrum

Gambar 8. Irisan penampang vertikal segment A-A', B-B', C-C', dan D-D' sebelum relokasi (merah) dan setelah relokasi (hitam) Teletomo DD.



Gambar 8. Model tiga dimensi hasil relokasi Teletomo DD.

gempa bumi yang terjadi. Gempa bumi yang membentuk suatu pola tunjaman subduksi dapat dilihat pada Gambar 8. Sebelum relokasi, banyak sekali gempa bumi dengan hiposentrum 10 km (fix depth), dan hiposentrum tersebut berubah setelah dilakukan relokasi. Lempeng Indo-Australia di bagian selatan yang menunjam lempeng Eurasia di bagian utara terdapat pada seluruh bagian bawah busur kepulauan Bali hingga Nusa Tenggara, dan memiliki penurunan hiposentrum yang signifikan ke arah utara hingga mencapai hiposentrum maksimal yang tercatat sekitar 640 km. Lapisan bumi yang semakin dalam semakin panas menyebabkan lempeng subduksi pada hiposentrum + 650 km mengalami perubahan bentuk menjadi lebih lunak dan kemudian menghilang (Gambar 7).

Sumber gempa bumi di wilayah ini tidak hanya berasal dari zona subduksi. Pada bagian utara penelitian juga terdapat sumber gempa bumi yang diakibatkan oleh pertemuan dua lempeng samudra, yang membentuk jalur gunung api di busur kepulauan tersebut, dan pensesaran naik busur belakang (*Flores Back-Arc Thrust* dan *Wetar Back-Arc Thrust*). Hal ini diperkuat oleh hasil irisan penampang vertikal (Gambar 7) yang memperlihatkan pola sebaran hiposentrum berupa gempa-gempa bumi dangkal dengan hiposentrum kurang dari 60 km. Menurut Kusnandar (2013) dan Widiyantoro (2011) wilayah utara Bali ke arah timur didominasi oleh gempa bumi dangkal dengan hiposentrum kurang dari 50 km dengan kecenderungan mekanisme sumber berupa patahan naik. Munculnya patahan naik busur belakang ini merupakan reaksi terhadap tekanan yang timbul pada busur kepulauan Bali hingga Nusa Tenggara Timur akibat tumbukan lempeng Indo-Australia terhadap busur kepulauan tersebut.

Secara tektonis dan dilihat dalam tiga dimensi, daerah slab subduksi pada daerah penelitian di sepanjang barat hingga timur, berdasarkan distribusi hiposentrum gempa bumi, memiliki kesenjangan aktivitas gempa bumi (seismic gap) pada hiposentrum yang berkisar antara 300 km -500 km (Gambar 8). Kesenjangan aktivitas gempa bumi tersebut menggambarkan bahwa tidak ada kejadian gempa bumi yang terekam pada kedalaman tersebut di wilayah penelitian. Kejadian tersebut bisa saja karena adanya pelelehan sebagian batuan pada lapisan mantel. Pelelehan tersebut merupakan kondisi suhu pada lapisan astenosfer yang lebih tinggi dibandingkan suhu leleh lapisan batuan pada hiposentrum tersebut. Pada rentang tertentu hiposentrum batuan akan mulai melentur dan meleleh, kemudian menjadi beku kembali karena melewati batas suhu pada astenosfer yang lebih kecil daripada suhu leleh batuan. Hasil penelitian ini bersesuaian dengan penelitian sebelumnya oleh Nugraha (2015) yang menggunakan data katalog hiposentrum gempa bumi Engdahl, Hilst, dan Bulland (EHB) periode tahun 1960 - 2008.

#### **KESIMPULAN**

Hasil relokasi TeletomoDD dengan model kecepatan 3D dapat menunjukkan perubahan lokasi hiposentrum yang lebih akurat di wilayah Bali dan Nusa Tenggara. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya residual waktu tempuh setelah relokasi yang mendekati nilai nol. Gempa bumi dengan *fix depth* (10 km) mengalami perubahan, sehingga distribusi hiposentrumnya lebih bervariasi.

Struktur subduksi di wilayah Bali dan Nusa Tenggara menggambarkan adanya penunjaman Indo-Australia terhadap lempeng lempeng Eurasia di sebelah utara. Pertemuan dua lempeng mengakibatkan terbentuknya jalur gunung api pada busur kepulauan dan patahan naik busur belakang (Flores Back-Arc Thrust dan Wetar Back-Arc Thrust). Hasil relokasi menunjukkan adanya penurunan hiposentrum yang signifikan ke arah utara hingga mencapai hiposentrum maksimal yang tercatat sekitar 640 km, dan ditemui adanya kesenjangan aktivitas gempa bumi di sepanjang lempeng subduksi pada hiposentrum 300 - 400 km akibat pelelehan sebagian batuan pada lapisan mantel.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG dan Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG yang telah membantu dan menyediakan data gempa bumi, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Bird, P.. 2003. An updated digital model of plate boundaries, *Geochemistry Geophysics Geosystems, Vol.* 4, No. 3, 1027.
- BMKG, 2017. Earthquake repository, BMKG Data Repository, <u>http://repogempa.</u> <u>bmkg.go.id/query.php</u> [2 Maret 2017].
- DeMets, C., Gordon, R.G., dan Argus, D.F., 2010. Geologically current plate motions. *Geophyscal Journal International*, Vol. 181, Issue 1, h.1 - 80. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x.

- Hamilton, W., 1979. *Tectonics of The Indonesian Region*, U.S. Geol. Survey Prof. Paper, h.1078,345.
- Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R., dan Buland, R., 1995. Constraints on Seismic Velocities in The Earth from Traveltimes, *Geophys. J. Int., Vol. 122*, h.108 - 124. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x
- Koketsu, K. dan Sekine, S., 1998. Pseudo-Bending Method for 3D Seismic Ray Tracing in A Spherical Earth with Discontinuities, *Geophys. J. Int., Vol. 132*, 339 - 346. DOI: 10.1046/j.1365-246x.1998.00427.x
- Kusnandar, R., 2013. Tomografi Seismik Gelombang P Wilayah Bali dan Sekitarnya, Skripsi, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Pesicek, J. D., 2009. Structure of the Sumatra-Andaman subduction zone, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- Pesicek, J.D., Thurber, C.H., Zhang, H., DeShon, H.R., Engdahl, E.R., dan Widiyantoro, S., 2010. Teleseismic Double-Difference relocation of earthquakes along the Sumatra-Andaman subduction zone using a 3-D model, *Journal of Geophysical Research, Vol.115*, B10303, AGU. DOI: 10.1029/2010JB007443.
- Rohadi, S., Widiyantoro, S., Nugraha, A.D., dan Masturyono, 2012. Relokasi Hiposentrum Gempa bumi di Jawa Tengah menggunakan Inversi Tomografi Double-Difference Simultan dan Data dari Katalog Meramex, JTM Vol. XVIII No. 2/2012, ITB, Bandung.DOI: <u>10.1063/1.4820328.</u>
- Setiadi, T.A.P., Rohadi, S., dan Heryandoko, N., 2016. Earthquake relocation in Mollucas Sea using teleseismic double difference method for tectonic setting analysis, *Proceeding of The 6th International Symposium on Earthquake and Disaster Mitigation*, Bandung. DOI: <u>10.1063/1.4987049</u>.
- Waldhauser, F. dan Schaff, D., 2007. Regional and teleseismic double-difference earthquake relocation using waveform cross-correlation and global bulletin data, *J. Geophys. Res.*, *Vol. 112.* DOI: <u>10.1029/2007JB004938.</u>

Widiyantoro, S. dan van der Hilst, R., 1997.

Mantle Structure Beneath Indonesia Inferred from High-Resolution Tomographic Imaging, *Geophys. J. Int.*, *Vol. 130*, h.167 - 182. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb00996.x.

- Widiyantoro, S., dan Fauzi, 2005. Note on seismicity of the Bali convergent region in the eastern Sunda Arc– Indonesia, *Australian Journal of Earth Sciences, Vol. 52*, h.379 - 383. DOI : 10.1080/08120090500136683.
- Widiyantoro, S., Pesicek J. D., dan Thurber, C. H., 2011. Subducting Slab Structure the Eastern Sunda Arc Inferred from Nonlinear Seismic Tomographic Imaging, Geological Society London Special Publications, Vol 355, h.139 - 155. DOI : 10.1144/SP355.7.