

Metode Double-Difference Untuk Merelokasi Hiposenter Gempabumi Susulan Di Seririt Singaraja

Winardi Tjahyo Baskoro^{1*}, I Gde Antha Kasmawan², I Ketut Putra³, Ni Nyoman Ratini⁴, Sismanto⁵

^{1,2,3,4}Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia

⁵Departemen Fisika, Laboratorium Geofisika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Received: 07 December 2024

Revised: 10 March 2024

Accepted: 14 April 2024

Corresponding Author:

Winardi Tjahyo Baskoro

winardi@unud.ac.id

© 2024 Kappa Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License



DOI:

<https://doi.org/10.29408/kpj.v8i1.24434>

Abstract: A method that does not require a main earthquake (master event) that can be used simultaneously to relocate a very large number of earthquakes with wide hypocenter separation is called the double-difference method. A method used to relocate the aftershocks in Seririt Singaraja on November 14 2019 with coordinate positions 113.478 - 115.181 East Longitude and 8.357 - 7.894 South Latitude. The earthquake data used in this research was accumulated from 85 BMKG seismic stations. Data analysis uses cross-correlation time differences which can increase the accuracy of travel time between the receiving station and the earthquake, thereby reducing errors in calculations. The double difference method used to relocate the earthquake in the Seririt Singaraja area showed that there was a shift in the location of the earthquake hypocenter before and after it was relocated. Horizontally and vertically, the distribution of earthquake hypocenters before and after being relocated occurs when there is a collection of location shifts. The results of this research were able to relocate 152 aftershocks properly. The main earthquake after being relocated was at a depth of 17 km, while the distribution of aftershocks was at a depth of around 6-25 km, so that it can more accurately describe the position of the earthquake source and is able to show clearer and easier to interpret structural patterns.

Keywords: relocation; hypocenter; double-difference; cross-correlation; BMKG

Pendahuluan

Seririt Singaraja yang berlokasi di Bali Utara memiliki sejarah gempabumi berkekuatan besar dan menelan banyak korban. Gempabumi Seririt Singaraja terjadi pada tanggal 14 Juli 1976 yang menyebabkan korban sebanyak 573 orang meninggal, 4.755 orang terluka, kerusakan bangunan rumah dan 226 sekolah dalam radius 50 km dari pusat gempa. Gempabumi berkekuatan M 6,5 dengan kedalaman hiposenter 36 km ini mengguncang sangat kuat pada skala intensitas VIII MMI (Astra, et al, 2015). Pada tahun 2019 silam, daerah Seririt Singaraja kembali diguncang gempabumi tektonik dengan M 5,1 dan merupakan gempabumi dangkal akibat aktivitas sesar aktif. Kerusakan bangunan akibat gempabumi terjadi

di 5 kecamatan di Kabupaten Buleleng yakni kecamatan Sukasada, Banjar, Seririt, Busungbiu dan Gerokgak. Kerusakan paling parah terjadi di kecamatan Seririt (BPBD, 2019).

Studi seismisitas lokal daerah Bali hasil pencatatan jaringan seismik lokal yang dilakukan oleh Masturyono (Masturyono, dkk. 1994), memperoleh hasil analisis bahwa seismisitas gempabumi lokal dan dangkal memberi petunjuk adanya struktur sesar naik belakang busur kepulauan. Adapun studi seismotektonik menyimpulkan adanya perpanjangan sesar naik Flores sampai ke sebelah Timur Laut Bali. Seismisitas lokal daerah Bali memberi petunjuk adanya struktur sesar naik di belakang busur kepulauan, hal ini didasarkan kepada fakta bahwa

How to Cite:

Baskoro, W. T., Kasmawan, I. G. A., Putra, I. K., Ratini, N. N., & Sismanto, S. (2024). Metode Double-Difference Untuk Merelokasi Hiposenter Gempabumi Susulan Di Seririt Singaraja. *Kappa Journal*, 7(1), 28-33. <https://doi.org/10.29408/kpj.v8i1.24434>

kedalaman hiposenter di sebelah Utara pulau Bali lebih dangkal jika dibandingkan dengan hiposenter di daratan pulau Bali (Daryono, 2011).

Metode

Menurut Waldhauser (Waldhauser, dkk. 2000), inversi lokasi hiposenter dari suatu kelompok gempa bumi yang dihubungkan dengan pusat kelompok (*centroid cluster*) adalah algoritma penentuan lokasi gempa bumi menggunakan metode *double-difference*. Metode ini tidak memerlukan gempa bumi utama (*master event*) sehingga dapat digunakan secara simultan untuk merelokasi gempa bumi dalam jumlah yang sangat besar dengan separasi hiposenter yang besar. Syarat utama yang dibutuhkan adalah jarak antara dua gempa bumi yang direlokasi haruslah sangat kecil jika dibandingkan dengan jarak antara kedua gempa bumi tersebut terhadap stasiun. Pada metode Geiger, penggunaan model kecepatan yang diasumsikan sudah mendekati keadaan sebenarnya, tetapi belum dapat digunakan untuk menentukan lokasi sebenarnya. Lokasi hiposenter mengalami pergeseran dari posisi sebenarnya dan sulit dianalisa struktur yang terbentuk oleh distribusi gempa bumi diakibatkan karena model kecepatan yang tidak sesuai, maka dalam menentukan lokasi hiposenter yang sebenarnya perlu menggunakan metode *double-difference*. Ilustrasi metode *double-difference* dapat dilihat pada Gambar 1.

Penentuan relokasi hiposenter gempa adalah menggunakan algoritma *telescismic double-difference* yang dikembangkan oleh Pesicek (Pesicek, et al. 2010). Metode ini merupakan pengembangan dari versi *original* metode *double-difference* (Waldhauser, et al. 2000). Inti pengembangan metode ini adalah menambahkan pelacakan sinar dengan mempertimbangkan bentuk bumi yang bulat. Jika *arrival time* T , gempa bumi ke- i , stasiun seismik k dapat dinyatakan menggunakan teori sinar sebagai lintasan integral sepanjang sinar dengan formula,

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \quad (1)$$

dengan τ adalah *origin time* dari *event* ke- i , u adalah bidang *slowness*, dan ds adalah elemen panjang lintasan. Karena hubungan *nonlinear* antara *travel time* dan lokasi *event*, ekspansi deret Taylor merupakan bentuk umum untuk persamaan *linear*. Permasalahan berikutnya berkaitan dengan residu *travel time*. r , untuk sebuah *event* ke- i adalah *linear* terkait dengan perturbasi. Δm , terhadap empat parameter hiposenter untuk setiap observasi k yaitu,

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i \quad (2)$$

dengan $r_k^i = (t_k^{obs} - t_k^{cal})^i$, t_k^{obs} adalah *travel time* observasi, t_k^{cal} adalah *travel time* kalkulasi. $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$. Persamaan (2) sesuai digunakan untuk pengukuran *arrival time*. Namun, penggunaan metode *cross-correlation* untuk mengukur perbedaan *travel time* antara *event*. $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$, akibatnya persamaan (2) tidak dapat digunakan secara langsung. Untuk memperoleh persamaan parameter hiposenter, relatif antara dua *event* i dan j , dengan persamaan,

$$\frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij} \quad (3)$$

dengan $\Delta m^{ij} = (\Delta dx^{ij}, \Delta dy^{ij}, \Delta dz^{ij}, \Delta d\tau^{ij})$ adalah perubahan dalam parameter hiposentral relatif antara dua *event*, dan turunan parsial t , yang berhubungan dengan m adalah komponen dari vektor *slowness* sinar yang menghubungkan antara sumber dan penerima (Aki, et al. 2002). Pada persamaan (3) sumber merupakan pusat dari dua hiposenter dengan asumsi vektor *slowness* konstan untuk dua *event*. dr_k^{ij} pada persamaan (3) adalah residu antara perbedaan *travel time* observasi dan kalkulasi antara dua *event* yang didefinisikan sebagai berikut,

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (4)$$

dengan:

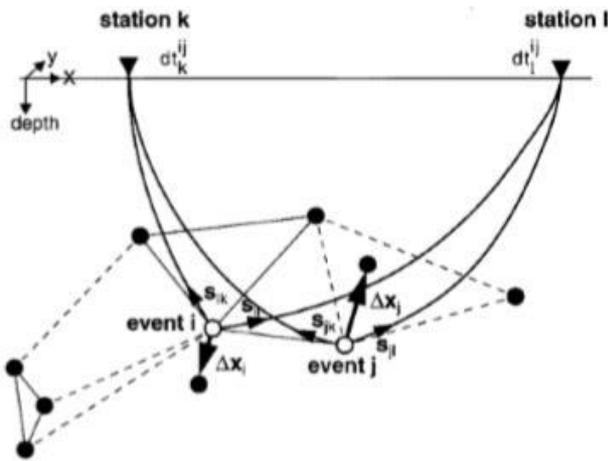
t_k^{obs} = waktu tempuh observasi (yang terekam oleh stasiun penerima)

t_k^{cal} = waktu tempuh kalkulasi (diperoleh dari perhitungan *raytracing*)

t_k^i = waktu tempuh gempa i yang terekam oleh stasiun k

dr_k^{ij} = residual waktu tempuh antara pasangan gempa i dan j pada stasiun k

Persamaan (4) didefinisikan sebagai *double-difference*. Diasumsikan bahwa vektor *slowness* konstan adalah berlaku untuk setiap *event* yang berdekatan, tetapi gagal untuk *event* dengan jarak yang jauh. Persamaan umum yang digunakan dalam perubahan jarak hiposentral antara dua *event* ke- i dan ke- j diperoleh dari persamaan (3) dan menggunakan vektor *slowness* dan *origin time* yang sesuai untuk setiap *event*, seperti diperlihatkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi metode *Double-Difference* (Aki, et al. 2002).

dengan:

dr_k^{ij} = selisih waktu residu gempabumi i dan j ke stasiun k

dr_l^{ij} = selisih waktu residu gempabumi i dan j ke stasiun l

S_{ik} = jarak gempabumi i ke stasiun k

S_{il} = jarak gempabumi i ke stasiun l

S_{jk} = jarak gempabumi j ke stasiun k

S_{jl} = jarak gempabumi j ke stasiun l

Δx^i = hasil relokasi gempabumi i

Δx^j = hasil relokasi gempabumi j

Metode ini menggunakan data waktu tempuh antar dua gempa, jika jarak persebaran hiposenter antara dua gempa sangat kecil dibanding jarak antara stasiun-gempa, maka *raypath* dan *waveform* kedua gempa dapat dianggap mendekati sama. Dengan asumsi ini, maka selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terekam pada satu stasiun yang sama dapat dianggap hanya sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter. Sehingga kesalahan model kecepatan bisa diminimalisasi tanpa menggunakan koreksi stasiun.

Pada Gambar 1, Δx adalah vektor relokasi untuk *event* i dan j yang diperoleh dari persamaan (5), dan dt adalah perbedaan *travel time* antara *event* i dan j yang yang diamati di stasiun k dan l , adalah

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij} \quad (5)$$

atau lengkapnya,

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j = dr_k^{ij} \quad (6)$$

Persamaan (6) di atas dikembangkan oleh Pesicek dkk. (2010) menjadi,

$$r_k^i = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial T_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \sum_{n \in G} W_n^G \delta U_n^G + \sum_{n \in L} W_n^L \delta U_n^L + S_k \quad (7)$$

dan

$$dr_k^{ij} = r_k^i - r_k^j \quad (8)$$

dengan ∂T_k^i adalah turunan parsial waktu tiba *event* i ke stasiun k terhadap x ; Δx_l^i ($l = 1,2,3$) adalah komponen x,y,z ; $\Delta \tau^i$ adalah *origin time event* i ; $W_n^G \delta U_n^G$ dan $W_n^L \delta U_n^L$ adalah jalur sinar yang diberi bobot dan *slowness* untuk model global (G) dan lokal (L); S_k adalah koreksi stasiun; r_k^i dan r_k^j adalah residu waktu tiba *event* i dan j pada stasiun k , dan dr_k^{ij} adalah residu *double-difference*.

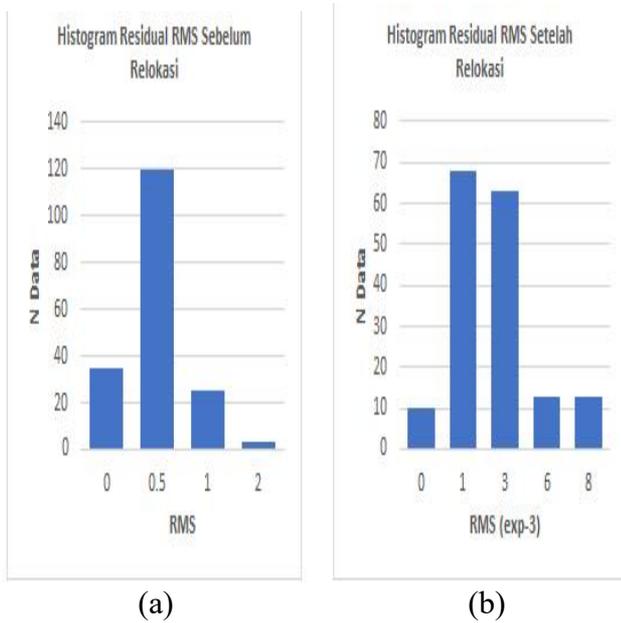
Hasil dan Pembahasan

Relokasi Hiposenter

Relokasi gempabumi dilakukan dengan data katalog gempabumi dari BMKG Balai 3 Denpasar sebanyak 174 kejadian gempabumi yang berasal dari 85 stasiun. Relokasi gempabumi dengan metode *double-difference* dilakukan dengan program *hypoDD*. Program *hypoDD* terdiri atas dua bagian yaitu program *ph2dt* untuk pengelompokan data gempabumi dan program *hypoDD* untuk merelokasi data gempabumi.

Nilai RMS (Root Mean Square) merupakan nilai yang digunakan sebagai parameter keakuratan suatu metode [8]. Semakin kecil nilai RMS atau semakin mendekati nol maka inversi hasil perhitungan dan hasil observasi semakin mendekati sama. Hal tersebut menunjukkan parameter model yang telah disusun melalui proses perhitungan semakin mendekati model yang sebenarnya. Perbandingan histogram RMS sebelum dan setelah relokasi diperlihatkan dalam Gambar 2, dimana Gambar 2(a) sebelum relokasi, sedangkan Gambar 2(b) adalah RMS setelah direlokasi. Pada gambar 2(a) nilai RMS masih belum dikatakan baik karena nilai RMS yang lebih besar yaitu pada kisaran 0,1-1,8. Setelah dilakukan pengolahan data Gambar 2(b) nilai RMS mengalami perubahan yaitu mendekati nol. Residual waktu tempuh hasil relokasi menggunakan *hypoDD* yang mendekati nol menunjukkan waktu tempuh kalkulasi nilainya sudah mendekati waktu tempuh observasi. Hal ini mengindikasikan model atau struktur kecepatan seismik hasil inversi yang dihasilkan dan digunakan

untuk menghitung waktu tempuh kalkulasi sudah mendekati kondisi sebenarnya sesuai hasil observasi. Hal ini menunjukkan bahwa parameter model yang telah disusun melalui proses perhitungan semakin mendekati model yang sebenarnya.

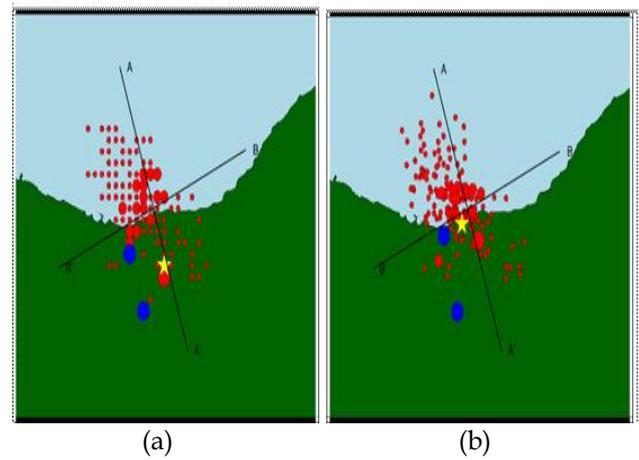


Gambar 2. Histogram nilai RMS residual time, (a) sebelum relokasi, (b) setelah direlokasi

Cross Section Hiposenter

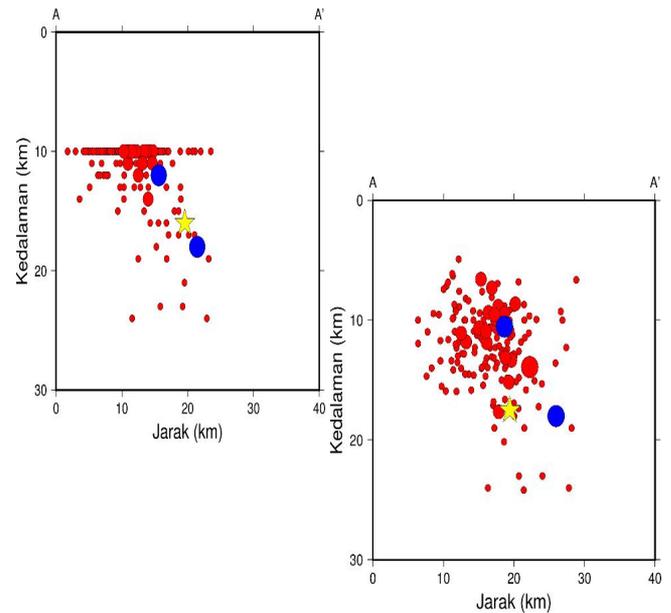
Sebaran hiposenter gempabumi dapat diproyeksikan melalui hasil cross section yang diilustrasikan pada Gambar 5. Garis A-A' dimulai dari titik 114,85569 BT dan 8,05601 LS menuju titik 114,95361 BT dan 8,30384 LS dengan jarak 31 km, serta garis B-B' yang dimulai dari titik 115,05672 BT dan 8,11498 LS menuju titik 114,76970 BT dan 8,23324 LS.

Pada Gambar 5 merupakan cross section dengan 2 arah yaitu vertikal (A-A') serta horisontal (B-B') menunjukkan pola sebaran gempabumi, dengan simbol bintang kuning adalah gempabumi utama, simbol lingkaran biru adalah gempabumi pendahuluan, dan simbol lingkaran merah adalah gempabumi susulan, dimana lingkaran merah kecil merupakan gempabumi dengan magnitudo < 4 dan lingkaran merah besar dengan magnitudo > 4.



Gambar 3. Hasil analisa cross section daerah A-A' dan B-B' (a) sebelum relokasi (b) setelah direlokasi

Setelah dilakukan pengolahan data dengan menggunakan metode double-difference maka didapatkan hasil pesebaran hiposenter setelah relokasi. Perbedaan kedalaman gempabumi daerah A-A' secara melintang, sebelum dan setelah relokasi ditunjukkan pada Gambar 4. Distribusi gempabumi sebelum

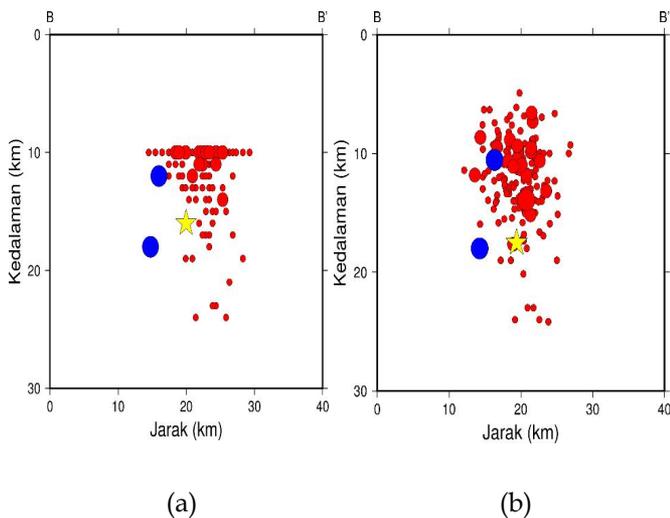


relokasi, sebaran hiposenter antar gempabumi saling berdekatan yang berada di kedalaman 10-24 km, adapun distribusi gempabumi setelah relokasi, sebaran hiposenter antar gempabumi lebih menyebar pada kedalaman 6-25 km.

Gambar 4. Hasil analisa cross section daerah A-A' secaramelintang, (a) sebelum relokasi (b) setelah direlokasi

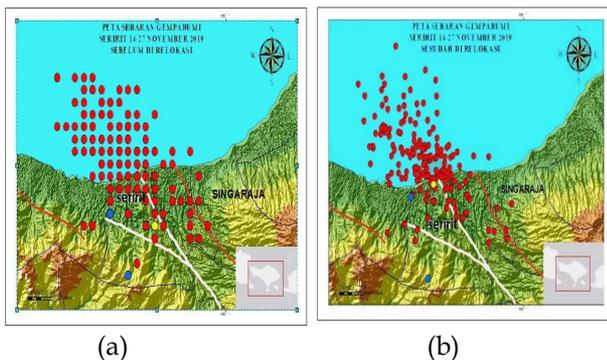
Hal yang sama diperoleh hasil pesebaran hiposenter setelah relokasi. Perbedaan kedalaman gempabumi daerah B-B' secara horisontal, sebelum dan setelah

relokasi ditunjukkan pada Gambar 5. Pesebaran hiposenter yang terjadi berada paling banyak pada kedalaman 10-20 km.



Gambar 5. Hasil analisa *cross section* daerah B-B' secara horizontal, (a) sebelum relokasi (b) setelah direlokasi

Setelah dilakukan pengolahan data dengan menggunakan metode *double-difference*, maka didapatkan hasil pesebaran hiposenter setelah relokasi. Perbedaan sebaran hiposenter sebelum dan setelah relokasi ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta sebaran gempabumi (a) sebelum relokasi, (b) setelah direlokasi

Pada Gambar 6 menunjukkan peta sebaran hiposenter sebelum dan setelah direlokasi dengan menggunakan metode *double-difference* memberikan perubahan lokasi gempabumi berdasarkan data gempabumi. Posisi hiposenter sebelum relokasi tersebar sehingga tidak dapat menunjukkan pola yang sesuai dengan sesar utamanya, namun setelah direlokasi sebaran hiposenternya cenderung berkumpul membentuk kelompok pada satu garis yang mengikuti bidang sesarnya. Kedalaman hiposenter beragam dan berada paling banyak pada kedalaman 10-20 km.

Hasil relokasi yang menggunakan metode *double-difference* ini dapat dikatakan cukup akurat karena berdasarkan validasi nilai RMS yang dihasilkan berada pada nilai mendekati 0. Hal tersebut menunjukkan menunjukkan bahwa pengolahan data yang dilakukan mendekati keadaan sebenarnya. Pada penelitian ini, gempabumi utama terletak pada kedalaman 17 km serta sebaran hiposenter gempabumi terletak pada kedalaman 6-25 km di bawah permukaan bumi.

Kesimpulan

Hasil relokasi gempabumi di daerah Seririt Singaraja dengan metode *double difference* menunjukkan bahwa adanya pergeseran lokasi hiposenter gempabumi sebelum dan sesudah relokasi. Sebaran hiposenter gempabumi sebelum dan sesudah relokasi dilihat dalam arah horizontal tidak mengalami perbedaan yang besar, namun secara vertikal terjadi perubahan lokasi hiposenter yang lebih terkumpul membentuk kelompok pada satu garis yang mengikuti bidang sesarnya. Penelitian ini berhasil merelokasi dengan baik 152 gempabumi susulan gempabumi Seririt Singaraja pada 14 November 2019 menggunakan metode *double difference*. Gempabumi utama setelah direlokasi berada pada kedalaman 17 km serta sebaran gempabumi susulan berada pada kedalaman 6-25 km, sehingga dapat menggambarkan posisi sumber gempabumi yang lebih akurat, yang pada akhirnya mampu memberikan pola struktur yang lebih jelas untuk diinterpretasi.

Ucapan Terima Kasih

Kami berterima kasih kepada LPPM Universitas Udayana Bali yang telah mendanai Riset Unggulan Program Studi Tahun 2022. Kami juga berterima kasih kepada semua responden dan siapa saja yang telah berpartisipasi selama penelitian.

Daftar Pustaka

- Astra, I Made Kris Adi, 2015, "200 Tahun Gejer Bali", Bali: 1-40.
- BPDB Buleleng, 2019, "Laporan Kebencanaan Geologi 15 November 2019", <https://vsi.esdm.go.id/index.php/kegiatan-pvmbg/berita-harian-kebencanaan-geologi/2736-laporan-kebencanaan-geologi-15-november-2019> [Diakses pada tanggal 14 Agustus 2021].
- Masturyono, Helmi, H., Marliyani, G.I., Nuraini, S., 1994, "Identifikasi Sesar Aktif di Pulau Bali dengan Menggunakan Data Pemetaan Geologi Permukaan dan Morfologi Tektonik",

Majalah Geografi Indonesia, Vol. 35, no. 1.

- Daryono, 2011, "Identifikasi Sesar Naik Belakang Busur (*Back Arc Thrust*) Daerah Bali Berdasarkan Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar", Artikel Kebumihan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Waldhauser, F., dan Ellsworth, W.L., 2000, "*A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault California*", Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 90, no. 3, 2000, pp. 1353- 1368.
- Pesicek, J.D., Thurber, C.H., Zhang, H., Deshon, H.R., Engdahl, E.R., 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.
- Aki, K. and Richards, P.G., 2002, "*Quantitative Seismology Second Edition*". Saucalito, CA : University Science Books.
- Wulandari, Anggina, 2016, "Relokasi Hiposenter Gempabumi Sumatera Barat Menggunakan Metode *Double Difference* (DD)", Tugas Akhir, Universitas Negeri Padang, Padang.