



Karakterisasi Spasial Struktur Bawah Permukaan Gunung Merapi dan Sekitarnya Menggunakan Tomografi Seismik

Spatial Characterization of Subsurface Structures Beneath Mount Merapi and Its Surroundings Using Seismic Tomography

Joshua Purba^{1*}, Riska Yulinda²

¹Gowa Geophysical Station, Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics (BMKG), Sulawesi Selatan, Indonesia

²Malang Geophysical Station, Agency for Meteorology Climatology and Geophysics (BMKG), Jawa Timur, Indonesia

*joshua.purba@bmkg.go.id

Received: 7 May 2025, Revised: 21 July 2025, Approved: 22 July 2025, Online: 17 August 2025

DOI: 10.33332/jgsm.geologi.v26i3.987

Abstrak- Aktivitas vulkanik intensif di kawasan Gunung Merapi memerlukan pemahaman mendalam terhadap struktur bawah permukaan, terutama dalam konteks mitigasi bahaya erupsi dan analisis sistem magmatik. Namun, keterbatasan resolusi spasial pada studi tomografi sebelumnya menyulitkan identifikasi detail struktur seperti reservoir magma dangkal, zona rekahan, dan sesar aktif yang berperan dalam suplai magma. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi struktur bawah permukaan Gunung Merapi dan wilayah sekitarnya secara spasial melalui tomografi seismik berbasis kecepatan gelombang P (V_p), gelombang S (V_s), dan rasio V_p/V_s . Data seismik lokal yang digunakan berasal dari jaringan *broadband* DOMERAPI dan BMKG, yang diolah menggunakan perangkat lunak LOTOS-13 dengan pemodelan inversi non-linier. Hasil inversi menunjukkan adanya zona anomali kecepatan rendah dengan rasio V_p/V_s tinggi pada kedalaman <6 km di bawah Merapi, yang diinterpretasikan sebagai reservoir magma dangkal yang kaya fluida. Zona transisi dan reservoir magma menengah teridentifikasi masing-masing pada kedalaman 6–12 km dan 13–16 km. Di bawah Gunung Merbabu, anomali kecepatan lebih lemah tanpa indikasi aktivitas magmatik signifikan, mencerminkan sistem vulkanik yang relatif tidak aktif. Selain itu, zona kecepatan rendah dan rasio V_p/V_s tinggi pada kedalaman 15–18 km di selatan Merapi dikaitkan dengan keberadaan Sesar Opak. Hasil studi ini memperkuat pemahaman mengenai dinamika sistem magmatik serta potensi seismotektonik di kawasan vulkanik Jawa Tengah.

Kata Kunci: Tomografi seismik, Gunung Merapi, Struktur bawah permukaan, rasio V_p/V_s , Reservoir Magma

Abstract- Intense volcanic activity in the Mount Merapi region necessitates a thorough understanding of its subsurface structure, particularly for eruption hazard mitigation and magmatic system analysis. However, limitations in spatial resolution from previous tomography studies have hindered detailed identification of features such as shallow magma reservoirs, fracture zones, and active faults responsible for magma transport. Therefore, this study aims to identify and spatially characterize the subsurface structure beneath Mount Merapi and its surroundings using seismic tomography based on P-wave velocity (V_p), S-wave velocity (V_s), and V_p/V_s ratio data. Local seismic data were obtained from the DOMERAPI and BMKG broadband networks and processed using the LOTOS-13 software with a non-linear inversion model. The results reveal a low-velocity anomaly zone with a high V_p/V_s ratio at depths of less than 6 km beneath Merapi, interpreted as a shallow, fluid-rich magma reservoir. A transition zone and an intermediate magma reservoir were identified at depths of 6–12 km and 13–16 km, respectively. Beneath Mount Merbabu, weaker velocity anomalies without significant magmatic signals indicate a relatively inactive volcanic system. Additionally, low-velocity and high V_p/V_s ratio zones at depths of 15–18 km south of Merapi are associated with the Opak Fault. These findings enhance our understanding of magmatic dynamics and seismotectonic potential in the Central Java volcanic region.

Keywords: Seismic tomography, Mount Merapi, Subsurface structure, V_p/V_s ratio, Magma reservoir

PENDAHULUAN

Latar belakang geologi Indonesia yang kompleks, terletak pada zona pertemuan tiga lempeng utama—Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik—menjadikan kepulauan ini sebagai salah satu wilayah dengan aktivitas seismik dan vulkanik tertinggi di dunia (Hall & Smyth, 2008; Hutchings & Mooney, 2021; Irsyam dkk., 2020; McCaffrey, 2009; Purba dkk., 2024). Tiga pertemuan lempeng ini telah melahirkan Busur Sunda, zona subduksi sepanjang 5.000 km yang menyebabkan seringnya terjadi gempa bumi dan pembentukan banyak gunung berapi aktif (Hall & Wilson, 2000; Katili, 1975; Purba dkk., 2025; Schlüter dkk., 2002; Smyth dkk., 2008). Diantara gunung-gunung tersebut, Gunung Merapi—yang terletak di Jawa Tengah (Gambar 1) di dekat persimpangan sistem patahan Semarang dan Solo—menonjol karena aktivitasnya yang terus-menerus dan kedekatannya dengan daerah yang padat penduduk (BPS, 2023; Hall, 2020; Sarkowi, 2010). Sebagai gunung berapi strato yang khas dengan riwayat keruntuhan kubah dan aliran piroklastik, Gunung Merapi menimbulkan bahaya vulkanis yang signifikan bagi lebih dari satu juta penduduk di wilayah sekitarnya (Luehr dkk., 2013; Murjaya dkk., 2021; Selles dkk., 2015).

Memahami arsitektur bawah permukaan di bawah Gunung Merapi sangat penting tidak hanya untuk prakiraan letusan tetapi juga untuk meningkatkan model transportasi magma, penyimpanan, dan interaksi tektonik-magmatik (Ardianto dkk., 2021; Gertisser dkk., 2011; Luehr dkk., 2013). Aktivitas vulkanik di Gunung Merapi secara intrinsik terkait dengan kondisi bawah permukaannya, yang meliputi sistem perpipaan magma yang kompleks, jalur yang dikendalikan oleh patahan, dan zona alterasi hidrotermal. Karakterisasi spasial fitur bawah permukaan ini membutuhkan teknik geofisika yang mampu menyelesaikan heterogenitas skala halus, terutama di kerak atas dan tengah. Tomografi seismik, secara khusus, telah berkembang sebagai alat utama untuk pencitraan anomali kecepatan bawah permukaan yang terkait dengan ruang magma, zona retakan, dan patahan aktif (Aki & Lee, 1976; Ardianto dkk., 2021; Luehr dkk., 2013; Ramdhan dkk., 2019; Lees, 2007; Zhao, 2009).

Tomografi seismik menggunakan variasi waktu tempuh gelombang seismik untuk menyimpulkan heterogenitas tiga dimensi dalam kecepatan seismik, yang sering kali menunjukkan perbedaan jenis batuan,

porositas, saturasi fluida, atau suhu (Ardianto dkk., 2021; Luehr dkk., 2013; Priyono dkk., 2021; Ramdhan dkk., 2019; Widiyantoro dkk., 2011; Widiyantoro dkk., 2018). Metode ini terbukti sangat berguna dalam pemodelan bawah permukaan gunung berapi, di mana pemetaan geologi tradisional terbatas karena tidak dapat diakses dan struktur bawah permukaan yang tersembunyi (Avseth & Lebeck, 2021; Lees, 2007; Widiyantoro dkk., 2018). Dalam kasus Gunung Merapi, penelitian sebelumnya telah memanfaatkan kumpulan data seismik pasif dan aktif untuk menyimpulkan keberadaan reservoir magma dangkal dan menengah, serta sistem patahan seperti Sesar Opak yang dapat memengaruhi kenaikan magma (Murjaya dkk., 2021; Ramdhan dkk., 2019).

Penelitian sebelumnya telah menggunakan tomografi gempa lokal (LET) untuk menyelidiki struktur bawah permukaan di wilayah vulkanik, termasuk di Pulau Jawa. Proyek MERAMEX (MERapi AMphibious EXperiment) dan DOMERAPI (Rohadi dkk., 2013; Ramdhan dkk., 2017) berperan penting dalam pengumpulan data seismik lokal untuk tujuan tersebut, misalnya Koulakov dkk. (2009) menggunakan data MERAMEX untuk mengidentifikasi struktur vertikal berkecepatan tinggi yang ditafsirkan sebagai tanggul atau saluran. Demikian pula, Ramdhan dkk. (2019) melakukan tomografi menggunakan perangkat lunak SIMULPS12 dan mengidentifikasi reservoir magma dangkal dan menengah di bawah Gunung Merapi, serta tidak adanya struktur serupa di bawah Gunung Merbabu, yang konsisten dengan aktivitas vulkaniknya yang lebih rendah.

Dalam studi ini, kami menggunakan perangkat lunak tomografi LOTOS-13, yang dikembangkan oleh Koulakov (2009), yang memungkinkan inversi simultan kecepatan gelombang P dan S. Metode ini melibatkan penelusuran sinar berdasarkan prinsip Fermat (Bóna & Slawinski, 2003; Um & Thurber, 1987) dan penyempurnaan berulang model kecepatan 3D menggunakan uji resolusi papan catur untuk validasi (Rawlinson & Spakman, 2016; Zhang & Thurber, 2007; Toomey & Foulger, 1989). Dengan mengintegrasikan data dari jaringan seismik DOMERAPI dan BMKG, pendekatan ini memungkinkan peningkatan cakupan dan resolusi azimuthal, terutama dalam kajian tektonik kompleks Gunung Merapi dan sekitarnya.

Meskipun studi tomografi sebelumnya telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap

pemahaman kita tentang wilayah Gunung Merapi, beberapa keterbatasan masih ada. Yang paling menonjol, model sebelumnya menggunakan jarak grid yang relatif kasar dan tidak sepenuhnya menyelesaikan anomali dangkal atau membedakan antara struktur yang tumpang tindih seperti reservoir magma dan zona patahan (Ramdhan dkk., 2019; Ramdhan dkk., 2017). Selain itu, luas Sesar Opak, yang diduga memainkan peran penting dalam sistem magmatik Gunung Merapi, masih ambigu secara spasial karena resolusi lateral yang terbatas dalam studi sebelumnya (Murjaya dkk., 2021; Ramdhan dkk., 2019).

Kemajuan besar yang diperkenalkan oleh penelitian ini adalah kemampuan untuk mengatasi anomali seismik pada kedalaman dangkal hingga ~3 km, dibandingkan dengan ~5 km pada Ramdhan dkk. (2019). Pencitraan yang lebih dangkal ini penting untuk menangkap fitur-fitur di dekat permukaan seperti zona hidrotermal dan batuan retak yang memengaruhi pelepasan gas vulkanik dan inisiasi aktivitas erupsi. Jarak kisi yang lebih halus juga memungkinkan interpretasi yang lebih baik antara struktur yang berdekatan secara vertikal, sehingga memperjelas geometri dan kontinuitas saluran magma dan zona patahan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi struktur bawah permukaan Gunung Merapi dan wilayah sekitarnya secara spasial menggunakan tomografi waktu tempuh berbasis data kecepatan gelombang P (Vp), gelombang S (Vs), dan rasio Vp/Vs. Dengan menerapkan algoritma inversi non-linier LOTOS-13 pada data seismik dari jaringan DOMERAPI dan BMKG, studi ini mengembangkan model kecepatan seismik 3D beresolusi tinggi hingga kedalaman 24 km. Penekanan utama diberikan pada pencitraan anomali di kerak atas hingga menengah (0–18 km), mencakup reservoir magma, zona rekahan, dan pengaruh struktur geologi seperti Sesar Opak, yang belum terselesaikan secara rinci pada studi sebelumnya.

Dengan mengintegrasikan data seismik dari jaringan DOMERAPI dan BMKG serta menerapkan algoritma inversi LOTOS-13 dengan jarak grid yang lebih baik, penelitian ini memungkinkan analisis spasial yang terperinci dari struktur magmatik dan patahan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga aspek: (1) kemampuan mencitrakan struktur kerak dangkal hingga ~3 km, melampaui batas ~5 km pada studi

sebelumnya (Ramdhan dkk., 2019), (2) penerapan inversi non-linier LOTOS-13 untuk resolusi anomali kecepatan seismik yang lebih akurat, dan (3) integrasi data seismik DOMERAPI–BMKG untuk cakupan azimuthal dan stabilitas inversi yang lebih baik—yang secara keseluruhan meningkatkan pencitraan reservoir magma, zona rekahan, dan sistem Sesar Opak.

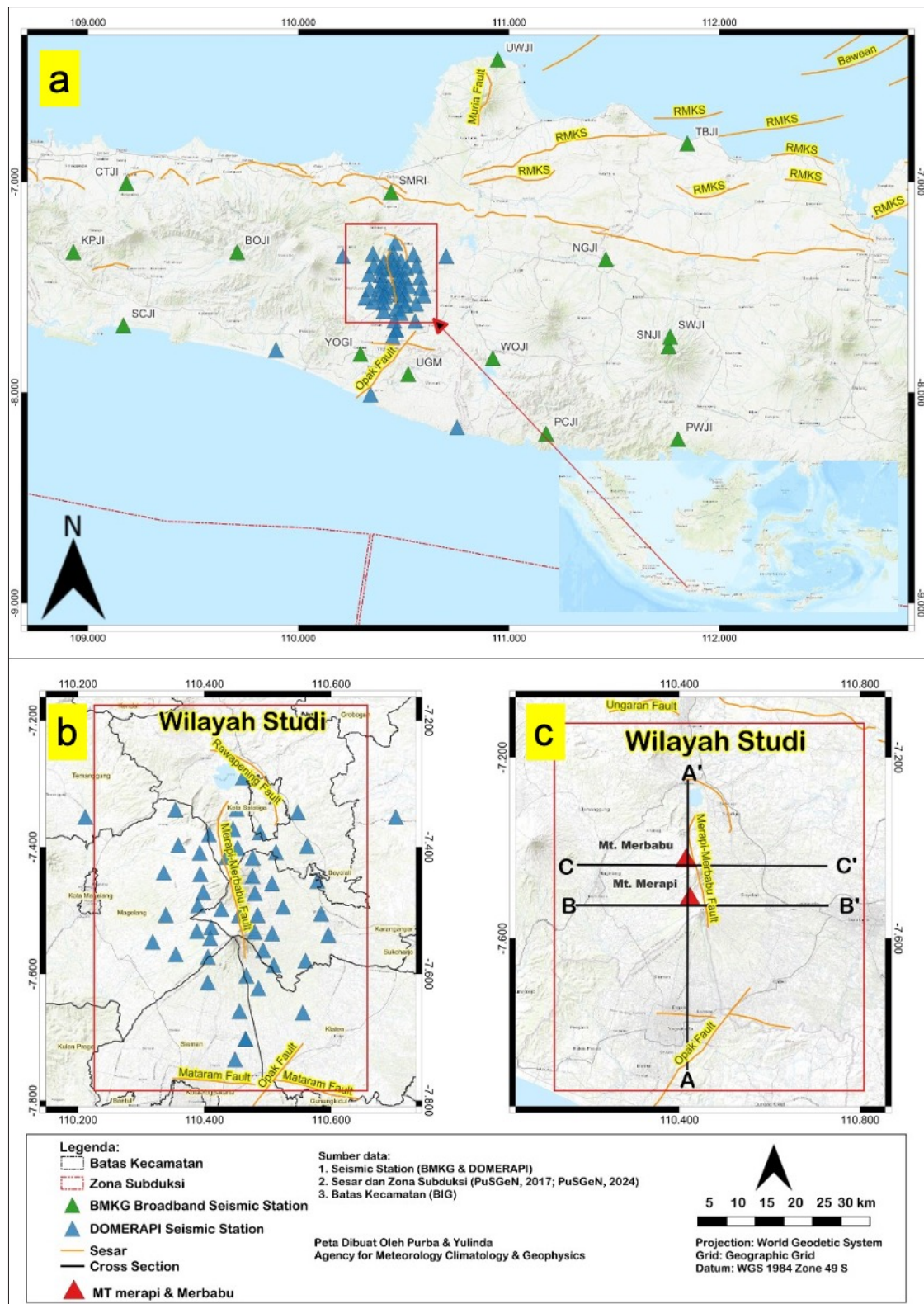
Studi ini juga menyajikan analisis tomografi komparatif antara Gunung Merapi dan Gunung Merbabu yang berdekatan dan tidak aktif, yang menyoroti kontras struktural dan magmatik utama antara sistem vulkanik aktif dan tidak aktif. Dengan memberikan model seismik yang komprehensif dan beresolusi tinggi, temuan tersebut memberikan wawasan penting tentang arsitektur kerak dan mekanisme transportasi magma di Jawa Tengah, sehingga berkontribusi pada pemahaman yang lebih dalam tentang kerangka tektonik-magmatik Busur Sunda. Hasil ini diharapkan dapat meningkatkan penilaian bahaya vulkanik, meningkatkan prakiraan letusan, dan mendukung pengembangan strategi mitigasi yang lebih efektif bagi masyarakat yang tinggal di salah satu wilayah vulkanik paling aktif di Asia Tenggara.

METODE PENELITIAN

Studi Area dan Dataset Seismik

Daerah penelitian meliputi Gunung Merapi dan wilayah sekitarnya di Jawa Tengah, Indonesia, yang dibatasi sekitar antara 6,4°–8,6° LS dan 109,3°–111,5° BT (Gambar 1). Data yang digunakan dalam penelitian ini direkam antara Oktober 2013 dan April 2015 dari dua jaringan seismik (Gambar 1): proyek DOMERAPI, yang memasang 53 seismometer *broadband* di sekitar Gunung Merapi dan Gunung Merbabu untuk meningkatkan cakupan azimuthal dan resolusi pencitraan, dan 17 stasiun *broadband* tambahan dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Indonesia (Ramdhan dkk., 2019).

Sebanyak 13.496 waktu kedatangan gelombang P dan 5.806 gelombang S dari 461 gempa bumi lokal dipilih berdasarkan kriteria kejernihan sinyal dan cakupan stasiun. Relokasi hiposenter awal dilakukan menggunakan algoritma perbedaan ganda (Waldhauser & Ellsworth, 2000; Waldhauser, 2001), dan hanya kejadian yang berlokasi baik dengan *root mean square* (RMS) rendah yang digunakan untuk tomografi.



Gambar 1. a) Peta Sesar Aktif, Stasiun Seismik Broadband BMKG, dan Stasiun Seismik DOMERAPI di Pulau Jawa, b) distribusi stasiun seismik DOMERAPI di sekitar wilayah studi, c) Area fokus studi dan profil penampang yang digunakan

Kerangka Tomografi Seismik

Tomografi seismik merupakan salah satu metode geofisika yang kuat untuk merekonstruksi variasi tiga dimensi kecepatan seismik bawah permukaan dengan cara menginversikan waktu tempuh gelombang seismik yang diamati (Ardianto dkk., 2021; Luehr dkk., 2013; Priyono dkk., 2021; Ramdhan dkk., 2019; Widiyantoro dkk., 2011; Widiyantoro dkk., 2018). Hubungan mendasar yang mengatur waktu tempuh dinyatakan sebagai berikut:

Dimana:

$$\Delta T = \int_{ray} \frac{1}{V(x)} dl = \int_{ray} S(x) dl \quad \dots\dots\dots(1)$$

ΔT adalah waktu tempuh, $V(x)$ adalah kecepatan, $S(x)$ adalah kelambatan, dan dl adalah elemen sepanjang lintasan sinar. Karena lintasan perjalanan bergantung pada struktur kecepatan medium, masalah ini dikategorikan sebagai masalah inversi non-linear (Lees, 2007; Zhao, 2009).

Metode tomografi seismik yang digunakan dalam penelitian ini adalah Tomografi Gempa Lokal (LET). Tomografi Gempa Lokal (LET) menggunakan data waktu tiba gelombang P dan S dari gempa bumi yang berada di dalam wilayah penelitian atau sedikit di luar wilayah penelitian (Li & Lin, 2016; Toledo dkk., 2020). Karena menggunakan sumber yang tidak terkontrol, solusi yang dapat dilakukan adalah menentukan parameter sumber dan model kecepatan secara simultan. Penelitian ini menggunakan kode LET LOTOS (Koulakov, 2009).

Parameterisasi Model

Parameterisasi model secara langsung mempengaruhi resolusi inversi tomografi. Studi ini menggunakan skema simpul-grid tiga dimensi yang diimplementasikan dalam perangkat lunak LOTOS-13 (Koulakov, 2009). Wilayah studi, yang mencakup sekitar 233 km × 244 km, didiskritisasi menggunakan interval grid 5 km secara lateral dan 3 km secara vertikal di 35 km bagian atas kerak. Simpul grid didistribusikan menurut kepadatan jalur sinar seismik, yang memungkinkan penyempurnaan adaptif di wilayah yang sampelnya baik. Interpolasi trilinear digunakan untuk menghitung kecepatan seismik antara simpul (Thurber & Eberhart, 1999).

Pelacakan Sinar (*Ray Tracing*)

Jalur sinar seismik antara sumber gempa dan stasiun dihitung dengan menggunakan metode pembelokan semu (Um & Thurber, 1987), yang secara iteratif menyesuaikan lintasan sinar untuk mengikuti jalur waktu tempuh tercepat sesuai dengan prinsip Fermat (Bóna & Slawinski, 2003; Um & Thurber, 1987). Metode ini sangat cocok untuk tomografi gempa bumi lokal di daerah dengan heterogenitas lateral yang jelas, seperti daerah vulkanik dan patahan (Aki & Lee, 1976; Ardianto dkk., 2021; Luehr dkk., 2013; Ramdhan dkk., 2019; Lees, 2007; Zhao, 2009). Untuk penelitian ini, perhitungan *ray tracing* dimulai dengan menggunakan model kecepatan referensi satu dimensi (1-D) yang berasal dari Koulakov dkk. (2007). Profil kecepatan-kedalaman ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Model Kecepatan 1-D pertama (Koulakov dkk., 2007)

Kedalaman (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
-3	4,3	2.49
3	4,9	2.83
8	5,7	3.29
16	6,9	3.99
24	7,1	4.10
77	7,8	4.51
120	8,05	4.65
165	8,17	4.72
210	8,3	4.80

Algoritma Inversi dalam Perangkat Lunak Lotos 13

Inversi untuk menentukan model kecepatan m yang sesuai dengan data waktu tempuh yang diamati d , dinyatakan sebagai:

$$d = g(m) \quad \dots\dots\dots(2)$$

Hubungan non-linear ini dilinearisasi sebagai:

$$\Delta d = A \Delta x \quad \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

A adalah matriks sensitivitas (Jacobian), Δd adalah vektor residu waktu tempuh, dan Δx adalah vektor pembaruan model. Solusi diperoleh melalui inversi kuadrat terkecil teredam:

$$\Delta x = [A^T A + \lambda I]^{-1} A^T \Delta d \quad \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

Proses inversi secara simultan menyelesaikan parameter kecepatan gelombang P (V_p) dan gelombang S (V_s), dimana rasio V_p/V_s dihitung—sebuah parameter diagnostik penting untuk mengidentifikasi keberadaan lelehan parsial dan zona yang jenuh fluida (Grandis, 2009; Zhao, 2009).

LOTOS-13 menggunakan algoritma inversi berbasis gradien untuk meminimalkan fungsi objektif, dengan melakukan penyempurnaan iteratif terhadap model kecepatan 3D serta penyesuaian dinamis terhadap sensitivitas grid berdasarkan cakupan lintasan sinar (Koulakov, 2012). Metode LSQR digunakan untuk menyelesaikan sistem *sparse* berukuran besar pada setiap iterasi.

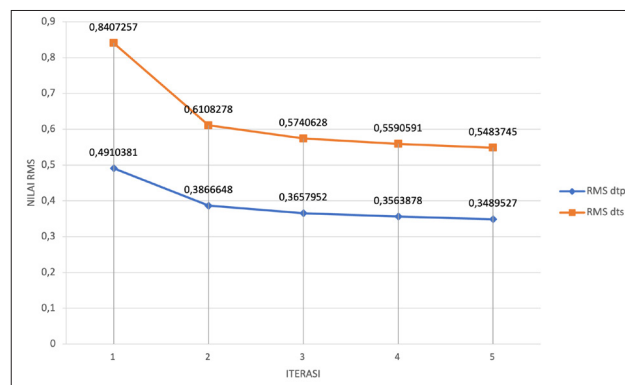
Pengujian Resolusi (Validasi)

Untuk mengevaluasi realibilitas spasial dan daya resolusi model tomografi, dilakukan Uji Resolusi Papan Catur (*Checkerboard Resolution Test/CRT*). Uji ini menggunakan model sintetis yang terdiri dari anomali kecepatan positif dan negatif bergantian ($\pm 10\%$ dari kecepatan referensi) yang disusun dalam pola papan catur 3D. Waktu tempuh sintetis dihitung melalui penelusuran sinar menggunakan geometri stasiun-peristiwa yang sama, dan data yang dihasilkan diinversi menggunakan parameter inversi yang sama seperti untuk data yang diamati (Nugraha dkk., 2013; Rawlinson & Spakman, 2016).

HASIL PENELITIAN

Analisis inversi menghasilkan penurunan nilai RMS secara progresif selama lima iterasi, mengindikasikan konvergensi model dan peningkatan kecocokan antara

data dan model. Nilai RMS waktu tempuh residual untuk gelombang P (garis biru) dan gelombang S (garis oranye) disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik nilai RMS Vp dan Vs terhadap iterasi

Hasil tomografi yang diperoleh diilustrasikan dalam Gambar 3 hingga 6. Gambar-gambar ini menyajikan anomali kecepatan seismik relatif untuk gelombang P, gelombang S, dan rasio V_p/V_s terhadap model kecepatan 1-D awal. Nilai anomali gelombang P dan S berkisar dari -40% (merah tua) hingga $+20\%$ (biru tua), sedangkan anomali rasio V_p/V_s berkisar dari 1,00 hingga 1,89, dengan nilai rendah ditunjukkan dengan warna biru tua dan nilai tinggi ditunjukkan dengan warna merah terang.

Gambar 3 hingga 4(f) menampilkan irisan tomografi dari kedalaman 0 km hingga 12 km. Pada tingkat dangkal ini, anomali kecepatan negatif yang nyata (-14% hingga -20%) pada gelombang P dan S diamati di sisi timur dan barat di sekitar Gunung Merapi dan Gunung Merbabu. Sebaliknya, sektor selatan Gunung Merapi dicirikan oleh anomali gelombang P positif (0% hingga $+10\%$) dan anomali gelombang S yang agak negatif (-2% hingga -8%), yang menunjukkan heterogenitas komposisi dan termal.

Rasio V_p/V_s pada kedalaman 0–9 km menunjukkan variasi spasial yang signifikan. Nilai V_p/V_s minimum (serendah $\sim 1,60\%$) muncul di wilayah timur Gunung Merapi dan Gunung Merbabu, sementara nilai V_p/V_s yang tinggi (hingga $1,81\%$) terkonsentrasi di sektor barat. Di sisi selatan Gunung Merapi, rasio V_p/V_s berkisar antara $1,71\%$ dan $1,81\%$, konsisten dengan zona yang berpotensi kaya akan cairan magmatik atau lelehan parsial.

Pada kedalaman yang lebih dalam, dari 15 hingga 24 km (Gambar 4g hingga 5), tomogram menunjukkan pola yang lebih kompleks. Anomali gelombang P dan S

negatif, berkisar antara -10% hingga -2%, mendominasi di bawah Gunung Merapi dan Gunung Merbabu, yang menunjukkan keberadaan volume batuan berdensitas rendah atau jenuh cairan. Menariknya, wilayah selatan Gunung Merapi menunjukkan pergeseran, di mana anomali gelombang P positif (0% hingga +6%) menjadi lebih umum, dan medan gelombang S menunjukkan transisi pada kedalaman 18 km dari anomali yang dominan negatif menjadi positif.

Distribusi V_p/V_s di bagian yang lebih dalam ini berkisar antara 1,60% hingga 1,70% di bawah Gunung Merapi dan Gunung Merbabu, dengan nilai meningkat ke arah selatan. Sektor selatan Gunung Merapi menunjukkan nilai V_p/V_s yang jauh lebih tinggi, mencapai 1,80%, yang menunjukkan adanya reservoir material yang sebagian meleleh atau cairan bertekanan tinggi yang lebih dalam.

Untuk memperjelas karakteristik anomali kecepatan gelombang P, gelombang S, dan rasio V_p/V_s pada berbagai kedalaman, Tabel 2 berikut menyajikan ringkasan nilai anomali tomografi secara numerik. Nilai ini diambil dari irisan horizontal tomogram yang mewakili zona di bawah Gunung Merapi.

Tabel 2. Ringkasan anomali tomografi

Kedalaman	Anomali kec. Gel P (%)	Anomali kec. Gel S (%)	Rasio V_p/V_s (%)
0	-40	-40	1.81
3	-40	-40	1.63
6	-18	-18	1.63
9	-12	-12	1.79
12	-6	-8	1.79
15	-10	-10	1.69
18	-6	-6	1.69
21	-6	-6	1.65
24	-4	-8	1.67

Untuk menguji reliabilitas spasial dari hasil tomogram, dilakukan uji resolusi menggunakan metode CRT. Dalam penelitian ini, CRT menggunakan ukuran node sebesar $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$, yang merepresentasikan skala spasial minimum yang dapat diresolusi oleh model inversi. *Checkerboard resolution test* adalah metode uji resolusi dengan membuat sebuah model seperti papan catur yang antar bloknya merupakan perselingan antara anomali kecepatan positif dan

negatif dari model kecepatan awal. Pada gempa bumi lokal digunakan anomali positif dan negatif sekitar $\pm 10\%$ relatif dari model kecepatan awal yang digunakan (Nugraha dkk., 2013; Rawlinson & Spakman, 2016). Jika hasil inversi dari CRT dapat kembali pada bentuk semula, maka wilayah tersebut dapat dikatakan dapat teresolusi dengan baik dan selanjutnya dapat dilakukan analisa.

Hasil inversi dari CRT menunjukkan pada kedalaman 0 km hingga 6 km (Gambar 6) beberapa wilayah dapat kembali ke bentuk awal dari model CRT, sehingga dapat diasumsikan bahwa wilayah tersebut teresolusi dengan cukup baik. Wilayah tersebut berada pada bagian barat dan timur wilayah Gunung Merapi, Gunung Merbabu, dan wilayah selatan Gunung Merapi. Pada wilayah yang sama, di kedalaman 9 hingga 12 km (Gambar 7a-f) model CRT masih dapat menyerupai bentuk semula, sehingga masih dapat dianggap wilayah tersebut cukup teresolusi.

Pada kedalaman 15 km hingga 21 km, hasil inversi model CRT masih cukup menyerupai dengan model awal (Gambar 7g-8f). Pada kedalaman 24 km (Gambar 8g-i) hasil inversi model CRT sangat sedikit memiliki kemiripan dengan model awal CRT, sehingga diasumsikan bahwa pada kedalaman 24 km sudah tidak dapat teresolusi dengan baik. Model CRT anomali kecepatan gelombang P dan V_p/V_s masih dapat cukup terlihat, jika dibandingkan dengan model CRT dari anomali kecepatan gelombang S.

Hasil inversi tomogram juga diperoleh dalam bentuk model profil vertikal. Profil vertikal berdasarkan pada irisan melintang pada wilayah yang akan dilakukan pencitraan tomogram. Pada penelitian ini dilakukan sebanyak 3 irisan melintang yang digunakan. Tiap-tiap irisan melintang ditunjukkan seperti pada Gambar 9 yang terdiri dari profil vertikal model anomali kecepatan gelombang P, S, dan rasio V_p/V_s .

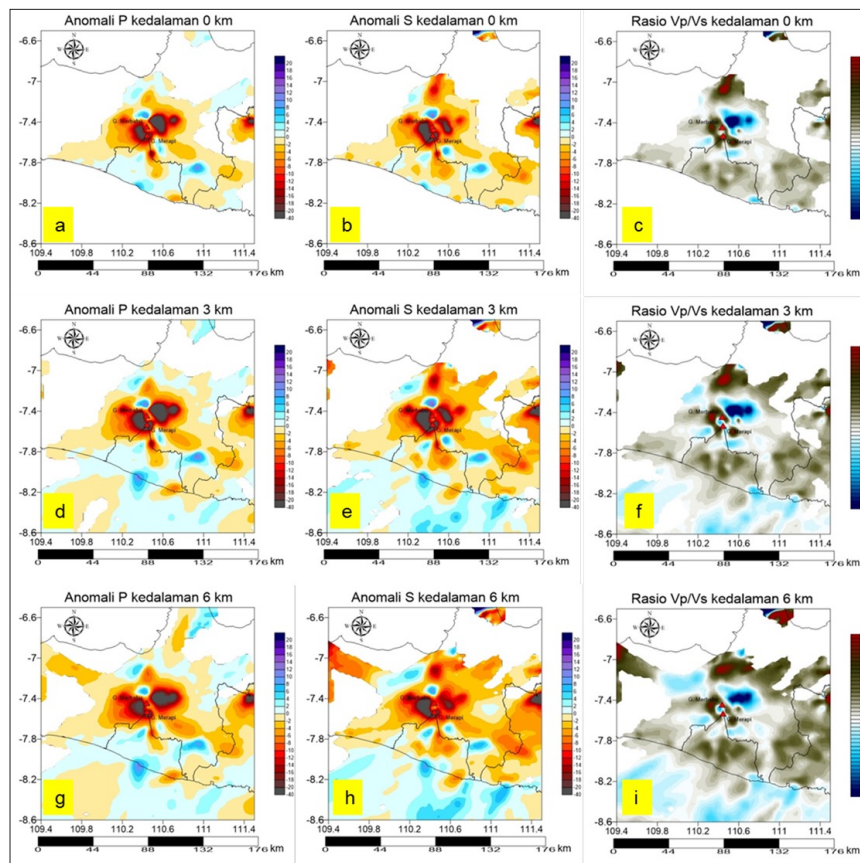
Pada Gambar 9 irisan melintang pertama dilakukan dari arah Selatan-Utara melewati Gunung Merapi dan Gunung Merbabu sepanjang kurang lebih 80 km, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 a-c. Hasil inversi tomogram yang diperoleh menunjukkan bahwa pada kedalaman 0 km hingga sekitar 5 km terdapat anomali negatif kecepatan gelombang P dan S yang cukup besar di bawah permukaan Gunung Merapi dengan rentang nilai anomali adalah berkisar dari -18% hingga -29%, sedangkan pada Gunung Merbabu

diketahui anomali negatif kecepatan gelombang P dan S dengan rentang nilai berkisar dari -2% hingga -14%. Pada rasio V_p/V_s di bawah permukaan Gunung Merapi dari kedalaman 0 km hingga kurang dari 3 km memiliki nilai anomali sekitar 1.82%, sedangkan kedalaman dari 3 km hingga 6 km memiliki anomali sekitar 1.64%. Nilai rasio V_p/V_s di bawah permukaan Gunung Merbabu pada kedalaman 0 km hingga 5 km adalah berkisar antara 1.78% – 1.74%. Untuk kedalaman dari 5 km hingga 20 km nilai V_p/V_s berkisar antara 1.72% hingga 1.66%.

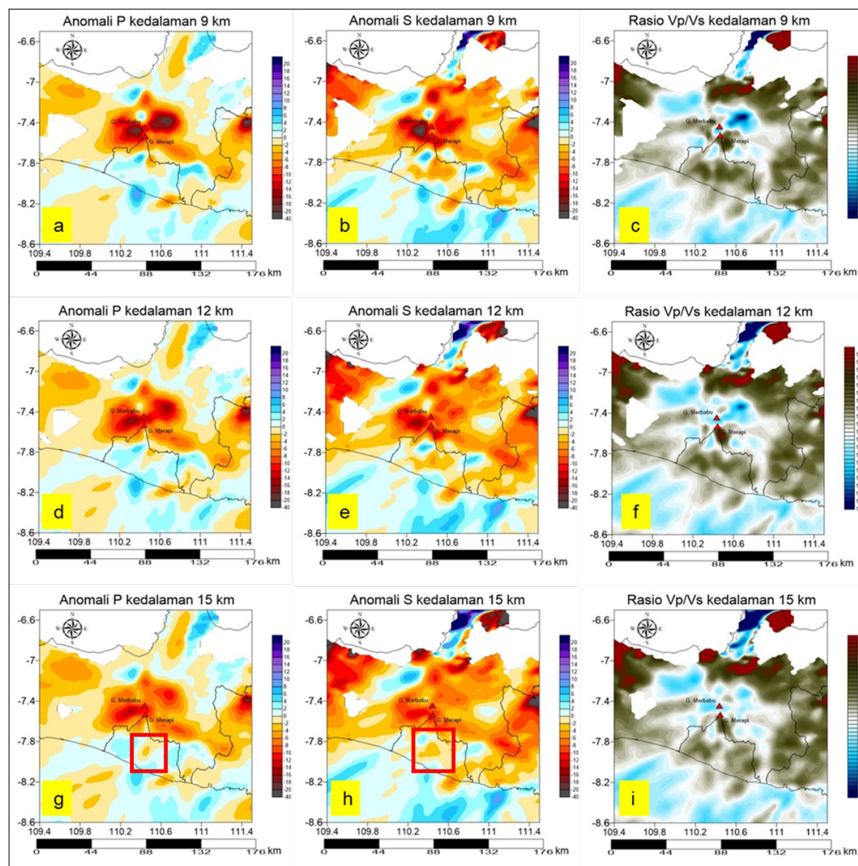
Gambar 9 d-f merupakan irisan melintang yang kedua adalah irisan yang berorientasi dari barat ke timur melewati Gunung Merapi dengan panjang irisan sekitar 50 km. Hasil inversi tomogram menunjukkan adanya anomali negatif kecepatan gelombang P dan S yang berarah barat ke timur sepanjang 20 km di bawah permukaan Gunung Merapi pada rentang kedalaman dari 0 km hingga sekitar 8 km. Nilai anomali negatif yang berada di bawah permukaan gunung Gunung Merapi ditunjukkan memiliki rentang nilai dari -18% hingga -40%. Rasio V_p/V_s yang bernilai tinggi ditunjukkan berarah menunjam ke barat dari bawah Gunung Merapi hingga kedalaman 10 km dengan

rentang nilai 1.88% hingga 1.78%. Pada kedalaman 2 km hingga 7 km di bawah Gunung Merapi terdapat nilai V_p/V_s yang cukup rendah dengan rentang nilai berkisar dari 1.68% hingga 1.66%.

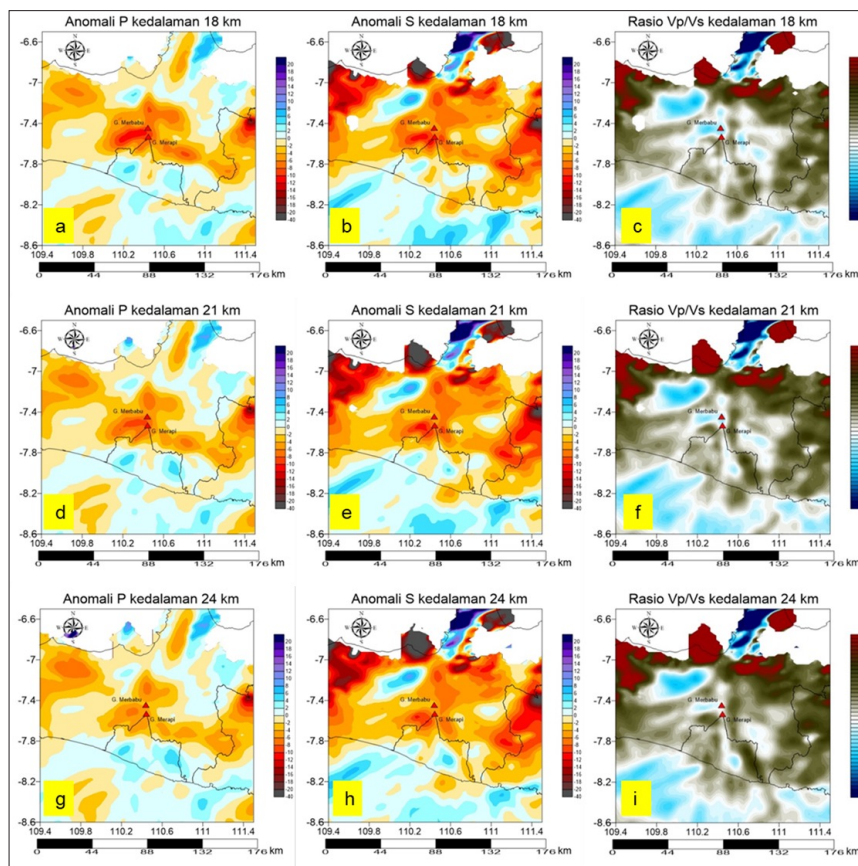
Gambar 9 g-i menunjukkan irisan melintang yang ketiga adalah irisan yang berorientasi dari barat ke timur melewati Gunung Merbabu dengan panjang irisan sekitar 50 km. Hasil inversi tomogram menunjukkan adanya anomali negatif kecepatan gelombang P dan S yang sangat besar dengan rentang nilai -14% hingga -25%, berada di sebelah barat dan timur Gunung Merbabu hingga kedalaman 10 km, sedangkan di bawah permukaan Gunung Merbabu terdapat anomali negatif gelombang P dan S yang tidak terlalu besar dengan rentang nilai -2% hingga -14%. Nilai rasio V_p/V_s yang cukup tinggi terlihat di sebelah barat Gunung Merbabu dengan rentang nilai dari 1.9% hingga 1.8% dengan kedalaman 0 km hingga sekitar 12 km, sedangkan di bawah gunung Merbabu ditunjukkan nilai rasio V_p/V_s yang tinggi dengan rentang dari 1.8% – 1.74% pada kedalaman 0 km hingga 8 km. Pada kedalaman 9 km hingga 20 km di bawah Gunung Merbabu terdapat nilai rasio V_p/V_s yang rendah dengan rentang nilai 1.7% hingga 1.62%.



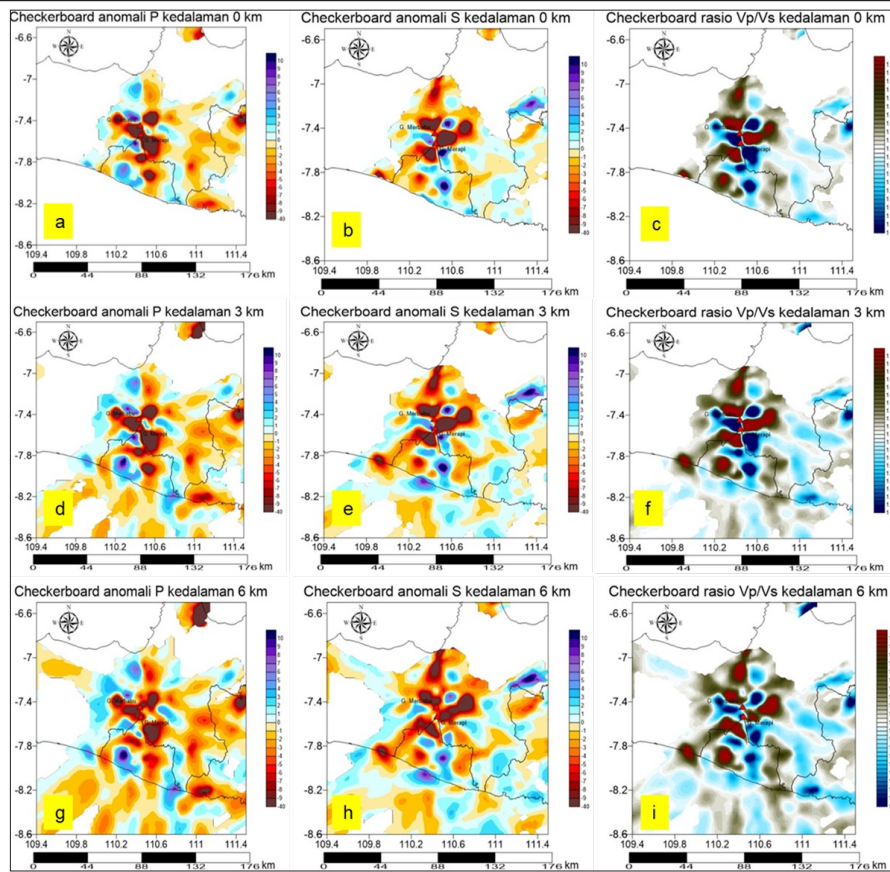
Gambar 3. Anomali V_p , Anomali V_s , Rasio V_p/V_s kedalaman 0 km - 6 km



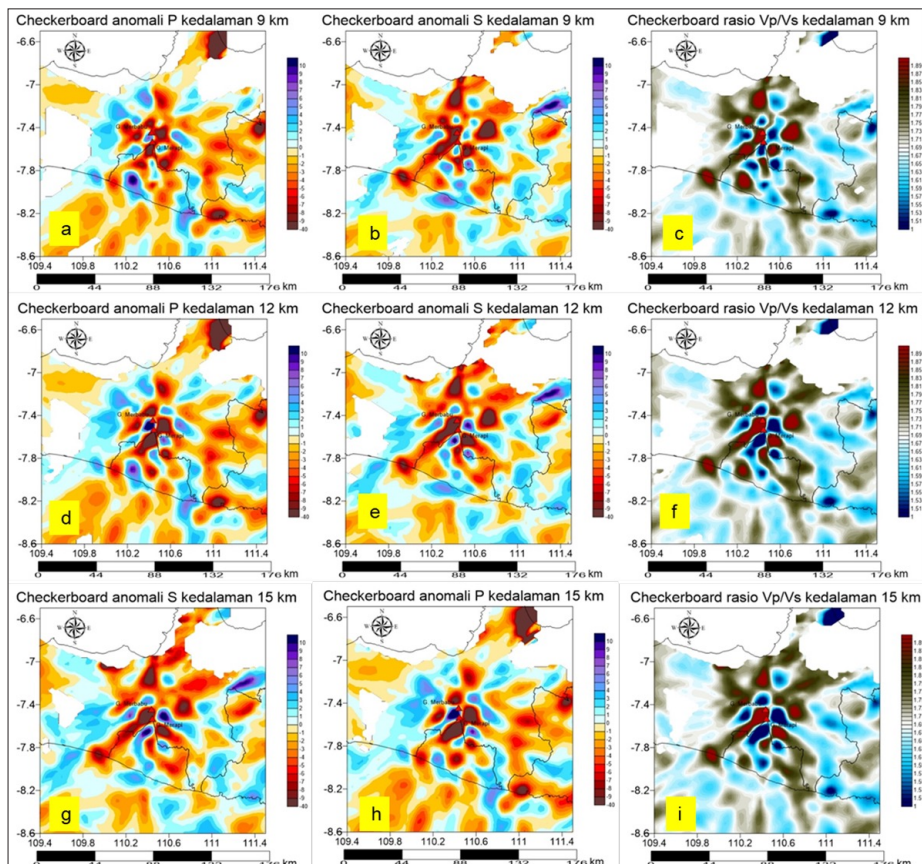
Gambar 4. Anomali Vp, Anomali Vs, Rasio Vp/Vs kedalaman 9 km - 15 km



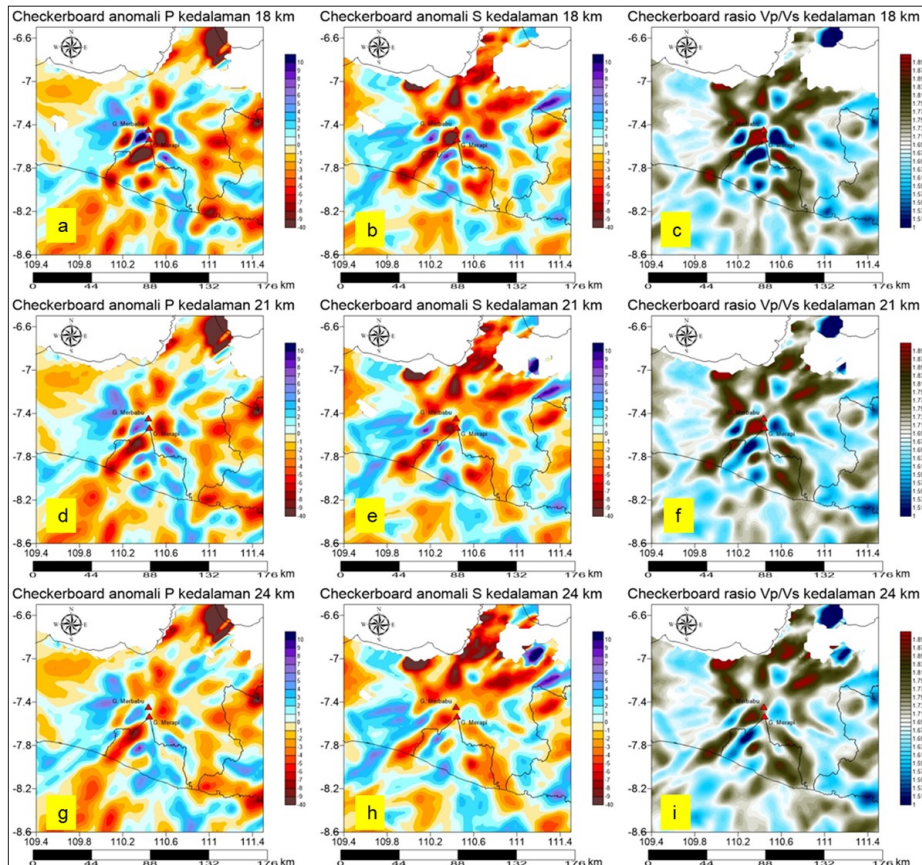
Gambar 5. Anomali Vp, Anomali Vs, Rasio Vp/Vs kedalaman 18 km - 24 km



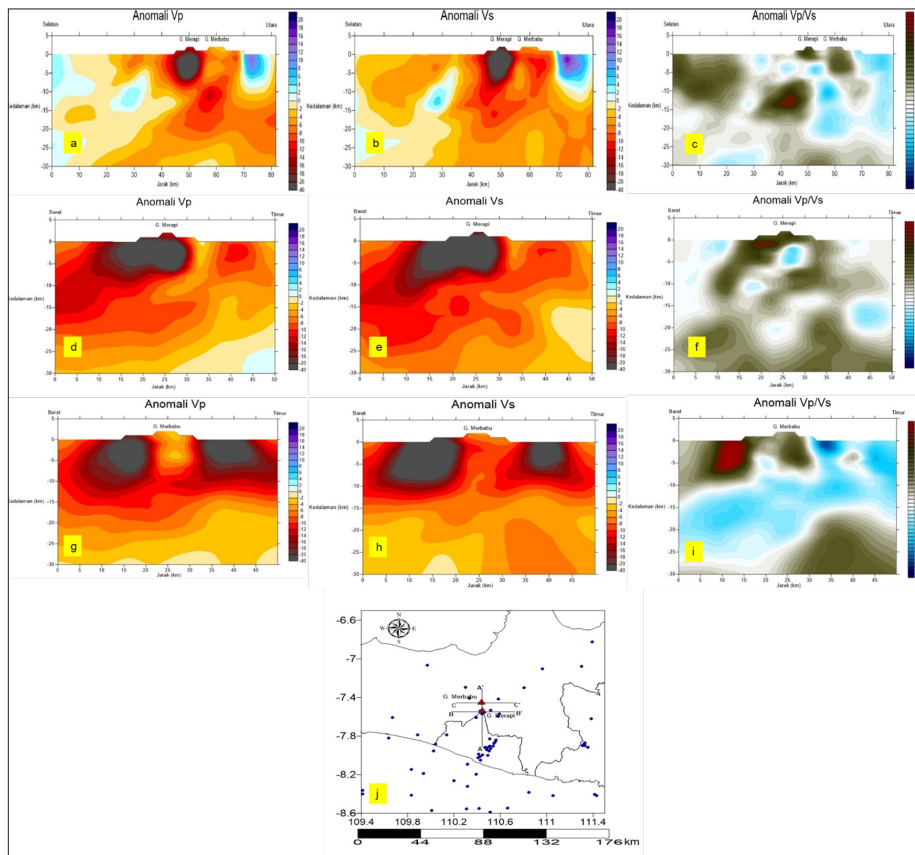
Gambar 6. Checkerboard anomali Vp, Vs dan rasio Vp/Vs kedalaman 0 - 6 km



Gambar 7. Checkerboard anomali Vp, Vs dan rasio Vp/Vs kedalaman 9 - 15 km



Gambar 8. Checkerboard anomali Vp, Vs dan rasio Vp/Vs kedalaman 18 - 24 km



Gambar 9. Hasil inversi anomali Vp, Vs dan rasio Vp/Vs pada irisan melintang a-c) Arah Selatan-Utara (A – A'), d-f) Arah Barat-Timur melewati gunung Merapi (B - B'), g-i) Arah Barat-Timur melewati gunung Merbabu (C – C'), j) profil penampang yang digunakan

DISKUSI

Temuan dari analisis tomografi seismik menunjukkan adanya struktur kompleks di bawah Gunung Merapi dan sekitarnya, yang mencerminkan dinamika vulkanik dan geotektonik yang aktif. Anomali kecepatan gel P (V_p) dan kecepatan gel S (V_s) yang rendah, serta rasio V_p/V_s yang tinggi di bawah tubuh Gunung Merapi (Gambar 9 a-f) memberikan indikasi kuat adanya material *partial melt*, khususnya pada kedalaman 0–5 km. Nilai anomali V_p sebesar -28%, V_s sebesar -29%, dan rasio V_p/V_s sebesar 1.82% mendukung interpretasi keberadaan reservoir magma dangkal, sebagaimana telah dijelaskan oleh Lees (2007) dan dikonfirmasi pula dalam studi oleh Costa dkk. (2013), Ramdhan dkk. (2017), serta Ramdhan dkk. (2019).

Selain itu, pada kedalaman 3–6 km, nilai rasio V_p/V_s sebesar 1.64% dan anomali V_p-V_s negatif yang lebih moderat mengindikasikan adanya batuan retakan yang kemungkinan terisi uap, sesuai dengan karakteristik fluida pada zona transisi antara fase cair dan gas di lingkungan vulkanik (Burnham dkk., 1969; Juric & Tryggvason, 1998). Temuan ini sejalan dengan hipotesis Ramdhan dkk. (2017) mengenai jalur magma yang mulai mendingin pasca-erupsi 2010, yang menghubungkan reservoir magma dangkal dan menengah.

Pada kedalaman lebih dari 10 km, khususnya di sisi selatan Gunung Merapi, terdapat indikasi adanya reservoir magma menengah dengan rasio V_p/V_s sebesar 1.86%, serta anomali kecepatan negatif. Hal ini menunjukkan kemungkinan keberadaan fluida dalam zona rekahan (Costa dkk., 2013; Ramdhan dkk., 2017; Ramdhan dkk., 2019), yang berperan sebagai sumber suplai ke reservoir magma dangkal.

Pada area dengan jarak ± 20 km dari Gunung Merapi dan kedalaman 5–15 km, ditemukan anomali V_p dan V_s positif dengan rasio V_p/V_s rendah, yang diasumsikan sebagai batuan tua atau intrusi beku yang telah membeku. Interpretasi ini menunjukkan kaitan dengan Zona Pegunungan Selatan yang menurut Mulyaningsih (2012) pernah mengalami aktivitas vulkanik pada zaman Tersier. Evolusi magmatik di zona ini, seperti dijelaskan oleh Smyth dkk. (2008), menunjukkan pergeseran jalur aktivitas gunung api ke arah utara, di mana Gunung Merapi saat ini berada.

Bawah permukaan Gunung Merbabu, seperti

tergambar pada Gambar 9 g-i, menunjukkan anomali serupa dengan V_p dan V_s rendah serta rasio V_p/V_s tinggi, yang mengindikasikan adanya fluida dalam rekahan batuan (Juric & Tryggvason, 1998). Meski demikian, nilai V_p yang tidak terlalu rendah dapat diinterpretasikan sebagai indikasi pendinginan magma, mendukung temuan dari Sarkowi (2010) yang menyatakan adanya kantong magma beku di bawah Gunung Merbabu. Kondisi ini menjelaskan aktivitas vulkanik Gunung Merbabu yang relatif lebih rendah dibandingkan Gunung Merapi.

Gambaran horizontal pada kedalaman 15 km juga menunjukkan anomali V_p dan V_s tinggi dengan rasio V_p/V_s tinggi di sisi Selatan Gunung Merapi, mengindikasikan intrusi batuan beku yang sudah membeku. Perubahan signifikan dari anomali V_p tinggi ke rendah pada zona ini berkaitan dengan keberadaan zona sesar aktif, seperti Sesar Opak, yang teresolusi hingga kedalaman 18 km (lihat kotak merah pada Gambar 4g-h). Perubahan karakter gelombang ini dapat dikaitkan dengan variasi litologi, kepadatan rekahan, serta keberadaan fluida atau fase batuan berbeda (Lees, 2007).

Selanjutnya, identifikasi anomali sangat rendah pada kedalaman 0–10 km ke arah barat dari Gunung Merapi mengindikasikan kemungkinan adanya sistem partial melt yang terkait dengan rantai vulkanik Sindoro-Sumbing dan Merapi-Telomoyo (Koulakov dkk., 2007; Koulakov dkk., 2009). Hal ini menguatkan hipotesis adanya sistem magmatik yang saling terhubung dalam zona vulkanik Jawa Tengah.

Dengan demikian, studi ini mengungkap dinamika kompleks dari sistem vulkanik Gunung Merapi dan sekitarnya, serta peran signifikan dari struktur bawah permukaan, baik berupa reservoir magma aktif, rekahan fluida, maupun intrusi batuan beku yang telah membeku. Interpretasi ini tidak hanya memperkuat pemahaman terhadap aktivitas vulkanik Gunung Merapi, tetapi juga membuka peluang penelitian lebih lanjut mengenai keterkaitan antara struktur seismik, jalur suplai magma, dan evolusi magmatik di zona vulkanik aktif Indonesia.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi struktur bawah permukaan Gunung Merapi dan Gunung Merbabu

menggunakan tomografi seismik berbasis kecepatan gelombang P, gelombang S, dan rasio V_p/V_s . Hasil inversi menunjukkan keberadaan reservoir magma dangkal yang kaya fluida di bawah Merapi pada kedalaman <6 km, zona transisi pada 6–12 km, dan reservoir magma menengah pada 13–16 km. Di bawah Gunung Merbabu, anomali kecepatan menunjukkan adanya fluida dalam rekahan batuan, tetapi tidak mencerminkan aktivitas magmatik signifikan.

Selain itu, zona lemah pada kedalaman 15–18 km di sisi selatan Merapi dikaitkan dengan keberadaan Sesar Opak, yang berpotensi memengaruhi dinamika sistem magmatik secara regional. Temuan ini mempertegas hubungan antara proses tektonik dan vulkanik di kawasan Jawa Tengah.

Penelitian lanjutan dengan cakupan data seismik yang lebih luas serta integrasi metode geofisika lainnya sangat diperlukan untuk meningkatkan resolusi pada kedalaman lebih besar dari 18 km.

Pendekatan multimetode seperti magnetotelurik dan gravimetri juga diharapkan dapat memperkuat validitas interpretasi dan memberikan gambaran yang lebih menyeluruh terhadap sistem magmatik aktif di kawasan ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Mohamad Ramdhan atas dukungannya yang besar dalam menyediakan akses data seismik, yang menjadi landasan penting bagi penelitian ini. Wawasan dan kontribusinya terhadap pemahaman tomografi seismik di wilayah Gunung Merapi sangat berharga. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dan tim proyek DOMERAPI atas komitmen mereka terhadap akuisisi dan penyebaran data, yang tanpanya penelitian ini tidak akan mungkin terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K., & Lee, W. H. K. 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first p arrival times from local earthquakes - 1. a homogeneous initial model. *J Geophys Res*, 81(23). <https://doi.org/10.1029/JB081i023p04381>
- Ardianto, A., Nugraha, A. D., Afif, H., Syahbana, D. K., Sahara, D. P., Zulfakriza, Z., Widiyantoro, S., Priyono, A., Rosalia, S., Saepuloh, A., Kasbani, K., Muttaqy, F., Rahsetyo, P. P., Priambodo, I. C., & Martanto, M. 2021. Imaging the Subsurface Structure of Mount Agung in Bali (Indonesia) Using Volcano-Tectonic (VT) Earthquake Tomography. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.619587>
- Avseth, P., & Lehocki, I. 2021. 3D Subsurface Modeling of Multi-Scenario Rock Property and AVO Feasibility Cubes—An Integrated Workflow. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.642363>
- Badan Informasi Geospasial. 2023. Indonesia Geospatial Portal. Badan Informasi Geospasial.
- BMKG. 2023. Katalog Gempabumi Indonesia: Relokasi Hiposenter Dan Implikasi Tektonik.
- Bóna, A., & Slawinski, M. A. 2003. Fermat's principle for seismic rays in elastic media. *Journal of Applied Geophysics*, 54(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.08.019>
- BPS Provinsi Jawa Tengah. 2023. Provinsi Jawa Tengah Dalam Angka 2023. Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Tengah.
- Burnham, C. W., Holloway, J. R., & Davis, N. F. 1969. Thermodynamic Properties of Water to 1,000° C and 10,000 Bars. In C. W. Burnham, J. R. Holloway, & N. F. Davis (Eds.), *Thermodynamic Properties of Water to 1,000° C and 10,000 Bars* (Vol. 132, p. 0). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE132-p1>

- Costa, F., Andreastuti, S., Bouvet de Maisonneuve, C., & Pallister, J. S. 2013. Petrological insights into the storage conditions, and magmatic processes that yielded the centennial 2010 Merapi explosive eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.12.025>
- Gertisser, R., Charbonnier, S. J., Troll, V. R., Keller, J., Preece, K., Chadwick, J. P., Barclay, J., & Herd, R. A. 2011. Merapi (Java, Indonesia): Anatomy of a killer volcano. *Geology Today*, 27(2). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2011.00786.x>
- Grandis, H. 2009. Pengantar Permodelan Inversi Geofisika. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Hall, R. 2020. Indonesia, Geology. In *Encyclopedia of Islands*. <https://doi.org/10.1525/9780520943728-104>
- Hall, R., & Smyth, H. R. 2008. Cenozoic arc processes in Indonesia: Identification of the key influences on the stratigraphic record in active volcanic arcs. *Special Paper of the Geological Society of America*, 436. [https://doi.org/10.1130/2008.2436\(03\)](https://doi.org/10.1130/2008.2436(03))
- Hall, R., & Wilson, M. E. J. 2000. Neogene sutures in eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6). [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00040-7)
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. 2021. The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9). <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., Meilano, I., Triyoso, W., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Ridwan, M., Hanifa, N. R., & Syahbana, A. J. 2020. Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, 36(1_suppl). <https://doi.org/10.1177/8755293020951206>
- Juric, D., & Tryggvason, G. 1998. Computations of boiling flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 24(3). [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(97\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(97)00050-5)
- Katili, J. A. 1975. Volcanism and plate tectonics in the Indonesian island arcs. *Tectonophysics*, 26(3–4). [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(75\)90088-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90088-8)
- Koulakov, I. 2009. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(1). <https://doi.org/10.1785/0120080013>
- Koulakov, I., Bohm, M., Asch, G., Lühr, B. G., Manzanares, A., Brotopuspito, K. S., Fauzi, P., Purbawinata, M. A., Puspito, N. T., Ratdomopurbo, A., Kopp, H., Rabbel, W., & Shevkunova, E. 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(8). <https://doi.org/10.1029/2006JB004712>
- Koulakov, I., Jakovlev, A., & Luehr, B. G. 2009. Anisotropic structure beneath central Java from local earthquake tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2). <https://doi.org/10.1029/2008GC002109>
- Koulakov, I., Zabelina, I., Amanatashvili, I., & Meskhia, V. 2012. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. *Solid Earth*, 3(2). <https://doi.org/10.5194/se-3-327-2012>
- Lees, J. M. 2007. Seismic tomography of magmatic systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1–4). <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.06.008>
-

- Li, P., & Lin, G. 2016. Local earthquake tomography with the inclusion of full topography and its application to Kilauea volcano, Hawai'i. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 316, 12. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.014>
- Luehr, B. G., Koulakov, I., Rabbel, W., Zschau, J., Ratdomopurbo, A., Brotopuspito, K. S., Fauzi, P., & Sahara, D. P. 2013. Fluid ascent and magma storage beneath Gunung Merapi revealed by multi-scale seismic imaging. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.03.015>
- McCaffrey, R. 2009. The tectonic framework of the sumatran subduction zone. In *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* (Vol. 37). <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100212>
- Mulyaningsih, S., dan Sanyoto, S. 2012. Geologi gunung api merapi; sebagai acuan dalam interpretasi gunung api komposit tersier di daerah gunung gede-imogiri daerah istimewa yogyakarta 1,2, (November), 242–251.
- Murjaya, J., Pramumijoyo, S., Karnawati, D., Daryono, D., Meilano, I., Supendi, P., Ahadi, S., Marliyani, G. I., Imananta, Syukur, F., Sianipar, D., & Krisno, A. 2021. Earthquake risk assessment of the Opak and Merapi-Merbabu active faults to support mitigation program in Yogyakarta province and its vicinity. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 851(1), 12001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/851/1/012001>
- Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Gunawan, A., & Suantika, G. 2013. Seismic velocity structures beneath the Guntur volcano complex, west java, derived from simultaneous tomographic inversion and hypocenter relocation. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 45(1). <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2013.45.1.2>
- Priyono, A., Nugraha, A. D., Muzli, M., Ardianto, A., Aulia, A. N., Prabowo, B. S., Zulfakriza, Z., Rosalia, S., Sasmi, A. T., Afif, H., Sahara, D. P., Widiyantoro, S., Wei, S., Husni, Y. M., & Sarjan, A. F. N. 2021. Seismic Attenuation Tomography From 2018 Lombok Earthquakes, Indonesia. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.639692>
- Purba, J., Harisma, H., Priadi, R., Amelia, R., Dwilyantari, A. A. I., Jaya, L. M. G., Restele, L. O., & Putra, I. M. W. G. 2024. Surface deformation and its implications for land degradation after the 2021 Flores earthquake (M7.4) using differential interferometry synthetic aperture radar. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(1), 6819–6831. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.121.6819>
- Purba, J., Restele, L. O., Hadini, L. O., Usman, I., Hasria, H., & Harisma, H. 2024. Spatial study of seismic hazard using classical probabilistic seismic hazard analysis (pscha) method in the kendari city area. *Indonesian Physical Review*, 7(3), 300–318. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i3.325>
- Purba, J., Yulinda, R., Pertiwi, I. I., & Saadia, A. O. 2025. Seismic hazard analysis in Malang Raya through classical PSHA method using OpenQuake with spatial approach. *JAGAT (Jurnal Geografi Aplikasi dan Teknologi)*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.13117/jagat.9.1.1>
- Purba, J., Priadi, R., Frando, M., & Pertiwi, I. 2025. The Purpri Fault: A newly identified active fault in East Kolaka, Indonesia, based on HypoDD and DInSAR. *Geoloski Anali Balkanskoga Poluostrva*, 00, 5–5. <https://doi.org/10.2298/GABP250417005P>
- PuSGeN. 2017. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. In Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Jakarta. (in Indonesian).
-

- PuSGeN. 2024. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2024. In Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Jakarta. (in Indonesian).
- Ramdhan, M., Widiyantoro, S., Dian Nugraha, A., Saepuloh, A., Métaxian, J. P., Kristyawan, S., Syaly Sembiring, A., & Budi Santoso, A. 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). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012039>
- Ramdhan, M., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Métaxian, J. P., Rawlinson, N., Saepuloh, A., Kristyawan, S., Sembiring, A. S., Budi-Santoso, A., Laurin, A., & Fahmi, A. A. 2019. Detailed seismic imaging of Merapi volcano, Indonesia, from local earthquake travel-time tomography. *Journal of Asian Earth Sciences*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.03.018>
- Ramdhan, M., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Métaxian, J. P., Saepuloh, A., Kristyawan, S., Sembiring, A. S., Santoso, A. B., Laurin, A., & Fahmi, A. A. 2017. Relocation of hypocenters from DOMERAPI and BMKG networks: a preliminary result from DOMERAPI project. *Earthquake Science*, 30(2). <https://doi.org/10.1007/s11589-017-0178-3>
- Rawlinson, N. and Spakman, W. 2016. On the use of sensitivity tests in seismic tomography. *Geophysical Journal International*, 205(2), 1221-1243. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw084>
- Rohadi, S., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., & Masturyono. 2013. Tomographic imaging of P- and S-wave velocity structure beneath central Java, Indonesia: Joint inversion of the MERAMEX and MCGA earthquake data. *International Journal of Tomography and Statistics*, 24(3).
- Sarkowi, M. 2010. Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Gunung Merbabu - Merapi Berdasarkan Pemodelan 3D Anomali Bouguer. *Berkala Fisika*, 13(2).
- Schlüter, H. U., Gaedicke, C., Roeser, H. A., Schreckenberger, B., Meyer, H., Reichert, C., Djajadihardja, Y., & Prexl, A. 2002. Tectonic features of the southern Sumatra-western Java forearc of Indonesia. *Tectonics*, 21(5). <https://doi.org/10.1029/2001TC901048>
- Selles, A., Deffontaines, B., Hendrayana, H., & Violette, S. 2015. The eastern flank of the Merapi volcano (Central Java, Indonesia): Architecture and implications of volcanoclastic deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 108, 33. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.04.026>
- Smyth, H. R., Hall, R., & Nichols, G. J. 2008. Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: The stratigraphic record of eruptions on an active continental margin. *Special Paper of the Geological Society of America*, 436. [https://doi.org/10.1130/2008.2436\(10\)](https://doi.org/10.1130/2008.2436(10))
- Thurber, C., & Eberhart-Phillips, D. 1999. Local earthquake tomography with flexible gridding. *Computers and Geosciences*, 25(7). [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00007-2)
- Toledo, T., Jousset, P., Gaucher, E., Maurer, H., Krawczyk, C., Calò, M., & Figueroa-Soto, Á. 2020. Local earthquake tomography at the Los Humeros geothermal field, Mexico. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9865>
- Toomey, D. R., & Foulger, G. R. 1989. Tomographic inversion of local earthquake data from the Hengill-Grensdlur central volcano complex, Iceland. *Journal of Geophysical Research*, 94(B12). <https://doi.org/10.1029/jb094ib12p17497>
-

-
- Um, J., & Thurber, C. 1987. FAST ALGORITHM FOR TWO-POINT SEISMIC RAY TRACING. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(3). <https://doi.org/10.1785/bssa0770030972>
- Waldhauser, F. 2001. hypoDD: A computer program to compute double-difference hypocenter locations. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 01–113.
- Waldhauser, F., & 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*, 90(6). <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- Widiyantoro, S., Pesicek, J. D., & Thurber, C. H. 2011. Subducting slab structure below the eastern Sunda arc inferred from non-linear seismic tomographic imaging. *Geological Society Special Publication*, 355. <https://doi.org/10.1144/SP355.7>
- Widiyantoro, S., Ramdhan, M., Métaxian, J. P., Cummins, P. R., Martel, C., Erdmann, S., Nugraha, A. D., Budi-Santoso, A., Laurin, A., & Fahmi, A. A. 2018. Seismic imaging and petrology explain highly explosive eruptions of Merapi Volcano, Indonesia. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31293-w>
- Zhang, H. and Thurber, C. H. 2007. Estimating the model resolution matrix for large seismic tomography problems based on lanczos bidiagonalization with partial reorthogonalization. *Geophysical Journal International*, 170(1), 337-345. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2007.03418.x>
- Zhao, D. 2009. Multiscale seismic tomography and mantle dynamics. *Gondwana Research*, 15(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.07.003>
-