

Modeling Lithosphere Structure in Central Java using Local Events and Tomography)

M. Yasir¹, P. T. Brilianti¹, S. S. Angkasa¹, S. Widyanti¹, I. Herawati¹, W. Pranowo¹, S. Satiawan¹, S. K. Suhardja¹, A. Priyono², S. Widiyantoro^{2,3}, M. Ramdhan⁴ dan A. Bilqis¹

¹Faculty of Exploration and Production Technology, University of Pertamina, Jl. Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220, Indonesia

²Global Geophysics Research Group, Faculty of Mining and Petroleum Engineering Institute of Technology Bandung, Jalan Ganesha No. 10, Bandung 40132, Indonesia

³Faculty of Engineering, Maranatha Christian University Bandung, Jalan Surya Sumantri No 65, Bandung 40164, Indonesia

⁴Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics, Jalan Angkasa I, No. 2, Kemayoran, Jakarta, Indonesia

*Email: s4ndy104@gmail.com

Submit: 10 April 2022; Revised: 7 Agustus 2022; Accepted: 13 September 2024

Abstrak: Pengaturan tektonik pulau Jawa sangat dikendalikan oleh tumbukan lempeng Indo-Australia yang mensubduksi lempeng Eurasia. Tingginya aktivitas tumbukan lempeng Eurasia dan Indo-Australia seringkali menyebabkan terjadinya gempa megathrust, munculnya *arc magmatism* yang meliputi letusan gunung berapi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola tektonik di bawah Jawa Tengah berdasarkan inversi tomografi gelombang-P. Metode *fast-marching* digunakan sebagai *ray tracing* dan *subspace inversion* untuk mencitrakan model kecepatan bawah permukaan hingga kedalaman 150 km. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data katalog yang berasal dari jaringan seismometer seperti MERAMEX yang terpasang di sekitar Jawa Tengah dan DOMERAPI yang terpasang di sekitar Gunung Merapi dan Gunung Merbabu. Kami juga menyertakan data *event* yang dikumpulkan dari Pusat Seismologi Internasional. Secara total, kami memproses 563 kejadian gempa untuk menggambarkan struktur kecepatan di bawah Jawa Tengah. Model *checkerboard* menunjukkan bahwa resolusi yang baik dapat diidentifikasi pada kedalaman dangkal, termasuk lepas pantai selatan Jawa yang dikontribusi dari data Seismometer Dasar Laut. Pada sumbu vertikal, model resolusi yang baik dapat diharapkan hingga kedalaman 150 km. Model gelombang *P* saat ini menunjukkan zona kecepatan rendah yang berbeda di bawah Gunung Merapi yang dapat dilihat hingga kedalaman 40 km, menunjukkan kemungkinan reservoir magma dalam yang terpisah. Di sebelah selatan kawasan Gunung Merapi juga menunjukkan model kecepatan rendah yang mungkin berhubungan dengan pegunungan di bagian selatan. Selain itu, bagian utara Gunung Merapi menampilkan model kecepatan yang sangat rendah ke arah Timur dan Barat dengan anomali di Bagian Timur tampaknya memiliki perluasan yang lebih dalam hingga kedalaman 50 km. Kami menghubungkan anomali ini dengan Anomali Merapi Lawu dan Cekungan Kendeng. Hasil kami menunjukkan hasil yang serupa dengan model tomografi sebelumnya di wilayah ini.

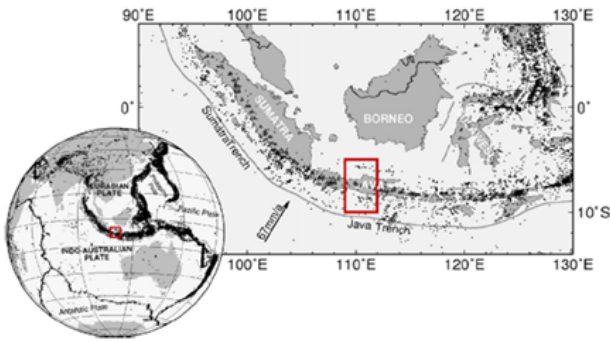
Kata kunci: tomografi, subduksi, *partial melting*, tektonik, Jawa Tengah

Abstract: The tectonic setting of the island of Java is strongly controlled by the collision of the Indo-Australian Plate, which subducts the Eurasian plate. The high collision activity of the Eurasian and Indo-Australian plates often causes megathrust earthquakes and the emergence of *arc magmatism*, which includes volcanic eruptions. This study aims to determine the tectonic pattern under Central Java based on *P-wave inversion tomography*. The *fast-marching* method was used for *ray tracing* and *subspace inversion* to image the subsurface velocity model to a depth of 150 km. The data used in this study is catalog data originating from seismometer networks such as MERAMEX, which is installed around Central Java, and DOMERAPI, which is installed around Mount Merapi and Mount Merbabu. We have also included event data collected by the International Seismological Center. In total, we processed 563 earthquake events to describe the velocity structure under Central Java. The checkerboard model shows that good resolution can be identified at shallow depths, including off the southern coast of Java, contributed by seabed seismometer data. On the vertical axis, a good resolution model can be expected to a depth of 150 km. The current *P* wave model shows a distinct low-velocity zone beneath Mount Merapi that can be seen to a depth of 40 km, suggesting a possible separate deep magma reservoir. The south of the Mount Merapi area also shows a low-speed model that may be related to the mountains in the south. In addition, the northern part of Mount Merapi displays very low-velocity models to the east and west, with the anomaly in the east having a deeper extension to a depth of 50 km. We attribute this anomaly to the Merapi Lawu Anomaly and the Kendeng Basin. Our results show similar results to previous tomographic models in this region.

Keywords: tomography, subduction, *partial melting*, tectonic, Central Java

1 PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah kepulauan yang terbentuk akibat interaksi antara 3 lempeng tektonik besar yaitu lem-



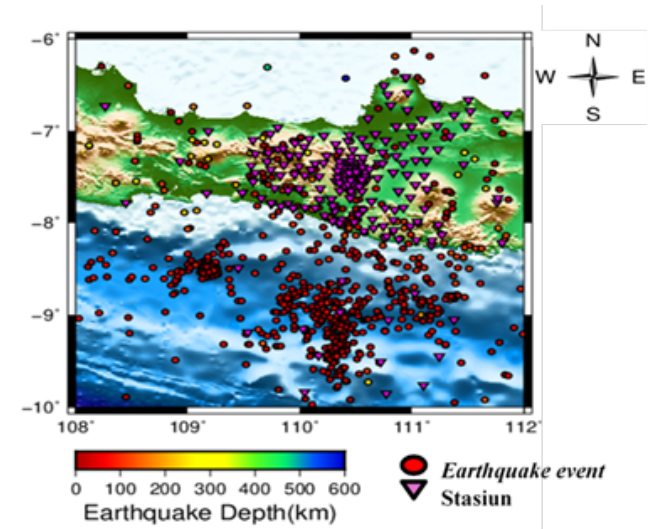
Gambar 1. Peta seismisitas wilayah penelitian (Bohm dkk., 2013)

peng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Tingginya aktivitas pergerakan ketiga lempeng ini mengakibatkan banyaknya Gunung-gunung berapi yang terbentuk di sepanjang Pulau Jawa hingga Sumatra sehingga Indonesia disebut sebagai wilayah *ring of fire*. Pergerakan 3 lempeng tersebut bergerak cukup cepat, yang dibuktikan pada hasil penelitian Hall (1995), terkait rekonstruksi lempeng, pada awalnya sebelum 50 juta tahun yang lalu Pulau Sumatera dan Pulau Jawa merupakan satu kepulauan yang tergabung kemudian setelah 45 juta tahun terpisah akibat proses *roll-back* dari utara ke arah selatan. Proses ini juga menyebabkan perubahan jalur subduksi yang memanjang ke arah timur Pulau Jawa.

Berdasarkan peta seismisitas Bohm dkk. (2013) pada Gambar 1, diketahui bahwa gempa bumi di daerah Jawa disebabkan oleh aktivitas lempeng dengan tingkat konvergensi lempeng antara Indo-Australia dan Eurasia adalah sebesar 67 mm/tahun dengan usia lempeng yang diperkirakan mencapai 80-100 Ma. Dari distribusi gempa bumi dalam katalog global, kedalaman lempeng di bawah Pulau Jawa adalah sekitar 100-120 km dengan sudut kemiringan slab hingga 70-80 derajat dari kedalaman 50 km ke arah utara Jawa (Koulakov dkk., 2007). Tingginya aktivitas tumbukan lempeng Eurasia dan Indo-Australia sering menimbulkan gempa megathrust yang mengakibatkan tingginya aktivitas sejumlah gunung berapi di wilayah Pulau Jawa khususnya Jawa Tengah. Salah satu gunung yang paling aktif saat ini adalah Gunung Merapi.

Gunung Merapi merupakan gunung berapi paling aktif di Indonesia, yang memiliki aktivitas vulkanisme mulai 40.000 tahun lalu. Gunung Merapi merupakan salah satu gunung paling aktif di dunia. Erupsi Gunung Merapi terjadi dalam siklus 4 – 6 tahun sekali (Ramadhan dkk., 2019). Dari pertengahan tahun 1500 sampai tahun 2000, setidaknya terdapat 32 letusan dari 61 letusan yang menyebabkan terjadinya banjir lahar (Suhardja dkk., 2020). Selama 20 tahun terakhir, tercatat 2 erupsi paling besar yaitu pada tahun 2006 dan puncaknya tahun 2010 dengan kekuatan 6 Skala Richter (SR) pada kedalaman 35 km. Erupsi dari gunung Merapi didominasi oleh aliran piroklastik yang disebabkan oleh runtuhnya kubah lava (Ramadhan dkk., 2017).

Berdasarkan data kegempaan, daerah Jawa Tengah sering mengalami gempa merusak dimana memiliki kesamaan letak geografis yang sama dengan zona tumbukan lempeng. Banyak studi terkait aktivitas tumbukan lempeng dilakukan dengan menggunakan data seismisitas. Dari data seismisitas



Gambar 2. Katalog gabungan data MERAMEX, DOMERAPI-BMKG dan BPPTKG dengan jumlah 255 stasiun seismik dan 563 event.

dapat diketahui batas atau jalur dari zona tumbukan antar lempeng tersebut. Studi menggunakan data seismisitas dapat dilakukan dengan berbagai macam metode, salah satunya adalah metode tomografi. Tomografi merupakan suatu metode yang digunakan untuk mencitrakan kondisi bawah permukaan berdasarkan efek penjalaran gelombang seismik. Gelombang seismik ini dianalisa berdasarkan waktu tempuh dan panjang lintasan gelombang gempa ke stasiun perekam. Dari data waktu tempuh gelombang seismik dibuat model kecepatan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Pada penelitian ini, penulis melakukan studi tomografi di area Gunung Merapi dengan menggunakan metode *ray tracing fast marching* dimana jenis *ray tracing* ini mampu mengestimasi nilai suatu jarak dari satu titik awal ke titik lainnya di segala arah. Data yang digunakan merupakan data katalog gempa di daerah Merapi yang terdiri dari lokasi gempa, lokasi stasiun, serta waktu tempuh gelombang seismik. Data ini diproses menggunakan Software *fmtomo v1.0* menggunakan inversi *subspace* untuk mendapatkan model kecepatan perturbasi dengan nilai residual yang minimum. Jenis gelombang yang digunakan pada penelitian adalah gelombang *P* karena selain lebih cepat terekam pada stasiun penerima, juga dapat merambat pada berbagai medium baik gas, *solid* maupun *liquid*. Hal ini sesuai dengan kondisi daerah penelitian dalam hal ini di daerah Gunung Merapi yang berasosiasi dengan struktur *thermal*. Hasil dari tomografi *fast marching* diharapkan mampu memberikan gambaran struktur tektonik Gunung Merapi dan sekitarnya.

2 DATA DAN METODE

Pada penelitian ini, data yang digunakan merupakan katalog dari gabungan data MERAMEX, DOMERAPI-BMKG dan BPPTKG dengan jumlah 255 stasiun seismik. Sebanyak 563 event yang terekam dengan kedalaman maksimum 160 km. Batas kedalaman ini dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya terkait kedalaman subduksi yang terlihat pada kedalaman 50-100 km (Koulakov dkk., 2007). Data ini dio-

Table 1. Model Kecepatan Gelombang P dari AK135 (Kennett dkk., 1995).

Depth (km)	Vp (km/s)
8	4.90
16	5.30
24	6.90
30	7.10
77	7.80
120	8.05
160	8.30

lah menggunakan software fntomov1.0. dengan menghitung waktu tempuh gelombang seismik. Hasil dari pengolahan data ini berupa model kecepatan perturbasi gelombang P di bawah permukaan. Gambar 2 menunjukkan peta seismisitas dan persebaran stasiun seismik pada daerah penelitian.

Pada penelitian ini, *software* yang digunakan untuk mengolah data gempa tersebut adalah fntomov1.0. *Software* ini menggunakan algoritma *ray tracing fast marching* untuk mengestimasi jarak dari satu titik awal ke titik lainnya di segala arah (Sethian, 1996). Penentuan nilai ini dapat dianalisis berdasarkan propagasi gelombang seismik. Setiap terjadi proses propagasi gelombang, algoritma *fast marching* dapat menghitung dan menyimpan nilai waktu tempuh dari suatu titik terhadap titik awal. nilai tersebut disimpan sebagai properti dan digunakan untuk mengestimasi titik-titik di sekitarnya. Metode *ray tracing fast marching* secara sistematis mengestimasi waktu tempuh area *downwind* atau area yang tidak dilewati oleh gelombang dari nilai – nilai yang diketahui menggunakan persamaan eikonal dapat ditulis:

$$|\nabla_x T| = S(x) \quad (1)$$

Keterangan:

∇_x = Operator gradien (faktor geologi)

T = Travel time

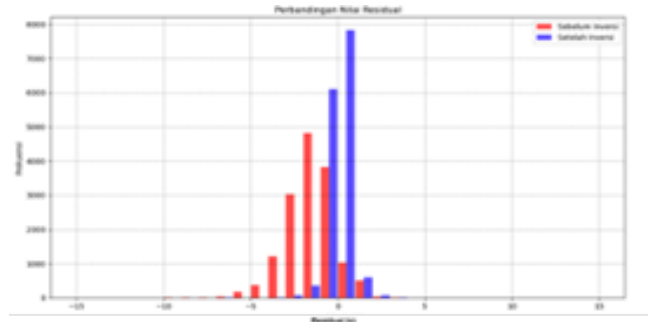
$S(x)$ = Slowness

Persamaan Eikonal diatas menyatakan bahwa besar gradien waktu tempuh pada setiap titik di sepanjang muka gelombang berbanding terbalik dengan kecepatan gelombang pada titik itu. Artinya waktu tempuh antar titik berbeda-beda tergantung dari operator atau medium yang dilalui oleh gelombang seismik.

Metode *ray tracing fast marching* menggunakan *grid* dengan ukuran dan interval yang sama berdasarkan distribusi gempa dan stasiun. Untuk mengetahui model kecepatan daerah Merapi digunakan model kecepatan awal referensi 1D global AK135 yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Dari model kecepatan diatas, dapat diketahui selisih/residual antara data observasi dan data kalkulasi, setelah itu dilakukan proses inversi. Proses inversi dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan akhir dengan data waktu tempuh hasil kalkulasi secara iteratif. Hasil akhir dari inversi tomografi berupa nilai persen relatif dari kecepatan awal (kecepatan perturbasi). Pada penelitian ini digunakan beberapa parameter inversi seperti *damping*, *smoothing*, dan iterasi untuk menyeimbangkan inversi dan meminimalisir *error*.

Dalam FMM digunakan fungsi objektif, dimana terdapat parameter *damping* dan *smoothing* untuk menyeimbangkan inversi dan meminimaliskan *error* sehingga permasa-

**Gambar 3.** Histogram perbandingan nilai residual sebelum dan sesudah inversi.

lahan inversi dapat diselesaikan dengan fungsi $S(m)$, dimana m merupakan parameter model. Fungsi objektif diungkapkan dalam rumus (Rawlinson and Sambridge, 2005):

$$S(m) = (g(m) - d_{obs})^T C_d^{-1} (g(m) - d_{obs}) + \dots \quad (2)$$

$$\dots \epsilon (m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0) + \eta m^T D^T D m$$

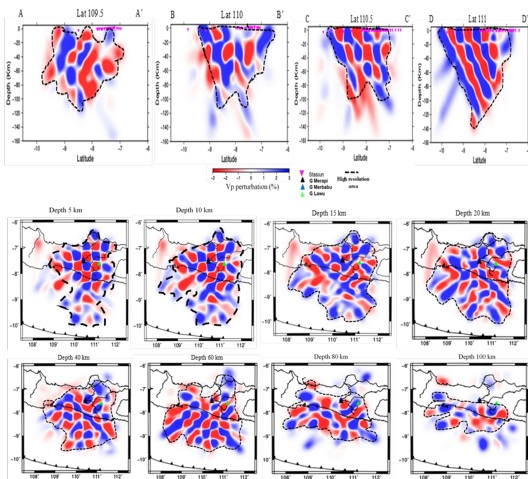
dimana $g(m)$ merupakan residual kalkulasi, d_{obs} merupakan residual observasi, C_d merupakan matriks data kovarians, m_0 merupakan model referensi, C_m merupakan matriks model kovarians, dan D merupakan operator *smoothing*, ϵ dan η merupakan parameter *damping* dan *smoothing*. *Damping* atau redaman merupakan parameter yang digunakan membatasi perubahan model kecepatan perturbasi atau kecepatan akhir terhadap kecepatan awal serta *smoothing* merupakan parameter inversi yang digunakan untuk memperhalus batas-batas kecepatan yang berbeda pada model.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

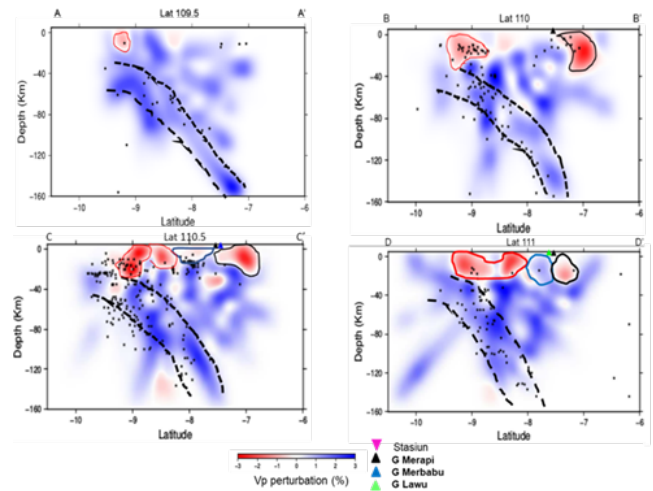
Berdasarkan model tomografi yang didapat, salah satu cara untuk memeriksa apakah model kecepatan sudah mendekati model bawah permukaan adalah dengan mengamati perbedaan antara waktu tempuh kalkulasi dan waktu tempuh observasi. Gambar 3 menunjukkan histogram waktu tempuh antara model awal dan model akhir. Sebelum inversi, sebagian besar data residual negatif dengan rata-rata sekitar -0,4 detik, dan data residual setelah inversi menunjukkan histogram yang lebih terpusat pada 0,1 detik, menunjukkan model kecepatan telah optimal dan mendekati model kecepatan sebenarnya. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh dari parameter inversi yang meminimalkan *error* dari perhitungan waktu tempuh seperti parameter *smoothing* dan *damping*. Berikut hasil histogram dari data residual sebelum dan sesudah inversi.

Uji resolusi *checkerboard* diperlukan untuk menguji ketahanan model karena kondisi yang tidak seimbang antara parameter yang tidak diketahui dan kumpulan data yang tersedia dapat menghasilkan solusi non-unik dalam proses inversi sehingga uji *checkerboard* membagi model kecepatan menjadi beberapa bagian kecepatan tinggi dan rendah. Berikut hasil *checkerboard* di area penelitian baik secara horizontal maupun secara vertikal.

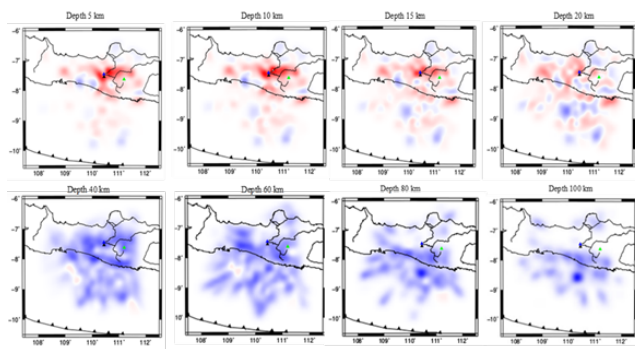
Berdasarkan model *checkerboard* diatas, sebagian besar wilayah menunjukkan resolusi yang baik hingga kedalaman 60 km meskipun efek *smearing* mulai muncul dari kedalaman 25 km di beberapa area yang membuat resolusi model



Gambar 4. Model checkerboard secara horizontal dan vertikal. Irisan vertikal diambil pada latitude 109.5, 110, 110.5, dan 111 derajat.



Gambar 6. Model tomografi secara vertikal.



Gambar 5. Model tomografi secara horizontal.

menjadi menurun. Kualitas resolusi mulai menurun dari kedalaman 80 km hingga mencapai kedalaman maksimum 100 km. Gambar 5 dan 6 menampilkan semua tomogram gelombang P yang dimodelkan di wilayah ini dalam irisan horizontal dan vertikal. Model kedalaman paling dangkal menunjukkan dominasi zona kecepatan rendah dan lebih dalam dari 40 km menunjukkan pola kecepatan tinggi.

Berdasarkan model tomografi secara horizontal, terlihat adanya zona kecepatan gelombang P yang rendah digambarkan sebagai warna merah di sekitar wilayah Gunung Merapi mulai dari kedalaman 5 hingga 20 km. zona ini biasanya berkorelasi dengan zona-zona yang memperlambat penalaran gelombang. Sedangkan pada kedalaman 40 km hingga 140 km menunjukkan kecepatan gelombang P yang tinggi ditandai dengan warna biru yang berkorelasi dengan zona material yang cukup padat. Dari model diatas dapat diketahui bahwa semakin bertambahnya kedalaman, kualitas data yang didapatkan juga semakin berkurang karena gelombang yang menjalar pada kedalaman tersebut lebih sedikit sehingga resolusi yang dihasilkan kurang baik.

Gambar 6 memperlihatkan rangkaian cross-section dari barat ke timur dengan hasil yang cukup baik. Dari model diatas, dapat dilihat di beberapa daerah antara latitude -9° sampai -8° dari kedalaman 5 sampai 30 km pada slice B, C dan D. Daerah kecepatan rendah lainnya juga dapat dilihat

pada latitude -7° di Kedalaman dangkal pada garis B, C, dan D. Model kecepatan cepat juga terlihat menunjam ke arah utara meskipun tidak begitu jelas. Plot kegempaan di atas tomogram terlihat menunjukkan pola kemiringan ke arah utara.

Berdasarkan model tomografi horizontal (Gambar 5), terlihat adanya anomali gelombang P yang rendah berwarna merah di sekitar wilayah Gunung Merapi mulai dari kedalaman 5 hingga 20 km. Anomali ini berkorelasi dengan zona-zona lemah seperti struktur termal maupun batuan vulkanik. Sementara itu, pada kedalaman 40 km hingga 140 km menunjukkan kecepatan gelombang P tinggi berwarna biru yang berkorelasi dengan zona material yang padat. Semakin bertambahnya kedalaman, kualitas data yang didapatkan juga semakin berkurang karena gelombang yang menjalar pada kedalaman tersebut lebih sedikit sehingga resolusi yang dihasilkan kurang baik.

Model tomografi horizontal diperkuat dengan hasil model secara vertikal di mana pada pemodelan ini dibuat 4 section arah utara-selatan yaitu pada bujur 109.5, 110, 110.5 dan 111. Penampang A menunjukkan anomali negatif di bagian selatan Pulau Jawa dari kedalaman 5-15 km, yang terkait dengan anomali lengan bawah laut yang berhubungan dengan sedimen laut (Bohm dkk., 2013). Penampang B menunjukkan anomali negatif di sebelah utara Gunung Merapi pada kedalaman dangkal 20 km yang diartikan sebagai zona partial melting (Koulakov dkk., 2007) sedangkan untuk kedalaman dangkal dikaitkan dengan zona cekungan Kendeng yang diisi dengan material sedimen. Pada penampang C, tepat di bawah dan bagian utara Gunung Merapi juga menunjukkan zona anomali rendah hingga kedalaman 30 km terkait dengan zona partial melting (Koulakov dkk., 2007) serta lapisan sedimen yang berasal dari Cekungan Kendeng. Selain itu juga terdapat anomali negatif di bagian selatan Gunung Merapi pada kedalaman dangkal hingga 15 km yang berhubungan dengan zona busur gunung bagian selatan di mana zona ini berhubungan dengan batuan vulkanik dan intrusi beku (Ramadhan dkk., 2019). Di penampang D, terdapat zona anomali negatif pada bagian utara Gunung Merapi yang merupakan zona MLA (Merapi Lawu Anomaly) yang berasosiasi dengan zona partial melting. Di bagian selatan

Gunung Merapi juga terdapat anomali positif yang merupakan busur gunung api selatan yang berkorelasi dengan intrusi batuan beku.

Daerah anomali kecepatan tinggi yang menunjam ke utara berkorelasi dengan lempeng Indo-Australia yang menunjam di bawah lempeng Eurasia, dengan pola penunjaman yang semakin curam ke arah timur. Sudut subduksi yang curam mungkin terkait dengan proses *rollback* dari utara ke selatan yang mengakibatkan perubahan jalur subduksi sehingga mempengaruhi aktivitas vulkanik di Jawa Tengah. Hasil pemodelan tomografi ini juga sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh Koulakov dkk. (2007), dimana terlihat anomali rendah pada kedalaman dangkal di sekitar Gunung Merapi yang berasosiasi dengan zona *partial melting*. Selain itu pada hasil *cross section*, terlihat pola subduksi pada kedalaman 40-50 km yang diikuti oleh pola gempa. Pola subduksi ini terlihat ke timur maka *slab subduksi* semakin curam ke arah selatan yang mengakibatkan gunung-gunung di bagian selatan Pulau Jawa menjadi relatif aktif dibandingkan dengan gunung-gunung di bagian utara yang terlihat dari pola anomali negatif pada model tomografi horizontal. Hal ini disebabkan oleh adanya *rollback* dari utara ke selatan yang mengakibatkan perubahan jalur subduksi sehingga mempengaruhi aktivitas Gunung api di Jawa Tengah.

Berdasarkan model tomografi menggunakan metode *fast marching*, hasil yang diperoleh sudah cukup baik jika dibandingkan dengan model tomografi Koulakov menggunakan metode tomografi simultan di mana tomografi simultan menggunakan jenis *ray tracing pseudo-bending* yang mengestimasi jarak pada medium tercepat. Dari anomali yang dihasilkan sudah sesuai dengan keadaan geologi. Model tomografi yang dihasilkan juga memiliki kualitas yang lebih baik dikarenakan jumlah data yang digunakan lebih banyak dibandingkan penelitian Koulakov dkk. (2007).

4 KESIMPULAN

Model tomografi menunjukkan hasil anomali gelombang *P* yang dimana zona MLA / *partial melting* di bawah Gunung Merapi, Cekungan Kendeng di Merapi bagian utara mengandung material sedimen, intrusi batuan beku di busur selatan pegunungan, dan anomali busur depan laut di selatan pulau Jawa. Anomali kecepatan tinggi dan sebaran kejadian gempa pada kedalaman lebih dari ± 40 km dapat merepresentasikan lempeng samudera yang menunjam dan meningkatkan sudutnya ke arah timur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah memberikan akses data katalog gempa sehingga penelitian ini berjalan dengan lancar. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sandy K. Suhardja, Bapak M. Ramdhan, dan rekan lainnya yang telah berkenan memberi dukungan sehingga penelitian ini dapat terwujud.

Pustaka

- Bohm, M., Haberland, C. and Asch, G. (2013): Imaging fluid-related subduction processes beneath central java (indonesia) using seismic attenuation tomography. *Tectonophysics*, **590**, 175–188, ISSN 0040-1951, doi:<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.021>.
- Hall, R. (1995): Plate tectonic reconstructions of the indonesian region. *Indonesian Petroleum Association, Proceedings 24th Annual Convention*, **24**, 71–84, jour. in SEAL.
- Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R. and Buland, R. (1995): Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, **122**(1), 108–124, ISSN 0956-540X, doi:[10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x).
- Koulakov, I. dkk. (2007): P and s velocity structure of the crust and the upper mantle beneath central java from local tomography inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**(B8), doi:<https://doi.org/10.1029/2006JB004712>.
- Ramdhan, M. dkk. (2017): Seismic travel-time tomography beneath merapi volcano and its surroundings: A preliminary result from domerapi project. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **62**(1), 012039, doi:[10.1088/1755-1315/62/1/012039](https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012039).
- Ramdhan, M. dkk. (2019): Detailed seismic imaging of merapi volcano, indonesia, from local earthquake travel-time tomography. *Journal of Asian Earth Sciences*, **177**, 134–145, ISSN 1367-9120, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.03.018>.
- Rawlinson, N. and Sambridge, M. (2005): The fast marching method: An effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media. *Exploration Geophysics*, **36**, 341–350, ISSN 0812-3985.
- Sethian, J.A. (1996): A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **93**(4), 1591–1595, ISSN 00278424.
- Suhardja, S., Widiyantoro, S., Métaxian, J.P., Rawlinson, N., Ramdhan, M. and Budi-Santoso, A. (2020): Crustal thickness beneath mt. merapi and mt. merbabu, central java, indonesia, inferred from receiver function analysis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **302**, 106455, ISSN 0031-9201, doi:<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106455>.