

Identifikasi Struktur Kerak di Bawah Permukaan Jawa Timur Berdasarkan Hasil Tomografi Seismik Menggunakan Model Kecepatan Gelombang P dan Gelombang S

Uli Ulfa^(1,a), Rahmawati Fitrianingtyas^{(1,b)*}, Yohana Noradika Maharani^(2,c),
Adhi Wibowo^(3,d)

¹⁾Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia, 55283

²⁾Progam Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia, 55283

³⁾Stasiun Geofisika Kelas III Lampung Utara, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Lampung Utara, Indonesia

Email : ^(a)uli.ulf@upnyk.ac.id, ^(b*)rahmawati.fitrianingtyas@upnyk.ac.id, ^(c)yohanam@upnyk.ac.id,
^(d)adhi.wibowo@bmkq.go.id

Diterima (07 Juli 2023), Direvisi (24 Juli 2023)

Abstract. Tectonic conditions that are vulnerable to earthquakes have become a trigger for researchers to conduct studies on subsurface conditions in East Java. A seismic tomographic study based on the P-wave and S-wave velocity models was applied to identify crustal structures in East Java. The research data totaled 3,893 earthquake events and 28 stations from the Meteorology, Climatology and Geophysics Agency (BMKG) in the 2009-2017 period covering coordinates 5°SL- 11°SL and 110° - 115° EL. The modeling results in this study are expressed in velocity perturbations against the ak135 one-dimensional reference velocity between -5% to 5%. The results of this study indicate that in the central of East Java, there is a negative velocity anomaly which is identified as a sedimentary layer that fills the basin in the Kendeng Zone and volcanoclastic deposits in the Southern Mountains Zone to a depth of 5 km. The dominant negative velocity anomaly in southern East Java is associated with the presence of intrusive and bedrock in the Southern Mountain Zone. The transition zone between the crust and upper mantle in East Java is observed at a depth of 35 km below the surface.

Keywords: crust structure, East Java, tomography, P wave, S wave.

Abstrak. Kondisi tektonik yang rentan terhadap bencana gempa bumi menjadi pemicu bagi peneliti untuk melakukan studi mengenai kondisi bawah permukaan di Jawa Timur. Studi tomografi seismik berdasarkan model kecepatan gelombang P dan gelombang S diterapkan untuk mengidentifikasi struktur kerak di Jawa Timur. Data penelitian berjumlah 3.893 kejadian gempa dan 28 stasiun dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) pada periode 2009-2017 yang mencakup koordinat 5° – 11° LS dan 110° – 115° BT. Hasil pemodelan dalam penelitian ini dinyatakan dalam perturbasi kecepatan terhadap referensi kecepatan satu dimensi ak135 antara rentang -5% sampai 5%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa di bagian tengah Jawa Timur terdapat anomali kecepatan negatif yang diidentifikasi sebagai lapisan sedimen yang mengisi cekungan di Zona Kendeng dan deposit vulkaniklastik di Zona Pegunungan Selatan hingga kedalaman 5 km. Anomali kecepatan negatif yang mendominasi di Jawa Timur bagian selatan diasosiasikan dengan keberadaan batuan intrusi dan batuan dasar di Zona Pegunungan Selatan. Zona transisi antara lapisan kerak dan mantel atas di Jawa Timur teramati pada kedalaman 35 km di bawah permukaan.

Kata kunci: struktur kerak, Jawa Timur, tomografi, gelombang P, gelombang S.

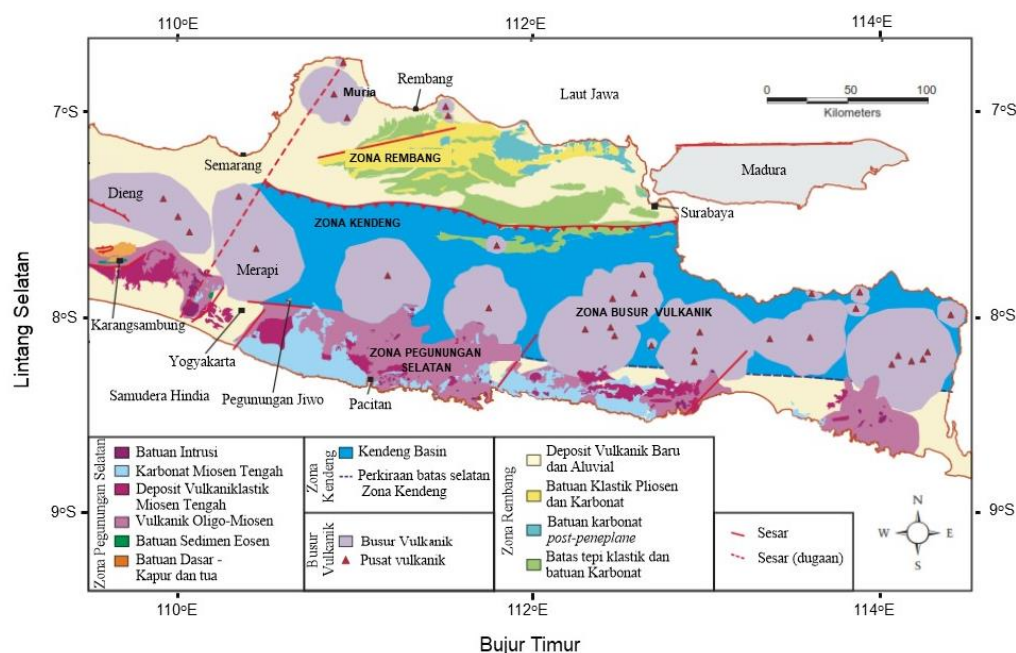
PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki kondisi tektonik yang kompleks. Hal ini disebabkan oleh posisinya yang terletak di antara empat lempeng besar dunia yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Laut Filipina [1]. Salah satu wilayah di Indonesia yang berada di zona tumbukan antarlempeng adalah wilayah provinsi Jawa Timur. Wilayah ini berada di antara dua lempeng yaitu Indo-Australia dan Eurasia. Tumbukan antar lempeng inilah yang mengontrol terjadinya gempa bumi di Jawa Timur, baik gempa yang disebabkan oleh sesar-sesar lokal maupun yang disebabkan oleh aktivitas subduksi di selatan pulau Jawa [2].

Gempa bumi yang disebabkan aktivitas sesar pada umumnya mengakibatkan kerusakan infrastruktur yang cukup parah. Hal ini disebabkan oleh letak hiposenter yang dangkal. Salah satu contohnya adalah Gempa Madiun yang terjadi pada tanggal 25 Juni 2015. Berdasarkan data BMKG gempa ini terjadi pada kedalaman 10

km dengan magnitudo 4,2 M_w . Gempa ini menyebabkan 57 rumah mengalami kerusakan [3]. Tingkat kerusakan akibat gempa bumi dipengaruhi oleh struktur bawah permukaan. Besaran penguatan gelombang seismik di permukaan bumi sangat bergantung terhadap rasio impedansi antara lapisan sedimen permukaan dan lapisan batuan yang mendasarinya [4]. Kondisi tektonik yang rentan terhadap bencana ditambah dengan jumlah penduduk yang padat menjadi pemicu bagi para peneliti untuk melakukan studi mengenai struktur kerak di bawah permukaan wilayah Jawa Timur.

Lapisan kerak merupakan lapisan terluar dari struktur bumi yang terdiri dari kerak benua dan kerak samudera [5]. Lapisan kerak bumi memiliki ketebalan yang bervariasi. Hasil studi terdahulu menggunakan metode gravitasi dan *receiver function* diketahui bahwa kedalaman lapisan kerak bumi di Jawa Timur antara rentang 20 – 40 km [6,7]. Kerak bumi tersusun dari struktur batuan yang umumnya dapat dijangkau oleh manusia dan menjadi fokus dalam studi geologi dan geofisika.



Gambar 1. Pembagian zona di Jawa Timur berdasarkan struktur dan stratigrafi (Smyth dkk., 2008)

Berdasarkan struktur geologi dan stratigrafinya, Jawa Timur dibagi menjadi empat zona, yaitu Zona Pegunungan Selatan, Zona Busur Vulkanik Muda, Zona Kendeng, dan Zona Rembang (Gambar 1) [9]. Zona Pegunungan Selatan adalah daerah pegunungan tua berumur Eosen-Miosen yang berada di selatan Jawa Timur [10]. Zona Kendeng terletak di utara Busur Pegunungan Selatan dan berorientasi timur-barat dengan panjang sekitar 400 km sejajar Busur Pegunungan Selatan [11]. Zona ini merupakan cekungan yang diisi oleh sedimen *volcanogenic* dan *pelagic mudstone* yang memiliki ketebalan kurang lebih 6 - 10 km [10]. Perbatasan antara Zona Pegunungan Selatan dan Zona Kendeng terdapat Zona Busur Vulkanik. Aktivitas vulkanisme di Zona Busur Vulkanik dimulai pada akhir Miosen hingga saat ini [10,11]. Zona Kendeng sebelah utara berbatasan dengan Zona Rembang yang dipisahkan oleh Sesar Kendeng berorientasi Barat – Timur. Zona Rembang terdiri dari antiklin dengan arah barat-timur dan membentang dari Purwodadi hingga Pulau Madura [10,11].

Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar untuk melakukan studi lanjut menggunakan metode lain untuk menganalisis struktur kerak di bawah permukaan daerah Jawa Timur. Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk memberikan gambaran kondisi tektonik dan geologi regional di Jawa Timur yaitu tomografi seismik. Metode ini merupakan metode yang dapat digunakan untuk mencitrakan bawah permukaan berdasarkan informasi gelombang seismik yang dihasilkan dari sumber seperti gempabumi atau ledakan [8]. Tomografi seismik menggunakan data gempa memiliki kelebihan dalam mencitrakan bawah permukaan hingga kedalaman ratusan kilometer yang tidak dapat dijangkau oleh

metode geofisika yang lain. Metode ini sudah digunakan oleh para ilmuwan kebumihan sejak tahun 1970 untuk mempelajari struktur interior bumi pada skala lokal maupun global sehingga diperoleh model 3D bumi yang terdiri dari kerak, mantel, dan inti [8]. Metode ini juga memiliki kekurangan, seperti ketergantungan pada sumber gempa dan sebaran stasiun yang mengakibatkan keterbatasan dalam mencitrakan bawah permukaan pada kedalaman tertentu.

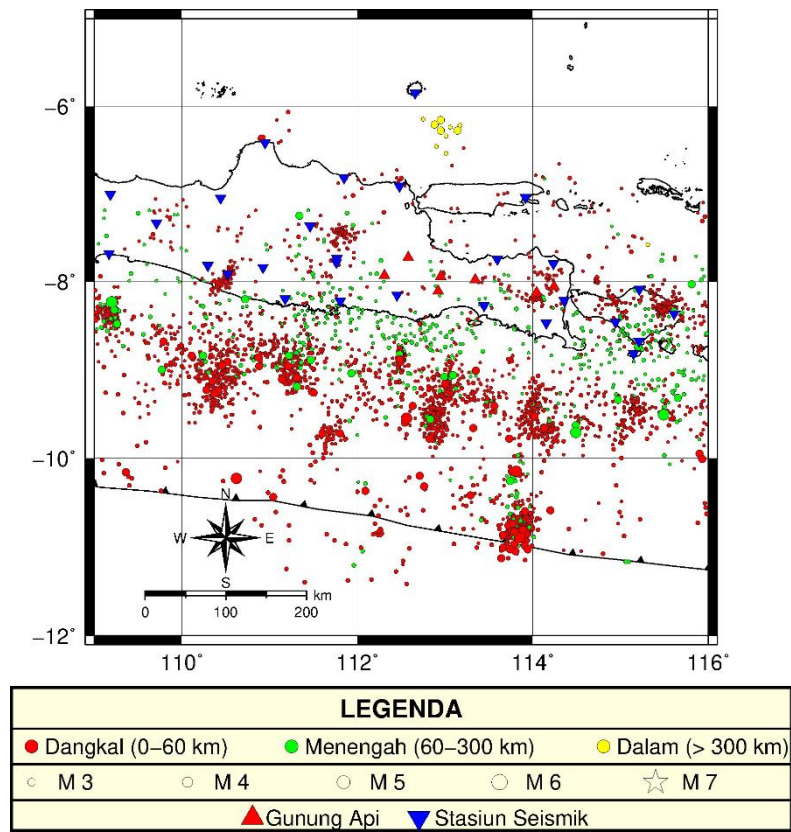
Penelitian ini bertujuan untuk mencitrakan model kecepatan tiga dimensi gelombang P dan S pada lapisan kerak bumi di Jawa Timur menggunakan metode tomografi seismik. Berdasarkan hasil pencitraan tersebut nantinya akan dilakukan interpretasi terkait kondisi tektonik dan geologi regional di Jawa Timur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan untuk studi tektonik lebih lanjut di wilayah Jawa Timur. Selain itu, temuan dari penelitian ini juga dapat menjadi referensi untuk menentukan kebijakan dalam meminimalisir dampak kerugian saat terjadi bencana.

METODE PENELITIAN

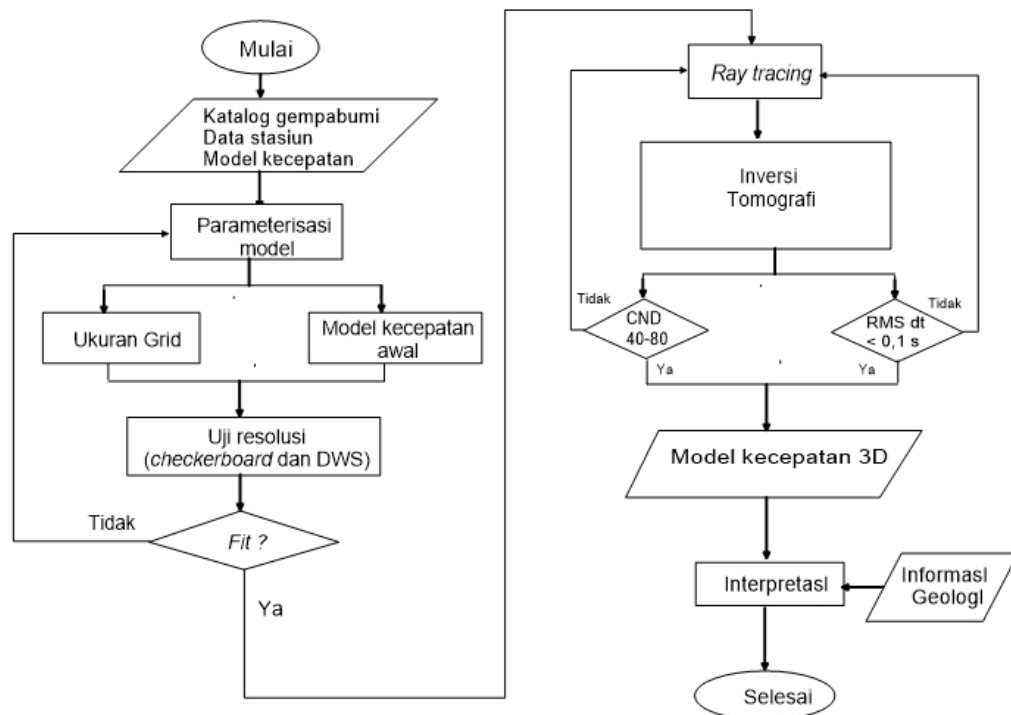
Data dan Diagram Alir Penelitian

Gambar 2 menunjukkan area penelitian, distribusi kejadian gempa serta sebaran stasiun dalam penelitian ini. Penelitian ini menggunakan sejumlah 3.893 kejadian gempa bumi dan 28 stasiun yang mencakup wilayah Jawa Timur dan sekitarnya. Data-data gempa tersebut merupakan rekaman yang dilakukan BMKG pada periode April 2009 hingga Desember 2017. Wilayah penelitian melingkupi koordinat 5°LS-2°LS dan 119°BT-116°BT.

Uli dkk: Identifikasi Struktur Kerak Di Bawah Permukaan Jawa Timur Berdasarkan Hasil Tomografi Seismik Menggunakan Model Kecepatan Gelombang P dan Gelombang S



Gambar 2. Peta daerah penelitian, distribusi data gempa dan stasiun.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3. Pengolahan data secara garis besar diawali dengan menentukan parameter model yang akan digunakan. Penelitian ini menggunakan *grid* berukuran 30 km x 30 km dan model kecepatan awal dari *ak135* [14]. Tahap selanjutnya adalah melakukan uji resolusi dari parameter yang digunakan menggunakan uji *checkerboard* dan *Derivative Weight Sum* (DWS). Uji resolusi *Derivative Weight Sum* (DWS) digunakan untuk mengetahui jumlah rata-rata relatif

Metode Tomography Seismic Double Difference

Pengolahan data menggunakan metode *tomography seismic double difference* (*tomoDD*). *TomoDD* dapat menghasilkan struktur kecepatan tiga dimensi gelombang P dan gelombang S untuk indentifikasi bawah permukaan [12]. Pada metode ini waktu tiba gelombang (T) dari suatu gempa i menuju stasiun seismik k dinyatakan dalam persamaan (1) berikut

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \quad (1)$$

dengan τ^i merupakan waktu kejadian gempa i , u menunjukkan medan *slowness* dan ds adalah elemen panjang lintasan penjalaran gelombang. Persamaan 1 menunjukkan hubungan yang non-linier antara waktu tiba gelombang dan lokasi *event*. Oleh karena itu perlu dilakukan linearisasi dengan mengaplikasikan ekspansi deret Taylor sehingga didapatkan hubungan linier antara residual waktu tempuh (r_k^i) dengan perturbasi hiposenter dan parameter model kecepatan pada persamaan (2).

$$r_k^i = \sum_{l=1}^3 \frac{\delta T_k^i}{\delta x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_l^k \delta u ds \quad (2)$$

dengan menghitung selisih Persamaan (2) dengan persamaan yang serupa untuk kejadian gempa j yang terekam pada stasiun k akan diperoleh,

gelombang yang melintas di suatu titik *grid*. Semakin besar nilai DWS menunjukkan nilai resolusi pada suatu wilayah semakin baik. Uji *checkerboard* digunakan sebagai uji resolusi pendukung untuk mengetahui parameter-parameter yang digunakan dalam proses inversi tomografi sudah cukup baik atau belum. Jika hasil uji *checkerboard* masih jauh dari yang diharapkan, maka masih ada parameter yang perlu disesuaikan. Tahap terakhir adalah proses inversi tomografi untuk mendapatkan model kecepatan 3D untuk kemudian diinterpretasikan.

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\delta T_k^i}{\delta x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_l^k \delta u ds - \sum_{l=1}^3 \frac{\delta T_k^j}{\delta x_l^j} \Delta x_l^j - \Delta \tau^j - \int_l^k \delta u ds \quad (3)$$

dengan mengasumsikan bahwa kedua gempa ini saling berdekatan sehingga menyebabkan *raypath* dari kedua gempa ini hampir sama dengan struktur kecepatan diketahui, maka Persamaan (3) dapat disederhanakan dan diperoleh

$$dr_{kij} = r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\delta T_k^i}{\delta x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i - \sum_{l=1}^3 \frac{\delta T_k^j}{\delta x_l^j} \Delta x_l^j - \Delta \tau^j \quad (4)$$

Persamaan (4) ini dikenal sebagai persamaan *double difference* [13]. Maka, perbedaan antara waktu tempuh observasi dan kalkulasi dalam komputasi metode *tomoDD* ditulis dengan persamaan berikut,

$$dr_{kij} = r_k^i - r_k^j = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{cal} \quad (5)$$

dengan $(T_k^i - T_k^j)^{obs}$ merupakan selisih waktu tiba observasi yang dihitung dari data katalog waktu tempuh, sedangkan $(T_k^i - T_k^j)^{cal}$ merupakan selisih waktu tiba yang diperoleh dari kalkulasi berdasarkan model kecepatan yang digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

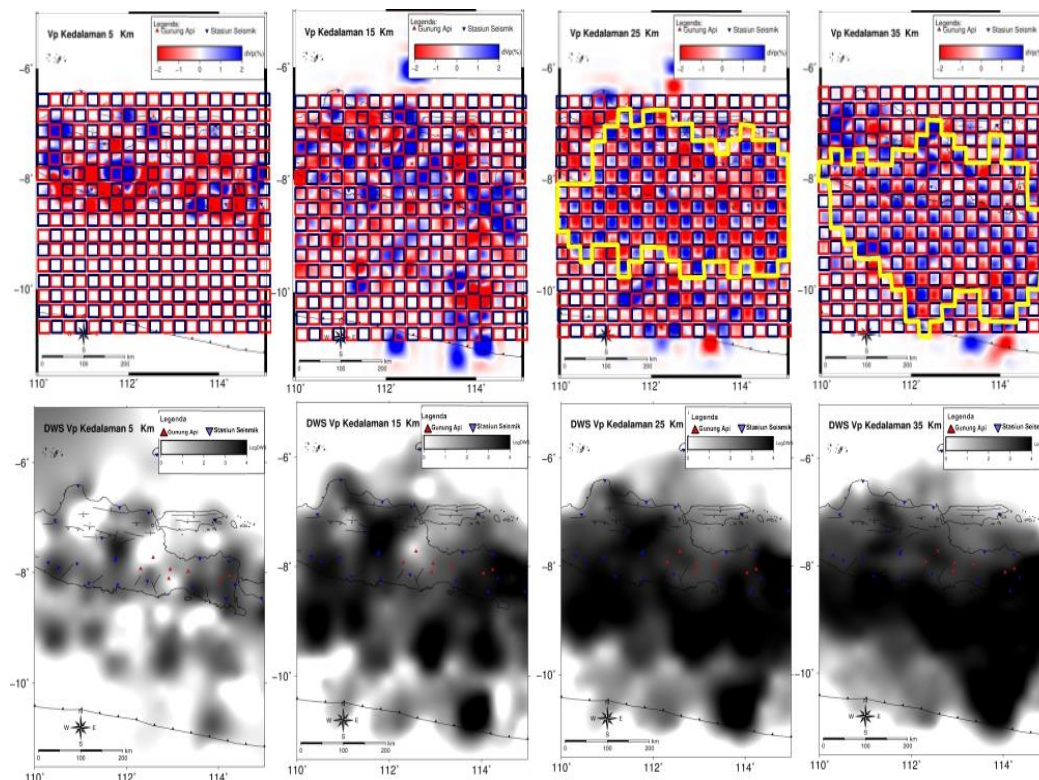
Uji Resolusi

Gambar 4 menunjukkan hasil uji resolusi *checkerboard* dan DWS untuk kecepatan gelombang P pada kedalaman 5 km, 15 km, 25 km, dan 35 km (berurutan dari kiri ke kanan). Hasil uji resolusi *checkerboard* dan DWS pada kedalaman yang sama untuk kecepatan gelombang S ditunjukkan oleh Gambar 5.

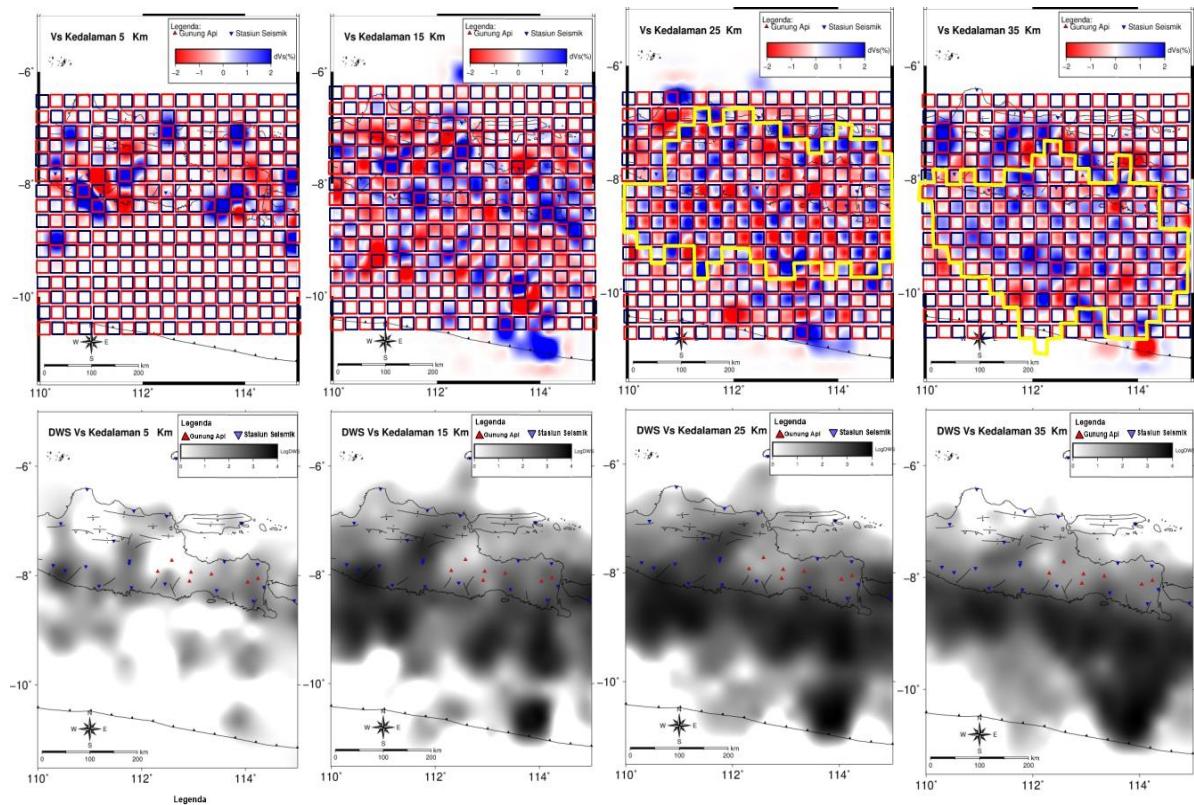
Pengujian *checkerboard* dilakukan dengan membuat model papan catur dari model kecepatan awal gelombang P dan gelombang S yang diberi perturbasi $\pm 2\%$. Nilai DWS diplot menggunakan skala logaritmik dari nilai 0 hingga 4. Berdasarkan hasil uji resolusi terlihat bahwa pada kedalaman 5 km hanya beberapa area di Jawa Timur yang memiliki nilai DWS tinggi dengan nilai log 4, yaitu Jawa Timur bagian tengah dan Jawa Timur sisi timur. Pada

kedalaman 15 km, 25 km dan 35 km resolusi DWS semakin menguat dan cakupan wilayahnya semakin meluas. Ketika dikorelasikan dengan uji *checkerboard*, hasil uji resolusi terbaik terdapat pada kedalaman 25 km yang dibatasi oleh garis berwarna kuning. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sumber gempa pada daerah penelitian didominasi oleh gempa bumi dangkal pada kedalaman antara 5 km hingga 35 km, sehingga sebagian besar jejak penjalaran gelombang dari sumber ke stasiun melewati area tersebut.

Hasil uji resolusi untuk kecepatan gelombang S menunjukkan pola yang serupa dengan gelombang P, tetapi resolusinya tidak sebaik kecepatan gelombang P. Hal ini disebabkan karena jumlah fase gelombang P lebih banyak, yaitu sebanyak 36.860 data. Sementara, jumlah fase gelombang S terbatas hanya 13.488 data.



Gambar 4. Hasil uji resolusi *checkerboard* dalam skala perturbasi $\pm 2\%$ (atas) dan hasil uji resolusi DWS dalam skala Log (bawah) untuk kecepatan gelombang P pada kedalaman 5 km, 15 km, 25 km, dan 35 km (berurutan dari kiri ke kanan).



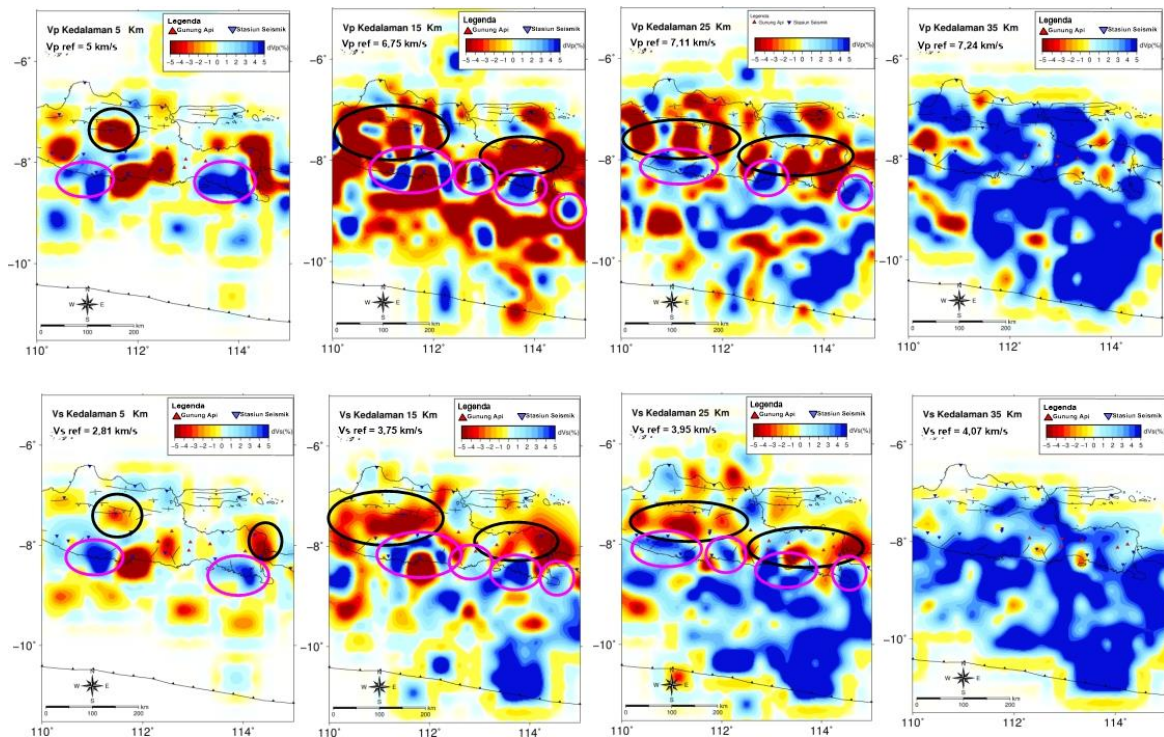
Gambar 5. Hasil uji resolusi *checkerboard* dalam skala perturbasi $\pm 2\%$ (atas) dan hasil uji resolusi DWS dalam skala Log (bawah) untuk kecepatan gelombang S pada kedalaman 5 km, 15 km, 25 km, dan 35 km (berurutan dari kiri ke kanan).

Hasil Tomogram

Penelitian ini menyajikan hasil tomogram penampang horizontal model kecepatan gelombang P dan gelombang S yang ditunjukkan Gambar 6. Hasil dari pemodelan dinyatakan dalam perturbasi $\pm 5\%$ terhadap kecepatan awal satu dimensi *ak135* [14]. Warna merah

merepresentasikan anomali kecepatan negatif minimum (-5%) untuk gelombang P dan gelombang S, sementara warna biru merepresentasikan anomali positif maksimum ($+5\%$). Penampang horizontal disajikan pada kedalaman 5 km, 15 km, 25 km dan 35 km (berurutan dari kiri ke kanan).

Uli dkk: Identifikasi Struktur Kerak Di Bawah Permukaan Jawa Timur Berdasarkan Hasil Tomografi Seismik Menggunakan Model Kecepatan Gelombang P dan Gelombang S



Gambar 6. Hasil tomogram penampang horizontal untuk gelombang P dan gelombang S pada kedalaman 5 km, 15 km, 25 km dan 35 km Lingkaran hitam menunjukkan anomali kecepatan negatif. Lingkaran ungu menunjukkan anomali kecepatan positif.

Berdasarkan hasil tomogram terlihat bahwa pada kedalaman 5 km citra tomografi di bagian tengah wilayah Jawa Timur didominasi oleh anomali kecepatan negatif untuk gelombang P maupun gelombang S, ditunjukkan dengan lingkaran hitam pada Gambar 6. Anomali negatif tersebut dapat diindikasikan sebagai lapisan sedimen yang mengisi Zona Kendeng [7,10]. Lapisan sedimen memiliki kepadatan dan densitas yang rendah, sehingga ditandai oleh kecepatan gelombang seismik yang lebih rendah dibandingkan sekitarnya. Anomali kecepatan negatif juga terlihat di sisi selatan Jawa Timur yang kemungkinan disebabkan oleh deposit vulkaniklastik dari zaman Miosen Tengah [10]. Sementara itu, anomali kecepatan positif pada kedalaman ini yang ditunjukkan oleh lingkaran berwarna ungu diasosiasikan dengan batuan dasar berumur tua di Zona Pegunungan Selatan. Batuan dasar memiliki struktur yang lebih kompak dengan densitas yang lebih tinggi, oleh

karena itu kecepatan gelombang seismik lebih cepat dibandingkan area sekitarnya. Hasil ini konsisten dengan hasil penelitian yang dilakukan terdahulu yang menunjukkan Zona Pegunungan Selatan dominan menunjukkan anomali Bouguer yang lebih tinggi dibandingkan area disekelilingnya, artinya zona tersebut terdiri dari batuan dengan densitas yang tinggi [10].

Pada kedalaman 15 km dan 25 km citra tomografi di bagian tengah Jawa Timur didominasi oleh anomali kecepatan negatif yang berasosiasi dengan keberadaan busur gunung berapi aktif. Beberapa penelitian sebelumnya mengasosiasikan anomali kecepatan negatif pada kedalaman ini sebagai aliran fluida yang berasal dari hasil partial melting aktivitas tektonik [2,15]. Kecepatan gelombang seismik dipengaruhi oleh kepadatan material. Material berbentuk padat memiliki kecepatan gelombang seismik yang tinggi, saat material tersebut terpanaskan dan perlahan meleleh maka

kecepatan gelombang semakin berkurang. Kecepatan gelombang P akan berkurang secara drastis saat material berubah fase sepenuhnya menjadi cair, sementara gelombang S tidak dapat menjalar ketika bertemu fase ini [16].

Pada kedalaman 35 km citra tomografi menunjukkan anomali kecepatan positif yang mendominasi baik pada untuk gelombang P maupun gelombang S. Lapisan ini diinterpretasikan sebagai zona peralihan dari kerak menuju mantel atas. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wölbern dan Rumpker (2015) yang menyatakan bahwa lapisan kerak di Jawa Timur memiliki ketebalan kurang lebih 30 km hingga 33 km [17].

KESIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi struktur lapisan kerak di bawah permukaan Jawa Timur menggunakan metode tomografi seismik berdasarkan model kecepatan gelombang P dan gelombang S. Anomali kecepatan negatif pada kedalaman 5 km di bagian tengah Jawa Timur diasosiasikan dengan lapisan sedimen yang mengisi cekungan di Zona Kendeng dan deposit vulkaniklastik di Zona Pegunungan Selatan. Sedangkan anomali kecepatan positif yang dominan di Zona Pegunungan Selatan diidentifikasi sebagai Zona peralihan antara lapisan kerak dan mantel atas di Jawa Timur terdeteksi pada kedalaman 35 km di bawah permukaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada BMKG atas data yang disediakan untuk penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada reviewers yang telah memberikan masukan untuk perbaikan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. B. Hamilton, *Tectonics of the Indonesian Region*, 4th ed. U.S Geological Survey : United States, 1979.
- [2] S. Widiyantoro, J. D. Pesicek, and C. H. Thurber, "Subducting Slab Structure Below The Eastern Sunda Arc Inferred from Non-Linear Seismic Tomographic Imaging", *Geological Soc., London, Special Publications*, Vol. 355, pp. 139-155, 2011.
- [3] A.D. Nugraha, P. Supendi, H.A. Shiddiqi, S. Widiyantoro, "Unexpected Earthquake of June 25th, 2015 in Madiun, East Java", *AIP Conference Proceedings*, vol. 1730, 2016.
- [4] R. Dobry, D. Borcherdt, C.B. Crouse, I.M. Idriss, W.B. Joyner, G.R. Martin, M.S. Poer, E.E. Rinne, dan R.B. Seed, "New Site Coefficient and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provision", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, no.1, pp. 41-67, 2000.
- [5] R. Meissner, *The Continental Crust A Geophysical Approach*, 3rd ed. United Kingdom: Academic Press, Inc, 1986.
- [6] M.R. Setiawan, *Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Zona Subduksi dan Busur Gunungapi Jawa Timur Berdasarkan Analisis Data Gravitasi*, Program Studi Ilmu Fisika, Universitas Gajah Mada : Yogyakarta, 2015.
- [7] S. Bahri, W. Suryanto, D. Ngadmanto, "Sediment and Crustal Structure Beneath East Kalimantan and East Java, Indonesia From Receiver Function", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.1825, pp.1-6, 2021.
- [8] D. Zhao, *Multiscale Seismic Tomography*. Springer: Japan, 2015.
- [9] R.W.V. Bemmelen, *The Geology of Indonesia*, Vol. 1A, Government Printing Office :The Hague, 1949.
- [10] H.R. Smyth, R. Hall, G.J. Nichols, "Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: The stratigraphic record of eruptions on an active

- continental margin”, *Geological Society of America Special Papers*, Vol. 436, No. 10, pp. 199–222, 2008.
- [11] H. Smyth, R. Hall, J.P. Hamilton, and P. Kinny, “East Java: Cenozoic basins, volcanoes and ancient basement”, *Proc. Indonesian Petroleum Association Annual Convention 30th*, p. 251–266, 2005.
- [12] H. Zhang, C.H. Thurber, “Double Difference Tomography: The Method and Its Application to the Hayward Fault, California” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 5, pp.1875-1889, 2003.
- [13] F. Waldhauser, “*HypoDD - A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations*”, U.S. :Geology Survey, 2001.
- [14] B.L.N. Kennett, E.R. Engdahl, and R. Buland, “Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times”, *Geophysical Journal International*, Vol. 122, pp. 108–124, 1995.
- [15] I. Koulakov, M. Bohm, G. Asch, B.G. Luhr, A. Manzananares, K.S. Brotopuspito, P. Fauzi, M. A. Purbawinata, N.T. Puspito, A. Ratdomopurbo, H. Kopp, W. Rabbel, E. Shevkunova, “P and S Velocity Structure of The Crust and The Upper Mantle Beneath Central Java From Local Tomography Inversion”, *Journal of Geological Research*, Vol. 112, pp. 1-19, 2007.
- [16] J.H. Schon, *Physical Properties of Rocks*. Vol 8, Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [17] I. Wölbern and G.Rümpker, “Crustal thickness beneath Central and East Java (Indonesia) inferred from P receiver functions”, *Journal of Asia Earth Sciences*, Vol.115, pp 69-79, 2016.