

Studi Relokasi Hiposenter Aftershock Gempa Yogyakarta 2006

Velli Shinta^{1,*}, Dwi Pujiastuti¹, Atin Nur Aulia²

¹Laboratorium Fisika Bumi dan Atmosfir, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163 Indonesia

²Pusat Penelitian Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Jl. Sangkuriang, Kompleks LIPI, Gedung No.8, Bandung, 40135 Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 25 Agustus 2020
Direvisi: 10 Oktober 2020
Diterima: 21 Oktober 2020

Kata kunci:

aftershock
JHD
model kecepatan 1D
relokasi hiposenter
velest

Keywords:

aftershock
JHD
1D velocity model
hypocenter relocation
velest

Penulis Korespondensi:

Velli Shinta
Email: shintavelli@yahoo.com

ABSTRAK

Studi relokasi hiposenter *aftershock* gempa Yogyakarta 2006 telah diteliti melalui pengolahan data *waveform aftershock* gempa Yogyakarta pada 16 Juni s.d 5 Juli 2006. Data model kecepatan gelombang 1D Jawa Tengah digunakan sebagai model kecepatan awal. Identifikasi distribusi hiposenter gempa bumi diperoleh menggunakan metode *Joint Hypocenter Determination* (JHD) dan program *Velest*. Lokasi hiposenter ini selanjutnya di plot pada peta menggunakan *GMT (Generic Mapping Tools)*. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa persebaran hiposenter gempabumi membentuk tiga buah *cluster*, berada dibagian timur kemudian membelok ke arah selatan Sesar Opak. Hiposenter memiliki pola persebaran membentuk suatu bidang sesar. Kemudian, hasil penelitian menemukan adanya rambatan energi di sepanjang zona lemah Sesar Opak dari sesar aktif di bagian timur. Nilai RMS residual relokasi hiposenter menunjukkan hasil yang cukup akurat yaitu sebesar 0,0596 detik dan menghasilkan model kecepatan yang tidak jauh berbeda dengan model kecepatan awal (Jawa Tengah).

The relocation study of the 2006 Yogyakarta earthquake aftershock hypocenter has been investigated through the processing of the Yogyakarta earthquake aftershock waveform data from 16 June to 5 July 2006. Data from the 1D wave velocity model of Central Java is used as the initial velocity model. Identification of the earthquake hypocenter distribution was obtained using the Joint Hypocenter Determination (JHD) method and the Velest program. The hypocenter location is then plotted on the map using GMT (Generic Mapping Tools). The results showed that the hypocenter of the earthquake formed three clusters, located in the eastern part and then veered to the south of the Opak Fault. The hypocenter has a distribution pattern to form a fault plane. Then, the results of the study found energy propagation along the weak zone of the Opak Fault from an active fault in the eastern part. The RMS value of the residual hypocenter relocation shows a fairly accurate result of 0.0596 seconds and produces a velocity model that is not much different from the initial velocity model (Central Java).

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Secara geografis, Indonesia terletak pada batas pertemuan tiga lempeng besar yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik. Hal ini menyebabkan Indonesia memiliki deretan gunung berapi aktif maupun yang dinyatakan non-aktif. Kondisi tersebut menyebabkan Indonesia sering dan rentan mengalami kejadian bencana geologi, salah satunya peristiwa gempa bumi (BMKG, 2010).

Jawa Tengah bagian selatan, termasuk kota Yogyakarta dan sekitarnya, merupakan salah satu wilayah rawan gempa bumi di Indonesia. Daerah Yogyakarta berdekatan dengan zona subduksi lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia (Hamilton, 1988). Aktifnya dinamika penyusupan lempeng yang didukung oleh aktivitas sesar di daratan menyebabkan Yogyakarta menjadi salah satu daerah dengan tingkat aktivitas kegempaan yang tinggi di Indonesia (Daryono, 2010).

Pada tanggal 27 Mei 2006 telah terjadi gempa bumi di Yogyakarta dan sekitarnya, termasuk wilayah kabupaten Bantul, Klaten, Gunung Kidul, dan Kulon Progo yang memakan korban sekitar 5000 jiwa (Natawidjaja, 2007). *United State Geological Survey* (USGS) mencatat gempa bumi tersebut berada di sebelah timur Sesar Opak, dengan kedalaman 10 km. Menurut lembaga lainnya, *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS) mencatat gempa berada di bagian barat daya Sesar Opak sedangkan menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) gempa bumi berada di laut bagian selatan kota Yogyakarta (Natawidjaja, 2016). Berdasarkan hal tersebut, lembaga pengamat gempa bumi *Geo Forschungs Zentrum* (GFZ) milik Jerman melakukan pemasangan seismograf temporary di sekitar Sesar Opak, sehingga dihasilkan data *aftershock* gempa Yogyakarta 2006 yang berguna untuk menentukan hiposenter gempa bumi Yogyakarta 2006.

Relokasi hiposenter gempa bumi penting dilakukan untuk memperoleh lokasi gempa yang lebih baik dan akurat, melakukan penentuan hiposenter maka akan terlihat liniasi atau kemenerusan hiposenter yang mempresentasikan struktur sesar di bawah permukaan bumi dan juga dapat digunakan untuk melakukan identifikasi tatanan seismotektonik berdasarkan distribusi gempa bumi yang terjadi. Beberapa metode yang digunakan untuk menentukan hiposenter yaitu metode manual (metode lingkaran). Metode ini kurang dapat diandalkan karena kualitas penentuannya tergantung pada ketelitian menggambar lingkaran. Metode lainnya yaitu metode relative (metode *single event determination*, *joint hypocenter determination* dan *double difference*) termasuk metode terbaik dikarenakan memberikan solusi yang meminimalkan *root mean square RMS* (Kayal, 2008).

Priadi dkk., (2019) telah melakukan penelitian mengenai relokasi hiposenter dan model kecepatan lokal 1D di Wilayah Papua. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Joint Hypocenter Determination* (JHD) dan program *velest*. Penelitian ini menggunakan data waktu tiba gempa Wilayah Papua periode tahun 2017 dan model kecepatan gelombang 1D IASP91. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa hiposenter hasil relokasi menggunakan JHD menunjukkan hiposenter yang tercluster pada wilayah yang berdekatan dan perhitungan yang dilakukan relatif akurat karena menghasilkan nilai RMS residual waktu tempuh di bawah 1 yaitu sebesar 0,6 detik. Model kecepatan 1D Wilayah Papua lebih lambat dibandingkan dengan model kecepatan IASP91. Penelitian lainnya juga dilakukan oleh Maynard dan Afnimar (2019) mengenai relokasi hiposenter gempa Yogyakarta 2006. Penelitian ini menggunakan metode *double difference* (DD) untuk memperoleh lokasi hiposenter dan adanya penurunan amplitude lokal pada data gempa. Data yang digunakan pada penelitian ini berupa data *aftershock* gempa Yogyakarta tanggal 2 s.d 6 Juni 2006. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa terdapat dua buah *cluster* hiposenter yang merupakan bagian dari Graben Bantul dan dua *cluster* lainnya diperkirakan teraktivasi akibat subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia serta terlihat adanya penurunan magnitudo lokal.

Pada penelitian ini telah dilakukannya studi relokasi hiposenter gempa bumi Yogyakarta menggunakan data *aftershock* 16 Juni s.d 5 Juli 2006 dengan metode JHD dan program *Velest* untuk mengidentifikasi distribusi hiposenter gempa bumi berdasarkan data *aftershock*, memperoleh model kecepatan 1D daerah penelitian, dan akan dilihat kemenerusan pola persebaran hiposenter gempa hasil relokasi penelitian ini dengan hasil penelitian sebelumnya Maynard dan Afnimar (2019).

II. METODE

2.1 Data

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data *waveform* gempa bumi *aftershock* yang terekam pada sepuluh stasiun di sekitar Daerah Istimewa Yogyakarta tanggal 16 Juni s.d 5 Juli 2006, peta sebaran stasiun yang merekam *waveform* dapat dilihat pada Gambar 1. Selain data *waveform*, penelitian ini juga menggunakan data model kecepatan 1D Jawa Tengah (Koulakov dkk, 2009) sebagai model kecepatan awal.



Gambar 1 Peta sebaran stasiun perekam *waveform*

2.1 Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu persiapan pengumpulan data, *picking* fasa gelombang P dan S, penentuan hiposenter awal, dan relokasi hiposenter.

2.1.1 Persiapan dan Pengumpulan Data

Persiapan dan pengumpulan data diperoleh dengan cara mendownload data *waveform* pada web <http://eida.gfz-potsdam.de/webdc3/> dalam format *mseed* (mini-seed).

2.1.2 *Picking* Fasa Gelombang

Picking fasa gelombang P dan S dilakukan secara manual menggunakan *software* SeisGram2k70. *Picking* merupakan proses penentuan *arrival time* dari kedua buah gelombang tersebut. Proses ini merupakan tahapan yang penting karena kualitas data hasil *picking* akan menentukan keakuratan hasil yg baik untuk tahap selanjutnya.

2.1.3 Penentuan Hiposenter Awal

Penentuan hiposenter awal dilakukan menggunakan program *Geiger's Adaptive Damping* (GAD) dengan menerapkan metode SED. Metode ini menggunakan prinsip Geiger yang merupakan prosedur iterasi dengan optimasi *least square* untuk menentukan lokasi hiposenter. Koordinat spasial hiposenter tertentu berdasarkan selisih antara observasi dengan hasil kalkulasi yang dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$res_j = tobs - tcl \quad (1)$$

res_j adalah perbedaan nilai residual, $tobs$ adalah waktu tiba observasi, tcl adalah hasil kalkulasi pada stasiun ke- j .

2.1.4 Relokasi Hiposenter

Metode yang digunakan untuk merelokasi hiposenter adalah metode JHD. Metode ini memperhitungkan koreksi stasiun untuk waktu tiba gelombang sebagai parameter tambahan dalam menentukan sejumlah gempa (Ratchkovsky dkk., 1998). Program yang digunakan untuk menjalankan metode ini adalah program *Velest* yang dikembangkan oleh Kissling dkk (1995), adapun program ini akan melakukan perhitungan model kecepatan 1D berdasarkan model *Coupled Velocity Hypocenter*. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$r = tobs - tcl = \sum_k^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_i^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \quad (2)$$

r adalah residual waktu tempuh observasi dan waktu tempuh kalkulasi, t_{ob_s} adalah waktu tempuh observasi, t_{cl} adalah waktu tempuh kalkulasi, f adalah fungsi terhadap lokasi stasiun, s adalah lokasi stasiun, h adalah lokasi hiposenter dan waktu tiba (*arrival time*), m adalah model kecepatan, e adalah koreksi stasiun, k adalah jumlah hiposenter, n adalah jumlah stasiun.

2.1.5 Plot Peta Hiposenter

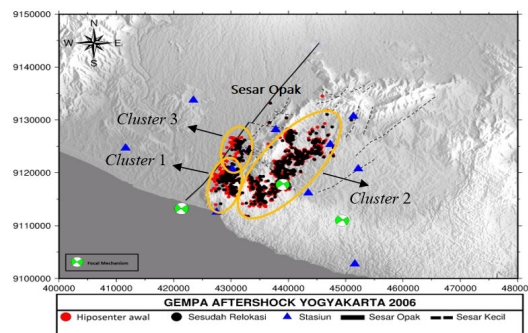
Data hiposenter yang diperoleh kemudian diplot dalam peta menggunakan software GMT. Peta tersebut menunjukkan sebaran hiposenter sebelum dan sesudah relokasi pada daerah penelitian.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Analisis Relokasi Hiposenter

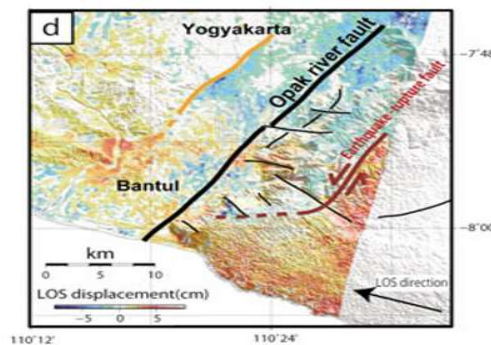
3.1.1 Plotting Hiposenter Awal dan Setelah Relokasi

Hasil plotting sebaran hiposenter sebelum (awal) dan sesudah relokasi dapat dilihat pada Gambar 2. Gambar tersebut menampilkan plot dari total 656 *event aftershock* gempa Yogyakarta 2006 tanggal 16 Juni s.d 5 Juli 2006. Terlihat bahwa adanya perubahan *latitude* dan *longitude* episenter awal dengan sesiposenter sesudah relokasi berjarak sekitar 312 m.



Gambar 2 Peta sebaran episenter sebelum dan sesudah relokasi

Gambar 2 menunjukkan bahwa sebaran episenter membentuk tiga buah *cluster*. Pada cluster 1 episenter membentang sepanjang 8 km dari timur laut hingga barat daya di bagian selatan Sesar Opak. Distribusi episenter *cluster* ini menunjukkan adanya kecenderungan arah sesar yang berorientasi barat daya hingga timur laut yang membentuk kesejajaran dengan Sesar Opak, menurut Rahardjo dkk., (1995) sesar *cluster* 1 ini memiliki kelurusan dengan Sesar Opak bagian selatan. Distribusi *cluster* 2 terkonsentrasi sepanjang 20 km dari timur laut hingga ke barat daya sebelas timur Sesar Opak. Sebaran episenter ini yang terdapat kesesuaian dengan analisis InSAR (*Synthetic Aperture Radar Interferometry*) yang dilakukan oleh Tsuji dkk., (2009). Tsuji dkk., (2009) menginterpretasikan bahwa terbentuknya sebuah bidang sesar yang berjarak sekitar 10 km di sebelah timur Sesar Opak yang ditandai dengan garis merah dapat dilihat pada Gambar 3.



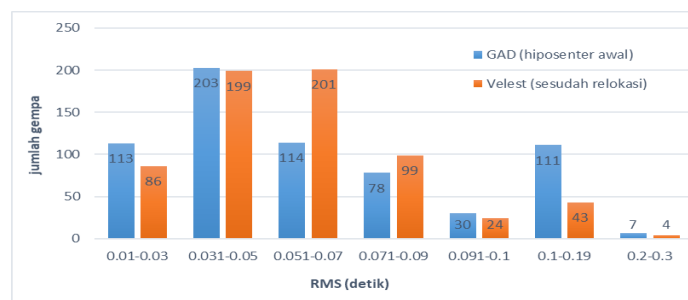
Gambar 3 Estimasi kenampakan sesar di permukaan menurut Tsuji dkk., (2009)

Garis merah tersebut merupakan presentasi lineasi bidang sesar penyebab gempa Yogyakarta 2006 (Tsuji dkk., 2009) namun garis tersebut tidak sepenuhnya lurus memanjang dari timur laut ke barat daya tetapi juga mengalami pembelokan ke arah barat bagian selatan Sesar Opak yang

digambarkan dengan garis putus-putus berwarna merah. Pembelokkan tersebut didukung juga dengan distribusi episenter yang terjadi pada *cluster* 1. Pada *cluster* 3 hiposenter terkonsentrasi mengikuti jalur patahan Sesar Opak, dapat diinterpretasikan bahwa terdapat juga rambatan energi gempa di sepanjang zona lemah Sesar Opak. Zona lemah yang dimaksud ialah zona patahan / patahan yang terbentuk karena terdapat dislokasi atau struktur yang memotong bidang-bidang perlapisan antar batuan (Lutfinur dkk., 2015). Selain itu, distribusi persebaran *aftershock* gempa Yogyakarta pada periode ini memiliki kedalaman 0 – 16 km, artinya gempa tersebut digolongkan sebagai gempa dangkal, yang mana menurut Garini (2014) gempa dangkal bercirikan dengan kedalaman gempa kurang dari 60 km sehingga gempa tersebut mempunyai potensi yang besar untuk merusak permukaan bumi.

3.1.2 RMS Travel Time

Proses relokasi menghasilkan nilai *RMS travel time residual* yang beragam untuk setiap *event* gempanya. Proses relokasi hiposenter gempa bumi akan memperkecil nilai *RMS travel time residual*, dibuktikan oleh histogram perbandingan *RMS travel time residual* GAD (hiposenter awal) dan Velest (sesudah relokasi) pada Gambar 4. Dari histogram tersebut dapat dilihat bahwa jumlah gempa setelah relokasi relatif lebih banyak pada skala $RMS \leq 0,09$ detik, sedangkan jumlah gempa menurun secara signifikan pada skala $RMS \geq 0,1$ detik dibandingkan dengan jumlah gempa sebelum relokasi. Nilai RMS rata-rata yang dimiliki GAD sebesar 0,0649 detik dan RMS rata-rata Velest sebesar 0,0596 detik, hal ini dapat dikatakan bahwa Velest memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dari pada GAD dikarenakan nilai RMS rata-rata cenderung menurun.



Gambar 4 Histogram perbandingan RMS sebelum dan sesudah relokasi

3.1.3 Koreksi Stasiun

Pada penelitian ini terdapat koreksi stasiun yang dilakukan terhadap 10 stasiun pencatat dengan 1 stasiun yang bertindak sebagai stasiun referensi yaitu stasiun WON. Stasiun tersebut dijadikan sebagai stasiun referensi dikarenakan lebih banyak mencatat *event* gempa bumi sebanyak 606 dari 656 event gempa, perekaman gelombang seismiknya relatif bagus dari pada stasiun pencatat lainnya, dan stasiun ini letaknya berada diantara stasiun lainnya dilihat pada Gambar 1. Setiap stasiun pencatat memiliki waktu *delay* (keterlambatan) terhadap perekaman gelombang seismik seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Daftar dan koreksi stasiun (waktu *delay*)

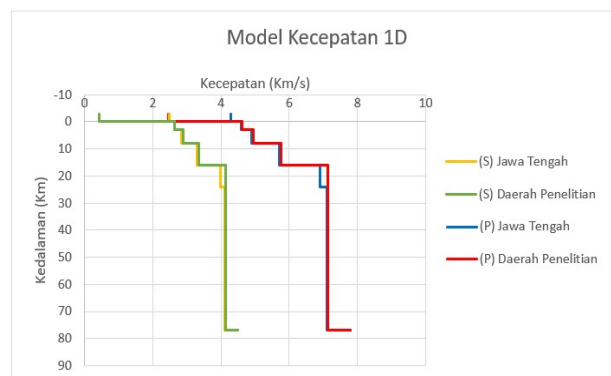
Stasiun	Koreksi Stasiun (detik)
PAL	0
WON	0.0036
WAN	0.002
KAR	0.0098
RAT	-0.0093
BOG	0.0111
BUM	0.0397
PEL	0.0059
KEM	-0.0495
NGL	0.1507

Nilai koreksi stasiun negatif (-) menunjukkan bahwa waktu tempuh gelombang P lebih cepat sampai pada stasiun pencatat tersebut dibandingkan dengan stasiun referensi, dikarenakan struktur batuan di sekitar stasiun tersusun atas batuan padat (*hardrock*). Nilai koreksi stasiun positif (+) mengindikasikan bahwa struktur batuan stasiun seismik tersebut tersusun atas batuan sedimen, pasir atau lempung yang menyebabkan gelombang P merambat lebih lambat untuk sampai pada stasiun pencatat (Madlazim dkk., 2010).

Hasil dari Tabel 1 menunjukkan stasiun WON, WAN, KAR, BUM, NGL, PEL, PAL, dan BOG memiliki nilai koreksi stasiun (+) yang mengindikasikan bahwa lapisan sekitar stasiun merupakan lapisan batuan sedimen. Hal ini sesuai dengan laporan penelitian Surono (2009) dan Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI) (2017) yang menyatakan bahwa bagian timur Provinsi DIY (Daerah Istimewa Yogyakarta sampai dengan daratan Provinsi Jawa Tengah di bagian timur terdiri dari struktur batuan sedimen yaitu batu pasir, batu apung, batu gamping, batu lempung, dan bereksi gunung api.

3.2 Model Kecepatan

Model kecepatan 1D gelombang seismik yang dihasilkan pada penelitian ini menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan dengan model kecepatan 1D Jawa Tengah sebagai model awal. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 5. Grafik tersebut menggambarkan bahwa pada kedalaman -3 s.d 0 km (di atas lapisan permukaan tanah) daerah Jawa Tengah memiliki kecepatan gelombang yang lebih besar dari pada daerah penelitian, sedangkan pada kedalaman 3 s.d 24 km di bawah lapisan permukaan tanah kecepatan gelombang pada daerah Jawa Tengah lebih lambat dari pada daerah penelitian. Hubungan antara kedalaman dengan kecepatan gelombang berbanding lurus, semakin ke dalam struktur lapisan kecepatan gelombang seismik juga semakin besar atau cepat. Lokasi gempa bumi yang akurat ialah hiposenter gempa yang ditentukan menggunakan model kecepatan 1D regional atau daerah penelitian (Azizah dkk., 2005), oleh karena itu nilai model kecepatan 1D yang dihasilkan dapat digunakan untuk penentuan hiposenter selanjutnya pada daerah yang sama.



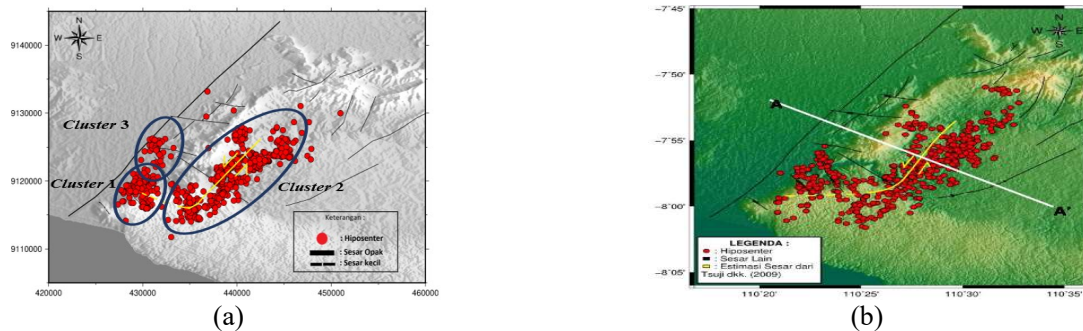
Gambar 5 Model kecepatan gelombang P dan S

3.3 Relokasi Hiposenter dengan Penelitian Sebelumnya

Data *aftershock* yang digunakan pada penelitian ini berbeda dari data yang digunakan oleh Maynard dan Afnimar (2019), dimana Maynard dan Afnimar (2019) menggunakan data pada 2 s.d 6 Juni 2006, sedangkan data yang digunakan pada penelitian kali ini adalah data pada 16 Juni s.d 5 Juli 2006. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh. Tujuan menggunakan data tersebut ialah untuk melihat adanya kemenerusan sebaran hiposenter *aftershock* yang terjadi pada periode ini dengan penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 6 (a).

Berdasarkan Gambar 6 dapat diamati bahwa persebaran relokasi hiposenter *aftershock* pada penelitian ini menunjukkan adanya *cluster* di bagian timur dan selatan sesar Opak (*cluster* 1 dan 2) yang serupa dengan penelitian Maynard dan Afnimar (2019) dilihat pada Gambar 6 (b). Hasil dari penelitian ini yang berbeda dengan penelitian sebelumnya adalah adanya *cluster* hiposenter yang mengikuti jalur patahan / zona lemah Sesar Opak (*cluster* 3). Persebaran hiposenter di *cluster* 3 ini tidak muncul pada penelitian sebelumnya yang menggunakan rentang waktu kejadian gempa sebelum rentang waktu yang digunakan pada penelitian ini. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat juga rambatan energi di sepanjang zona lemah Sesar Opak jika waktu pengamatan gempa *aftershock* lebih

panjang. Hasil penelitian ini semakin mendukung dugaan Tsuji dkk., (2009) yang menyatakan bahwa gempa Yogyakarta 2006 disebabkan oleh pergerakan sesar aktif di bagian timur Sesar Opak yang kemudian merambat membelok ke arah barat bagian selatan Sesar Opak.



Gambar 6 (a) Persebaran hiposenter penelitian ini (b) Persebaran hiposenter penelitian Maynard dan Afnimar (2019)

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian, diperoleh pola persebaran hiposenter gempa membentuk tiga buah *cluster* yang sejajar dengan Sesar Opak. Pola ini menggambarkan adanya bidang sesar yang berada di sebelah timur Sesar Opak dan merambat ke arah selatan. Model kecepatan 1D gelombang seismik memperlihatkan bahwa pada kedalaman -3 s.d 0 km (di atas lapisan permukaan tanah) daerah Jawa Tengah memiliki kecepatan gelombang yang lebih besar dari pada daerah penelitian, sedangkan pada kedalaman 3 s.d 24 km dibawah permukaan lapisan bumi. Penelitian ini menemukan adanya rambatan energi di sepanjang zona lemah Sesar Opak dari sesar aktif di bagian timur pada waktu pengamatan yang lebih Panjang dari pada penelitian sebelumnya. Hiposenter hasil relokasi menunjukkan hasil yang lebih baik ditinjau dari nilai RMS residualnya dibandingkan dengan nilai sebelum relokasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Azizah, K. Susilo, A. dan Rachman, T.D., 2014, Studi Relokasi Hiposenter Gempa di Sekitar Patahan Palu Koro dan Matano Menggunakan Metode Geiger. Universitas Brawijaya, Malang.
- BMKG Homepage, 2010, InaTEWS Konsep dan Implementasi, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, <http://www.bmkg.go.id>, diakses April 2020.
- Daryono., 2010, Aktifitas Gempa bumi Tektonik di Yogyakarta Menjelang Erupsi Merapi 2010, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG).
- Garini, S. A., 2014, Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Di Sulawesi Tengah Dengan Menggunakan Metode Geiger Dan Coupled Velocity-Hypocenter, *Jurnal Fisika*, Vol 3, hal 107-112.
- IAGI Homepage, 2017, Geologi Regional Pegunungan Selatan, <https://sm-iagi.ft.ugm.ac.id/geologi-regional-pegunungan-selatan/>, diakses Oktober 2020.
- Kayal, J.R., 2008, Microearthquake Seismology and seismotectonics of South Asia. Capital Publishing Company, New Delhi, India.
- Kissling, E. Kradolfer, U. dan Maurer, H., 1995, *Velest User's Guide Short Introduction*, Institute of Geophysics and Swiss Seismological Service. *ETH*. Zurich.
- Koulakov, I. Jokovlev, A. dan Luehr, B. G., 2009, Anisotropic Structure Beneath Central Java From Local Earthquake Tomography, *American Geophysical Union*. Vol 10, Number 2.
- Lutfinur, I. Wulandari, R.S. dan Fauziyah, S., 2015, Identifikasi Zona Sesar Di Daerah Bantul Yogyakarta Menggunakan Metode Seismik Refraksi, *Jurnal Saintekno*, Vol. 13, No. 1.
- Natawidjaya, D., 2007, Tectonic Setting Indonesia dan Pemodelan Sumber Gempa dan Tsunami, Pelatihan Pemodelan Run-Up Tsunami, Ristek LIPI.
- Natawidjaya, D., 2016, Misteri Patahan Sumber Gempa Yogyakarta 2006, *Geomagz*, <http://geomagz.geologi.esdm.go.id>, diakses Juli 2019.
- Maynard. D. dan Afnimar., 2019, Relokasi Hiposenter Aftershock Tanggal 2 Hingga 6 Juni 2006 Dari Gempa Bumi Yogyakarta Mei 2006 Menggunakan Metode Double Difference Beserta Penentuan Manigtudo Lokalnya, *Jurnal Puslitbag*, ITB.

- Priadi, R. Ulfiana, E. dan Ariyanto, P., 2018, Model Kecepatan Gelombang Seismik 1 Dimensi Wilayah Papua, Jurusan Geofisika, STMKG.
- Supariyono., 2014, Estimasi Model Satu Dimensi Kecepatan Gelombang P dan S Di Jawa Tengah dan Timur, Universitas Airlangga, Surabaya.
- Surono., 2009, Litostratigrafi Pegunungan Selatan Bagian Timur Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah, Jurnal Sumberdaya Geologi, Vol. 19, No. 3, hal. 209-210.
- Tsuji, T.K. Onishi, K. Bahar, A. Meilano, L. dan Abidin, H., 2009, Earthquake Fault Of The May 2006 Yogyakarta Earthquake Observed By SAR Interferometry, *Earth Planets Space*, Vol 61, hal 29-32.