

## APLIKASI DOUBLE DIFFERENCE UNTUK IDENTIFIKASI ZONA PATAHAN MIKRO WILAYAH SULAWESI BARAT

<sup>1</sup>Suwardi✉, <sup>1,2</sup>Arko Djajadi, <sup>1</sup>Tata Subrata, <sup>1</sup>Laura Belani Nudiyah

<sup>1</sup>Program Studi Magister Teknik Informatika, Universitas Raharja, Tangerang, Indonesia

<sup>2</sup>Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

Email: [surwadi@raharja.info](mailto:surwadi@raharja.info)

DOI: <https://doi.org/10.46880/jmika.Vol7No2.pp272-277>

### ABSTRACT

West Sulawesi is an area in South Sulawesi province that is experiencing a sudden increase in seismic activity. There have been 264 earthquake events recorded during the 2021-2022 period. The increase in seismic activity occurred around the west Sulawesi segment and the Mamuju segment, which are local faults located in west Sulawesi. Sulawesi Island itself is the result of fragments due to larger complex reactions and has quite high seismic activity. Therefore, it is necessary to calculate the earthquake hypocenter relocation to obtain more accurate hypocenter parameters for fault zone identification and micro fault orientation. This study aims to relocate the earthquake hypocenter based on mathematical measurement data using the Double-Difference method for identification of fault zones and micro-fault orientation. The data used is BMKG earthquake catalog data for the western Sulawesi region with a range of 118.49 East - 119.59 East and 3.67 LS - 2.45 LS in the 2021-2022 period. The Double-Difference method is a method based on the Geiger method using residual travel time data from each pair of hypocenters to the earthquake recording station. The principle is to compare two earthquake hypocenters that are close to the earthquake recording station with the assumption that the distance between the two hypocenters must be closer than the distance between the hypocenter and the earthquake recording station. This is done so that the ray path of the two hypocenters can be considered close to the same value. From the calculation of the earthquake hypocenter relocation, it was found that the hypocenter after relocation experienced changes in distribution that accumulated in the Mamasa fault segment area. From the residual histogram, it is found that the RMS residual is close to 0, indicating an improvement in data quality as evidenced by the observation travel time and the calculated travel time are almost close to the same value. In the cross-section results, it is obtained that the depth changes vary in the subsurface depth from the initial depth of 10 km before being relocated, indicating that the earthquake that occurred in West Sulawesi was included in the shallow crustal earthquake type.

**Keyword:** Double-Difference, Residual, Hypocenter.

### ABSTRAK

Sulawesi barat merupakan satu wilayah di provinsi Sulawesi Selatan yang sedang mengalami peningkatan aktivitas seismik secara tiba-tiba. Tercatat telah terjadi sebanyak 264 event gempabumi selama periode tahun 2021-2022. Peningkatan aktivitas seismik tersebut terjadi di sekitar segmen Sulawesi barat dan segmen Mamuju yang merupakan sesar lokal yang berada di Sulawesi barat. Pulau Sulawesi sendiri merupakan hasil pecahan fragmen akibat reaksi kompleks yang lebih besar dan memiliki aktivitas seismik yang cukup tinggi. Maka dari itu perlu dilakukan perhitungan relokasi hiposenter gempabumi untuk memperoleh parameter hiposenter yang lebih akurat untuk identifikasi zona patahan dan orientasi patahan mikro. Penelitian ini bertujuan untuk merelokasi hiposenter gempabumi berdasarkan data hasil pengukuran secara matematis menggunakan metode Double-Difference untuk identifikasi zona patahan dan orientasi patahan mikro. Data yang digunakan adalah data katalog gempabumi BMKG wilayah Sulawesi barat dengan range wilayah 118.49 BT - 119.59 BT dan 3.67 LS - 2.45 LS pada periode tahun 2021-2022. Metode Double-Difference merupakan metode yang berdasar pada metode Geiger dengan menggunakan data waktu tempuh residual dari setiap pasangan hiposenter ke stasiun pencatat gempabumi. Prinsipnya yaitu dengan membandingkan dua hiposenter gempabumi yang berdekatan terhadap stasiun pencatat gempabumi dengan asumsi bahwa jarak kedua hiposenter harus lebih dekat dibandingkan dengan jarak hiposenter ke stasiun pencatat gempabumi. Hal ini dilakukan agar raypath dari kedua hiposenter dapat dianggap mendekati nilai yang sama. Dari hasil perhitungan relokasi hiposenter gempabumi

diperoleh bahwa hiposenter setelah relokasi mengalami perubahan sebaran yang terakumulasi pada daerah segmen sesar Mamasa. Dari histogram residual diperoleh bahwa RMS residual mendekati nilai 0, hal ini menunjukkan perbaikan kualitas data yang dibuktikan dengan waktu tempuh observasi dengan waktu tempuh hasil kalkulasi hampir mendekati nilai yang sama. Pada hasil cross-section diperoleh perubahan kedalaman yang bervariasi di kedalaman subsurface dari kedalaman awal 10 km sebelum direlokasi yang mengindikasikan jika gempabumi yang terjadi di Sulawesi barat masuk jenis gempa shallow crustal.

**Kata Kunci: Double-Difference, Residual, Hiposenter.**

## PENDAHULUAN

Pulau Sulawesi merupakan salah satu wilayah aktif seismik di Indonesia. Pulau Sulawesi terbentuk oleh interaksi rumit triple junction Antara Lempeng Filipina, Lempeng Sunda, dan Lempeng Pasifik yang menyebabkan wilayah Sulawesi memiliki frekuensi kegunaan cukup tinggi (Ibrahim et al., 2010). Secara Umum banyak sekali sesar major dan sesar minor yang berada di pulau Sulawesi. Secara regional, Pulau Sulawesi mendapat tekanan dari luar sehingga terjadi deformasi secara terus menerus (Rusydi, 1998).

Pada rentang tahun 2021-2022 tercatat telah terjadi 264 event gempa bumi di wilayah Sulawesi barat. Terdapat empat gempabumi signifikan yang dirasakan dengan mekanisme gempa bumi dominan pada jenis thrust fault. Tingginya aktivitas seismik tersebut terjadi disekitar segmen Sulawesi barat yang merupakan terusan dari patahan Selayar. Salah satu sesar aktif yang berada di wilayah Sulawesi Selatan dan melewati wilayah Sulawesi barat adalah sesar Saddang (Siahaan et al., 2005). Sesar Saddang membentang dari pesisir Pantai Mamuju, Sulawesi Barat memotong diagonal melintasi daerah Sulawesi Selatan bagian Tengah, lalu Sulawesi Selatan bagian Selatan, Kota Bulukumba, hingga ke Pulau Selayar bagian Timur. Tingginya frekuensi gempa merepresentasikan tingkat aktivitas seismik yang tinggi pada suatu daerah (Ramadhan et al., 2012). Salah satu parameter gempabumi yang sangat penting dalam mengidentifikasi keadaan tektonik suatu wilayah adalah hiposenter. Data episenter merupakan salah satu data penting yang digunakan untuk menginterpretasikan keadaan mekanisme sumber gempa bumi. Data output hasil analisa awal menggunakan ketentuan fix depth pada kedalaman 10 km ketika polarisasi dan pembacaan waktu tiba gelombang P dan gelombang S yang kurang baik. Hal ini menyebabkan distribusi hiposenter pada data awal diseminasi menjadi seragam pada kedalaman 10 km dan sulit untuk melakukan interpretasi mekanisme sumber gempa bumi.

Distribusi hiposenter yang presisi akan memberikan representasi keadaan tektonik pada suatu area gempa dari aspek geologi maupun seismologi

(Jannah et al., 2016). Selain itu penentuan posisi hiposenter secara presisi dapat digunakan dalam identifikasi zona patahan dan sebaran serta orientasi micro fault (patahan mikro) (Sunardi et al., 2012). Pada analisis seismisitas kegunaan penentuan hiposenter memiliki ketidakpastian yang sangat besar. Hal tersebut karena penentuan hiposenter dapat mempengaruhi penentuan dimensi patahan sumber gempabumi sehingga sulit untuk menginterpretasi struktur geologi dengan baik (Madrinovella et al., 2014).

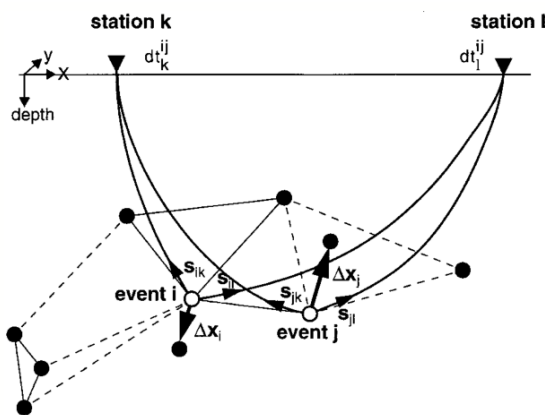
Pada gempa Sulawesi barat data distribusi hiposenter yang diperoleh dari data katalog memberikan trend yang tidak wajar di Wilayah Sulawesi barat. Hal tersebut dikarenakan kedalaman gempa banyak terdistribusi pada kedalaman 10 km sehingga dimungkinkan jika kedalaman gempabumi yang diperoleh merupakan hasil fix depth otomatis dari seiscomp3. Maka perlu dilakukan pendekatan model sederhana yang tepat diperlukan untuk dapat merelokasi posisi hiposenter awal ke hiposenter baru yang lebih presisi. Sehingga data relokasi hiposenter dapat digunakan sebagai identifikasi orientasi patahan mikro (Socquet et al., 2006). Penelitian ini bertujuan untuk merelokasi hiposenter gempabumi untuk identifikasi zona patahan dan orientasi patahan mikro menggunakan metode Double-Difference.

Metode Double-Difference merupakan metode yang berdasar pada metode Geiger dengan menggunakan data waktu tempuh residual dari setiap pasangan hiposenter ke stasiun pencatat gempabumi (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Prinsipnya yaitu dengan membandingkan dua hiposenter gempabumi yang berdekatan terhadap stasiun pencatat gempabumi dengan asumsi bahwa jarak kedua hiposenter harus lebih dekat dibandingkan dengan jarak hiposenter ke stasiun pencatat gempabumi (Garini, 2014). Hal ini dilakukan agar raypath dari kedua hiposenter dapat dianggap mendekati sama. Dengan penentuan hiposenter secara teliti maka data hiposenter dapat digunakan dalam menentukan orientasi patahan mikro dari suatu sumber gempabumi (Madrinovella et al., 2014).

**TINJAUAN PUSTAKA**

Metode double difference merupakan teknik relokasi gempa dengan tujuan untuk mendapatkan posisi hiposenter yang lebih presisi agar sesuai dengan kondisi tektonik (Waldhause, 2001). Metode ini berdasar pada metode Geiger dengan menggunakan data waktu tempuh residual dari setiap pasangan hiposenter ke stasiun pencatat gempabumi. Prinsipnya adalah dengan membandingkan dua hiposenter yang memiliki jarak berdekatan terhadap stasiun pencatat gempabumi, dengan asumsi bahwa jarak kedua hiposenter ini harus lebih dekat dibandingkan dengan jarak hiposenter ke stasiun pencatat gempabumi.

Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh raypath dari kedua hiposenter dapat dianggap mendekati sama. Dengan asumsi ini, maka selisih waktu tempuh antara kedua hiposenter yang terekam pada stasiun pengamat gempabumi yang sama dapat dianggap sebagai fungsi jarak antar kedua hiposenter gempabumi (Zhang, 2003). Sehingga kesalahan yang diperoleh menggunakan model kecepatan dapat diminimalkan.



Sumber: (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

**Gambar 1.** Ilustrasi Algoritma Double Difference

Gambar 1 memperlihatkan ilustrasi algoritma double difference. Lingkaran hitam dan putih merupakan event gempabumi yang berhubungan satu sama lain. Garis hitam tebal yaitu pasangan gempabumi dengan data korelasi silang dan garis putus-putus dengan data katalog. Lingkaran putih merupakan event gempabumi I dan J yang saling berpasangan. Arah panah besar merupakan vector perpindahan dari lokasi gempabumi awal ke lokasi setelah relokasi. Arah panah kecil merupakan raypath dari lokasi gempabumi ke stasiun (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Gambar 2 memperlihatkan contoh data raw dari database seismik gempabumi Sulawesi Barat. Waktu tempuh residual

relatif antara kedua hiposenter yang saling berdekatan dalam satu cluster dapat diformulasikan dengan

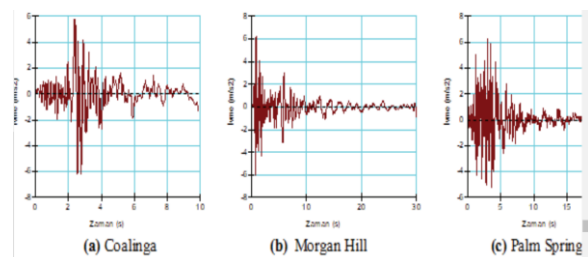
$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{calc} \tag{1}$$

Persamaan 1 merupakan persamaan umum *double difference*. Hasil relokasi hiposenter gempa bumi merupakan hasil pengurangan waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun k akibat gempabumi i dan waktu tempuh gelombang seismik ke stasiun k akibat gempabumi j. Sehingga relokasi gempabumi dapat dilakukan jika gempa bumi memiliki pasangan data yang bersebelahan. Selanjutnya persamaan 1 dapat ditulis dalam bentuk

$$\Delta d = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \tag{2}$$

$$WGm = Wd \tag{2}$$

Persamaan 2 merupakan rumus yang digunakan dalam perhitungan double difference menurut Waldhauser dan Ellsworth (2000). Dimana W adalah matriks diagonal untuk pembobotan setiap persamaan perhitungan waktu tempuh gelombang. Kemudian G adalah matriks turunan parsial parameter hiposenter dari jumlah data observasi double difference. Sedangkan m adalah data vector perturbasi parameter setiap hiposenter pada satu cluster dan d merupakan data waktu tempuh residual untuk setiap pasangan gempa yang diterima pada suatu stasiun. Pada gambar 2 terlihat contoh hasil rekaman sinyal gelombang seismik pada sensor seismometer. Polarisasi dan waktu tiba gelombang yang tercatat pada seismometer dapat berbeda-beda, tergantung jarak dari sumber dan kondisi lokal daerah setempat. Pada wilayah dengan kondisi batuan keras umumnya memiliki kecenderungan memiliki sinyanya; gelombang P yang impulsive.

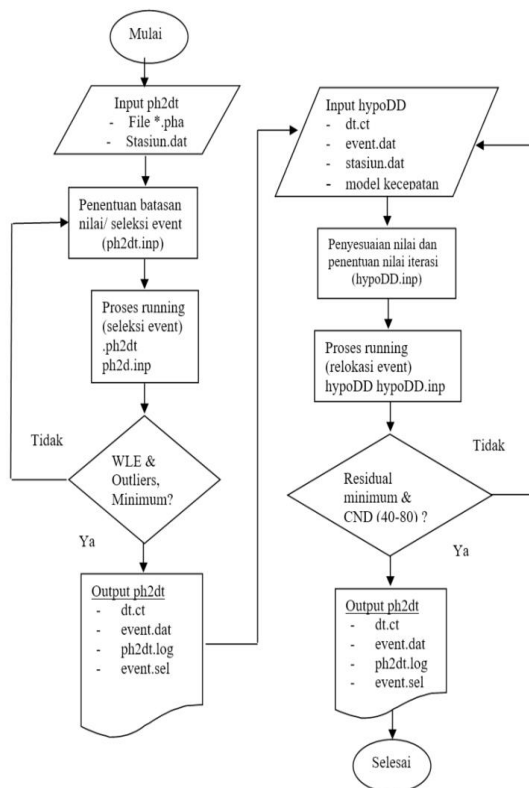


**Gambar 3.** Ilustrasi Hasil Rekaman Gelombang Seismik yang Tercatat Pada Sensor Seismometer

**METODE PENELITIAN**

Data gempabumi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari katalog gempabumi BMKG. Data gempabumi yang digunakan adalah data gempabumi yang terjadi di sekitar wilayah Sulawesi barat, Provinsi Sulawesi Selatan dengan batasan wilayah 118.49 BT - 119.59 BT dan 3.67 LS -2.45 LS. Rentang pengambilan data gempabumi dengan kurun waktu 2021-2022. Diperoleh data gempabumi sebanyak 264 event gempabumi. Jaringan stasiun pencatat yang digunakan tersebar di sekitar wilayah Pulau Sulawesi.

Dilakukan relokasi hiposenter dari data katalog gempa menggunakan metode double difference untuk memperoleh posisi hiposenter yang lebih akurat. Gambar 4 memperlihatkan alur algoritma pengolahan double difference. Data katalog gempa awalnya dikonversi kedalam format .inp untuk dijadikan penentuan parameter input ph2dt. Output dari ph2dt adalah event.dat dan dt.ct yang digunakan sebagai inputan untuk menjalankan program hypodd. Maka akan diperoleh output berupa hypoDD.reloc yang merupakan hasil relokasi dari algoritma hypodd. Data hasil relokasi harus memiliki rentang nilai CND antara 40-80 untuk memvalidasi data hasil relokasi.

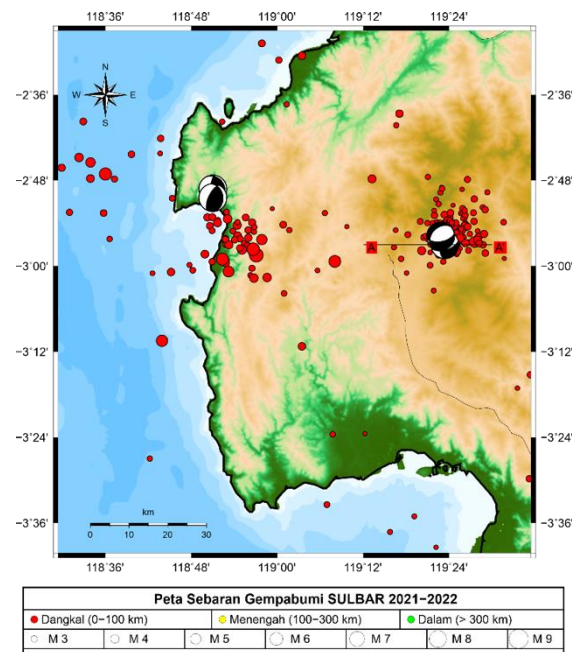


**Gambar 3.** Diagram Algoritma Pengolahan Double Difference

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada gempa Sulawesi barat dari 264 event yang diperoleh sebanyak 208 event gempabumi berhasil direlokasi menggunakan metode double difference. Sebanyak 56 event gempa tidak berhasil direlokasi akibat tidak memiliki pasangan gempabumi untuk melakukan perbandingan waktu tempuh gelombang gempa ke stasiun pencatat.

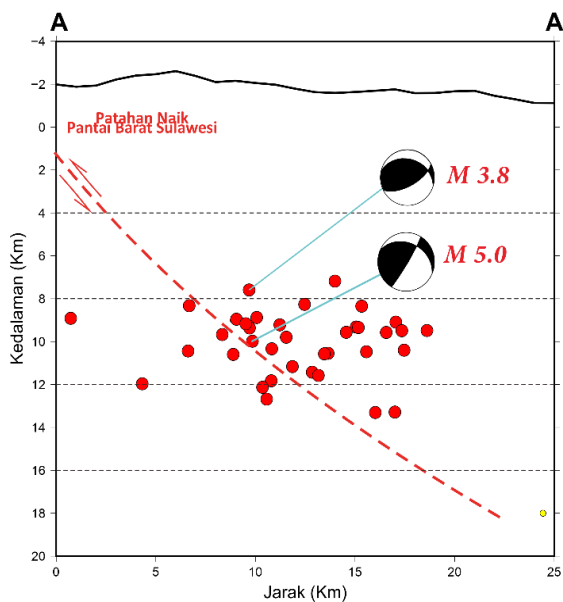
Gambar 4 memperlihatkan distribusi hiposenter setelah dilakukan relokasi. Pada gambar 4 terlihat jika terdapat dua segmen distribusi gempa bumi yang terjadi dalam rentang 2021-2022. Segmen Mamasa yang berada di sebelah timur yaitu wilayah Mamasa dan sebelah barat pada segmen Mamuju yaitu wilayah Malunda. Hal ini karena pada periode tahun 2021-2022 terdapat 4 gempa signifikan di wilayah Mamuju dan Mamasa. Peningkatan aktivitas terjadi karena setelah gempa signifikan akan diikuti oleh beberapa gempa susulan (aftershock). Hal ini terjadi karena ketika batuan patah, batuan akan bergerak untuk kembali pada keadaan setimbang



**Gambar 4.** Peta Cross-Section Hiposenter Gempa Sulawesi Barat Setelah Dilakukan Relokasi

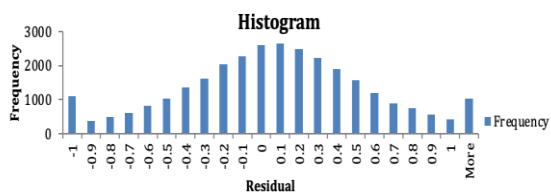
Gambar 5 memperlihatkan cross-section atau penampang melintang wilayah Mamasa dari peta sebelumnya. Terlihat jika distribusi gempa bumi berada pada kedalaman dangkal dengan rentang antara 7-12 km. Pada hasil cross-section terlihat jika distribusi hiposenter gempa bumi memberikan pola yang dapat diinterpretasikan. Pola distribusi hiposenter gempa bumi yang berada di Mamasa memiliki kesesuaian dengan pola patahan naik pantai barat Sulawesi yaitu

Makassar Strait fault. Kedalaman hiposenter gempa bumi bervariasi pada kedalaman subsurface sehingga guncangan dipermukaan akan jauh terasa karena masuk dalam kategori gempa bumi dangkal. Data relokasi yang dihasilkan dari hypodoc perlu dilakukan validasi untuk mengetahui keakuratan data yang diperoleh. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan frekuensi residual time sebelum dan sesudah relokasi hiposenter. Gambar 6 memperlihatkan frekuensi residual sebelum relokasi. Dari histogram tersebut diketahui jika frekuensi residual memiliki rms yang sangat tinggi terlihat jika distribusi nilai rms tidak berpusat dan mendekati nilai nol pada diagram histogram.



**Gambar 5.** Cross-Section Hiposenter Gempa Sulawesi Barat Setelah Dilakukan Relokasi

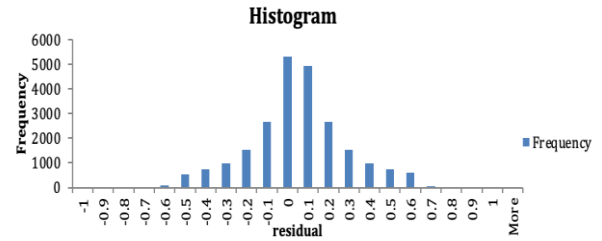
Sementara itu setelah dilakukan relokasi nilai frequency residual hiposenter mendekati nol yang mengindikasikan adanya perbaikan posisi hiposenter.



**Gambar 6.** Frequency Residual Hiposenter Sebelum Dilakukan Relokasi

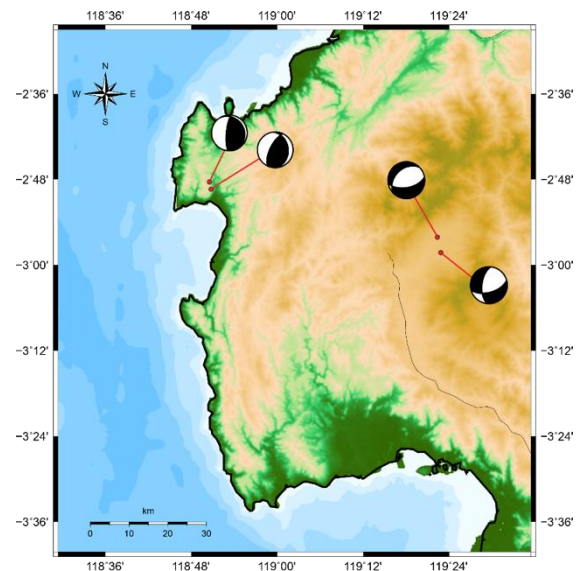
Gambar 7 memperlihatkan frekuensi residual setelah dilakukan relokasi hiposenter. Ketika nilai residual mendekati nol maka menunjukkan kesamaan antara model bumi dan kenyataan tidak terlalu jauh berbeda. Kedua histogram tersebut memperlihatkan

perubahan nilai residual sebelum dan setelah dilakukan relokasi hiposenter.



**Gambar 7.** Frequency Residual Hiposenter Setelah Dilakukan Relokasi

Dari hasil relokasi terlihat orientasi patahan mikro baru di sebelah patahan major yang merupakan terusan dari sesar Selayar dan sesar Saddang. Gambar 8 memperlihatkan gambar orientasi patahan mikro rangkaian gempabumi Sulawesi barat. Pada rangkaian gempabumi Sulawesi barat terdapat gempabumi dengan magnitude di atas M 4.0 yang memungkinkan untuk dilakukan polarisasi untuk memperoleh mekanisme sumber gempa di wilayah Sulawesi barat.



**Gambar 8.** Orientasi Patahan Mikro Gempa Sulawesi Barat

Diperoleh 4 event gempabumi yang dapat digunakan sebagai data dukung orientasi patahan mikro wilayah Sulawesi barat dari data hasil relokasi hiposenter sebelumnya. Hiposenter setelah relokasi terkluster pada daerah yang tidak dilewati sesar major hal tersebut juga dibuktikan dengan mekanisme sumber rangkaian gempabumi Sulawesi barat yang memiliki mekanisme gempa yang dominan thrust fault, kecuali pada pada wilayah Mamasa terdapat gempa bumi dengan mekanisme sesar oblique. Sesar oblique sesar

yang mengalami patahan vertikal bersamaan dengan patahan horizontal.

Diduga jika gempa bumi yang berada di wilayah Sulawesi barat merupakan hasil dari pergerakan patahan mikro yang berada di sebelah patahan major Sulawesi dengan tipe gempa bumi shallow crustal karena kedalaman hiposenter gempa bumi yang dangkal. Patahan mikro ini dimungkinkan terjadi sebagai akibat dari akumulasi energi dan desakan patahan major Sulawesi sehingga batas elastisitas batuan daerah setempat terlampaui dan menyebabkan batuan patah.

#### KESIMPULAN

Pada periode tahun 2021-2022 telah terjadi 264 event gempa bumi. Sebanyak 208 event gempa bumi berhasil direlokasi menggunakan metode double difference, namun 56 event gempa tidak berhasil direlokasi akibat tidak memiliki pasangan gempa bumi. Dari hasil relokasi diperoleh jika hiposenter setelah relokasi mengalami perubahan distribusi hiposenter yang terakumulasi pada daerah segmen Sulawesi barat yang masuk kedalam patahan mikro.

Dari histogram residual diperoleh jika RMS residual mendekati nilai 0 yang menunjukkan perbaikan kualitas data dikarenakan nilai selisih waktu tempuh observasi dengan kalkulasi hampir mendekati kesamaan. Pada hasil cross-section diperoleh perubahan kedalaman yang bervariasi di kedalaman sub-surface dari kedalaman awal 10 km sebelum direlokasi yang mengindikasikan jika gempa bumi yang terjadi di Sulawesi barat masuk kedalam jenis gempa shallow crustal.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Garini, S. A. (2014). Relokasi Hiposenter Gempabumi di Sulawesi Tengah dengan Menggunakan Metode Geiger Dan Coupled Velocity-Hypocenter. *Inovasi Fisika Indonesia*, 3(02).
- Ibrahim, G., Subardjo, & Senjaya, P. (2010). *Tektonik dan Mineral di Indonesia*. Puslitbang BMKG.
- Jannah, I. N., Anggono, T., & Yulianto, T. (2016). Aplikasi Metode Double Difference dalam Relokasi Hiposenter untuk Menggambarkan Zona Transisi antara Busur Banda dan Busur Sunda. *Youngster Physics Journal*, 5(3), 113–122.
- Madrinovella, I., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., & Triastuty, H. (2014). Studi Penentuan dan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Sekitar Cekungan Bandung. *Jurnal Geofisika*, 13(2).
- Ramdhan, M., Nugraha, A. D., & Sule, M. R. (2012). Analisis Kegempaan Sesar Sumatera pada Area Segmen Sunda Menggunakan Hasil Relokasi Gempa Metoda Double-Difference. *Prosiding*

*PIT HAGI Palembang*.

- Rusydi, H. M. (1998). *Studi Kegempaan di Daerah Sulawesi*. Universitas Gadjah Mada.
- Siahaan, E. E., Soemarinda, S., Fauzi, A., Silitonga, T., Azimudin, T., & Raharjo, I. B. (2005). Tectonism and volcanism study in the Minahasa compartment of the north arm of Sulawesi related to Lahendong geothermal field, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*, 24–29.
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., Ambrosius, B., & Spakman, W. (2006). Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research*, 111(B8), B08409. <https://doi.org/10.1029/2005JB003963>
- Sunardi, B., Rohadi, S., Masturyono, M., Widiyantoro, S., Sulastri, S., Susilanto, P., & Setyonegoro, W. (2012). Relokasi Hiposenter Gempabumi Wilayah Jawa Menggunakan Teknik Double Difference. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 13(3).
- Waldhause, F. (2001). *A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations*.
- Waldhauser, F., & 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*, 90(6), 1353–1368.
- Zhang, H. (2003). Double-Difference Tomography: The Method and Its Application to the Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5), 1875–1889. <https://doi.org/10.1785/0120020190>