

Relokasi Hiposenter Gempabumi dengan Menggunakan Metode *Double Difference* Wilayah Bali dan Sekitarnya

Relocation of Earthquakes Hypocenter Using the Double Difference Method in Bali and Its Surrounding Areas

Devi Irma Putri^{*}, I Ketut Sukarasa¹, Rudy Darsono², Winardi Tjahyo Baskoro¹, Nyoman Wendri¹, I Made Satriya Wibawa¹

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Badung, Bali, Indonesia 80361

²Balai Besar Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Wilayah III Denpasar, Jl. Raya Tuban, Badung, Bali, Indonesia, 80361

Email: *irmaputri1411@gmail.com; sukarasafisika@gmail.com; darsonorudy@gmail.com; winardi@unud.ac.id; wendri@unud.ac.id; satriya_wibawa@unud.ac.id

Abstrak – Telah dilakukan penelitian mengenai relokasi hiposenter gempabumi dengan metode *Double Difference* di wilayah Bali dan Sekitarnya. Penelitian ini dilaksanakan di Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III Denpasar. Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu guna mengetahui sebaran hiposenter gempa bumi sebelum dan sesudah dilakukan relokasi serta mengetahui kemenerusan hiposenter gempabumi yang ada di wilayah Bali. Data yang digunakan adalah data arrival time sebanyak 1.815 kejadian gempabumi dari 1 Januari 2014 s.d 31 Desember 2023 dan data 26 stasiun pencatat gempabumi. Metode relokasi yang diterapkan adalah metode *Double Difference* dan diproses dengan *ph2dt* serta *HypoDD*. Relokasi yang telah dilakukan menunjukkan posisi hiposenter yang baik yang ditandai dengan nilai residual waktu tempuh yang mendekati 0. Sebaran hiposenter gempabumi di wilayah Bali sebelum dilakukan relokasi menyebar ke seluruh wilayah dan setelah dilakukan relokasi, posisi hiposenter semakin mendekat ke sumber penyebab gempa yaitu pada zona penujaman subduksi di bawah wilayah Bali yang ditunjukkan pada hasil cross section. Selain itu, berdasarkan hasil analisis hiposenter gempabumi setelah direlokasi, didapatkan trend kemenerusan hiposenter yang menuju zona penujaman subduksi.

Kata kunci: Hiposenter gempabumi; relokasi hiposenter; double difference; *HypoDD*; *ph2dt*.

Abstract – A study on the relocation of earthquake hypocenters using the *Double Difference* method has been conducted in Bali and its surrounding areas. This research was carried out at the Center for Meteorology, Climatology, and Geophysics Region III Denpasar. The purpose of this study is to find out the distribution of earthquake hypocenters before and after the relocation and to know the continuity of earthquake hypocenters in the Bali region. The data used are arrival time data of 1,815 earthquake events from January 1, 2014 to December 31, 2023, and data from 26 earthquake recording stations. The relocation method applied is the *Double Difference* method, which is processed with *ph2dt* and *HypoDD*. The relocation that has been carried out shows a good hypocenter position which is characterized by a residual value of travel time that is close to 0. The distribution of the earthquake hypocenter in the Bali area before the relocation spread throughout the region and after the relocation, the position of the hypocenter was getting closer to the source of the earthquake, namely in the subduction zone under the Bali area as shown in the cross-section results. In addition, based on the results of the analysis of the hypocenter of the earthquake after relocation, it was found that the trend of the hypocenter continued toward the subduction subduction zone.

Keywords: Earthquakes hypocenter; hypocenter relocation; double difference; *HypoDD*; *ph2dt*.

1. Pendahuluan

Indonesia adalah salah satu negara dengan aktivitas kegempaan dan tektonik yang tinggi [1]. Indonesia berada di kawasan geografis yang dilalui oleh jalur cincin api dan merupakan titik pertemuan tiga lempeng

tektonik besar dunia, meliputi Lempeng Pasifik, Indo-Australia dan Eurasia. Pertemuan 3 lempeng tektonik akan menciptakan jalur tektonik lempeng yang aktif dan kompleks [1]. Satu diantara kawasan Indonesia yang memiliki aktivitas tektonik yang tinggi adalah wilayah Bali [2].

Wilayah Bali rawan terjadi gempa bumi. Kerawanan gempa bumi tersebut diakibatkan dari posisi wilayah Bali yang terletak diantara 2 sumber gempa bumi. Di selatan Bali terdapat zona subduksi, tempat pertemuan Lempeng Indo-Australia yang bergerak dari selatan menuju utara dengan Lempeng Eurasia dari arah utara menuju selatan. Selain itu, kawasan utara Bali merupakan zona patahan naik yang ada di sepanjang utara Bali hingga Flores [3,4]. Hal inilah yang mengakibatkan jumlah gempa bumi di wilayah Provinsi Bali dan sekitarnya cukup tinggi.

Hiposenter merupakan titik pusat terjadinya gempa bumi yang ada didalam bumi [5]. Penentuan parameter hiposenter secara akurat dalam mempelajari kegempaan dan aktivitas tektonik wilayah adalah hal yang penting, utamanya untuk analisa lanjutan yang berhubungan dengan tektonisme atau fenomena pergerakan lapisan kerak bumi. Analisis mendetail struktur tektonik, seperti identifikasi batas lempeng, pola bidang patahan dan pola zona subduksi dapat ditentukan dengan penentuan lokasi hiposenter yang tepat [6]. Penentuan hiposenter yang tepat diperlukan untuk memahami lokasi sumber gempa di dalam bumi, yang membantu dalam evaluasi risiko gempa dan mitigasi dampaknya terhadap infrastruktur serta populasi. Seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, penentuan hiposenter masa kini sudah semakin cepat dilakukan.

Relokasi hiposenter gempa bumi merupakan salah satu teknik untuk memperoleh informasi-informasi parameter gempa bumi secara tepat. Relokasi hiposenter gempa bumi adalah metode memperbaiki posisi titik hiposenter gempa bumi atau menghitung kembali agar menjadi lebih baik dan tepat. Hasil dari relokasi hiposenter gempa bumi memberikan gambaran *trend* hiposenter yang mencerminkan bagaimana kestrukturannya dari sesar yang berada pada bawah permukaan bumi [6]. Elemen-elemen penting yang perlu diperhatikan dalam penentuan gempa bumi adalah *arrival time* gelombang primer (t_p), kecepatan gelombang primer (v), dan *origin time* (t_0).

Berdasarkan pemaparan di atas, maka dilakukan studi yang lebih lanjut untuk memperbaiki atau meningkatkan keakuratan hiposenter gempa bumi. Tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu untuk mengetahui persebaran hiposenter gempa bumi sebelum dan sesudah direlokasi serta mengetahui kemenerusan hiposenter gempa bumi di Bali. Studi relokasi gempa ini dilakukan di wilayah Bali, dengan kejadian gempa bumi dari tahun 2014-2023. Metode yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu metode *Double Difference* dengan pemrosesan melalui program *HypoDD* dan *ph2dt* serta dipetakan menggunakan *Generic Mapping Tool* (GMT).

2. Landasan Teori

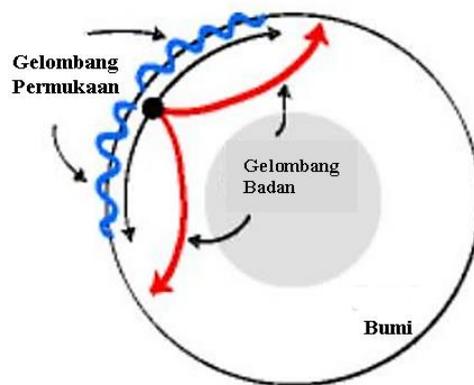
2.1 Gelombang seismik

Gelombang seismik adalah gelombang elastik dan kecepatan perambatannya dipengaruhi sifat elastisitas serta densitas batuan. Kecepatan rambat gelombang seismik di berbagai lapisan batuan perlu dicari untuk menentukan tingkat densitas dan kekerasan batuan tersebut [8]. Gelombang seismik sering kali dihasilkan oleh gempa bumi atau ledakan. Saat gelombang seismik melewati batas antar *layer*, sebagian gelombang akan direfleksikan kembali, sementara bagian lainnya dibiarkan. Gejala fisis ini diamati melalui geophone untuk menangkap gelombang seismik tersebut [9]. Waktu untuk gelombang seismik merambat melalui lapisan batuan tergantung kecepatan rambat pada medium yang dilaluinya [10].

Gelombang seismik dikategorikan menurut jalur perambatannya menjadi dua, yaitu gelombang badan yang rambatannya ada di bawah permukaan bumi dan gelombang permukaan yang rambatannya pada permukaan bumi seperti pada Gambar 1.

2.2 Gempabumi

Gempabumi adalah gelombang kejutan (*shock wave*) yang berasal dari suatu lokasi di mantel atau kerak bumi. Gempabumi terjadi pada daerah yang mengalami deformasi [12]. Syarat terjadinya gempa bumi meliputi penumpukan *stress* secara perlahan pada batas pertemuan lempeng, dan batuan yang cukup kuat untuk menyimpan energi. Ketika kedua kondisi ini terpenuhi, maka energi akan terakumulasi hingga mencapai batas elastisitas batuan [13].

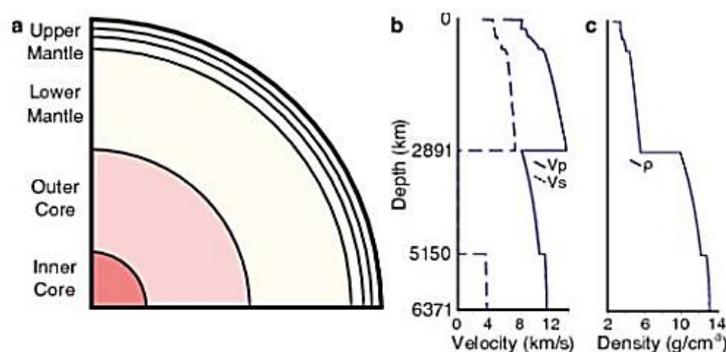


Gambar 1. Gelombang badan dan gelombang permukaan [11].

Pada batuan heterogen (rapuh), tekanan yang diterima tidak terlalu besar karena disalurkan seketika melalui gempa-gempa kecil. Sebaliknya, pada batuan homogen, gempa kecil jarang terjadi. Hal ini dikarenakan tekanan tidak seketika dilepaskan. Tekanan tersebut disimpan sampai batuan tersebut tidak mampu menahannya lagi. Pada saat itu, terjadilah pelepasan energi secara tiba-tiba dengan kekuatan yang besar dan ke segala arah. Fenomena ini dikenal sebagai gempabumi dan proses ini akan terus berlangsung, sehingga gempabumi dapat terjadi kembali dalam periode waktu tertentu [13]. Setiap kejadian gempabumi memiliki beberapa parameter yang berupa gelombang sebagai rekaman sinyal. Setelah melalui proses pengolahan data, informasi ini digunakan sebagai data bacaan fase (*phase reading data*). Parameter-parameter tersebut terdiri dari *origin time*, hiposenter, episenter, magnitudo dan intensitas. *Origin time* merupakan waktu ketika gempa pertama kali terjadi di bawah permukaan bumi. Hiposenter adalah titik di dalam bumi tempat gempa bermula sedangkan titik di permukaan bumi yang berada tepat di atas hiposenter disebut sebagai episenter. Magnitudo merupakan energi yang dilepaskan oleh gempa dan ukuran dampak atau kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa di suatu lokasi disebut intensitas.

2.3 Model kecepatan

Berbagai studi seperti Geofisika, Geokimia, dan Astronomi memerlukan deskripsi yang akurat tentang variasi sifat elastis dan kepadatan di bagian dalam bumi. Bumi memiliki lapisan di dalamnya yang memiliki kecepatan seismik yang beragam tergantung kedalaman dan media perambatan gelombangnya. Model Bumi direpresentasikan untuk membandingkan bagian bumi yang bergantung pada kedalaman dan media lapisan bumi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada kedalaman tertentu di bawah permukaan bumi ada lapisan diskontinuitas yang menandakan terjadinya pergantian fase atau pergantian komposisi penyusun lapisan tersebut. Hal tersebut diketahui dengan menggunakan data kecepatan gelombang seismik yang menjalar melalui media jari-jari bumi. Perbandingan tersebut menggunakan kecepatan gelombang P (v_p) dan kecepatan gelombang S (v_s).

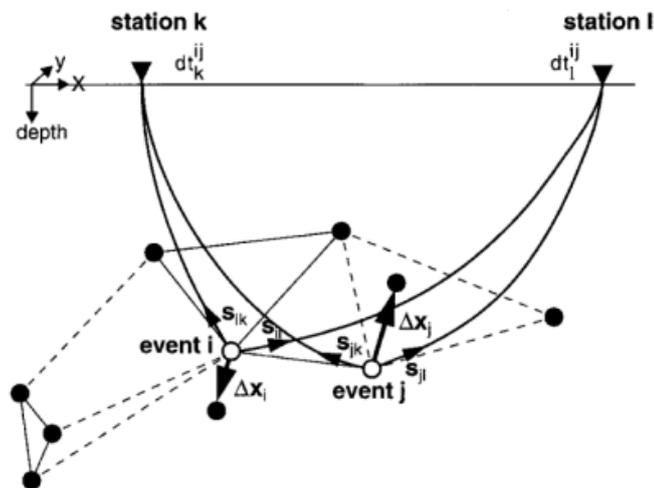


Gambar 2. Properti bumi (a) Jari-jari struktur bumi yang menunjukkan lapisan utama. Garis utuh menunjukkan diskontinuitas disebabkan oleh pergantian fase atau pergantian komposisi (b) Struktur kecepatan yang bergantung pada kedalaman yang sesuai untuk gelombang kompresi dan geser (c) Struktur densitas berpengaruh pada kedalaman [14].

2.4. Metode Double Difference

Relokasi hiposenter gempabumi dibutuhkan untuk analisis lebih detail mengenai gempabumi. Metode *Double Difference* (DD) merupakan teknik yang digunakan untuk menentukan lokasi hiposenter relatif dengan tujuan memperoleh posisi lokasi hiposenter yang lebih tepat, sesuai dengan kondisi tektonik yang sebenarnya [15]. Metode ini diperkenalkan oleh Waldhauser dan Ellsworth pada tahun 2000 melalui algoritma dalam *software HypoDD*. Proses relokasi ini terpaut erat dengan model kecepatan. Apabila relokasi tidak melibatkan model kecepatan yang sesuai dengan karakteristik heterogen episenter, maka hasil relokasi dapat menghasilkan titik yang kurang akurat dengan kondisi sebenarnya. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan gelombang seismic yang melewati berbagai jenis batuan dan struktur geologi. Tanpa mempertimbangkan heterogenitas ini, hasil relokasi dapat memberikan posisi hiposenter yang salah, yang berpengaruh terhadap pemahaman sumber gempabumi dan analisis risiko lebih lanjut.

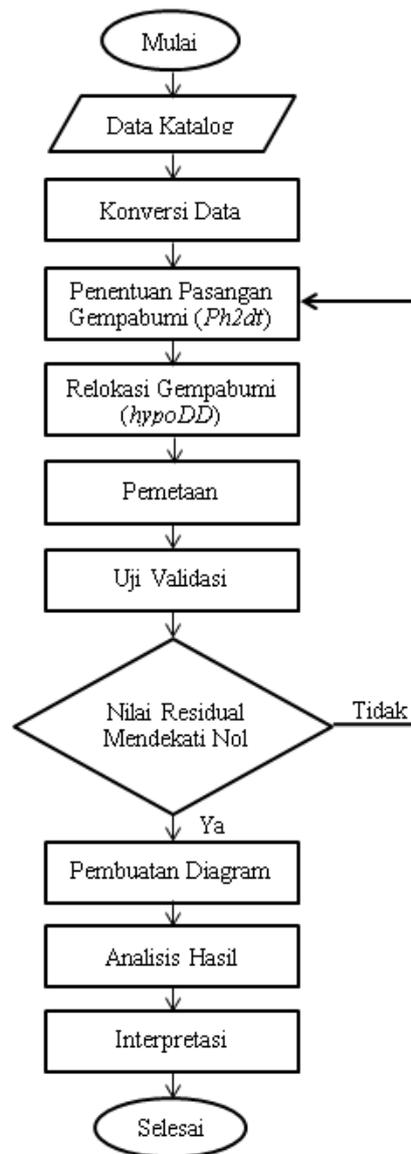
Teknik ini memanfaatkan informasi waktu tempuh dari pasangan gempabumi ke stasiun observasi dengan cara meminimalisasi perbedaan waktu residual antara waktu observasi dan waktu kalkulasi dari pasangan gempabumi yang memiliki jarak hiposenter yang berdekatan. Dengan demikian, metode ini dapat mengatasi masalah mengenai struktur kecepatan yang tidak termodel, sehingga akurasi posisi hiposenter gempabumi meningkat. Konsep dasar metode DD adalah bahwa jika ada dua gempabumi memiliki jarak yang lebih dekat satu sama lain dibandingkan jarak masing-masing gempabumi dari stasiun perekam yang sama, maka propagasi gelombang dari kedua gempabumi tersebut dianggap serupa. Berdasarkan anggapan ini, selisih waktu tempuh antara kedua gempabumi dapat diasumsikan sebagai fungsi jarak, sehingga *error* model propagasi gelombang gempabumi dapat diminimalisasi tanpa menggunakan koreksi stasiun [15]. Ilustrasi dari pemaparan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi dari relokasi gempabumi dengan algoritma *Double Difference* [15].

3. Metode

Penelitian ini menggunakan data sekunder dari katalog gempabumi dari tanggal 1 Januari 2014 s.d 31 Desember 2023 yang diunduh dari repositori BMKG dengan wilayah penelitian berada di daerah Bali dengan koordinat wilayah $-8,33^{\circ}$ s.d $-7,45^{\circ}$ LS dan $114,26^{\circ}$ s.d $115,43^{\circ}$ BT. Data gempabumi tersebut berkisar antara kedalaman 1-1000 km dengan magnitudo 1,0-9,5 Mw. Data dalam katalog gempabumi ini mencakup informasi tentang kejadian gempabumi, meliputi *origin time*, *arrival time*, lintang, bujur, kedalaman, tanggal, RMS, *azimuthal gap*, fase gelombang dan stasiun pencatat gempabumi. Adapun data pendukung yang dibutuhkan yaitu, data koordinat pada 26 stasiun pencatat seismic yang diperoleh dari laman http://inatews2.bmkg.go.id/new/data/meta_eq.php. Dari data yang diperoleh, selanjutnya dilakukan pengolahan relokasi hiposenter dengan metode DD menggunakan perangkat lunak *HypoDD* dan hasilnya dipetakan menggunakan GMT. Adapun diagram alir penelitian terkait relokasi hiposenter gempabumi dengan menggunakan metode DD di wilayah Bali dan sekitarnya seperti ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir.

4. Hasil Dan Pembahasan

4.1. Seismisitas Wilayah Bali

Wilayah Bali periode 2014 sampai dengan 2023 memiliki sebanyak 1.815 kejadian gempabumi dengan fase gelombang P terekam sebanyak 83.703 dan gelombang S yang terekam sebanyak 20.122 fase. Adapun sebaran hiposenter gempabumi berdasarkan kedalaman dan magnitudo dalam rentang awal 2014 s.d akhir 2023 seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Sebaran hiposenter gempabumi berdasarkan kedalaman dan magnitudo periode 2014-2023 (kejadian).

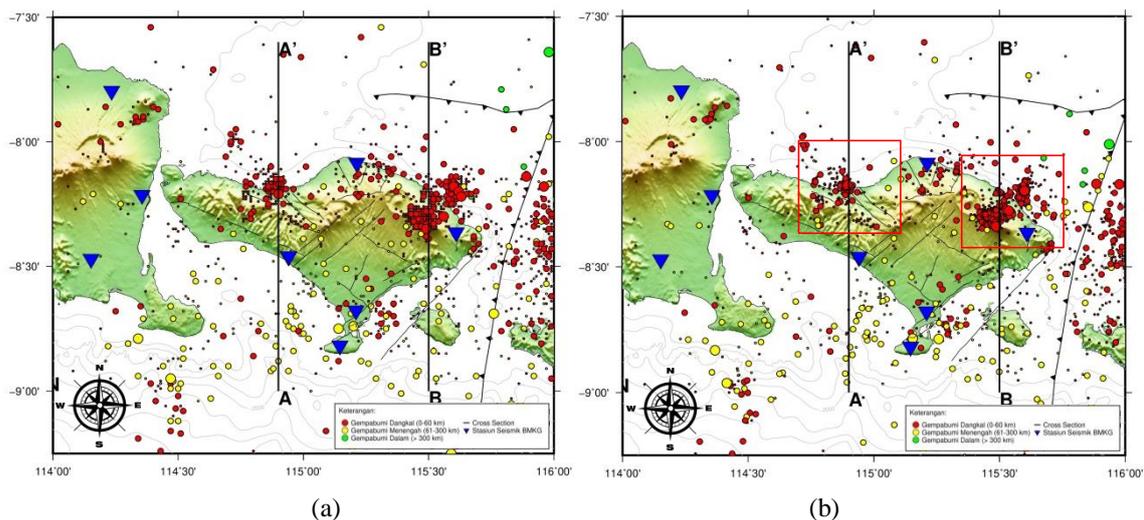
Berdasarkan Kedalaman			Berdasarkan Magnitudo		
Dangkal	Menengah	Dalam	M0 - M3	M3 - M5	>M5
1517	287	11	1274	524	17

Tabel 1 menunjukkan bahwa dalam kurun waktu 10 tahun yaitu pada tahun 2014-2023, mayoritas kejadian gempabumi wilayah Bali berdasarkan kedalamannya merupakan gempabumi dengan kedalaman dangkal sebanyak 1517 kejadian atau 83,58% dari total 1.815 kejadian. Adapun berdasarkan magnitudo gempabumi wilayah Bali didominasi dengan gempabumi M0 - M3 sebanyak 1274 kejadian atau 70,19% dari total 1.815 kejadian gempa. Kedua hal ini merupakan akibat dari posisi wilayah Bali yang berada pada zona subduksi

sehingga kejadian gempabumi banyak terjadi pada daerah kerak bumi serta aktivitas vulkanik yang ada di Bali [16].

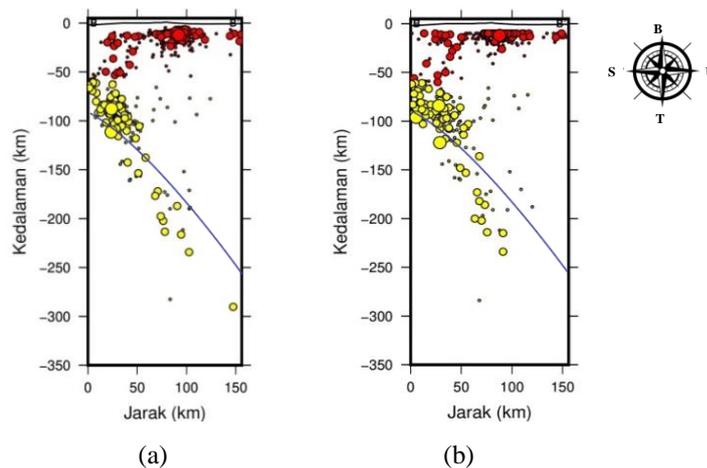
4.2. Pemetaan hasil sebelum dan sesudah relokasi

Relokasi hiposenter gempabumi dipetakan dengan membandingkan letak hiposenter sebelum dan sesudah direlokasi. Hiposenter kejadian gempabumi ditampilkan pada Gambar 5, dimana hiposenter gempabumi menyebar pada seluruh daerah penelitian. Untuk menunjukkan persebaran hiposenter gempabumi pada daerah penelitian secara regional dilakukanlah irisan penampang vertikal (*cross section*). *Cross section* dilakukan pada 2 lokasi yaitu A-A' dan B-B' dengan koordinat *cross section* berada pada $-9,0^{\circ}$ s.d $-7,66^{\circ}$ LS yang kemudian dikonversi ke jarak (km) dimana, 1° lintang/ bujur adalah 111 km maka, setiap irisan membentang kurang lebih 148,74 km. Pada peta seismisitas yang ditampilkan pada Gambar 5, lokasi episenter kejadian gempabumi ditandai dengan simbol bulatan dengan warna merah yang menunjukkan gempa dangkal, warna kuning menunjukkan gempa menengah dan hijau menunjukkan gempa dalam. Simbol segitiga dengan warna biru merupakan lokasi stasiun perekam.



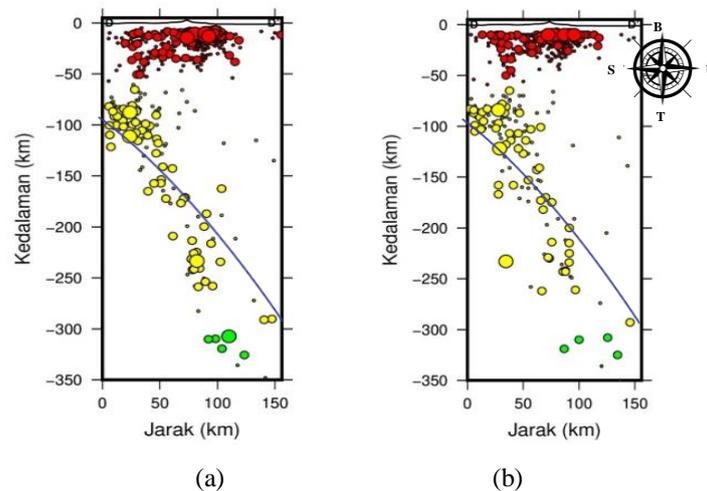
Gambar 5. Sebaran seismisitas daerah penelitian (a) sebelum relokasi dan (b) sesudah relokasi.

Dari keseluruhan kejadian gempabumi pada rentang tahun 2014-2023, sebelum relokasi tercatat 1.815 data kejadian gempabumi. Setelah relokasi dilakukan, kejadian gempabumi yang terelokasi berjumlah 1.780 data kejadian gempabumi. Hal ini disebabkan karena relokasi dilakukan dengan menyesuaikan parameter kontrol serta kontrol solusi yang dimasukkan pada subprogram *ph2dt* dan *HypoDD*, oleh karena itu beberapa kejadian tidak dapat terelokasi karena tidak memenuhi parameter yang dimasukkan. Adapun parameter masukan dari subprogram *ph2dt*, yaitu data waktu tempuh, model kecepatan seismic, parameter hiposenter awal, jarak antara pasangan-pasangan gempa, stasiun seismic dan penentuan *threshold* (batas maksimal dan minimal pemilihan pasangan gempa serta ambang batas kesalahan). Pada subprogram *hypoDD*, parameter yang dimasukkan antara lain *file* parameter kontrol (*hypoDD.inp*), data waktu tempuh (*phase.dat*), data perbedaan waktu tempuh (*dt.cc* dan *dt.ct*), parameter hiposenter awal (*hypoDD.loc*), lokasi stasiun (*station.dat*), daftar pasangan gempa (*event.dat*), parameter iterasi dan mode relokasi. Dari hasil relokasi juga dapat terlihat bahwa terjadi perbedaan lokasi hiposenter gempabumi, dari yang sebelum relokasi terlihat letak hiposenter menyebar dari patahan-patahan sumber gempabumi di daerah penelitian, setelah relokasi menunjukkan bahwa letak hiposenter gempabumi semakin rapat atau mendekat ke arah patahan-patahan sumber gempabumi di daerah penelitian yang ditunjukkan melalui *cross section*. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses relokasi sudah sesuai dengan tujuan relokasi itu sendiri, yaitu menghubungkan antarkejadian gempabumi yang sekiranya berada pada satu sumber mekanisme penyebab gempabumi yang sama. Di bawah ini ditunjukkan hasil *cross section* A-A' pada Gambar 6.



Gambar 6. *Cross section A-A'* (a) sebelum relokasi dilakukan, dan (b) sesudah relokasi dilakukan.

Hasil *cross section A-A'* membentang sepanjang kurang lebih 148,74 km dari utara hingga utara daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 6 di atas. *Cross section* dilakukan sepanjang garis tersebut agar dapat mendefinisikan persebaran hiposenter secara regional, sehingga dapat terlihat struktur atau sumber mekanisme penyebab gempa bumi di daerah penelitian. Garis berwarna biru merupakan garis penujaman zona subduksi yaitu pertemuan lempeng Eurasia dan Indo-Australia. Secara regional pada *cross section A-A'* sebelum dan sesudah dilakukan relokasi terdapat pergeseran letak hiposenter yang terlihat merapat pada zona penujaman. Secara tektonik, kawasan utara Pulau Bali memiliki struktur patahan naik belakang busur kepulauan yang dikenal sebagai *back arc thrust*. Struktur ini terbentuk akibat penunjaman balik lempeng Eurasia terhadap lempeng Samudra Indo-Australia, yang menyebabkan sering terjadinya gempa bumi dengan pusat di darat dan kedalaman dangkal pada kawasan tersebut [17]. *Cross section B-B'* untuk sebelum dan sesudah dilakukan relokasi ditampilkan pada Gambar 7.

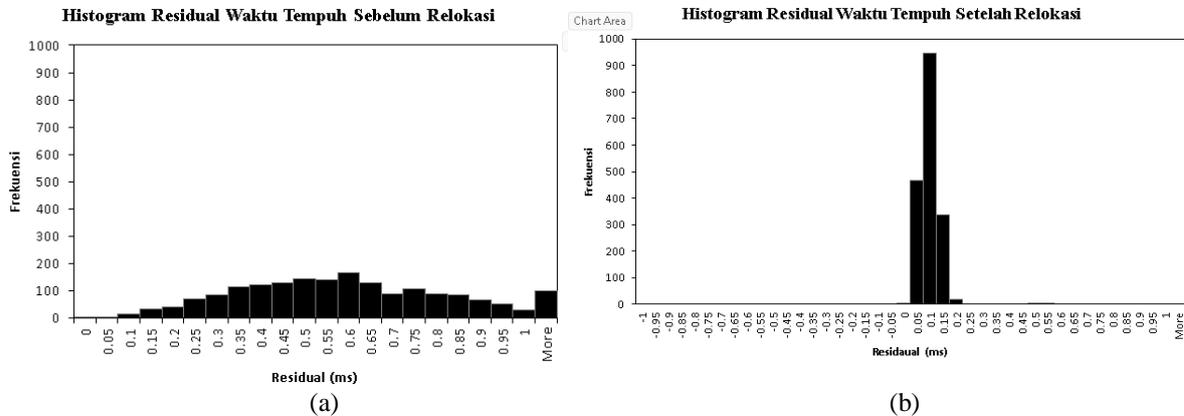


Gambar 7. *Cross section B-B'* (a) sebelum relokasi dilakukan dan (b) sesudah relokasi dilakukan.

Hasil *cross section B-B'* membentang kurang lebih sepanjang 148,74 km dari selatan hingga utara Bali yang ditunjukkan pada Gambar 7. Secara regional terdapat pergeseran pada distribusi hiposenter gempa bumi pada sebelum dan setelah relokasi hiposenter dilakukan. *Cross section B-B'* ini membelah daerah sekitar Gunung Agung sampai dengan zona *back arc thrust* yang memiliki intensitas kegempaan yang cukup tinggi. Pada bagian penujaman zona subduksi, dapat dilihat pada sebelum relokasi dilakukan terdapat beberapa hiposenter gempa bumi yang berada sedikit menyebar atau jauh dari zona penujaman berada. Setelah relokasi dilakukan, dapat terlihat adanya pergeseran atau perubahan letak hiposenter yang mendekati ke arah zona penunjaman. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses relokasi mempengaruhi perubahan letak hiposenter ke segala arah termasuk kedalaman.

4.3. Residual waktu tempuh

Residual waktu tempuh menunjukkan kecocokan atau kesesuaian antara parameter model dengan keadaan sebenarnya. Residual waktu tempuh diukur dalam satuan mikro-sekon (ms). Nilai residual waktu tempuh merupakan selisih antara waktu tempuh kalkulasi dan waktu tempuh observasi. Nilai residual dianggap semakin baik jika mendekati angka 0. Nilai residual yang mendekati 0 menunjukkan bahwa model kecepatan seismik yang digunakan untuk menghitung waktu tiba sesuai dengan kondisi nyata di bawah permukaan bumi. Histogram menunjukkan residual waktu tempuh dari masing-masing kejadian gempa bumi yang terjadi sebelum maupun setelah relokasi yang disajikan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Residual waktu tempuh (a) sebelum relokasi dan (b) sesudah relokasi.

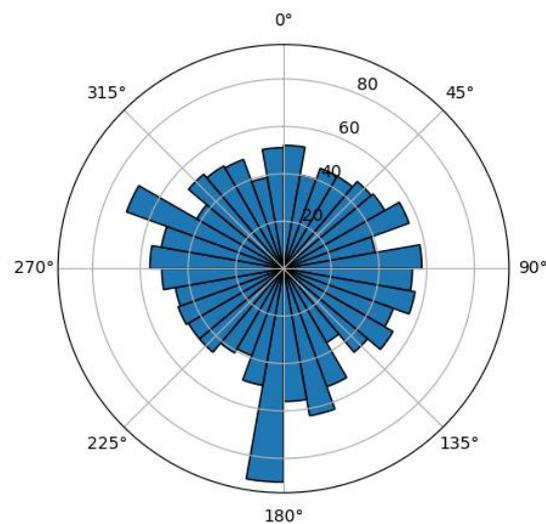
Pada Gambar 8a dari 1.815 data gempa bumi yang digunakan dengan sebelum relokasi, didapatkan persebaran residual waktu tempuh masih berada pada angka lebih dari 1,0 ms. Dengan frekuensi residual waktu tempuh tertinggi berada pada 0,6 ms. Nilai residual yang cukup tinggi kurang menggambarkan letak hiposenter sebenarnya. Hal tersebut merupakan akibat dari selisih waktu tempuh kalkulasi dan waktu tempuh observasi terlalu besar, sehingga waktu kalkulasi belum mendekati nilai waktu tempuh observasi, oleh karena itu belum dapat dikatakan mendekati lokasi hiposenter yang sebenarnya.

Setelah direlokasi dapat dilihat pada Gambar 8b terdapat 1.780 data gempa bumi yang berhasil terelokasi karena memenuhi syarat parameter masukan pada proses relokasi. Histogram residual waktu tempuh mayoritas berada kurang dari 0,3 ms dengan frekuensi berada pada 0,2 ms seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil relokasi menunjukkan adanya pengurangan nilai residual waktu tempuh yang berarti nilai residual waktu tiba kalkulasinya sudah mendekati nilai residual observasi. Semakin mendekati 0 maka posisi hiposenter pada data observasi sudah semakin mendekati posisi pada model kecepatan kalkulasi yang digunakan [18].

4.4. Diagram Rose

Relokasi hiposenter menghasilkan pergeseran letak hiposenter kejadian gempa bumi yang berhasil direlokasi. Diagram *rose* menggambarkan distribusi frekuensi atau intensitas dari suatu arah atau sudut. Dari hasil diagram tersebut dapat dilihat proses relokasi yang mengubah posisi hiposenter gempa bumi ke berbagai arah pada Gambar 9.

Setelah relokasi dilakukan, interval sudut pergeseran diukur dalam rentang 0-360°, sementara lingkaran dengan skala 20-100 menggambarkan jumlah kejadian gempa bumi. Setelah dilakukan relokasi, Posisi hiposenter menyebar ke segala arah tanpa menunjukkan kecenderungan ke arah tertentu dengan frekuensi tertinggi berada pada 180° yang berarah selatan, dimana pada arah selatan ini merupakan zona penunjaman subduksi yang mengindikasikan kejadian gempa bumi bergeser atau mendekat pada zona penunjaman subduksi di bawah wilayah Bali.



Gambar 9. Diagram Rose.

5. Kesimpulan

Hasil relokasi hiposenter menggunakan metode *Doble Difference* menunjukkan perubahan lokasi hiposenter yang lebih akurat di wilayah Bali. Hal ini dibuktikan dengan banyaknya residual waktu tempuh setelah relokasi yang mendekati nilai nol. Sebaran hiposenter gempa bumi di wilayah Bali sebelum dilakukan relokasi menyebar ke seluruh wilayah dan setelah dilakukan relokasi, posisi hiposenter semakin mendekat ke sumber penyebab gempa yaitu pada zona penujaman subduksi di bawah wilayah Bali yang ditunjukkan pada hasil *cross-section*. Selain itu, berdasarkan hasil analisis hiposenter gempa bumi setelah direlokasi, didapatkan trend kemenerusan hiposenter yang menuju zona penujaman subduksi.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat terlaksana dengan baik berkat dukungan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kepala BBMKG Wilayah III Denpasar dan Dosen Program Studi Fisika FMIPA Universitas Udayana atas kerjasama dan bimbingan yang telah diberikan dalam penelitian ini.

Pustaka

- [1] M. Stemm and R. H. Katz, Measuring and P. Bird, "An Updated Digital Model of Plate Boundaries," *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 4, no. 3, p. 1027, 2003.
- [2] T. A. P. Setiadi and S. Rohadi, "Relokasi Gempa Bumi Teleseismic Double-Difference di Wilayah Bali-Nusa Tenggara dengan Model Kecepatan 3D," *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, vol. 9 no. 1, pp. 45–52, 2018.
- [3] I. N. Setiawan, D. Krismawati, S. Pramana, and E. Tanur, "Klasterisasi Wilayah 117 Rentan Bencana Alam Berupa Gerakan Tanah dan Gempa Bumi di Indonesia," in *Seminar 118 National Official Statistics, 2022*, pp. 669–676.
- [4] N. Nuraeni, M. Mujiburrahman, and R. Hariawan, "Manajemen Mitigasi Bencana pada 123 Satuan Pendidikan Anak Usia Dini untuk Pengurangan Risiko bencana Gempa Bumi dan 124 Tsunami," *Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Ilmu Pendidikan: E-Saintika*, vol. 4, no. 1, pp. 68–79, 2020.
- [5] N.P.J.A.R. Pangastuti, "Analisis Energi Potensial Gempabumipada Zona Subduksi Wilayah Bali," *Buletin Fisika*, vol. 33 no. 2, pp. 137–144, 2022.
- [6] T.A.P. Setiadi, Y. Daud, A.A. Martha, and S. Rohadi, "Relokasi Gempabumi Menggunakan Metode Teleseismik Double Difference di Wilayah Jawa," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 23, no. 1, pp. 23–27, 2022.
- [7] M.F. Gracynthia, "Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Metode Coupled Velocity-Hypocenter dan Local Earthquake Tomography Untuk Sesar Palu Koro," *Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya*, 2015.

- [8] A.M. Lubis, “Analisis Kecepatan Gelombang Seismik Bawah Permukaan di Daerah yang Terkena Dampak Gempabumi 4 Juni 2000 (Studi Kasus: Kampus Universitas Bengkulu),” *Jurnal Gradien*, vol. 1, no. 2, pp. 69–73, 2005.
- [9] N. Nakif, Darsono, and K. Sorja, “Penentuan Tingkat Kekerasan Batuan Menggunakan Metode Seismik Refraksi di Jatikuwung Karanganyar,” *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 3, no. 1, pp. 29–35, 2013.
- [10] S. Ayub, M. Zuhdi, and J. Rakhmat, “Aplikasi Metode Seismik Refraksi dalam Menentukan Lapisan dan Tingkat Kekerasan Batuan di Bawah Permukaan Desa Medana Lombok Utara,” *Kappa Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 188–196, 2020.
- [11] V. Arintalofa, G. Yuliyanto, and U. Harmoko, “Analisa Mikrotremor Menggunakan Metode HVSR untuk Mengetahui Karakteristik Bawah Permukaan Manifestasi Panas Bumi Diwak dan Derekan Berdasarkan Nilai VP,” *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, vol. 1, no. 2, pp. 54–61, 2020.
- [12] K.E. Bullen and A.B. Bruce, *An Introduction to The Theory of Seismology*, 4th ed. USA: Cambridge University Press, 1965.
- [13] A.V.H. Simanjutak and Olyphia, “Perbandingan Energi Gempabumi Utama dan Susulan (Studi Kasus: Gempabumi Subduksi Pulau Sumatera dan Jawa),” *Jurnal Fisika FLUX*, vol. 14, no. 1, pp. 19–26, 2017.
- [14] A.M. Dziewonski and D.L. Anderson, “Preliminary Reference Earth Model,” *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 25, no. 4, pp. 297–356, 1981.
- [15] F. Waldhauser and W.L. Ellsworth, “A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method Application to the Northern Hayward Fault, California,” *Bulletin of Seismological Society of America*, vol. 90, no. 6, pp. 1353–1368, 2000.
- [16] S.J. Hutchings and W.D. Mooney, “The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications,” Menlo Park, CA, USA, Oct. 2021.
- [17] S. Hidayatunnisak, A. Susilo, and M. Anshori, “Studi Tomografi Seismik Untuk Menentukan Model Kecepatan Gelombang P daerah Bali,” Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, 2015.
- [18] Y.R. Serhalawan, “Petunjuk Teknis Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Program Hypocenter Double Difference (HypoDD) Berdasarkan Data Katalog/ Buletin Gemabumi,” Sorong, Indonesia, 2018.