

DOI: doi.org/10.21009/SPEKTRA.032.05

Received: 29 November 2017
Revised: 29 April 2018
Accepted: 18 August 2018
Published: 30 August 2018

IMAGING OF 3-D SEISMIC TOMOGRAPHY FOR INTERNAL STRUCTURE UNDER THE MOUNTAIN MERAPI USING THE LOTOS-10 SOFTWARE

Ayu Wita Sari^{1, a)}, Gede Bayu Suparta^{2, b)}

¹*STIKES Guna Bangsa Yogyakarta, Jl. Padjajaran No.Kel, Ngringin, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283*

²*Jurusan Fisika FMIPA UGM, Bulaksumur Yogyakarta, Senolowo, Sinduadi, Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281*

Email: ^{a)}ayu.0221@gmail.com, ^{b)}gbsuparta@gmail.com

Abstrak

Telah dilakukan penelitian pencitraan tomografi seismik 3D untuk stuktur internal di bawah Gunung Merapi dengan empat stasiun pencatat gempa dan gempa vulkanik sebagai sumber sinar gelombang. Penelitian ini menggunakan perangkat LOTOS-10 (Local Tomography Software 10) untuk inversi tomografi seismik 3D. Karakteristik medium bawah Gunung Merapi dapat digambarkan oleh parameter fisis seperti kecepatan gelombang primer dan sekunder. Hasil pengolahan data seismograf menunjukkan metoda tomografi seismik dapat mengungkap struktur bawah permukaan Gunung Merapi melalui distribusi anomali deviasi kecepatan dan V_p/V_s ratio. Kualitas citra yang dihasilkan dengan menggunakan gelombang primer lebih jelas resolusinya dan waktu yang digunakan lebih efisien, sehingga dapat digunakan sebagai informasi mitigasi bencana sebelum gempa erupsi terjadi. Daerah anomali negatif yang diperoleh terletak di bawah puncak Gunung Merapi pada kedalaman 3 - 5 km mempunyai karakter fisis yaitu zona lemah, kurang kompak, panas dan heterogen. Daerah anomali tersebut dapat diinterpretasikan sebagai keberadaan zona materi panas yang berasosiasi dengan sisa dapur magma dangkal.

Kata-kata kunci: Gunung api Merapi, sifat fisis, tomografi seismic, lotos-10.

Abstract

3D seismic tomography imaging research conducted for internal structures under Merapi Volcano with four earthquake recording and volcanic earthquake stations as a source of wave rays. This study used LOTOS-10 (Local Tomography Software 10) for 3D seismic tomography inversion. Characteristics of the medium under Merapi Volcano described by physical parameters such as primary and secondary wave velocities. The result of seismograph data processing shows seismic tomography method can reveal the subsurface structure of the Merapi Volcano through the distribution of deviation anomaly speed and V_p / V_s ratio. Image quality generated by using primary wave more clearly the resolution and time used more efficient, so that can be used as disaster mitigation information before earthquake eruption happened. The negative anomaly area obtained under the peak of Merapi Volcano at a depth of 3 - 5 km has the physical characteristics of weak, less compact, hot and heterogeneous zones. The anomalous region can interpret as the existence of a zone of heat material associated with the rest of the shallow magma kitchen.

Keywords: Mount of Merapi, physical character, Seismic of Tomography, lotos-10.

PENDAHULUAN

Aktivitas gunung api merupakan kejadian alami yang sulit diduga. Indikasi aktivitas suatu gunung api antara lain adanya pertumbuhan kubah lava dan letusan paroksimal yang disertai awan panas. Aktivitas Gunung Merapi yang membahayakan adalah letusan yang disertai awan panas, semburan gas beracun, aliran lava pijar ataupun bahaya sekunder sebagai efek letusan. Letusan yang disertai awan panas sukar diperkirakan sehingga banyak yang tidak terselamatkan pada kejadian tersebut.

Berdasarkan permasalahan yang diuraikan di atas, maka memotivasi para peneliti pendahulu untuk menemukan metode-metode dalam penyelesaian permasalahan tersebut. Publikasi tentang metode pencitraan struktur 3-D kecepatan gelombang seismik pertama kali dikenalkan oleh Aki dan Lee [1]. Metode ini selanjutnya dikenal dengan metode tomografi seismik. Tomografi seismik merupakan metode pemetaan bawah permukaan yang belum lama digunakan dalam eksplorasi migas dan juga sudah lama dipakai di bidang-bidang lain di luar seismik seperti, radio astronomi, dunia kedokteran dan lainnya

Metode tomografi yang telah berhasil digunakan untuk mengungkap citra struktur litosfer bumi yang menunjam ke dalam lapisan mantel menggunakan gelombang gempa bumi tektonik global juga telah dicoba diterapkan di daerah yang lebih kecil yaitu daerah gunung api. Penerapan metoda tomografi seismik di daerah gunung api diharapkan dapat memberikan gambaran bawah permukaan secara lebih rinci sehingga dapat melengkapi model bawah permukaan lainnya.

Simulasi tomografi seismik dengan model Gunung api Merapi dengan program LOTOS-10 (*Local Tomography Software* 10) digunakan untuk memudahkan proses pengkajian suatu metode tomografi seismik di daerah gunung api. Sehingga dengan simulasi tomografi seismik yang dihasilkan diharapkan mampu menggambarkan keadaan di bawah Gunung Merapi dengan lebih rinci. Program ini sebelumnya telah diuji coba pada gempa tektonik secara global [4] untuk itu penulis ingin melakukan percobaan pada gempa Vulkanik dengan objek Gunung api Merapi.

METODE

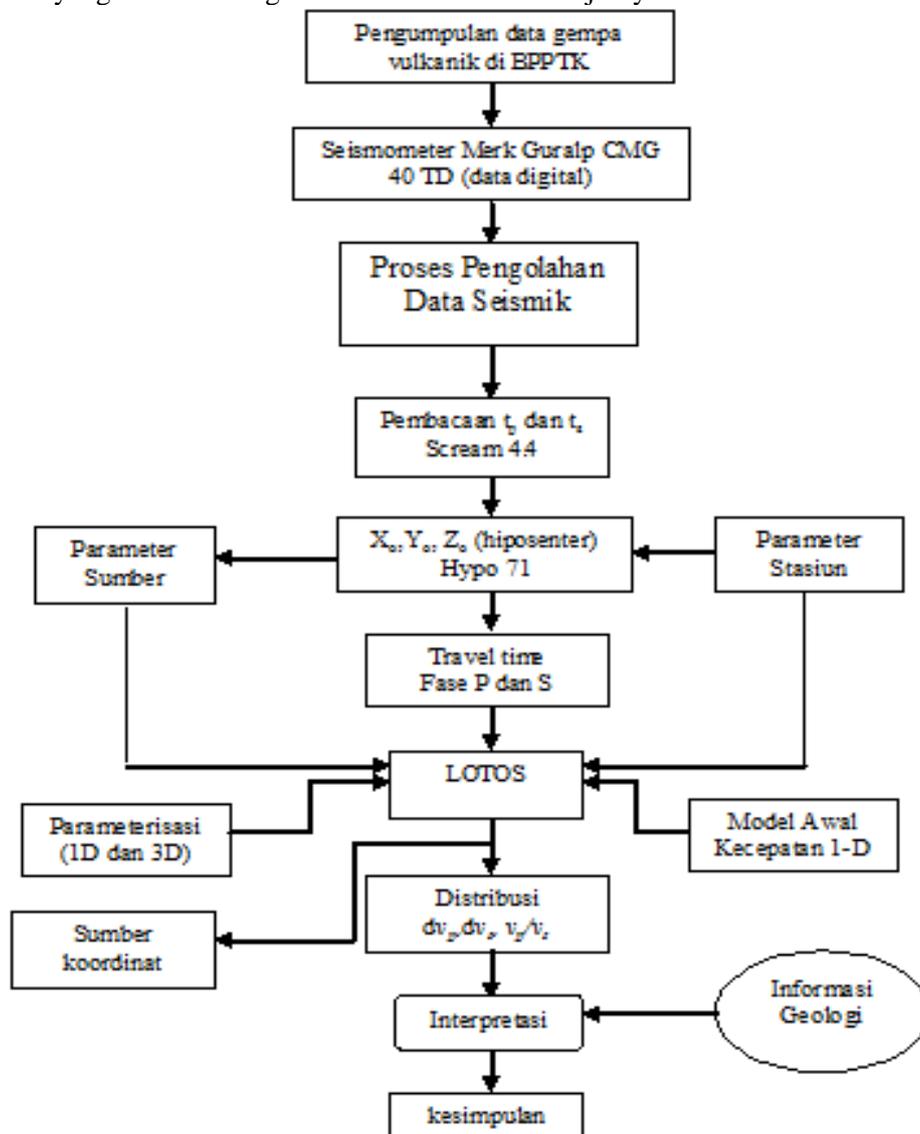
Penelitian yang dilakukan yaitu pengolahan data gempa vulkanik dari 4 seismograf yang terpasang di sekitar puncak Gunung Merapi menggunakan metode inversi tomografi seismik. Data dikumpulkan dari BPPTK (Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungapian) Yogyakarta dari tahun 2007 – 2009 [2]. Pengolahan data secara umum menggunakan *software* LOTOS-10 dan Hypo71 serta SURFER 9. Tahapan penelitian pencitraan tomografi seismik 3D di bawah Gunung Merapi secara umum diperlihatkan pada (Gambar 1).

Pengolahan pertama yaitu menentukan waktu datang (*arrival time*) gelombang P (primer) dan gelombang S (sekunder) dari setiap stasiun pada satu kejadian gempa. Data gempa vulkanik yang diperoleh yaitu sebanyak 67 kejadian dan terdapat 488 sinar gelombang. Selanjutnya memperhitungkan hiposenter dari setiap kejadian gempa menggunakan *Software Hypo71* [6]. Parameter yang digunakan untuk *input* pada program ini yaitu daftar lokasi stasiun, daftar model kecepatan lapisan berdasarkan referensi, daftar waktu tiba gelombang P dan S beserta karakteristik gelombang.

Masalah tomografi seismik sesungguhnya adalah masalah non-linier. Selama ini pemecahan masalah tomografi seismik dilakukan dengan pendekatan linier, yaitu dengan melakukan penyederhanaan masalah non-linier menjadi masalah linier. LOTOS melakukan penyelesaian tomografi dengan dua tahap pekerjaan, yaitu optimisasi kecepatan 1D dan inversi tomografi dalam 3D [3]. Untuk optimisasi kecepatan 1D, yaitu pencarian model kecepatan 1D terbaik dan preliminar lokasi sumber dilakukan dengan langkah awal perhitungan daftar waktu tempuh model 1D. Tahap berikutnya menghitung waktu tempuh yang didasarkan interpolasi bilinear dari nilai yang didapatkan dalam daftar referensi untuk menghitung lokasi sumber dengan menggunakan metode *grid search*. Matriks kernel yang menggambarkan variasi kecepatan dalam setiap kedalaman pada waktu tempuh setiap sinar kemudian dikomputasi. Inversi matriks dilakukan untuk anomali kecepatan gelombang P dan S dalam 1D, dan koreksi parameter sumber (dx , dy , dz , dt), dengan melakukan metode LSQR [8], dengan damping yang dikontrol oleh blok *smoothing* khusus.

Hasil yang telah didapatkan dalam pekerjaan pertama, kemudian digunakan dalam inversi tomografi 3D, tahap awal dalam inversi ini, yaitu penentuan lokasi sumber dalam model kecepatan 3D. Jika lokasi sumber dalam model 1D menggunakan metode *grid search*, maka dalam 3D [4, 5].

Hasil yang telah didapatkan dalam pekerjaan pertama, kemudian digunakan dalam inversi tomografi 3D, tahap awal inversi ini, yaitu penentuan lokasi sumber dalam model kecepatan 3D. Jika lokasi sumber dalam model 1D menggunakan metode *grid search*, maka dalam 3D, menggunakan metode gradien dari pencarian nilai ekstrim (*goal function*) fungsi G . Parameterisasi grid dibangun pada iterasi pertama saja, anomali kecepatan dikomputasi dalam node yang terdistribusi dalam volume studi menurut kepadatan sinar, terhubung satu dan yang lainnya melalui blok *smoothing* dalam inversi. Orientasi grid yang berbeda digunakan untuk menghilangkan pengaruh node yang terdistribusi tidak merata, dan di-*stack*. Perhitungan derivatif matriks awal dilakukan menggunakan jejak sinar yang dikomputasi setelah lokasi sumber dalam model 3D, yang berisi parameter kecepatan, koreksi sumber (dx, dy, dz, dt) dan koreksi stasiun. Amplitudo dan kehalusan dari penyelesaian dikontrol oleh dua blok tambahan. Kenaikan dari bobot blok ini menyebabkan penurunan amplitudo dan kehalusan penyelesaian. Inversi untuk keseluruhan matriks *sparse* dilakukan dengan metode LSQR (*Least Square Regresion*). Hasil yang didapat dari parameterisasi grid-grid direratakan dalam satu model 3D yang kemudian digunakan untuk iterasi selanjutnya.



GAMBAR 1. Diagram alur penelitian pencitraan tomografi seismik di bawah Gunung Merapi

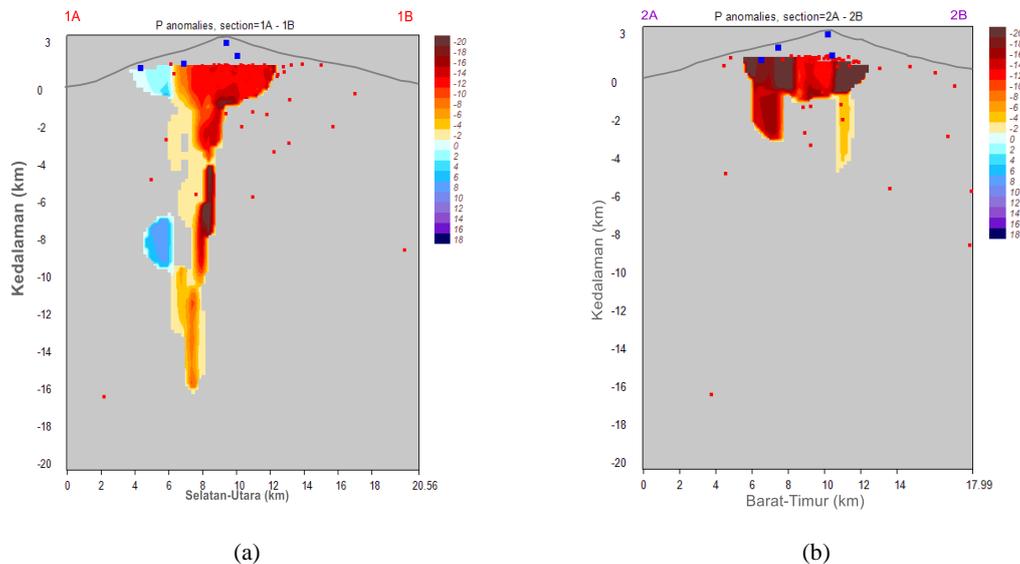
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil citra tomogram dari *software* LOTOS-10 ini dipresentasikan menjadi dua irisan yaitu irisan horizontal dan irisan vertikal. Masing-masing irisan akan menampilkan sinar gelombang dengan cakupan yang bervariasi. Cakupan sinar bahwa *ray covery* dan *ray density* di bawah kawah Gunung Merapi cukup baik sehingga resolusi tomogram di daerah-daerah ini juga cukup tinggi. Irisan vertikal dilakukan dalam arah Barat-Timur dan Selatan-Utara. Adapun irisan horizontal ditampilkan dengan interval kedalaman 2 km, 4 km, 6 km, 8 km, 10 km di bawah elevasi referensi. Model tomografi yang ditampilkan terdiri dari:

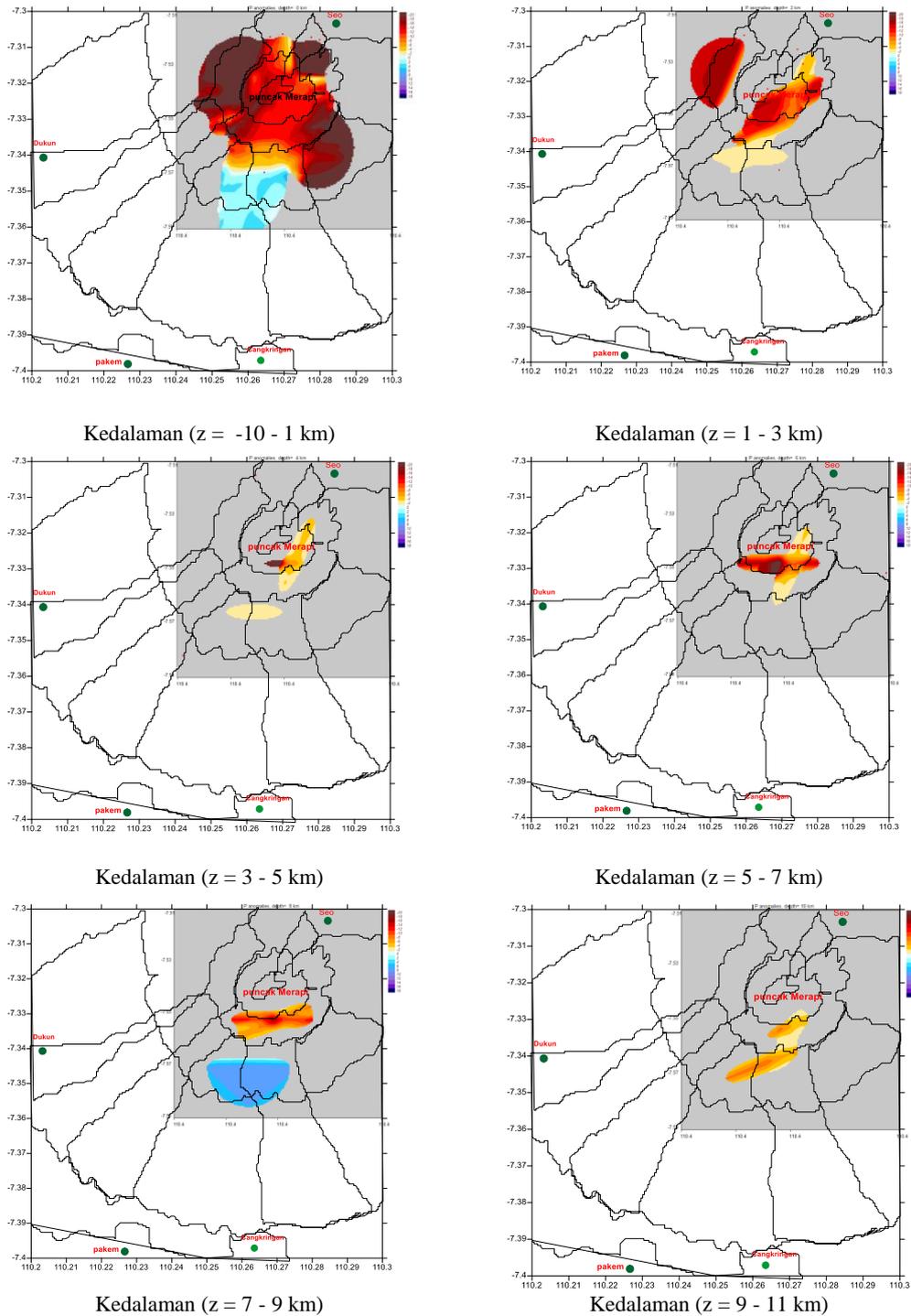
Model Tomogram Waktu Tunda Gelombang P (Primer)

Hasil penelitian yang didapatkan adalah citra anomali berdasarkan waktu tunda gelombang P ditampilkan dalam besaran presentasi deviasi kecepatan gelombang P (dV_p), satuan besaran deviasi ini adalah km/detik. Harga anomali deviasi kecepatan kecepatan berkisar -20 % sampai +10 % terhadap model kecepatan gelombang P. Dalam pembacaan warna untuk warna merah tua mewakili anomali negatif maksimum dan warna biru tua mewakili anomali positif maksimum.

Keenam gambar yang dihasilkan adalah anomali negatif terlihat jelas pada irisan bidang horizontal $z = 0$ km dan $z = -2$ km sedangkan pada $z = -4$ km, $z = -6$ km, $z = -8$ km, $z = -10$ km anomali mulai kurang teresolusi. Pada gelombang P untuk irisan vertikal arah Barat-Timur terlihat jelas pada bidang 2A-2B dan tampilan anomali negatifnya tampak semakin berkurang pada sisi kanan, sedangkan untuk irisan vertikal arah Selatan-Utara bidang 1A-1B anomali deviasi kecepatannya positif dari pada bidang 2A-2B, semakin ke selatan anomali negatifnya semakin berkurang karena terdapat warna biru muda namun dipresentasikan sampai kedalaman 15 km yang ditunjukkan pada **Gambar 2**.



GAMBAR 2. Irisan vertikal (a). 1A-1B dan (b). 2A-2B anomali deviasi kecepatan gelombang P.

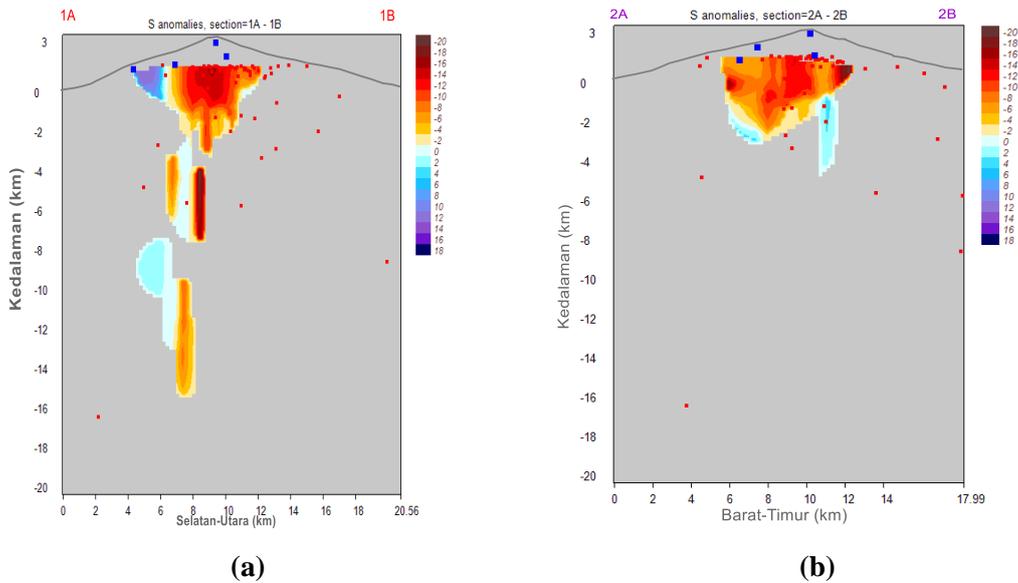


GAMBAR 3. Irisan horizontal tomogram anomali deviasi kecepatan gelombang P

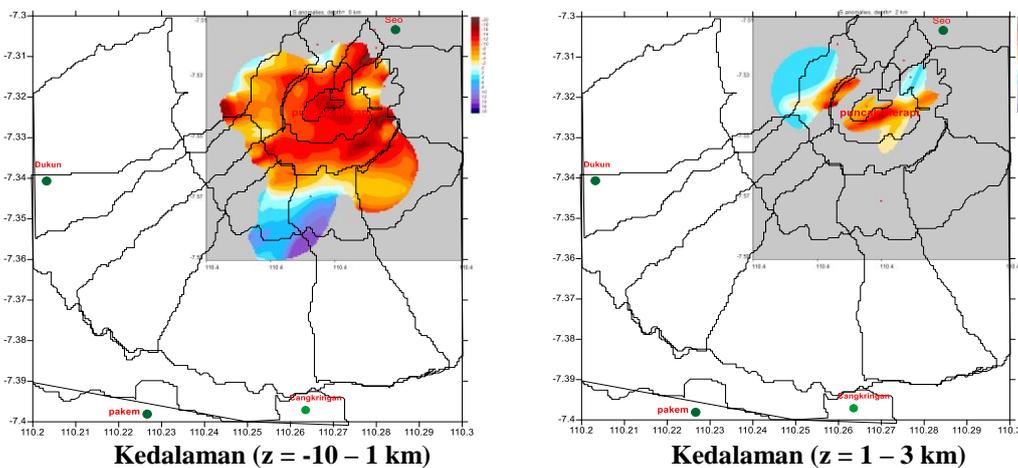
Model Tomogram Waktu Tunda Gelombang S (sekunder)

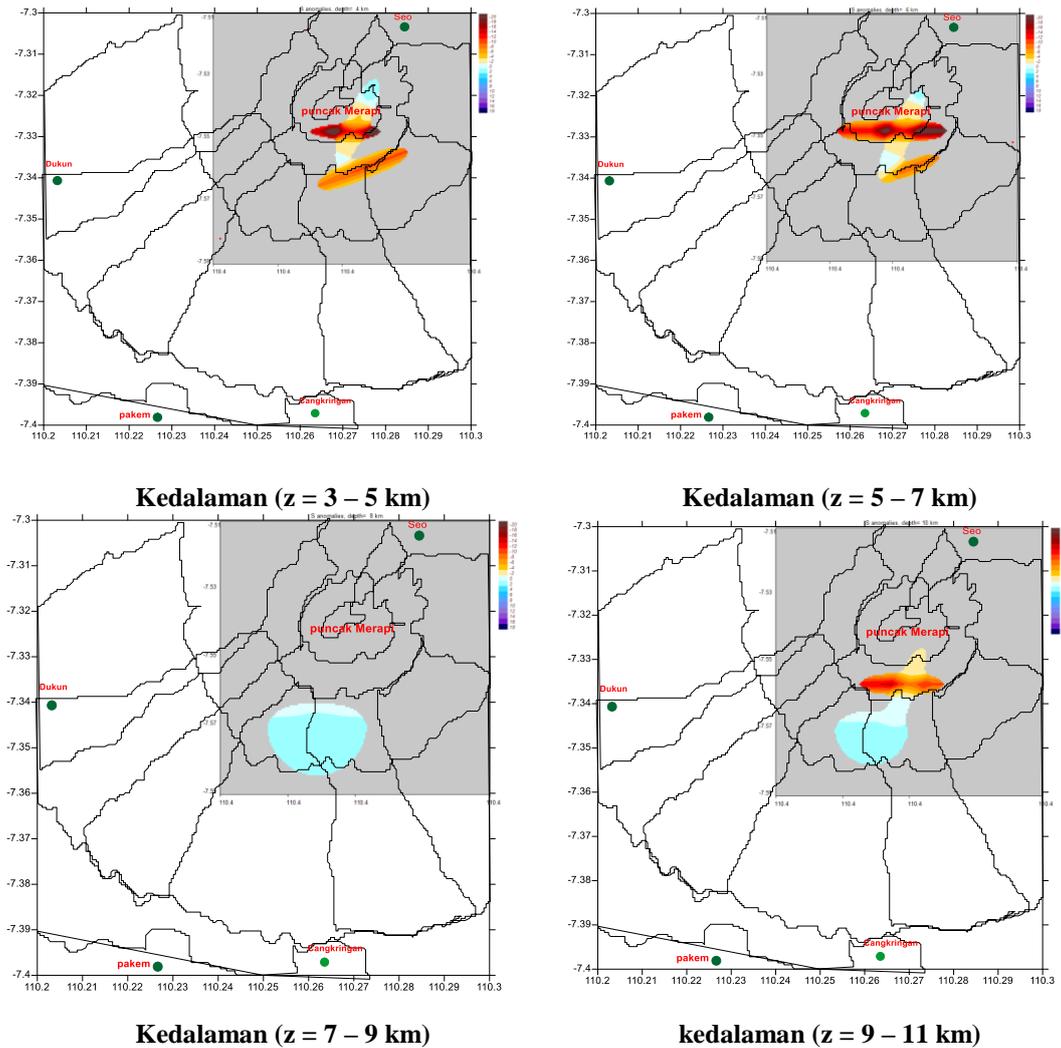
Citra anomali berdasarkan waktu tunda gelombang S juga ditampilkan dalam presentase besaran deviasi kecepatan gelombang S (dVs), satuan besaran deviasi ini adalah km/detik. Harga anomali deviasi kecepatan berkisar antara -20% sampai +18% terhadap model kecepatan gelombang S. Warna merah tua mewakili anomali negatif maksimum dan warna biru tua mewakili anomali positif maksimum.

Citra tomogram yang dihasilkan, anomali negatif dapat dilihat jelas hanya pada irisan bidang horizontal $z = 0$ km, sedangkan pada $z = -2$ km, $z = -4$ km, $z = -6$ km, $z = -8$ km, $z = -10$ km anomali negatif tidak teresolusi dengan baik. Anomali negatif pada $z = 0$ km dominan mengumpul dengan luasan kurang lebih 30 km^2 yang ditampilkan pada **Gambar 5**. Pada gelombang S untuk irisan vertikal arah Barat-Timur terlihat jelas pada bidang 2A-2B dan tampilan anomali negatifnya tampak semakin berkurang pada sisi kanan, sedangkan untuk irisan vertikal arah Selatan-Utara bidang 1A-1B anomali deviasi kecepatannya positif dari pada bidang 2A-2B, semakin ke selatan anomali negatifnya semakin berkurang karena terdapat warna biru muda namun dipresentasikan sampai kedalaman 15 km yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Irisan vertikal (a). 1A-1B dan (b). 2A-2B anomali deviasi kecepatan gelombang S.



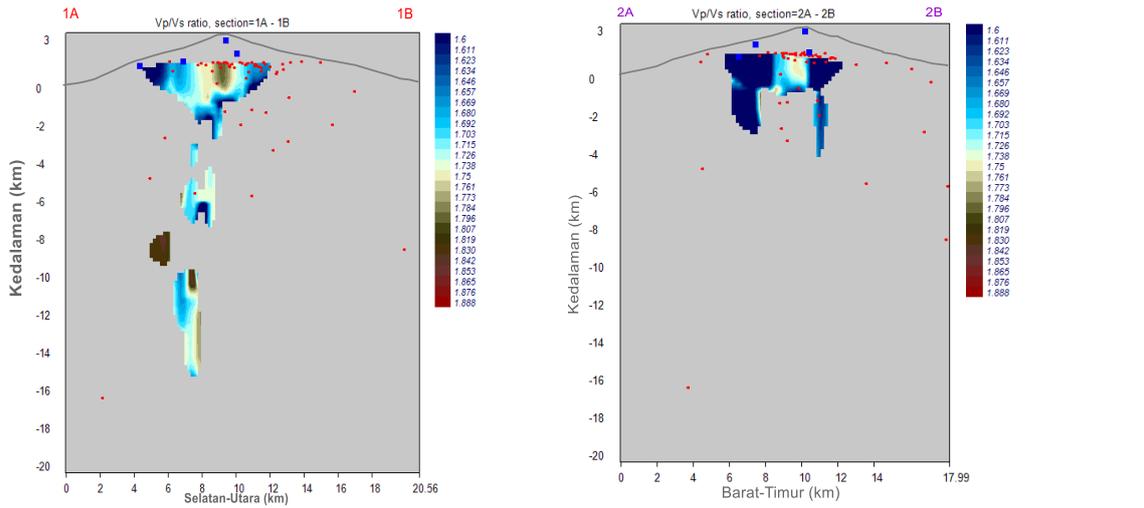


Gambar 5 Irisan horizontal tomogram anomali deviasi kecepatan gelombang S.

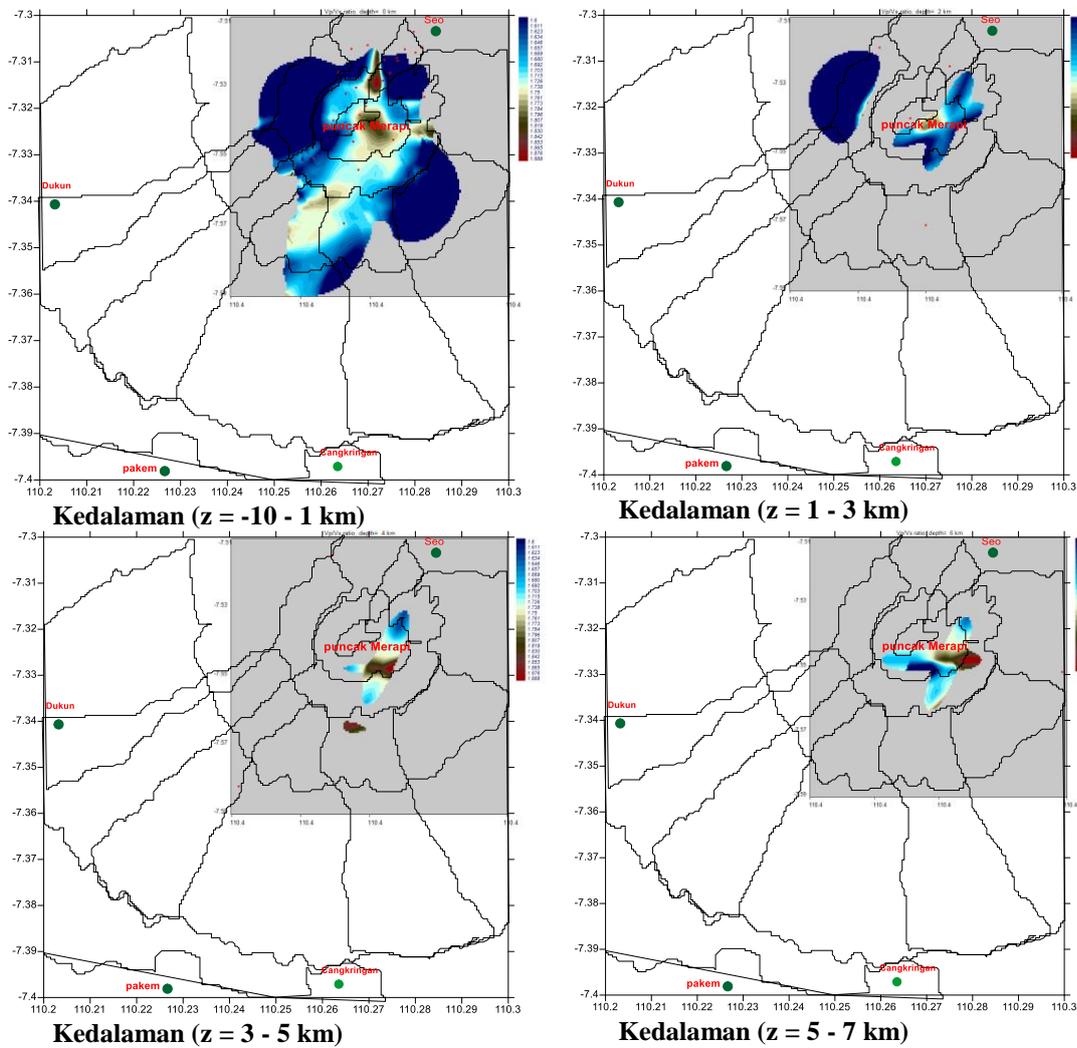
Model V_p/V_s Ratio

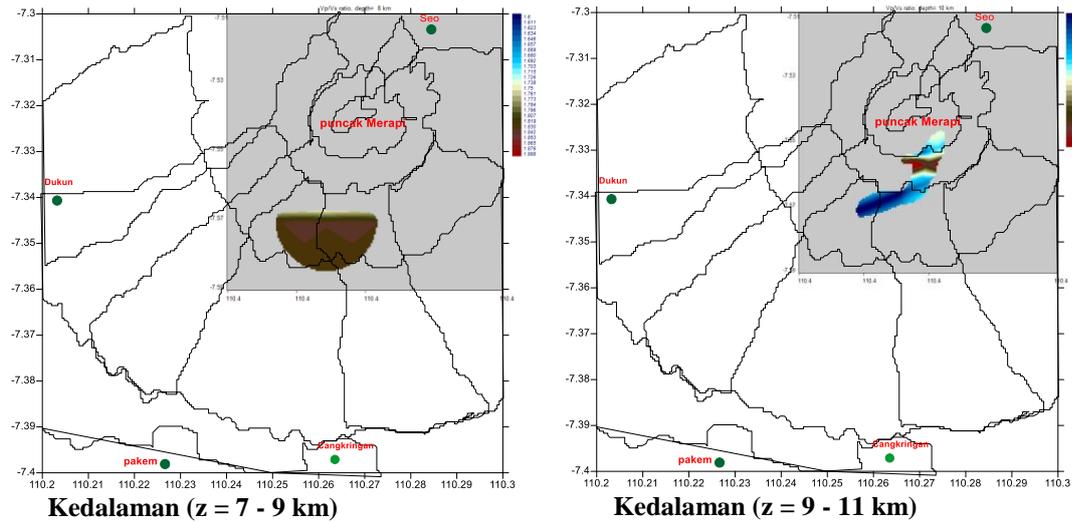
Berdasarkan model V_p/V_s yang dihasilkan untuk citra tomogram ditampilkan tanpa satuan, besaran ini bergantung pada kecepatan gelombang V_p dan V_s . Besaran ini mempunyai harga dari 1,60-1,88. Warna merah tua mewakili V_p/V_s ratio maksimum dan warna biru tua mewakili V_p/V_s ratio minimum. Untuk selanjutnya akan dibahas V_p/V_s ratio minimum yang merupakan anomali di sekitar V_p/V_s ratio yang lebih besar karena anomali ini lebih mencerminkan daerah lemah (kurang padat) di bawah permukaan yang berkaitan langsung dengan kegiatan vulkanik Gunung Merapi. Pada irisan bidang horizontal $z = 0$ km dapat terlihat jelas dan paling luas area V_p/V_s ratio minimumnya. Untuk V_p/V_s ratio minimum pada irisan bidang horizontal selanjutnya mulai berkurang dan kecil, bahkan tak terlihat untuk V_p/V_s ratio minimum pada irisan bidang horizontal $z = 8$ km dapat dilihat pada **Gambar 7**.

Pada irisan vertikal terdiri dari dua bagian yaitu Selatan-Utara (1A-1B) dan Barat-Timur (2A-2B) terlihat berbeda luasan daerah V_p/V_s ratio minimumnya. Hasil citra yang diperoleh untuk bidang vertikal arah Selatan-Utara V_p/V_s ratio minimum terlihat kurang jelas (berwarna biru muda), pada arah ini tampak V_p/V_s ratio minimum sampai di kedalaman 15 km seperti yang ditampilkan pada **Gambar 6**.



(a) (b)
Gambar 6. Irisan vertikal bidang (a). 1A-1B dan (b). 2A-2B tomogram V_p/V_s ratio.





Gambar 7 Irisan horizontal tomogram V_p/V_s ratio.

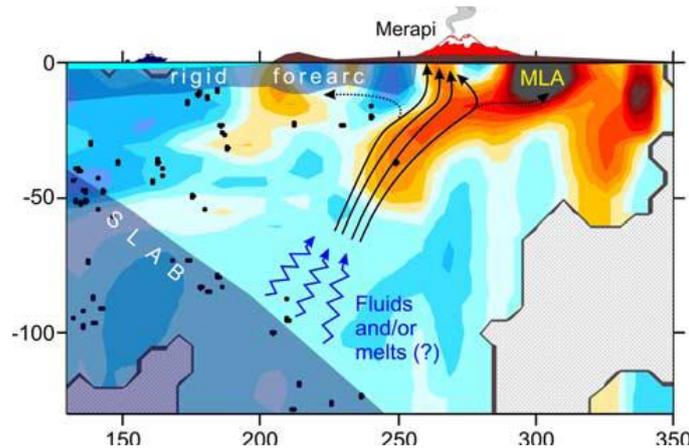
Interpretasi Tomogram Bawah Permukaan Gunung Merapi

Model tomografi gelombang P dan S sama-sama menunjukkan deviasi negatif terhadap model kecepatan, deviasi negatif maksimum mencapai -20% . Deviasi negatif atau anomali negatif kecepatan menurut studi terdahulu sangat berkaitan dengan sumber panas di bawah permukaan [9] atau adanya daerah lemah (sesar atau struktur bawah permukaan hasil kegiatan tektonik) [1, 10]. Dari hasil penelitian ini terlihat jelas bahwa tomografi gelombang P lebih jelas atau lebih teresolusi bila dibandingkan dengan anomali negatif model tomografi gelombang S. Ini berarti anomali gelombang P lebih negatif daripada anomali gelombang S.

Pada model tomografi V_p/V_s ratio terlihat juga anomali negatif sangat jelas dan terletak pada posisi yang sama dengan model gelombang P dan S, harga V_p/V_s ratio terendah di daerah anomali di bawah kawah Merapi pada kedalaman $z = 0$ adalah $V_p/V_s = 1,60$. Berdasarkan hasil studi di Gunung Nevado del Ruiz (Columbia) harga V_p dan V_p/V_s yang rendah di bawah kawah yang aktif berasosiasi dengan sistem geotermal yang didominasi oleh uap [7].

Model bawah permukaan Gunung Merapi dapat diinterpretasikan berdasarkan anomali tomogram dan distribusi pusat gempa vulkanik. Karakter fisis anomali adalah daerah lemah, heterogen, kurang kompak, panas, mengandung uap air tetapi tidak jenuh, dan kemungkinan di pusat anomali sebagian kecil ada yang bersifat partial melting.

Sumber gempa vulkanik di bawah Kawah Merapi cukup dangkal yaitu $0-2$ km di bawah elevasi referensi, di bawah kedalaman ini merupakan zona aseismik yang diinterpretasikan sebagai kantong magma terbesar dan dangkal. Sementara pada kedalaman $2-15$ km merupakan saluran magma dari kantong magma yang paling dalam. Pada **Gambar 8** merupakan interpretasi dari bawah Gunung Merapi yang dilakukan penelitian tomografi Jawa Tengah dan menemukan sebuah kantong magma yang besar di bawah Merapi bagian utara yang disebut juga MLA (Merapi-Lawu Anomaly).



Gambar 8. Interpretasi kecepatan di bawah Jawa Tengah pada referensi [3]

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pencitraan tomografi di bawah Gunung api Merapi dapat ditarik kesimpulan:

- Citra 3-D yang dihasilkan dari LOTOS sudah memadai yang menghasilkan tiga model citra anomali, yaitu model citra anomali gelombang P, citra anomali gelombang S, dan model V_p/V_s ratio. Posisi anomali negatif dari ketiga model tersebut berada pada area yang sama, yaitu anomali lebih luas berada pada kedalaman $z = 0$ km di bawah elevasi referensi dan terdalam yaitu pada kedalaman $z = 15$ km di bawah elevasi referensi.
- Hasil model citra anomali yang didapatkan menjelaskan bahwa Gelombang P memberikan gambaran tomogram yang lebih jelas daripada gelombang S, karena *signal to noise ratio* gelombang S lebih rendah dan waktu tiba gelombang S tidak sejelas waktu tiba gelombang P. Sifat fisis material pada bagian anomali negatif di bawah Gunung Merapi adalah kurang kompak, panas, heterogen, pada pusat anomali kemungkinan sebagian bersifat *partial melting* dan bersifat fluida. Posisi anomali negatif tepat berada di bawah pusat-pusat erupsi sebelumnya yang mencerminkan sistem kantong magma Gunung Merapi. Anomali negatif sangat berkaitan dengan daerah lemah yang dihasilkan oleh kegiatan vulkanik Gunung Merapi yang selalu aktif di area kantong magma. Karena itu perubahan sifat fisis anomali secara berkala berdasarkan studi tomografi ini kemungkinan dapat digunakan untuk memantau tingkat kegiatan Gunung Merapi.

REFERENSI

- [1] K. Aki and W. H. K. Lee, 1976, "Determination Of Three-Dimensional Velocity Anomalies Under a Seismic Array Using First P Arrival Times from Local Earthquake," *Journal of Geophysical Research*, No. 23, Vol. 81, 4381-4399.
- [2] BPPTK, 2000, Leaflet: *Pesona Merapi*, BPPTK, Yogyakarta.
- [3] I. Koulakov and S. V. Sobolev, 2006, "A Tomographic Image of Indian Lithosphere Break-off Beneath the Pamir Hindukush Region", *Geophysics Journal International*, Vol. 164, p. 425-440.
- [4] I. Koulakov et al., 2007, "Joint Inversion of Active and Passive Seismic Data in Central Java," *Geophysics Journal International*, Vol. 170, p. 923-932.
- [5] I. Koulakov, 2009, "LOTOS Code For Local Earthquake Tomographic Inversion : Benchmarks for Testing Tomographic Algorithms," *Bulletin of Seismological Society of America (BSSA)*, No. 1, Vol.99, p. 194-214.

- [6] W. H. K. Lee and J. C. Lahr, 1972, "Hypo71: A computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude, and First Motion Pattern of Local Earthquakes," *Open-File Report U. S. Geological Survey*, p. 100. California.
- [7] J. M. Londono, 2002, "A Seismic Model for the Volcanic Activity of Nevado del Ruiz Vulcano Colombia," *Thesis*, Kyoto University, Kyoto.
- [8] C. C. Paige and M. A. Saunders, 1982. "LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares," *ACM trans. Math. Soft.*, 8, 43–7
- [9] L. K. Steck, et al., 1998. "Crust and Upper Mantle P Wave Velocity Structure Beneath Valles Caldera, New Mexico: Result from the James Teleseismic Tomography Experiment," *Journal Geophys. Res.*, 103, 24.301-24.320.
- [10] J. Um and C. Thurber, 1987, "A Fast Algorithm for Two-Point Seismic Ray Tracing," *Bulletin of The Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 3, p. 972-966.

