

# ANALISIS SEISMISITAS DI YOGYAKARTA BERDASARKAN HASIL RELOKASI HIPOSENTER MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE-DIFFERENCE*

## *SEISMICITY ANALYSIS IN YOGYAKARTA BASED ON HYPOCENTER RELOCATION USING DOUBLE-DIFFERENCE METHOD*

Rahmawati Fitrianingtyas<sup>1\*</sup>, Muhamad Firdaus Al Hakim<sup>1</sup>, Adhi Wibowo<sup>2</sup>, dan Khafidh Nur Aziz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Lampung Utara, Indonesia

<sup>3</sup>Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

\*Email korespondensi: [rahmawati.fitrianingtyas@upnyk.ac.id](mailto:rahmawati.fitrianingtyas@upnyk.ac.id)

Submitted: 13 April 2023, Accepted: 27 April 2023

### Abstrak

Aktivitas subduksi di selatan Jawa mengakibatkan terbentuknya sesar-sesar di daerah Yogyakarta. Salah satu sesar aktif yang ada di daerah ini adalah Sesar Opak dengan orientasi Timur Laut - Barat Daya. Aktivitas Sesar Opak diyakini sebagai sumber yang menyebabkan Gempa Yogyakarta 2006, meskipun hingga saat ini masih terjadi perdebatan diantara para peneliti terkait hal tersebut. Penelitian ini mempejari kondisi seismotektonik di Yogyakarta berdasarkan hasil relokasi gempa menggunakan metode *double-difference*. Data yang digunakan adalah data katalog dari Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) periode April 2009 sampai April 2017. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa relokasi hiposenter menggunakan metode *double-difference* berhasil memperbaiki lokasi hiposenter dari data katalog BMKG yang masih dominan pada kedalaman *fix depth* serta menghasilkan distribusi episenter yang lebih terfokus. Hasil relokasi menunjukkan adanya kluster gempa di daerah Yogyakarta yang berlokasi 15-20 km di sisi timur Sesar Opak dan memanjang 45 km dengan orientasi N42.4°E yang mengindikasikan adanya sesar aktif lain di sisi timur Sesar Opak.

**Kata kunci:** gempa bumi, relokasi, sesar, Yogyakarta, *double-difference*

### Abstract

*Subduction activity in southern Java has caused fault formation in the Yogyakarta area. One of the active faults in this area is the Opak Fault, with a northeast - southwest trend. The activity of Opak Fault has been believed to be the source of the Yogyakarta Earthquake 2006. However, there is still debate among researchers regarding this matter. This paper aims to study the seismotectonics in Yogyakarta based on hypocenter relocation using the double-difference method. The data were obtained from the Meteorology and Geophysics Agency (BMKG) for the period April 2009 to April 2017. The results of this study indicated that the relocation of the hypocenter using the double-difference method succeeded in improving the location of the hypocenter from the BMKG catalog data, which was still dominant at a fixed depth and showed concentrated epicenters. The relocation shows that there is an earthquake cluster in the Yogyakarta area, which is 15-20 km on the east side of the Opak Fault and extends 45 km with an orientation of N42.4°E. This indicates the existence of another active fault on the east side of the Opak Fault.*

**Keywords:** earthquake, relocation, fault, Yogyakarta, *double-difference*

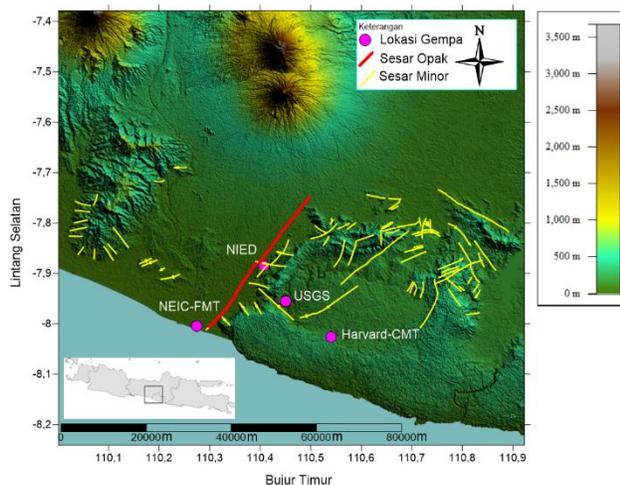
### Pendahuluan

Yogyakarta merupakan wilayah di Indonesia yang masih aktif mengalami deformasi akibat aktivitas subduksi lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Pergerakan lempeng tektonik tersebut menyebabkan

terjadinya patahan atau sesar pada batuan di bawah permukaan bumi. Salah satu sesar yang terbentuk dan telah dipetakan di Yogyakarta adalah Sesar Opak dengan orientasi Timur Laut - Barat Daya [1]. Observasi yang dilakukan oleh *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*

Japan (NIED) dan *National Earthquake Information Center* (NEIC) menyebutkan Sesar Opak merupakan penyebab utama yang mengontrol gempa Yogyakarta berskala 6,3  $M_w$  pada 27 Mei 2006 pukul 05.54 WIB [5, 7]. Gempa yang disebabkan oleh sesar pada umumnya menimbulkan resiko kerusakan yang tinggi karena letaknya yang dekat permukaan. Gempa ini mengakibatkan banyak korban jiwa dan kerugian ekonomi. Sebanyak kurang lebih 5.700 orang meninggal dunia, 37.000 orang terluka, 157.000 rumah hancur [2]. Pemerintah memperkirakan total kerugian yang disebabkan oleh gempa tersebut kurang lebih sebanyak Rp 29,1 triliun atau sebesar US\$ 3.1 milyar [2].

Kajian yang menyebutkan penyebab Gempa Yogyakarta 2006 bersumber dari Sesar Opak hingga saat ini masih menjadi perdebatan. Gambar 1 menunjukkan pemetaan hiposenter gempa dari berbagai lembaga seperti *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention Japan* (NIED), *National Earthquake Information Center* (NEIC), USGS dan Harvard-CMT [3, 4, 5, 6, 7]. Berbeda dengan NIED dan NIEC, USGS mengestimasi hiposenter yang menyebabkan Gempa 2006 berlokasi di sebelah timur Sesar Opak.



**Gambar 1.** Episenter Gempa Yogyakarta 2006 dari berbagai lembaga direpresentasikan oleh titik lingkaran ungu [3,4,5,6,7]. Garis merah merepresentasikan Sesar Opak [1].

Beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan juga menunjukkan bahwa distribusi *aftershock*

gempa tidak berada di Sesar Opak, melainkan bergeser sejauh 10-20 km ke arah timur sejajar dengan Sesar Opak dengan arah  $U50^{\circ}T$  [8, 9, 10, 13]. Hal ini yang kemudian memunculkan pemikiran bahwa penyebab Gempa Yogyakarta 2006 bukanlah Sesar Opak, melainkan sesar lain di sebelah timur Sesar Opak. Penelitian terbaru dari hasil tomografi seismik menunjukkan adanya struktur sesar geser dengan arah Barat Daya-Timur Laut dengan kemiringan ke arah timur yang berlokasi 10-15 km di sebelah timur Sesar Opak, sesar ini kemudian dihubungkan dengan zona sesar di Sungai Ngalang [10].

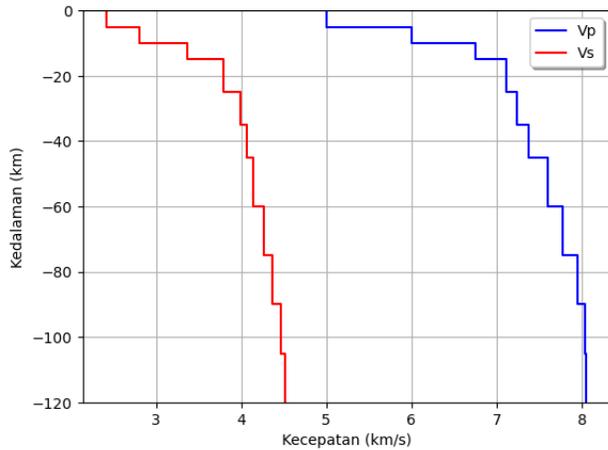
Penelitian ini mencoba melakukan kajian seismotektonik di Yogyakarta berdasarkan hasil relokasi hiposenter gembabumi dari data BMKG. Penelitian yang telah dilakukan berhasil menunjukkan bahwa relokasi hiposenter menggunakan metode *double-difference* menghasilkan pola seismisitas yang lebih rapat dan sesuai dengan kondisi geologinya dibandingkan dengan data katalog [11]. Hasil relokasi hiposenter yang lebih baik akan mempermudah dalam proses interpretasi dan berguna untuk studi lanjutan dalam upaya mitigasi bencana gempabumi di masa yang akan datang.

## Metode Penelitian

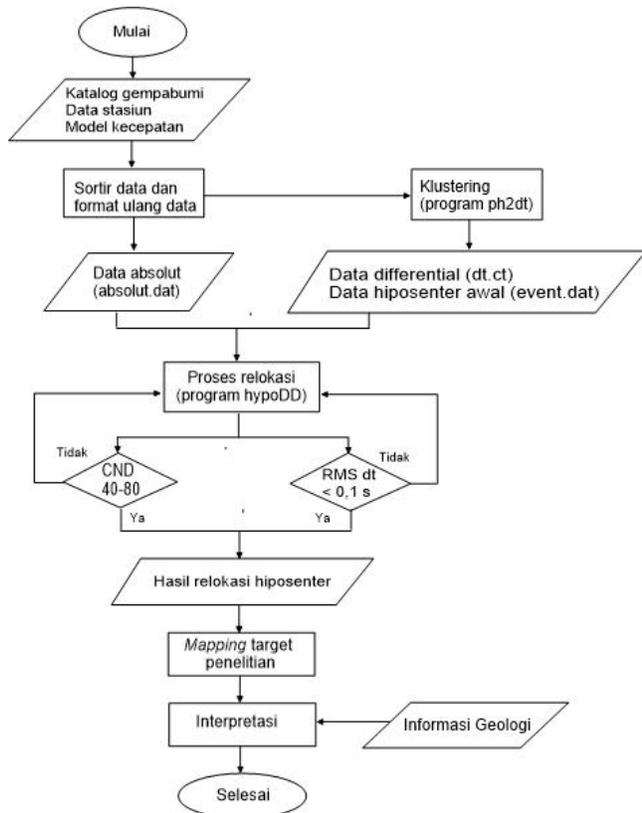
### Data

Penelitian ini menggunakan 28 jaringan stasiun Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) untuk merekam kejadian gempabumi pada periode April 2009 hingga Desember 2017. Fokus penelitian berada di wilayah Yogyakarta dan sekitarnya dengan rentang koordinat  $100^{\circ} - 111^{\circ} BT$  dan  $7.4^{\circ} - 8.3^{\circ} LS$ . Data yang diperoleh dari hasil *picking arrival time* selama periode tersebut sebanyak 3893 kejadian gempabumi. Model kecepatan awal untuk gelombang P menggunakan interpolasi dari model kecepatan ak135 [12]. Sedangkan model kecepatan gelombang S diperoleh dari rasio diagram wadati dengan perbandingan  $V_p$  dan  $V_s$  sebesar 1,78. Sehingga pada akhirnya diperoleh model kecepatan gelombang P dan

gelombang S di tiap kedalaman seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Model kecepatan yang digunakan dalam penelitian [12]



**Gambar 3.** Diagram alir penelitian

Penelitian ini secara garis besar terbagi menjadi dua tahap. Tahap pertama yaitu menentukan kejadian

gempabumi yang saling berkaitan menggunakan program *ph2dt*. Tahap kedua adalah melakukan proses relokasi hiposenter menggunakan program *hypoDD*. Diagram alir penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.

**Metode Double-difference**

Pemrosesan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan program *hypoDD*. *HypoDD* adalah program komputer berbasis Fortran yang digunakan untuk merelokasi hiposenter. Prinsip metode *double-difference* untuk menentukan kembali parameter lokasi hiposenter yaitu dengan memasang dua gempa yang direkam oleh satu stasiun yang sama, jika jarak antara dua gempa yang dipasangkan relatif kecil dibandingkan dengan jarak antara stasiun pengamat ke masing-masing gempa yang dipasangkan, maka *raypath* kedua gempa tersebut dapat dianggap sama [11]. Berdasarkan asumsi tersebut, maka selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terekam pada satu stasiun yang sama dapat dianggap hanya sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter, dengan begitu kesalahan model kecepatan dapat diminimalkan.

Waldhauser dan Ellsworth (2000) mendefinisikan waktu tiba untuk gempabumi *i* ke stasiun *k* dalam suatu persamaan

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \tag{1}$$

dengan  $\tau$  adalah waktu kejadian dari gempa *i*, *u* adalah medan *slowness*, dan *ds* adalah elemen panjang dari jejak penjalaran gelombang. Hubungan *non-linier* antara waktu tiba gelombang dan lokasi gempabumi pada persamaan (1) kemudian dilinearkan menggunakan deret Taylor yang kemudian menghasilkan hubungan yang linier antara waktu tempuh residual ( $dr_k^{ij}$ ) dengan perturbasi parameter model hiposenter ( $\Delta m^{ij}$ ) pada setiap pengamatan stasiun *k*:

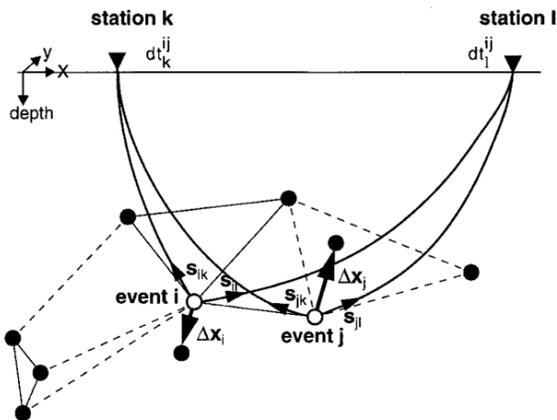
$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^{ij}}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^{ij} \tag{2}$$

dengan  $\Delta \mathbf{m}^{ij} = (\Delta dx^{ij}, \Delta dy^{ij}, \Delta dz^{ij}, \Delta d\tau^{ij})$  adalah perubahan relatif parameter hiposenter antara dua

event gempabumi  $i$  dan  $j$ ; dan  $\frac{\partial t_k^i}{\partial \mathbf{m}}$  adalah derivatif parsial waktu tiba terhadap parameter model;  $\mathbf{m}$  merupakan komponen medan slowness dari sumber ke penerima. Dengan mengasumsikan bahwa vektor *slowness* konstan untuk kedua *event* tersebut, maka pada persamaan (2) adalah residual waktu tempuh observasi dan kalkulasi dari waktu tempuh diantara dua gempabumi yang dinyatakan dalam persamaan:

$$dr_k^{ij} = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{cal} \quad (3)$$

dengan  $dr_k^{ij}$  adalah waktu tempuh residual antara pasangan gempa  $i$  dan  $j$  pada stasiun  $k$ ;  $i$  dan  $j$  masing-masing adalah koodinat hiposenter gempabumi yang saling berdekatan;  $k$  adalah stasiun yang merekam kedua kejadian gempabumi tersebut;  $T_k^i$  adalah waktu tempuh dari gempa  $i$  yang direkam oleh stasiun  $k$ ;  $T^{obs}$  adalah waktu tempuh observasi yang terekam oleh stasiun penerima; dan  $T^{cal}$  adalah waktu tempuh kalkulasi yang diperoleh berdasarkan pada model kecepatan. Ilustrasi relokasi hiposenter dengan metode *double-difference* ditunjukkan oleh Gambar 4.



**Gambar 4.** Ilustrasi relokasi menggunakan metode *double-difference* [7]

Persamaan umum yang berlaku untuk selisih waktu tempuh residual dua gempa  $i$  dan  $j$  pada persamaan 2 dalam bentuk yang lengkap adalah sebagai berikut:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y_i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z_i + \Delta \tau_i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x_j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y_j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z_j - \Delta \tau_j \quad (4)$$

persamaan (4) menunjukkan turunan parsial dari waktu tiba  $t$  di stasiun  $k$  untuk gempa bumi  $i$  dan  $j$  terhadap lokasi gempa  $(x, y, z)$  dan waktu kejadian gempa  $\tau$ , sedangkan  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau$  adalah perubahan parameter hiposenter yang diperlukan untuk membuat model agar sesuai dengan data.

Kombinasi persamaan (4) dari keseluruhan pasangan hiposenter untuk tiap stasiun dan kemudian digabungkan dengan semua stasiun membentuk sistem persamaan linier yang memenuhi persamaan matrik:

$$\mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{m} = \mathbf{W} \mathbf{d} \quad (5)$$

dengan  $\mathbf{W}$  adalah matrik diagonal untuk pembobotan di tiap persamaan;  $\mathbf{G}$  didefinisikan sebagai matrik berisi turunan parsial berukuran  $M \times 4N$  ( $M$  adalah jumlah observasi data *double-difference*;  $N$  adalah jumlah *event* gempabumi),  $\mathbf{d}$  adalah vektor data yang berisi persamaan *double-difference* pada persamaan (3); dan  $\mathbf{m}$  adalah vektor dengan ukuran  $4N [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau]^T$  yang terdiri dari perubahan parameter hiposenter hasil perhitungan. Pendekatan sederhana menggunakan pembobotan *least square* untuk mendapatkan solusi persamaan (5) yaitu,

$$\mathbf{m} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{d} \quad (6)$$

sehingga parameter hiposenter yang baru diperoleh melalui persamaan:

$$\begin{aligned} x_i &= x_o + \Delta x_i; y_i = y_o + \Delta y_i; \\ z_i &= z_o + \Delta z_i; t_i = t_o + \Delta t_i \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_j &= x_o + \Delta x_j; y_j = y_o + \Delta y_j; \\ z_j &= z_o + \Delta z_j; t_j = t_o + \Delta t_j. \end{aligned} \quad (8)$$

dengan  $x_o, y_o, z_o, t_o$  adalah model awal parameter hiposenter;  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i, \Delta t_i$  adalah perubahan parameter hiposenter; dan  $x_i, y_i, z_i, t_i$  adalah parameter hiposenter baru hasil relokasi untuk gempa  $i$ . Cara yang sama digunakan untuk menghitung parameter hiposenter baru hasil relokasi untuk gempa  $j$  yang dirumuskan oleh persamaan (8).

## Hasil dan Diskusi

### Proses Relokasi

Proses pengolahan data menghasilkan 3.880 *event* berhasil direlokasi dari sebanyak 3.893 *event*.

Gempabumi yang tidak berhasil direlokasi disebabkan karena pada saat proses inversi terdapat *event* yang kehilangan tautan akibat proses *re-weighting*. Proses perhitungan program saat relokasi dikontrol oleh faktor kualitas *Conditional Number of Damping* (CND) dan *Root Mean Square* (RMS).

**Tabel 1.** Nilai CND dan RMS tiap iterasi

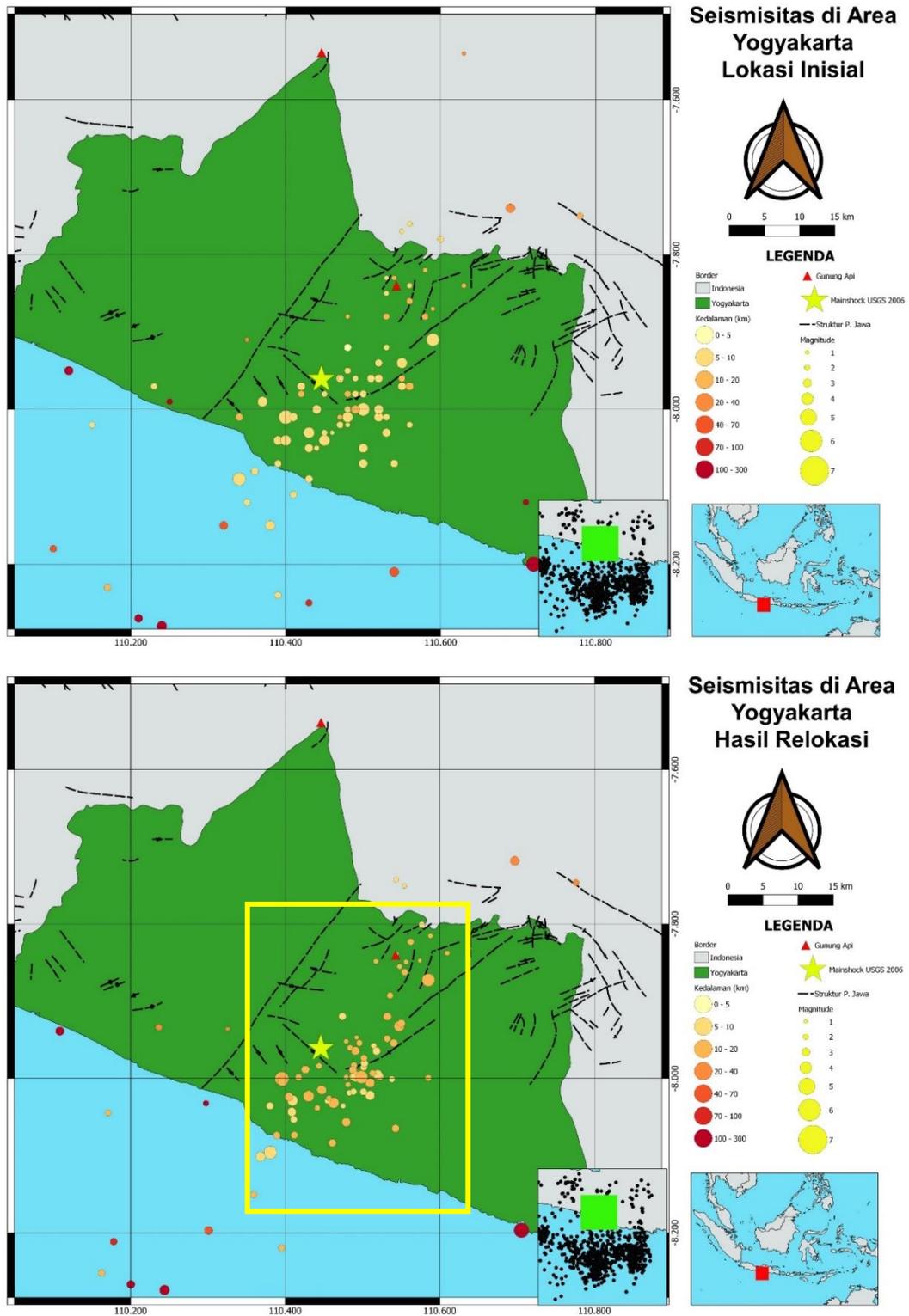
Iterasi	CND	RMS
1	78,90	0,61
2	74,60	0,51
3	79,20	0,43
4	73,20	0,33
5	76,10	0,36
6	71,10	0,25
7	74,00	0,12
8	68,20	0,07

Nilai CND pada setiap iterasi harus pada rentang 40-80. Nilai pada rentang tersebut menunjukkan bahwa kondisi kluster hasil relokasi sudah stabil. Nilai CND yang terlalu tinggi atau lebih besar dari 80 menunjukkan bahwa sistem tidak stabil yang dapat disebabkan karena beberapa faktor, seperti hubungan yang lemah antar pasangan gempa, data *outlier*, atau pemilihan pembobotan yang kurang tepat. Sedangkan nilai CND yang terlalu kecil menunjukkan solusi yang terlalu diredam karena pemilihan nilai pembobotan yang terlalu tinggi. Selanjutnya, proses iterasi dihentikan saat nilai RMS sudah mencapai kurang dari 0.1 detik. RMS menggambarkan selisih antara perhitungan waktu tempuh observasi dan kalkulasi. Nilai RMS yang mendekati nilai nol menunjukkan bahwa model kecepatan dan posisi hiposenter akhir yang digunakan lebih mendekati ke model bumi sebenarnya. Pada penelitian ini dilakukan sebanyak 8 kali iterasi. Tabel 1 menampilkan nilai CND dan RMS pada setiap proses iterasi. Nilai CND yang dihasilkan pada perhitungan ini antara rentang 68,20 sampai 79,20. Pada iterasi pertama nilai RMS sebesar 0,61 detik dan pada iterasi terakhir nilai RMS tereduksi menjadi 0,07 detik.

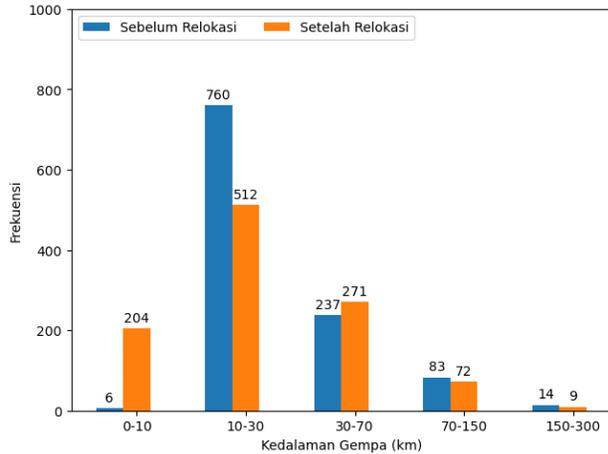
Hasil relokasi menggunakan algoritma hypoDD dapat memperbaiki nilai *residual* waktu tempuh. *Residual* waktu tempuh merupakan selisih antara waktu tiba observasi dan waktu tiba kalkulasi. Grafik histogram perbandingan residual waktu tempuh antara sebelum dan setelah relokasi ditunjukkan pada Gambar 5. Nilai residual waktu tempuh sebelum relokasi antara rentang -2,39 sampai 2,37. Sedangkan setelah dilakukan relokasi nilai residual waktu tempuh menjadi lebih kecil, yaitu antara nilai -0,93 sampai 0,93. Nilai *residual* waktu tempuh yang semakin kecil ini menunjukkan bahwa perhitungan kalkulasi yang dilakukan semakin konvergen dan nilainya semakin mendekati model bumi sebenarnya

Gambar 6 menunjukkan perbandingan pola sebaran hiposenter sebelum dan setelah direlokasi pada area penelitian, seismisitas setelah relokasi menunjukkan pola yang lebih terfokus seperti tampak pada area kotak berwarna kuning. Kedalaman gempa direpresentasikan dengan lingkaran berwarna kuning hingga merah. Gempa pada kedalaman 0-70 km ditunjukkan oleh lingkaran berwarna kuning hingga jingga, sedangkan gempa-gempa pada kedalaman lebih dari 70 km direpresentasikan oleh lingkaran berwarna merah. Kejadian gempa yang relatif dangkal (kurang dari 10 km) dan berada di daratan mengindikasikan adanya aktivitas sesar atau aktivitas vulkanik, sementara kejadian gempa dalam (lebih dari 70 km) kemungkinan disebabkan oleh aktivitas *slab* subduksi. Besar magnitudo gempa direpresentasikan oleh lingkaran berwarna kuning antara rentang 1 hingga 7, semakin besar diameter lingkaran maka semakin besar besar magnitudonya.

Secara statistik perbandingan sebaran hiposenter gempabumi sebelum dan setelah relokasi terlihat jelas pada kedalaman 0-10 km (Gambar 7). Sebelum direlokasi terdapat 6 *event* pada kedalaman 0-10 km, sedangkan setelah direlokasi menjadi sebanyak 204 *event*. Relokasi hiposenter menggunakan metode *double-difference* dapat memperbaiki posisi hiposenter yang banyak di kedalaman 10 km (*fix depth*) menjadi lebih terdistribusi dan lebih representatif secara geologi.



**Gambar 6.** Sebaran episenter gempa bumi sebelum relokasi (atas) dan setelah relokasi (bawah). Kotak berwarna kuning menunjukkan kluster gempa bumi hasil relokasi yang lebih terfokus.



**Gambar 7.** Perbandingan jumlah gempabumi di berbagai kedalaman sebelum relokasi (biru) dan setelah relokasi (jingga)

### Seismisitas Wilayah Yogyakarta

Gambar 8 menggambarkan kluster yang terbentuk di wilayah Yogyakarta, berada di 15-20 km di sisi timur Sesar Opak. Kluster gempa ini memanjang 45 km dengan arah  $U42.4^{\circ}T$ . Kluster gempa ini disesuaikan dengan *aftershock* gempa 2006 yang dipetakan oleh penelitian terdahulu dan mengonfirmasi aktivitas sesar di sebelah timur sesar Opak [9, 13, 14]. Mengacu pada penelitian terdahulu, kluster gempa pada periode ini berada di area *mainshock* gempa Yogyakarta 2006 yang dipetakan oleh USGS. Gambar 8 juga menunjukkan distribusi kluster gempabumi di Yogyakarta dalam 3D dari perspektif sejajar Sesar Opak.

Distribusi hiposenter gempabumi di Yogyakarta dalam penampang U – S ditunjukkan oleh Gambar 9. Kedalaman gempa pada kluster ini mencapai 15 km dengan kemiringan kurang lebih  $80^{\circ}$ . Distribusi seismisitas gempabumi pada kluster tersebut disesuaikan dengan penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa penyebab utama gempa tahun 2006 merupakan gempa dangkal yang berada pada

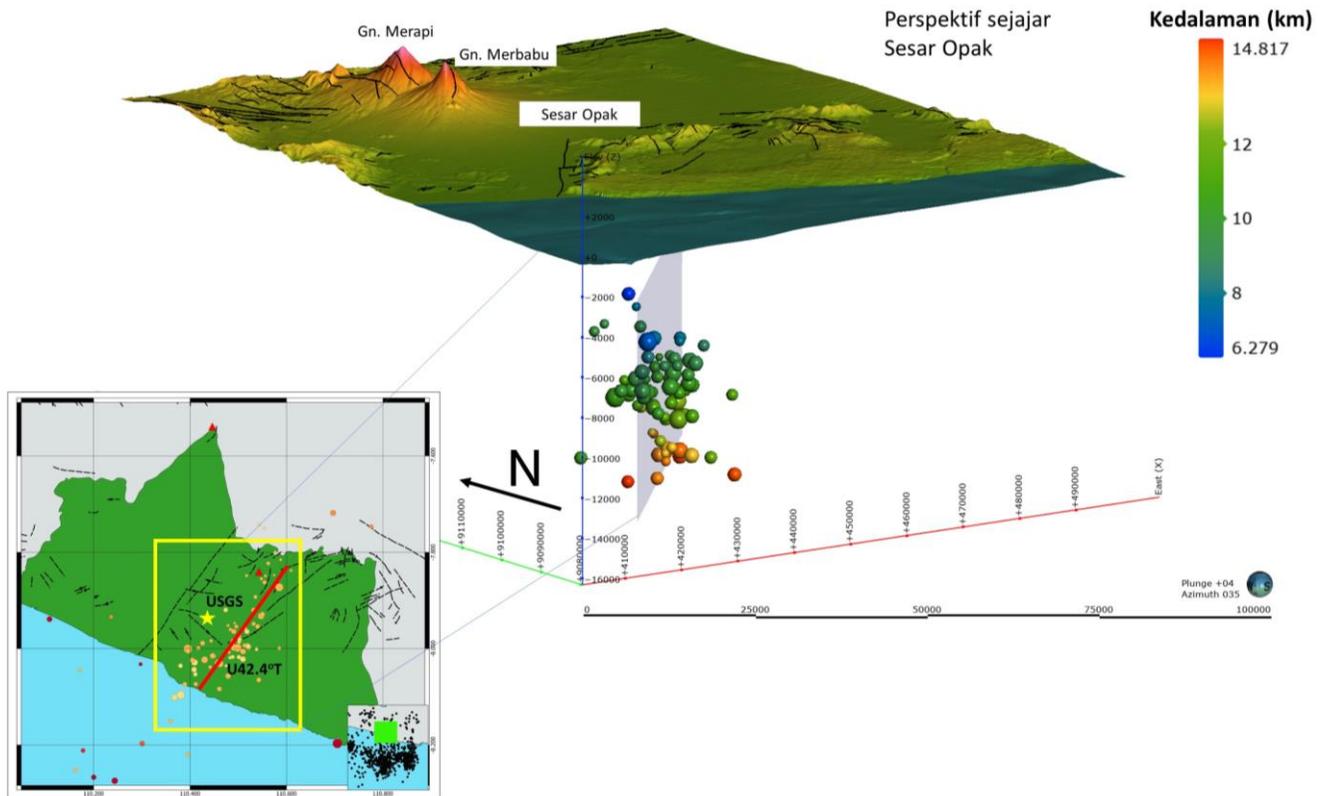
kedalaman antara 10-15 km dengan kemiringan hampir  $90^{\circ}$  ke arah timur [9, 15]. Hasil ini mengindikasikan bahwa masih ada keterkaitan antara kluster gempa pada periode 2009 hingga 2017 dengan kluster dari data *aftershock* gempa Yogyakarta 2006, atau dengan kata lain dapat dikatakan masih ada energi yang dilepaskan dari gempa 2006 hingga tahun 2017. Hal inilah yang menyebabkan pada daerah di sebelah timur Sesar Opak aktivitas kegempaan masih aktif hingga periode tersebut.

### Simpulan

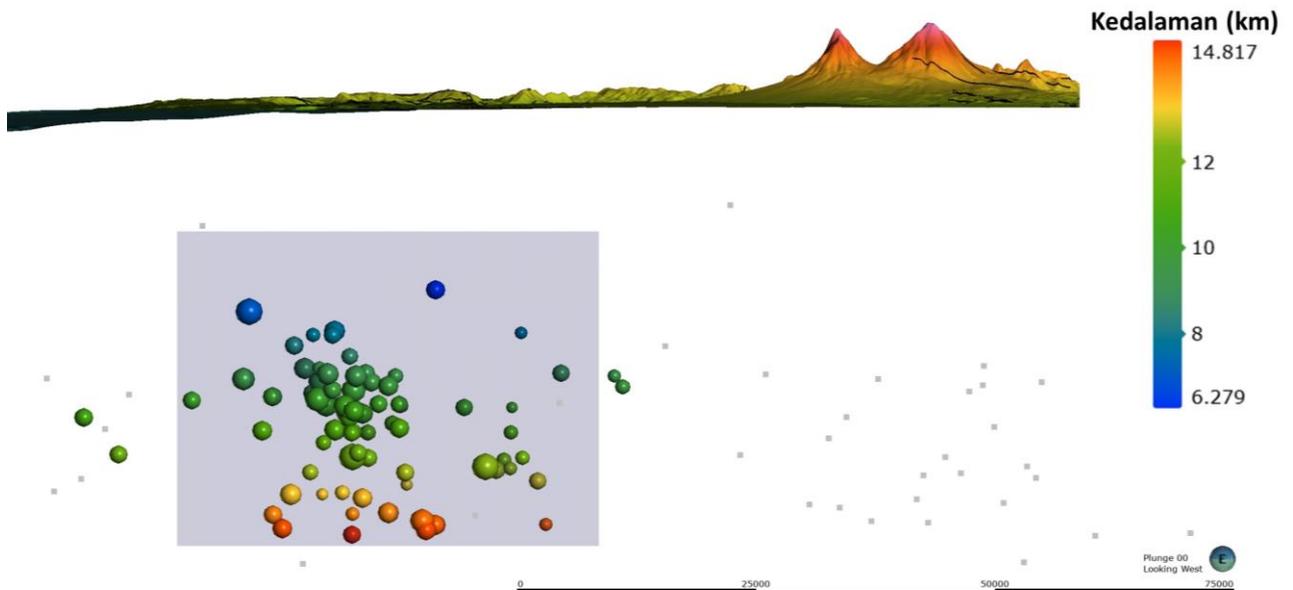
Relokasi hiposenter menggunakan metode *double-difference* berhasil memperbaiki lokasi gempabumi dari katalog BMKG yang masih dominan pada kedalaman *fix depth* sehingga lebih representatif untuk diinterpretasi. Hasil relokasi menunjukkan adanya kluster gempa di daerah Yogyakarta yang berlokasi 15-20 km di sisi timur Sesar Opak dan memanjang 45 km dengan orientasi  $N42.4^{\circ}E$ . Berdasarkan hasil klustering *aftershock* dari penelitian terdahulu, disimpulkan kluster gempa pada penelitian ini disebabkan oleh patahan yang sama yang menyebabkan gempa Yogyakarta 2006. Penelitian ini mendukung pernyataan peneliti terdahulu yang menyebutkan bahwa penyebab utama gempa 2006 bukanlah dari Sesar Opak, melainkan sesar lain yang berada di sisi timur Sesar Opak. Penelitian lebih lanjut dari berbagai disiplin ilmu masih diperlukan untuk mengkonfirmasi tentang keberadaan sesar tersebut agar diperoleh informasi yang lebih komprehensif.

### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) atas data yang disediakan untuk penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada pengulas anonim untuk saran dan komentar pentingnya.



**Gambar 8.** Distribusi hiposenter gempa bumi di Yogyakarta dalam 3D dari prespektif sejajar Sesar Opak (garis hitam putus-putus). Simbol bintang merepresentasikan episenter Gempa Yogyakarta 2006 yang dipetakan oleh USGS [4]. Garis merah merepresentasikan orientasi cluster gempa hasil relokasi dengan arah U42.4°T.



**Gambar 9.** Distribusi hiposenter gempa bumi di Yogyakarta periode tahun 2009 – 2017 dalam penampang U – S.

### Daftar Pustaka

- [1] Rahardjo, W., Sukandarrumidi & Rosidi, H. (1995) Geologic Map of the Yogyakarta Sheet, Jawa, 1:100.000, 2 edn, *Geological Research and Development Centre*, Bandung.
- [2] BAPPENAS (2006) *Preliminary Damage and Loss Assessment Yogyakarta and Central Java Natural Disaster*, no. June, pp. 140, [Online]. ([http://siteresources.worldbank.org/INTINDONESIA/Resources/2262711150196584718/PackageJune13\\_HIRES\\_FINAL.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTINDONESIA/Resources/2262711150196584718/PackageJune13_HIRES_FINAL.pdf)).
- [3] Tsuji, T., Yamamoto, K., Matsuoka, T., Yamada, Y. & Onishi, K. (2009) Earthquake fault of the 26 May 2006 Yogyakarta earthquake. *Earth Planets Space*, 61, e29–e32.
- [4] USGS Preliminary Earthquake Report (2006) The website of United States Geological Survey, *Earthquake Hazards Program*, (<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2006/usneb6/>).
- [5] Nakano, M., H. Kumagai, K. Miyakawa, T. Yamashita, H. Inoue, M. Ishida, S. Aoi, N. Morikawa, and P. Harjadi. (2006) Source Estimates of the May 2006 Java Earthquake, *EOS Trans. AGU*, **87**, 45, doi:10.1029/2006EO450002.
- [6] Harvard-CMT (2006) Focal mechanism of the 2006 Yogyakarta earthquake, The website of the Harvard Global CMT, id#20062253A, (<http://www.globalcmt.org>).
- [7] NEIC-FMT (2006) Focal mechanism of the 2006 Yogyakarta earthquake, The website of U.S. National Earthquake Information Center (NEIC), ([http://neic.usgs.gov/neis/eq\\_depot/2006/eq\\_060526neb6/Neic\\_neb6\\_q.html](http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2006/eq_060526neb6/Neic_neb6_q.html)), 2006.
- [8] Walter, T. R., B. Luhr, M. Sobiesiak, H. Grosse, R. Wang, S. Parolai, H.-U. Wetzel, J. Zschau, C. Milkereit, and E. Cuntzer (2007) Soft volcanic sediments compound 2006 Java Earthquake disaster, *EOS*, **88** (46), 486,13 November, DOI: 10.1029/2007EO460002.
- [9] Walter, T. R. et al. (2008) The 26 May 2006 magnitude 6.4 Yogyakarta earthquake south of Mt. Merapi volcano: did Lahar deposits amplify ground shaking and thus lead to the disaster? *Geochem. Geophys.*, 9(5), pp. 1–9
- [10] Diambama, D., Angraini, A., Nukman, M., Luehr, B. G., Suryanto, Wiwit. (2018) Velocity Structure around the 2006 M6.3 Yogyakarta Earthquake Zone Inferred from Seismic Tomography, in: *20th EGU General Assembly*, EGU 2018. p. 2156.
- [11] 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. 6, pp. 1353–1368.
- [12] Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R. and Buland, R. (1995) Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times, *Geophysical Journal International*, Vol. 122, pp. 108–124.
- [13] Husni, Y. M., Nugraha, A. D., Rosalia, S., Zulfakriza, Sahara, D. P. (2018) Aftershock location determination of the 27 May 2006, M 6.4 Yogyakarta earthquake using a non-linear algorithm: *A preliminary results*, in: *AIP Conference Proceedings 1987*. p. 020049. DOI:10.1063/1.5047334
- [14] Angraini, A., Sobiesiak, M., Walter, T. R., Luehr, B. G. (2011) The 26 May 2006 Yogyakarta Earthquake: Its aftershocks and Its Relation Towards the Regional Seismotectonic Setting, in: *American Geophysical Union Fall Meeting*, p. T14A–05.
- [15] Wulandari, A., Angraini, A., Suryanto, W. (2018) Hypocenter Analysis of Aftershocks Data of the Mw 6.3, 27 May 2006 Yogyakarta Earthquake Using Oct-Tree Importance Sampling Method. *Appl. Mech. Mater.* 881, 89–97, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.881.89