

Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Susulan Bawean Menggunakan Metode Double Difference

The Relocation of Bawean Earthquake Aftershock Using Double Difference Method

Riska Yulinda^{1*}, Lulu' C. Nisa¹, Ilham^{1,2}, Joshua Purba³

¹Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Geofisika Malang, Jln. Bend. Lahor No. 40, Kabupaten Malang, 65165

²Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Kota Malang, 65145

³Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Geofisika Gowa, Jln. Poros Malino, Sungguminasa, Kabupaten Gowa, 92112

Article history:

Received: 18 December 2024

Accepted: 21 July 2025

Keywords:

Earthquake; Bawean;

Relocation; HypoDD;

Correspondent author:

riska.yulinda@bmkg.go.id

Abstrak. Gempa bumi yang terjadi pada tanggal 22 Maret 2024 di sekitar Pulau Bawean memicu serangkaian gempa susulan. Penelitian ini bertujuan untuk relokasi gempa susulan yang terjadi di sekitar Pulau Bawean dengan menggunakan metode *Double Difference* untuk meningkatkan akurasi penentuan hiposenter. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah katalog gempa bumi dari Stasiun Geofisika Malang, dengan total 878 kejadian yang dianalisis selama periode 22 Maret 2024 hingga 12 Juni 2024. Hasil relokasi menunjukkan adanya pergeseran lokasi hiposenter yang cenderung berkelompok di area barat laut Pulau Bawean. Secara visual, hiposenter yang direlokasi membentuk dua kluster yang jelas dengan orientasi barat-timur dan timur laut-barat daya. Nilai residual dari hiposenter yang direlokasi menunjukkan penurunan yang signifikan, mendekati nol. Perubahan signifikan diamati pada gempa bumi yang awalnya tercatat pada kedalaman 10 km, yang setelah relokasi menunjukkan variasi kedalaman yang berbeda-beda. Temuan ini menegaskan efektivitas metode *Double Difference* dalam memberikan penilaian bahaya seismik yang lebih akurat untuk wilayah tersebut.

Abstract. The earthquake that occurred on March 22, 2024, around Bawean Island triggered a series of aftershocks. This study aims to relocate the aftershocks that occurred around Bawean Island using the *Double Difference* method to improve the accuracy of hypocenter determination. The data used for this research comprises the earthquake

catalog from the Malang Geophysical Station, with a total of 878 events analyzed over the period from March 22, 2024, to June 12, 2024. The relocation results reveal a shift in hypocenter locations, which tend to cluster in the northwest area of Bawean Island. Visually, the relocated hypocenters form two distinct clusters oriented in the west-east and northeast-southwest directions. The residual values of the relocated hypocenters indicate a significant reduction, approaching zero. A notable change was observed in earthquakes initially recorded at a depth of 10 km, which, after relocation, exhibited varying depths. These findings underscore the efficacy of the Double Difference method in providing more precise seismic hazard assessments for the region.

© 2025 JRGI (Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia)

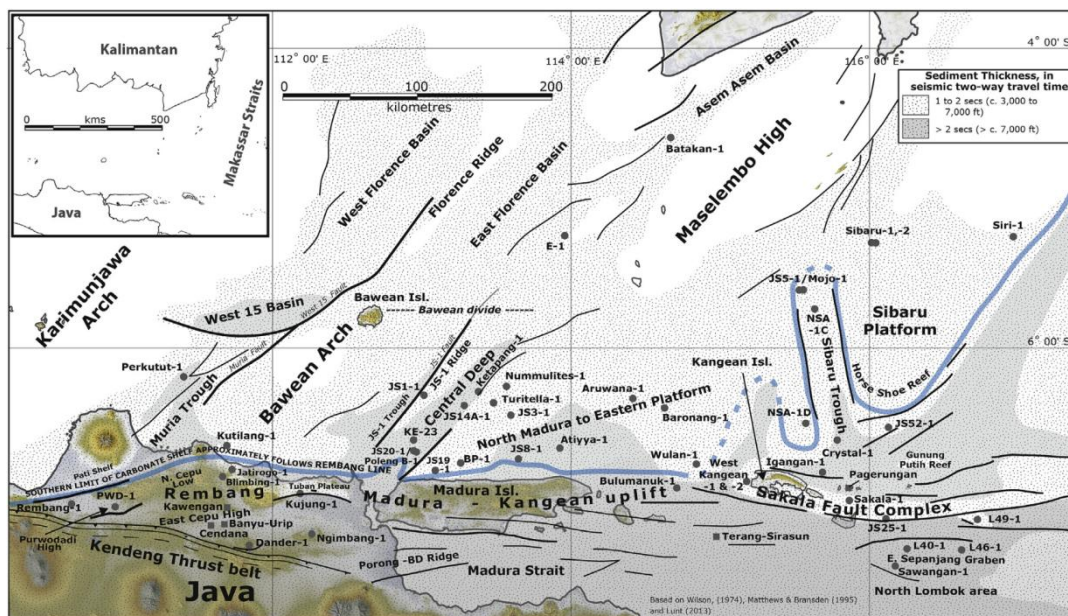
1. PENDAHULUAN

Struktur tektonik di wilayah perairan utara Jawa Timur sangat kompleks, yang secara signifikan mempengaruhi aktivitas seismik di daerah tersebut. Daerah ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, terbentuk karena interaksi antara mikro-kontinen Argo dan bagian tenggara Busur Sunda. Seiring waktu, interaksi ini membentuk zona sutura yang memanjang dari Muria di Jawa hingga Meratus di Kalimantan (Lunt, 2019; Rosana & Prasita, 2018). Pengaturan geologis ini menempatkan Pulau Bawean tepat di dalam zona sutura tersebut, menjadikannya pusat perhatian untuk studi seismik. Kompleksitas dan seringnya kejadian seismik di wilayah ini membutuhkan investigasi yang lebih rinci untuk meningkatkan pemahaman tentang dinamika gempa bumi dan potensi bahaya di daerah tersebut (Irsyam et al., 2020; Novianto et al., 2020).

Pada tanggal 22 Maret 2024, terjadi gempa bumi signifikan di sekitar Pulau Bawean dengan magnitudo 6,5 M yang menyebabkan

kerusakan pada 4.300 bangunan (Kompas.com, 2024). Gempa utama ini diikuti oleh serangkaian gempa susulan yang dianalisis oleh Stasiun Geofisika Malang, dengan total 878 kejadian dalam rentang waktu dari 22 Maret 2024 hingga 12 Juni 2024. Mengingat pentingnya relokasi hiposenter gempa susulan untuk pemetaan kerawanan gempa bumi (Purba et al., 2024), penelitian ini bertujuan untuk melakukan relokasi menggunakan metode *Double Difference* (Bai et al., 2016; Supendi et al., 2017; Ramdhan et al., 2023). Metode ini telah terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi lokasi sumber gempa, seperti yang telah diterapkan pada gempa bumi di Pulau Jawa dengan data katalog gempa dari tahun 2009 hingga 2010 (Sunardi et al., 2012).

Masalah utama dalam penelitian ini adalah menentukan lokasi yang lebih akurat dari hiposenter gempa susulan di sekitar Pulau Bawean. Solusi umum yang diterapkan adalah menggunakan metode *Double Difference* untuk relokasi hiposenter gempa susulan. Metode ini



Gambar 1. Struktur tektonik Jawa Timur Bagian Utara.

dapat meminimalkan perbedaan waktu tempuh antara dua gempa yang diamati pada satu sensor, sehingga mengurangi simpangan spasial dalam penentuan lokasi sumber gempa (Feng et al., 2015; Enescu et al., 2005; Aoki et al., 2005).

Metode *Double Difference* yang digunakan dalam penelitian ini dirancang berdasarkan teori bahwa jika jarak antara dua gempa bumi lebih kecil dibandingkan dengan jarak gempa dengan sensor pencatat, maka lintasan gelombang antara sumber gempa dan stasiun adalah sama (Yamanaka et al., 2014; Zhu & Miao, 2015). Dengan demikian, metode ini bertujuan untuk menentukan lokasi sumber gempa yang lebih akurat dengan meminimalkan perbedaan waktu tempuh antara dua gempa yang diamati pada satu sensor. Studi oleh Waldhauser & Schaff (Waldhauser & Schaff, 2007) menunjukkan bahwa metode *Double Difference* dapat secara signifikan meningkatkan resolusi spasial dari

distribusi hiposenter, terutama dalam daerah dengan jaringan seismik yang baik.

Penelitian sebelumnya oleh Lanza et al. (Lanza et al., 2019) menggunakan metode ini untuk relokasi hiposenter gempa di wilayah lain, yang menunjukkan peningkatan kualitas hiposenter gempa yang signifikan. Hasil relokasi menunjukkan adanya perubahan distribusi hiposenter yang lebih terfokus, dengan nilai residual yang lebih rendah setelah relokasi. Studi ini menyoroti efektivitas metode *Double Difference* dalam meningkatkan akurasi lokasi gempa, yang sangat relevan untuk aplikasi di wilayah Bawean yang kompleks secara tektonik (Woessner et al., 2006; Bulut et al., 2007).

Beberapa studi telah dilakukan untuk memahami dinamika seismik di wilayah Bawean. Misalnya, Hutchings & Mooney (Hutchings & Mooney, 2021) meneliti asal usul cekungan Laut Jawa Timur dan menunjukkan bahwa sejarah tektoniknya sangat dipengaruhi oleh interaksi mikro-kontinen yang

membentuk zona sutura. Selain itu, penelitian oleh Primananda (Primananda & Muhajir, 2023) mengusulkan model struktural baru untuk cekungan Kendeng yang relevan untuk eksplorasi minyak dan gas, menunjukkan pentingnya memahami struktur tektonik lokal untuk mitigasi risiko seismik dan eksplorasi sumber daya alam. Namun, meskipun ada penelitian sebelumnya yang menggunakan metode *Double Difference* untuk relokasi hiposenter di wilayah lain, masih terdapat kesenjangan dalam penerapan metode ini di wilayah Bawean yang memiliki karakteristik tektonik unik. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan menerapkan metode *Double Difference* untuk relokasi hiposenter gempa susulan di wilayah Bawean, yang diharapkan dapat memberikan wawasan baru tentang distribusi seismik di wilayah ini dan meningkatkan pemahaman tentang potensi bahaya seismik (Enescu et al., 2005; Békési et al., 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan relokasi hiposenter gempa susulan di sekitar Pulau Bawean menggunakan metode *Double Difference*, dengan tujuan meningkatkan akurasi penentuan lokasi sumber gempa. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penerapan metode *Double Difference* di wilayah Bawean yang memiliki kompleksitas tektonik unik, yang belum banyak diteliti sebelumnya. Ruang lingkup penelitian mencakup analisis data gempa dari Stasiun Geofisika Malang untuk periode 22 Maret 2024 hingga 12 Juni 2024, dengan fokus pada peningkatan kualitas hiposenter gempa melalui metode relokasi yang tepat. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam

pemahaman dinamika seismik dan mitigasi risiko gempa bumi di wilayah Bawean.

2. DATA DAN METODE

2.1. Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data waktu tiba gelombang gempa bumi utama, awalan, dan susulan yang dianalisis oleh Pegawai Operasional Stasiun Geofisika Malang. Data yang digunakan mencakup 878 kejadian gempa bumi yang terjadi di sekitar Pulau Bawean dari tanggal 22 Maret 2024 hingga 12 Juni 2024, dalam rentang wilayah 5.4 – 6.4 LS dan 112 – 112.8 BT. Data ini telah melalui proses kontrol kualitas untuk menambah jumlah fase dan mengurangi azimuth gap, yang penting untuk meningkatkan akurasi dalam relokasi hiposenter gempa (Ramdhan et al., 2023).

2.2. Model Kecepatan

Model kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah model kecepatan lokal di Jawa. Model kecepatan ini diperoleh melalui perhitungan green function Program GEMINI yang telah dilakukan oleh Santosa B. J. (Santosa, 2008). Berikut model kecepatan yang digunakan pada penelitian kali ini, yang tertera pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Model kecepatan Pulau Jawa

Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs(km/s)
0.0	2.31	1.30
1.0	4.27	2.40
2.0	5.52	3.10
5.0	6.23	3.50

Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs(km/s)
16.0	6.41	3.60
33.0	6.70	4.70
40.0	8.00	4.76
100.0	8.00	4.57
225.0	8.40	4.80
325.0	8.60	4.91
425.0	9.30	5.31

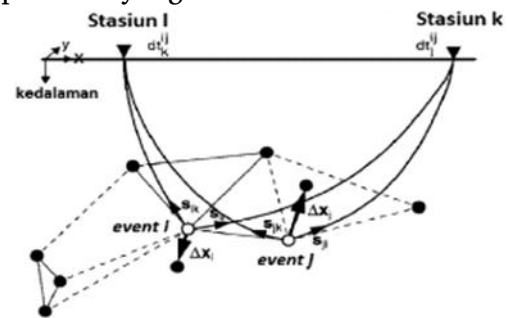
2.3. Metode Double Difference

Jika jarak antara dua gempa bumi lebih kecil dibandingkan dengan jarak gempa bumi dengan sensor pencatat gempa, maka lintasan gelombang antara area sumber gempa dan stasiun adalah sama (Got et al., 1994), seperti yang ditampilkan pada **Gambar 2**. Dengan berlandaskan teori ini, metode DD dirancang yang bertujuan untuk menentukan lokasi sumber gempa bumi yang lebih akurat dengan meminimalisir perbedaan waktu tiba antara dua gempa bumi yang teramati pada satu sensor yang menyebabkan simpangan spasial dalam penentuan lokasi sumber gempa tersebut (Feng et al., 2015; Waldhauser & Schaff, 2007; Waldhauser, 2001). Secara umum, Metode DD menggunakan kalkulasi pada persamaan (1) (Feng et al., 2015; Waldhauser & Schaff, 2007; Waldhauser, 2001).

$$d_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (1)$$

Notasi t_k^i adalah waktu tempuh antara gempa i dengan stasiun k , dan t_k^j adalah waktu tempuh antara gempa j dengan stasiun k . Hasil dari perbedaan waktu tempuh ini

dioptimalkan untuk menghasilkan lokasi hiposenter yang lebih akurat.



Gambar 2. Ilustrasi dari metode DD (Feng et al., 2015; Waldhauser & Schaff, 2001)

HypoDD menggunakan algoritma perbedaan ganda (double-difference) yang memanfaatkan waktu kedatangan gelombang seismik untuk menentukan vektor penghubung antar hiposenter (Waldhauser & Schaff, 2007). Untuk penelitian ini, relokasi hiposenter dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data waktu tiba gelombang P dan S dari katalog gempa bumi.
2. Menghitung perbedaan waktu tiba antar gempa bumi untuk semua pasangan gempa yang diamati pada stasiun yang sama.
3. Menggunakan algoritma perbedaan ganda untuk meminimalkan perbedaan waktu tiba yang diamati dan dihitung.
4. Melakukan iterasi proses ini untuk mendapatkan lokasi hiposenter yang lebih akurat (Katsumata et al., 2019).

2.4. Validasi dan Verifikasi

Keberhasilan Metode *Double Difference* dalam relokasi hiposenter gempa bumi diukur melalui analisis nilai residual sebelum dan

sesudah relokasi. Nilai residual yang lebih rendah setelah relokasi menunjukkan peningkatan akurasi lokasi hiposenter (Daniarsyad et al., 2023). Selain itu, distribusi hiposenter setelah relokasi diharapkan membentuk pola yang lebih terfokus, yang mencerminkan karakteristik struktur geologi di wilayah studi (Ramdhan et al., 2023).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

3.1.1. Persebaran Hiposenter Gempa Bumi Sebelum dan Sesudah Relokasi

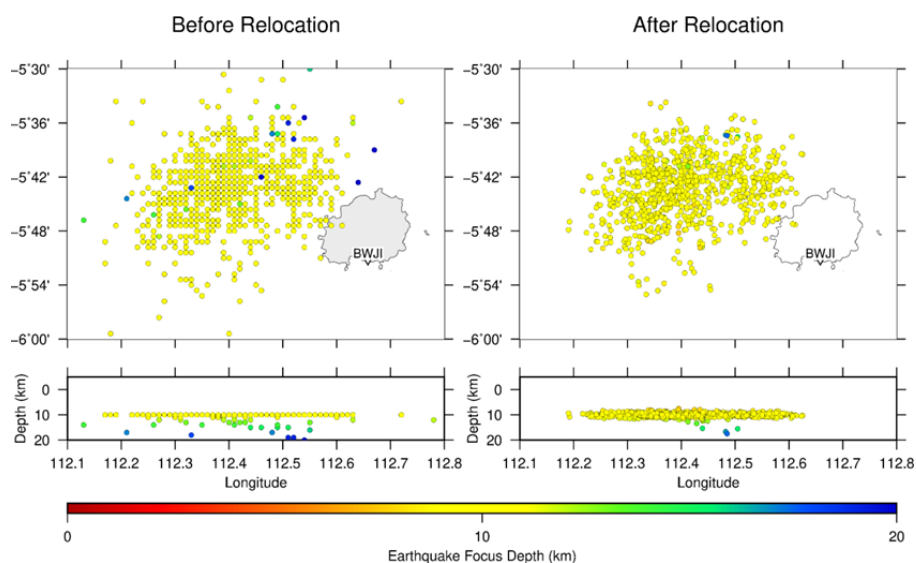
Dalam proses relokasi dengan metode *Double Difference* menghasilkan sebanyak 878 kejadian gempa bumi. Jumlah kejadian gempabumi sebelum dan sesudah relokasi yang sama menunjukkan bahwa semua kejadian gempa bumi yang digunakan sebagai data awal relokasi dapat terelokasi semua.

Hasil persebaran hiposenter gempa bumi sebelum dan sesudah dilakukan relokasi ditunjukkan pada **Gambar 3**. Persebaran hiposenter sebelum dilakukan relokasi menunjukkan adanya keteraturan seperti pola

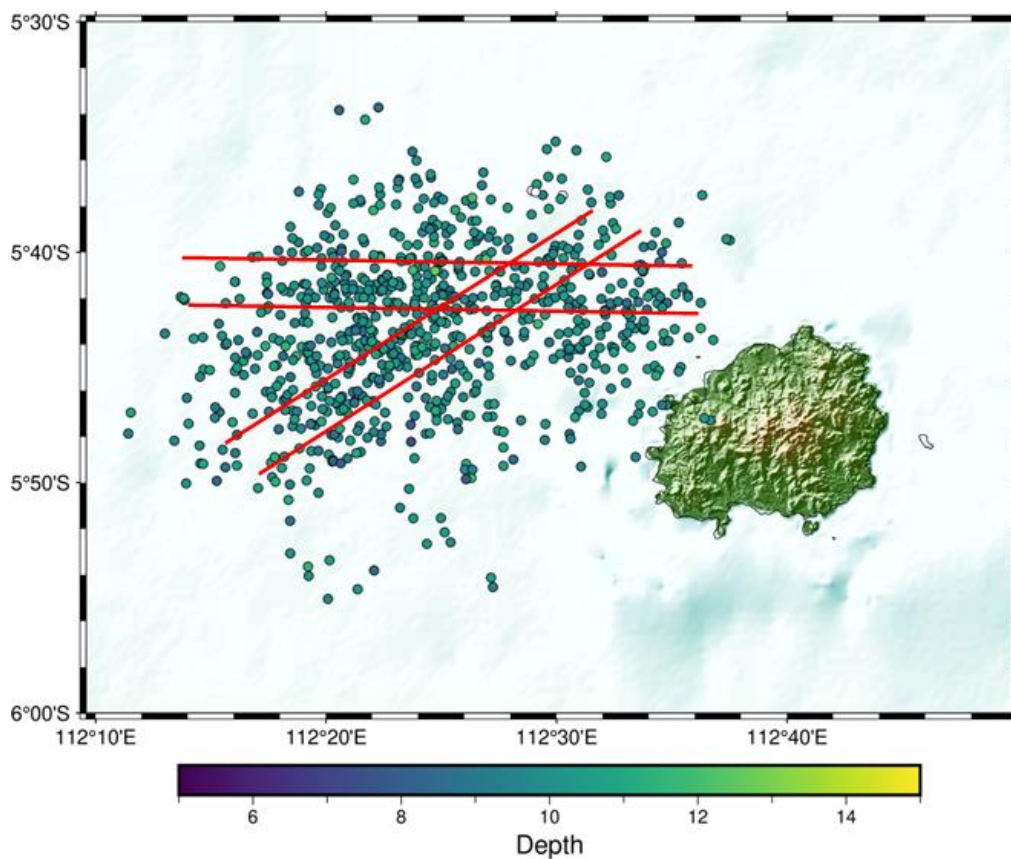
yang berada di sebelah barat laut Pulau Bawean. Hal tersebut terjadi dikarenakan komputasi perhitungan hiposenter pada Seiscomp4 menggunakan metode grid search.

Persebaran hiposenter setelah relokasi menunjukkan adanya perubahan lintang, bujur, dan kedalaman. Pada **Gambar 3**, bagian sebelum relokasi terlihat kedalaman awal terbanyak terjadi pada kedalaman 10 km dan beberapa kejadian gempa bumi memiliki variasi kedalaman hingga 20 km. Setelah dilakukan relokasi kedalaman gempa bumi berubah dengan kedalaman bervariasi pada rentang 8 km hingga 18 km.

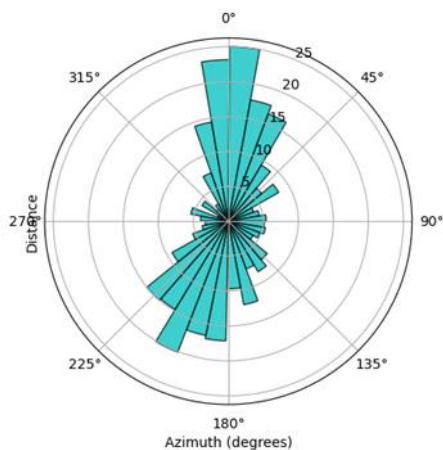
Pada gambar 4 hasil relokasi menunjukkan perubahan episenter yang signifikan. Pada **Gambar 4** terdapat 2 klaster yang ditunjukkan dengan 2 garis merah sebagai pembatas untuk masing-masing klaster. Klaster pertama membentang sepanjang ± 20 km yang berorientasi barat-timur di sebelah barat laut Pulau Bawean. Klaster kedua membentang sepanjang ± 23 km yang berorientasi barat daya-tenggara di sebelah barat laut Pulau Bawean.



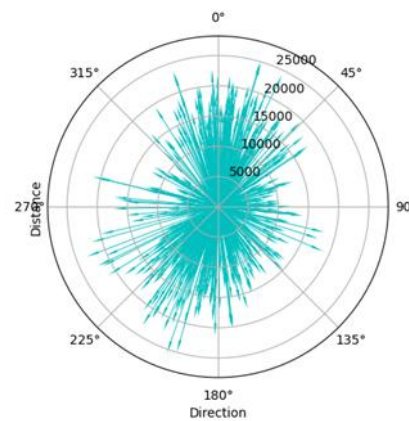
Gambar 3. Lokasi hiposenter sebelum dan sesudah relokasi



Gambar 4. Hasil relokasi hiposenter cenderung membentuk dua kluster yang masing-masing dibatasi oleh dua garis merah



Gambar 5. Diagram rose hasil relokasi hiposenter



Gambar 6. Diagram kompas hasil relokasi hiposenter

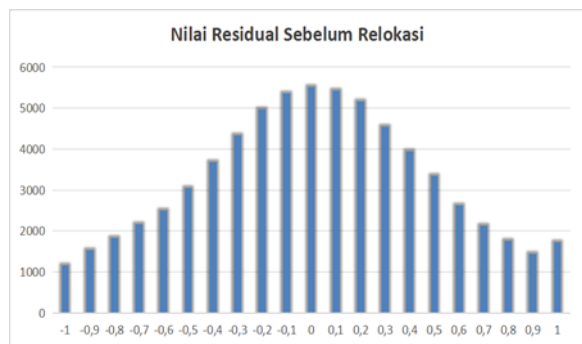
Pada **Gambar 5** dan **6**, terdapat diagram rose dan kompas. Kedua Gambar tersebut menunjukkan arah pergeseran hiposenter gempa bumi setelah direlokasi. Pada kedua

gambar tersebut, dapat dilihat pergeseran episenter lebih dominan bergeser ke arah utara. Hasil relokasi menunjukkan adanya 22 kejadian gempa bumi yang mengalami

pergeseran episenter dengan rentang jarak 20-25 km. Pergeseran terjauh dari hasil relokasi adalah 25 km.

3.1.2 Nilai Residual

Pada **Gambar 7** dan **Gambar 8** menunjukkan histogram sebelum dan sesudah relokasi. Nilai residual sebelum relokasi menyebar pada rentang nilai - 0.1 hingga 0.1. Histogram sesudah relokasi menunjukkan perubahan rentang nilai residual. Rentang nilai residual setelah relokasi yaitu -0.01 hingga 0.01, dengan jumlah nilai residu terbanyak mendekati nilai 0. Hal tersebut menunjukkan bahwa relokasi hiposenter gempa bumi susulan di wilayah Bawean menggunakan metode *Double Difference* menghasilkan nilai residual yang lebih baik.



Gambar 7. Nilai residual waktu tiba gempa bumi sebelum direlokasi



Gambar 8. Nilai residual waktu tiba gempa bumi setelah direlokasi

3.2. Pembahasan

Penelitian ini berhasil merelokasi hiposenter gempa bumi susulan di wilayah Pulau Bawean menggunakan metode *Double Difference*. Temuan utama menunjukkan bahwa distribusi hiposenter setelah relokasi membentuk dua klaster utama dengan orientasi barat-timur dan timur laut-barat daya. Hal ini mengindikasikan adanya struktur geologi yang kompleks di wilayah barat laut Pulau Bawean. Pergeseran episenter yang lebih dominan ke arah utara juga menunjukkan adanya aktivitas tektonik yang signifikan di wilayah tersebut.

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi-studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa metode *Double Difference* dapat meningkatkan akurasi lokasi hiposenter dan mengidentifikasi struktur geologi dengan lebih baik (Supendi et al., 2017; Feng et al., 2015; Enescu et al., 2005). Studi oleh Waldhauser & Schaff (Waldhauser & Schaff, 2007) serta Katsumata et al (Katsumata et al., 2019) menegaskan bahwa metode ini efektif dalam mengurangi nilai residual dan meningkatkan resolusi spasial distribusi hiposenter, yang juga terbukti dalam penelitian ini dengan penurunan signifikan nilai residual setelah relokasi.

Salah satu kelebihan utama penelitian ini adalah penggunaan metode *Double Difference* yang terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi penentuan lokasi hiposenter. Dengan analisis data gempa yang mendalam, penelitian ini berhasil mengidentifikasi dua klaster utama hiposenter yang mencerminkan

struktur geologi wilayah Bawean. Namun, terdapat beberapa kekurangan dalam penelitian ini, seperti keterbatasan data seismik dari jumlah stasiun pengamatan yang digunakan. Untuk peningkatan lebih lanjut, integrasi data dari lebih banyak stasiun seismik dan penggunaan model kecepatan yang lebih detail dapat memberikan hasil yang lebih komprehensif.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting baik secara ilmiah maupun praktis. Secara ilmiah, peningkatan akurasi lokasi hiposenter memberikan wawasan lebih mendalam tentang distribusi seismik dan dinamika tektonik di wilayah Bawean. Penelitian ini juga menambah bukti bahwa metode *Double Difference* adalah alat yang sangat efektif untuk studi seismik, khususnya dalam kondisi geologi yang kompleks (Lanza et al., 2019; Woessner et al., 2006; Bulut et al., 2007).

Secara praktis, hasil penelitian ini relevan untuk mitigasi bencana di wilayah Bawean. Informasi yang lebih akurat tentang lokasi hiposenter dapat digunakan untuk pemetaan kerawanan gempa bumi yang lebih baik, membantu pemerintah dan pihak terkait dalam merencanakan langkah-langkah mitigasi yang lebih efektif. Hasil ini juga penting untuk perencanaan dan pembangunan infrastruktur yang tahan gempa di daerah yang rawan seismik (Purba et al., 2024; Urata et al., 2016; Isken et al., 2017).

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk menggunakan model kecepatan yang lebih detail dan spesifik untuk wilayah Bawean guna meningkatkan akurasi hasil relokasi lebih lanjut. Integrasi data dari lebih banyak stasiun

seismik juga diperlukan untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif tentang mekanisme sumber gempa bumi dan distribusi tegangan di wilayah ini. Selain itu, penggunaan teknik analisis yang lebih canggih seperti 3-D dynamic rupture simulations dapat memberikan wawasan tambahan tentang dinamika seismik di wilayah Bawean (Urata et al., 2016; Isken et al., 2017).

Analisis temporal dari distribusi hiposenter setelah relokasi juga dapat dilakukan untuk mengidentifikasi pola migrasi gempa bumi susulan dan hubungannya dengan aktivitas tektonik regional. Studi lanjut mengenai sifat seismik dan dimensi fraktal dari zona subduksi di wilayah ini juga dapat memberikan wawasan tambahan yang penting untuk mitigasi risiko seismik (Munafi, 2021).

Penelitian ini telah berhasil menunjukkan bahwa metode *Double Difference* efektif dalam meningkatkan akurasi lokasi hiposenter gempa bumi susulan di wilayah Pulau Bawean.

Temuan ini penting untuk pemahaman yang lebih baik tentang dinamika seismik di wilayah yang kompleks secara tektonik dan untuk pengembangan strategi mitigasi bencana yang lebih efektif. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam bidang seismologi dan membuka peluang untuk studi lanjut yang lebih mendalam mengenai mekanisme sumber gempa bumi dan distribusi tegangan di wilayah Bawean dan sekitarnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan relokasi hiposenter gempa bumi susulan di wilayah Pulau Bawean menggunakan metode

Double Difference. Dari 878 kejadian gempa bumi yang dianalisis, hasil relokasi menunjukkan adanya pergeseran hiposenter yang cenderung berkelompok di area sebelah barat laut Pulau Bawean. Distribusi hiposenter setelah relokasi membentuk dua klaster utama, yaitu klaster dengan orientasi barat-timur dan timur laut-barat daya. Hasil ini mengindikasikan adanya struktur geologi yang kompleks di wilayah tersebut.

Secara ilmiah, penelitian ini menambah pemahaman tentang dinamika seismik di wilayah Bawean. Peningkatan akurasi lokasi hiposenter melalui metode *Double Difference* memberikan wawasan lebih mendalam tentang distribusi seismik dan orientasi bidang patahan. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa metode *Double Difference* adalah alat yang sangat efektif untuk meningkatkan resolusi spasial data hiposenter, yang telah terbukti efektif dalam berbagai penelitian seismik sebelumnya.

Secara praktis, hasil penelitian ini sangat relevan untuk mitigasi bencana di wilayah Bawean. Informasi yang lebih akurat tentang lokasi hiposenter dapat digunakan untuk pemetaan kerawanan gempa bumi yang lebih baik, membantu pemerintah dan pihak terkait dalam merencanakan langkah-langkah mitigasi yang lebih efektif. Selain itu, hasil ini juga penting untuk perencanaan dan pembangunan infrastruktur yang tahan gempa di daerah yang rawan seismik.

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam bidang seismologi dengan menerapkan metode *Double Difference* pada wilayah yang memiliki kompleksitas tektonik tinggi. Hasil penelitian ini mendukung temuan

sebelumnya yang menunjukkan bahwa metode ini dapat meningkatkan akurasi lokasi hiposenter dan mengidentifikasi struktur geologi dengan lebih baik. Penelitian ini juga membuka peluang untuk studi lanjut mengenai dinamika seismik di wilayah lain dengan karakteristik geologi yang serupa.

Meskipun penelitian ini telah berhasil mencapai tujuannya, terdapat beberapa aspek yang dapat ditingkatkan dalam penelitian selanjutnya. Salah satunya adalah penggunaan model kecepatan yang lebih detail dan spesifik untuk wilayah Bawean, yang dapat meningkatkan akurasi hasil relokasi lebih lanjut. Selain itu, integrasi data dari lebih banyak stasiun seismik dan penggunaan teknik analisis yang lebih canggih seperti simulasi ruptur dinamis 3-D dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang mekanisme sumber gempa bumi dan distribusi tegangan di wilayah ini.

Penelitian selanjutnya juga dapat fokus pada analisis temporal dari distribusi hiposenter setelah relokasi untuk mengidentifikasi pola migrasi gempa bumi susulan dan hubungannya dengan aktivitas tektonik regional. Studi lebih lanjut mengenai sifat seismik dan dimensi fraktal dari zona subduksi di wilayah ini juga dapat memberikan wawasan tambahan yang penting untuk mitigasi risiko seismik.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil menunjukkan efektivitas metode *Double Difference* dalam relokasi hiposenter gempa bumi susulan di wilayah Pulau Bawean. Temuan ini penting untuk pemahaman yang lebih baik tentang dinamika seismik di wilayah yang kompleks secara tektonik dan untuk

pengembangan strategi mitigasi bencana yang lebih efektif. Penelitian ini juga memberikan kontribusi signifikan dalam bidang seismologi dan membuka peluang untuk studi lanjut yang lebih mendalam mengenai mekanisme sumber gempa bumi dan distribusi tegangan di wilayah Bawean.

DAFTAR PUSTAKA

- Aoki, S., Nishi, M., Nakamura, K., Hashimoto, T., Yoshikawa, S., & Ito, H. (2005). Multi-planar structures in the aftershock distribution of the mid niigata prefecture earthquake in 2004. *Earth, Planets and Space*, 57(5), 411-416. <https://doi.org/10.1186/bf03351826>
- Bai, L., Liu, H., Ritsema, J., Mori, J., Zhang, T., Ishikawa, Y., ... & Li, G. (2016). Faulting structure above the main himalayan thrust as shown by relocated aftershocks of the 2015 mw7.8 gorkha, nepal, earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43(2), 637-642. <https://doi.org/10.1002/2015gl066473>
- Békési, E., Süle, B., Lenkey, L., Lenkey-Bőgér, Á., & Bondár, I. (2017). Double-difference relocation of the 29 january 2011 ml 4.5 orozslány earthquake and its aftershocks and its relevance to the rheology of the lithosphere and geothermal prospectivity. *Acta Geodaetica Et Geophysica*, 52(2), 229-242. <https://doi.org/10.1007/s40328-017-0195-7>
- Bulut, F., Bohnhoff, M., Aktar, M., & Dresen, G. (2007). Characterization of aftershock-fault plane orientations of the 1999 izmit (turkey) earthquake using high-resolution aftershock locations. *Geophysical Research Letters*, 34(20). <https://doi.org/10.1029/2007gl031154>
- Daniarsyad, G., Priyobudi, P., Cahyaningrum, A. P., Wibisono, D. G., Sriyanto, S. P. D., Rosid, A., Pranata, B., Gunawan, I., Fatchurochman, I., & Daryono, D. (2023). Analysis on the Causative Fault of the 2021 Mw 6.0 Tehoru Earthquake in the South Coast of Seram Island: A Preliminary Result. *E3S Web of Conferences*, 447. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344701020>
- Enescu, B., Mori, J., & Ohmi, S. (2005). Double-difference relocations of the 2004 off the kii peninsula earthquakes. *Earth, Planets and Space*, 57(4), 357-362. <https://doi.org/10.1186/bf03352576>
- Feng, L., Xu, W., Ruan, X., Zhao, M., & Yi, G. (2015). A more accurate relocation of the 2013 m s7.0 lushan, sichuan, china, earthquake sequence, and the seismogenic structure analysis. *Journal of Seismology*, 19(3), 653-665. <https://doi.org/10.1007/s10950-015-9485-0>
- Got, J.L., J. Fréchet & F.W. Klein. (1994). Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea, J. *Geophys. R.* 99, 15375-15386.
- Hutchings, S. J. and Mooney, W. D. (2021). The seismicity of indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9). <https://doi.org/10.1029/2021gc009812>
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R., & Syahbana, A. J. (2020). Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl). <https://doi.org/10.1177/8755293020951206>
- Isken, M. and Mooney, W. D. (2017). Relocated hypocenters and structural analysis from waveform modeling of aftershocks from the 2011 prague, oklahoma, earthquake sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 553-562. <https://doi.org/10.1785/0120160150>
- Katsumata, K., Ichianagi, M., Ohzono, M., Aoyama, H., Tanaka, R., Takada, M., ... & Ueno, T. (2019). The 2018 hokkaido eastern iburi

- earthquake ($m_j = 6.7$) was triggered by a strike-slip faulting in a stepover segment: insights from the aftershock distribution and the focal mechanism solution of the main shock. *Earth, Planets and Space*, 71(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1032-8>
- Kompas.com. (2024). BMKG ungkap 12 fakta gempa Bawean berpusat di sesar tua pola Meratus. https://www.kompas.com/tren/read/2024/03/25/073000265/bmkg-ungkap-12-fakta-gempa-bawean-berpusat-di-sesar-tua-pola-meratus#google_vignette.
- Lanza, F., Chamberlain, C. J., Jacobs, K., Warren-Smith, E., Godfrey, H., Kortink, M., ... & Eberhart-Phillips, D. (2019). Crustal fault connectivity of the mw 7.8 2016 kaikōura earthquake constrained by aftershock relocations. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6487-6496. <https://doi.org/10.1029/2019gl082780>
- Lunt, P. (2019). The origin of the East Java Sea basins deduced from sequence stratigraphy, *Marine and Petroleum Geology*, 105, 17 –31.
- Muntafi, Y. (2021). Seismic properties and fractal dimension of subduction zone in java and its vicinity using data from 1906 to 2020. *International Journal of GEOMATE*, 21(85). <https://doi.org/10.21660/2021.85.j2217>
- Novianto, A., S., S., Prasetyadi, C., & Setiawan, T. (2020). Structural Model of Kendeng Basin: A New Concept of Oil and Gas Exploration. *Open Journal of Yangtze Oil and Gas*, 05(04). <https://doi.org/10.4236/ojogas.2020.54016>
- Primananda, D. L. A. and Muhajir, M. (2023). Modelling earthquake disaster damage due depth of epicenter and magnitude using spatial regression. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika Dan Terapan*, 17(3), 1221-1234. <https://doi.org/10.30598/barekengvol17iss3pp1221-1234>
- Purba, J., Harisma, H., Priadi, R., Amelia, R., Dwilyantari, A. A. I., Jaya, L. M. G., Restele, L. O., & Putra, I. M. W. G. (2024). Surface deformation and its implications for land degradation after the 2021 Flores earthquake (M7.4) using differential interferometry synthetic aperture radar. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(1), 6819–6831. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.121.6819>
- Purba, J., Restele, L. O., Hadini, L. O., Usman, I., Hasria, H., & Harisma, H. (2024). SPATIAL STUDY OF SEISMIC HAZARD USING CLASSICAL PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS (PSHA) METHOD IN THE KENDARI CITY AREA. *Indonesian Physical Review*, 7(3), 300–318. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i3.325>
- Ramadhan, M., Priyobudi, Mursitanyo, A., Palgunadi, K. H., Panjaitan, A. L., & Jatnika, J. (2023). Hypocenter relocation of the mw 5.9 eastern manggarai earthquake 2022 and its aftershocks based on bmkg seismic network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1227(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1227/1/012042>
- Rosana, N. and Prasita, V. D. (2018). Potential of fishing port development in the east java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 135, 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/135/1/012020>
- Santosa, B.J. (2008). Seismogram Analysis of the Earthquakes in Sumatra on WRAB Observation Station: S Wave Velocity Structure on Subduction Zone of Sumatra-Java, *ITB J. Sci.*, 40 (1), 71 – 87
- Sunardi, B., Rohadi, S., Masturyono, Widiyantoro, S., Sulastri, Susilanto, P., Hardy, T., & Setyonegoro W. (2012). Relokasi Hiposenter

Gempabumi Wilayah Jawa Menggunakan Teknik Double Difference, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13 (3), 179 – 188

Supendi, P., Nugraha, A. D., & Wijaya, T. (2017). Relocation and focal mechanism of aftershocks pidie jaya earthquake (mw6.5) dec 7th, 2016 using bmk network. *Jurnal Geofisika*, 15(3), 17. <https://doi.org/10.36435/jgf.v15i1.19>

Urata, Y., Yoshida, K., Fukuyama, E., & Kubo, H. (2017). 3-d dynamic rupture simulations of the 2016 kumamoto, japan, earthquake. *Earth, Planets and Space*, 69(1).<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0733-0>

Waldhauser, F. (2001). HypoDD: A Computer Program to compute *Double Difference* Earthquake location. U. S. Geol. Surv. Openfile report, 01-113, Menlo Park, California.

Waldhauser, F. and Schaff, D. P. (2007). Regional and teleseismic double-difference earthquake relocation using waveform cross-correlation and global bulletin data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B12). <https://doi.org/10.1029/2007jb004938>

Woessner, J., Schorlemmer, D., Wiemer, S., & M, P. R. (2006). Spatial correlation of aftershock locations and on-fault main shock properties. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B8). <https://doi.org/10.1029/2005jb003961>

Yamanaka, H., Hiramatsu, Y., & Katao, H. (2014). Spatial distribution of atypical aftershocks of the 1995 hyogo-ken nanbu earthquake. *Earth, Planets and Space*, 54(10), 933-945. <https://doi.org/10.1186/bf03352441>

Zhu, S. and Miao, M. (2015). How did the 2013 lushan earthquake (ms = 7.0) trigger its aftershocks? insights from static coulomb stress change calculations. *Pure and Applied Geophysics*, 172(10), 2481-2494. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1064-3>