RELOKASI HIPOSENTER GEMPABUMI MENGGUNAKAN METODE TELESEISMIC DOUBLE DIFFERENCE UNTUK ANALISIS POLA **TEKTONIK DI WILAYAH LAUT MALUKU**

TECTONIC SETTING ANALYSIS IN MOLLUCAS SEA USING TELESEISMIC DOUBLE DIFFERENCE METHOD

Tio Azhar Prakoso Setiadi^{1*}, Supriyanto Rohadi¹, Untung Merdijanto², Nova Heryandoko³

¹Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta ²Kedeputian Bidang Inskalrekjarkom BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta ³Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta Jakarta **E-mail*: tio.prakoso08@gmail.com

Naskah masuk: 29 September 2016; Naskah diperbaiki: 8 Desember 2016; Naskah diterima: 20 Desember 2016

ABSTRAK

Relokasi hiposenter gempabumi penting dilakukan untuk mendapatkan lokasi gempabumi dengan ketelitian yang tinggi, analisa pola tektonik, studi model struktur kecepatan, dan analisis seismisitas untuk studi global maupun studi lokal. Metode relokasi yang digunakan adalah metode teleseismic Double-Difference yang menggunakan model kecepatan seismik 3D. Penelitian ini dilakukan dengan merelokasi gempabumi yang terjadi di sekitar wilayah Laut Maluku. Jumlah gempabumi yang direlokasi adalah sebanyak 7042 dari 8845 gempabumi. Hasil dari relokasi hiposenter menggunakan teleseismic Double-Difference menunjukkan hiposenter yang lebih baik, yaitu gempabumi dengan kedalaman tertentu (fixed depth = 10 km) telah terelokasi dan distribusi hiposenter yang didapat menunjukkan pola penunjaman yang berasosiasi dengan zona subduksi di wilayah Laut Maluku.

Kata Kunci: teleseismic Double-Difference, relokasi, Laut Maluku

ABSTRACT

Earthquake relocation is important to be applied for obtaining high resolution of earthquake location, analyzing tectonic setting, studying velocity structure model, and anlyzing global and local studies of seismicity. One of the relocation methods was teleseismic Double-Difference method which use 3D seismic velocity model. This research has been conducted by relocating the earthquake that occurred in the Mollucas Sea. We relocated 7042 of the 8845 earthquakes. Results of the hypocenter relocation using teleseismic Double-Difference show a better hypocenter, so earthquakes with a certain depth (fixed depth = 10km) has been relocated and the distribution of hypocenter relocation may indicate the tectonic phenomenon such as subduction in Mollucas Sea.

Keywords: teleseismic Double Difference, relocation, Moluccas Sea

1. Pendahuluan

Wilayah perairan Laut Maluku termasuk salah satu wilayah aktif gempabumi di Indonesia [1]. Disekitar perairan Laut Maluku memiliki interaksi tektonik yang cukup kompleks, terdapat 3 lempeng makro yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, Lempeng Filipina, dan lempeng mikro Laut Maluku yang merupakan bagian yang terpisah dari lempeng makro. Lempeng inilah yang secara aktif berkontribusi pada keaktifan seismik di wilayah Laut Maluku. Lampeng Laut Maluku mensubduksi ke kedua arah, Lempeng Eurasia di arah barat dan lempeng Filipina di arah timur. Subduksi ganda ini menghasilkan busur kepulauan Halmahera di sebelah Timur Laut Maluku, dan busur kepulauan Sangihe di sebelah Barat. [2]

Dalam mempelajari aktifitas seismik dan pola tektonik di suatu wilayah, keakuratan dalam penentuan hiposenter gempabumi sangatlah penting. Penentuan hiposenter yang akurat dan konsisten merupakan kebutuhan mutlak untuk analisis kegempaan lebih lanjut [3]. Oleh karena itu dibutuhkan teknik relokasi gempabumi yang mampu menghasilkan lokasi hiposenter gempabumi yang akurat. Penulis memilih metode *Teleseismic Double-Difference (TeletomoDD)* karena metode ini dapat menghitung banyak data gempabumi secara simultan dengan akurasi tinggi secara akurat walaupun struktur dalam bumi yang sangat heterogen dan distribusi stasiun yang tidak merata [4].

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan relokasi hiposenter gempabumi dari data BMKG pada wilayah Laut Maluku menggunakan teknik *Teleseismic Double-Difference*. Hasil relokasi diharapkan mampu meningkatkan keakuratan posisi sumber gempabumi sehingga diperoleh posisi sumber gempabumi yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam studi analisa tektonik.

2. Metode Penelitian

2.1 Data Penelitian

Daerah yang menjadi fokus pada penelitian ini adalah wilayah Laut Maluku dan sekitarnya dengan koordinat 5° LU - 5° LS dan 123° BT - 130° BT. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data gempabumi yang bersumber dari katalog gempabumi BMKG [5] dimulai dari 1 Januari 2009 - 12 Juni 2016, dengan batasan kedalaman 1-700 km dan magnitudo 1,0 - 9,0. Jumlah data yang diperoleh adalah 9006 event yang tercatat di beberapa stasiun pencatat BMKG di wilayah Laut Maluku dan sekitarnya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta seismisitas wilayah Laut Maluku.

2.2 Teleseismic Double Difference

Metode Double-Difference (DD) merupakan pengembangan dari metode Geiger dengan menggunakan waktu tempuh absolut dan/atau pengukuran cross-correlation waktu tempuh differensial gelombang P dan S [6]. Residual antara waktu tempuh observasi dan kalkulasi diminimalisasi untuk setiap pasangan gempa pada setiap stasiun. Prinsip metode DD menganggap bahwa setiap gempa yang berpasangan, yaitu dua gempa yang memiliki jarak hiposenter yang sangat kecil dibandingkan jarak terhadap stasiun, maka raypath kedua gempa dapat dianggap mendekati sama. Sehingga selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terekam pada satu stasiun yang sama dianggap hanya sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter. Residual waktu tempuh antara dua gempa, i dan j, terhadap stasiun k adalah;

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta \boldsymbol{m}^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta \boldsymbol{m}^j = d\boldsymbol{r}_k^{ij} \tag{1}$$

 t_k^i waktu tempuh dari hiposenter gempa i ke stasiun k, dan t_k^j waktu tempuh dari hiposenter gempabumi j ke stasiun k, serta $\Delta m'$ dan $\Delta m'$ adalah selisih model awal dengan model hasil inversi untuk event i dan j. Pada awalnya metode DD digunakan dalam koordinat kartesian [7], kemudian dikembangkan untuk koordinat spherical,[8]. Ilustrasi metode DD untuk jarak teleseismik dapat dilihat pada Gambar 2.



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

Metode DD dikembangakan untuk kasus teleseismik dengan mengadaptasi metode penjejakan sinar gelombang PB untuk kasus spherical earth [8]. Metode DD untuk jarak teleseismik ini (teletomoDD) menggunakan model kecepatan 3D nested regionalglobal [9]. Untuk model regional digunakan model kecepatan 3D dan untuk model global digunakan model kecepatan ak135 [10]

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Validasi Hasil Pengolahan teletomoDD

Untuk menguji hasil relokasi teletomoDD, pada penelitian ini dilakukan pengujian distribusi frekuensi residual waktu tempuh untuk sebelum relokasi dan sesudah relokasi menggunakan grafik histogram. Hasil relokasi yang baik dapat dilihat pada histogram yang menunjukkan frekuensi yang tinggi mendekati angka nol(0).

Distribusi frekuensi residual waktu tempuh pada saat sebelum dan setelah relokasi, hiposenter menunjukkan perbedaan sangat signifikan (Gambar 3). Hal ini mengindikasikan setelah dilakukan relokasi menghasilkan perubahan posisi hiposenter yang lebih baik.

Perubahan posisi hiposenter gempabumi setelah direlokasi dapat digambarkan dengan plot diagram kompas dan diagram rose. Kedua diagram tersebut menunjukkan arah pergeseran dan interval sudut perubahan arah setelah direlokasi (Gambar 4).

Berdasarkan analisis diagram kompas (Gambar 4.a), didapatkan adanya 27 event gempabumi yang mengalami pergeseran episenter lebih dari 20 km (panah warna biru). Pergeseran episenter yang besar ini kemungkinan disebabkan oleh kurang akuratnya pada saat picking waktu tiba gempabumi, dengan demikian metode ini cukup baik digunakan untuk relokasi gempabumi.

Dari analisis diagram rose (Gambar 4.b), menunjukkan arah dominan peregeseran episenter sebagian besar sejajar dengan arah subduksi Lempeng Laut Maluku (Barat-Timur). Pada diagram ini skala 0 hingga 330 menunjukkan interval sudut pergeseran episenter gempabumi setelah dilakukan relokasi. Skala 0 menunjukan arah utara, sedangkan lingkaran dengan skala 100 hingga 400 menunjukkan jumlah event gempabumi.



Gambar 3. Distribusi frekuensi residual waktu tempuh (a) sebelum relokasi, dan (b) setelah relokasi.



Gambar 4. Diagram kompas untuk menunjukkan arah dan jarak pergeseran episenter gempabumi. (a), dan Diagram rose untuk menunjukkan frekuensi arah dominan pergeseran episenter gempabumi (b).

3.2 Hasil Relokasi teletomoDD

Data awal yang digunakan pada pengolahan relokasi teletomoDD terdiri dari 9006 events yang diperoleh dari katalog gempabumi BMKG. Dari hasil pengolahan data awal pada proses clustering yang diolah dengan ph2dt didapatkan 8845 events, dan dilanjutkan dengan pengolahan relokasi teletomoDD, hingga mendapatkan hasil relokasi gempabumi sebanyak 7042 events.

Gempabumi yang tidak terelokasi disebabkan pada saat proses relokasi terdapat event yang tidak memenuhi kriteria yang sesuai dengan input yang diberikan dan terdapat beberapa gempabumi menjadi airquake. Airquake adalah gempabumi yang berlokasi diatas permukaan setelah direlokasi.

Gambar 5.a dan gambar 5.b adalah hasil sebaran episenter gempabumi di wilayah Laut Maluku dan sekitarnya sebelum dan setelah relokasi. Jika dilihat secara horizontal seismisitas sebelum dan sesudah relokasi hiposenter tidak menunjukkan perubahan posisi episenter yang signifikan.

Untuk mengetahui pola penunjaman Subduksi Ganda Laut Maluku akibat menunjamnya lempeng Laut Maluku kebawah Busur Sangihe di arah barat dan Busur Halmahera di arah timur, maka dilakukakan analisis irisan penampang vertikal untuk sebaran posisi gempabumi dari A-A' hingga C-C'. Panjang masing-masing segmen 800 km dengan lebar 100 km (Gambar 5).



Gambar 5. Peta seismisitas sebelum relokasi *teletomoDD* (a), dan setelah relokasi (b) dan Irisan penampang untuk sebaran posisi gempabumi dari A-A', B-B', C-C'.

3.2.1 Segment Irisan Vertikal A-A'

Pada irisan penampang vertikal segment A - A' (gambar 6), terlihat banyak gempabumi dangkal yang berada di tengah pemantang Lempeng Laut Maluku. Setelah dilakukan relokasi lebih menggambarkan Subduksi Ganda dengan menyusupnya Lempeng Laut Maluku ke bawah Busur Sangihe yang berada di sebelah barat Laut Maluku hingga kedalaman ± 580 km, dan menyusupnya Lempeng Laut Maluku ke bawah Busur Halmahera disebelah timur hingga kedalaman \pm 240 km. Pada kedalaman 400-500 km, tidak terlihat adanya aktifitas gempabumi (free zone earthquake) dikarenakan adanya kemungkinan bahwa lempeng tektonik di kedalaman 350 km mengalami gaya gaya tarik lempeng ke bawah (slab pull), sedangkan pada bagian di sekitar kedalaman lebih dari 500 km terjadi gaya apung lempeng yang menahan ke atas (slab buoyancy)[11].



Gambar 6. Irisan penampang vertikal segment A - A' sebelum relokasi (a) dan setelah relokasi (b).



Gambar 7. Irisan penampang vertikal segment B - B' sebelum relokasi (a) dan setelah relokasi (b).

3.2.2 Segment Irisan Vertikal B-B'

Pada irisan penampang vertikal segment B-B' (gambar 7) sebelum relokasi terdapat banyak sekali gempabumi dengan kedalaman fix depth (10 km). Setelah dilakukan relokasi, kedalaman dengan fix depth tersebut telah berkurang dan lebih bervariasi kedalamannya. Hasil relokasi menggambarkan Lempeng Laut Maluku menujam ke bawah Busur Sangihe yang berada di sebelah barat hingga kedalaman ± 400 km, Lempeng Laut Maluku menujam ke bawah Busur Halmahera disebelah timur hingga kedalaman \pm 250 km dan terlihat adanya pembalikan/ rollback pada Lempeng Laut Filipina yang sejajar dengan penujaman Lempeng Laut Maluku ke arah Busur Halmahera hingga kedalaman \pm 290 km. Hasil ini bersesuaian dengan penelitian sebelumnya [12].



Gambar 8. Irisan penampang vertikal segmen C - C' sebelum relokasi (a) dan setelah relokasi (b).

3.2.3 Segment Irisan Vertikal C-C'

Pada segment irisan vertikal C - C' (gambar 8) ini aktifitas gempabumi sebagian besar di wilayah perairan Sulawesi atau arah barat dari Lempeng Laut Maluku dan di segment ini banyak terdapat gempabumi dangkal, dan jalur tunjamannya paling landai dari pada segment sebelumnya dimana tunjaman bisa mencapai ± 380 km, namun pada segment ini hanya pada kisaran ± 280 km dan tunjaman Lempeng Laut Maluku ke arah Busur Halmahera hanya pada kisaran ± 170 km. Namun melihat dari zona subduksinya, subduksi Lempeng Laut Maluku yang menujam kebawah Busur Halmahera cukup tajam, sangat bertolak belakang dengan penujaman di Busur Sangihe.



Gambar 9. Kartun struktur Lempeng Laut Maluku dari hasil relokasi teletomoDD.

3.2.4 Pembahasan

Pada penelitian teletomoDD didapatkan bentuk kartun gambar 3 dimensi (Gambar 9). Penujaman Lempeng Laut Maluku pada arah timur di wilayah Busur Halmahera memiliki kedalaman yang lebih dangkal dengan keadalaman ± 250 km dan Lempeng Laut Maluku yang menujam di wilayah Busur Sangihe lebih dalam dengan kedalaman \pm 580 km. Hasil dari ketiga penampang vertikal menggambarkan Lempeng Laut Maluku tidak memiliki kedalaman yang sama ke arah Busur Sangihe dan Busur Halmahera. Penujaman Lempeng Laut Maluku kearah Busur Sangihe dan Busur Halmahera semakin ke selatan menunjukan sudut tunjaman akan semakin landai. Didapatkan adanya rollback pada Lempeng Laut Filipina hingga kedalaman \pm 300 km yang sejajar dengan penujaman Lempeng Laut Maluku ke arah Busur Halmahera. Hasil penelitian ini bersesuaian dengan yang didapatakan peneliti sebelumnya, menggunakan metode gaya berat [13]. Terlihat ada beberapa kesamaan dimana tunjaman Busur Sangihe lebih dalam hingga 600 Km, dari tunjaman ke arah Busur Halmahera yang hanya berkisar 250 Km.

2. Kesimpulan

Hasil relokasi menunjukan perubahan lokasi hiposenter yang lebih akurat, hal ini seperti dibuktikan dengan banyaknya residual waktu tempuh setelah relokasi yang mendekati nilai nol. Kedalaman gempa dengan *fix depth* (10 km) berubah sehingga distribusi kedalamannya lebih bervariasi. Relokasi hiposenter dengan model kecepatan 3D dapat menggambarkan distribusi kegempaan dan pola penunjaman di wilayah Laut Maluku lebih jelas. Struktur subduksi ganda (*Double Subduction*) di wilayah Laut Maluku menggambarkan adanya penujaman Lempeng Laut Maluku ke arah Busur Sangihe di sebelah barat dan Busur Halmahera di sebelah timur. Penujaman Lempeng Laut Maluku kearah Busur Sangihe semakin ke utara maka arah tunjaman semakin dalam (\pm 580 km), dan penujaman ke arah selatan akan semakin landai (\pm 280 km). Sedangkan subduksi Lempeng Laut Maluku yang menujam kebawah Busur Halmahera didapatkan ratarata kedalaman tunjaman \pm 250 km. Pada penelitian ini juga didapatkan gambaran pembelokan (*rollback*) pada Lempeng Laut Filipina yang bergerak sejajar dengan penujaman Lempeng Laut Maluku ke arah Busur Halmahera.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada BMKG untuk katalog data gempabumi yang digunakan.

Daftar Pustaka

- Hutagalung, R., 2010, Pemetaan Gempa-Tsunami di Wilayah Tektonik Maluku dan Upaya Mengurangi Dampak Resiko, Seminar Nasional Basic Science II, Ambon
- [2] Hamilton, W., 1979, Tectonics of Indonesian Region: Geological Survey Professional Paper 1078, Washington.
- [3] Rohadi, S., Widiyantoro, S., Nugraha, A.D., dan Masturyono, 2012, Relokasi Hiposenter Gempabumi di Jawa Tengah menggunakan I n v e r s i T o m o g r a f i D o u b l e -DifferenceSimultan dan Data dari Katalog Meramex, JTM Vol. XVIII No. 2/2012, ITB, Bandung.

- [4] Pesicek, J.D., Thurber, C.H., Zhang, H., DeShon, H.R., Engdahl, E.R., and 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, doi:10.1029/2010JB007443, American Geophysical Union.
- [5] http://repogempabumi.bmkg.go.id, diakses pada 13 Juni 2016.
- [6] Waldhauser, F., dan Ellsworth, W.L., 2000, A Double-DifferenceEarthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault: Bull. Seism. Soc. Am., 90, 1353-13.
- [7] Um, J., and Thurber, C. H., 1987, A fast algorithm for two Point seismic ray tracing, Bulletin of the Seismological Society of America, 77,972–986.
- [8] Koketsu, K., and Sekine, S., 1998, Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical earth with

discontinuities, Journal of Geophysical Research, 132, 339–346, Jepang.

- [9] Widiyantoro, S., and R. van der Hilst., 1997, Mantle structure beneath Indonesia inferred from high-resolution tomographic imaging, Geophys. J. Int., 130(1), pp. 167-182
- [10]Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R., Buland, R., 1995, Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes, Geophys. J. Int., 122.108-124.
- [11] Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S. Nugraha, A. D., Ramdhan, M., Wandono, Sutiyono, Handayani, T., 2015, Spatiotemporal variation of b-value in Molucca Collision Zone using high precision relocated hypocenters, presentasi poster pada 9th International Statistical Seismology (StatSei) workshop, Potsdam, Germany.
- [12]McCaffrey, R., Eli Asilver and Rursell W. Raitt, 1980, Crustal Structure Of The Mollucas Sea Collision Zone, Indonesia, Univercity of Callifornia Santa Cruss, Institude Of Oceanografi A-005 La Jolla California.