Anisotropi Azimutal di Kompleks Gunung Agung-Batur Menggunakan *Ambient Noise Tomography*

Zulfakriza[1], Nazal Rhinta Hawari[1], Nanang Tyasbudi Puspito[1], Andri Dian Nugraha[1], David Prambudi Sahara[1], Rexha Verdhora Ry[1], Shindy Rosalia[1], Devy Kamil Syahbana[2], Aditya Lesmana[1], Martanto[2], Kristianto[2], Sri Widiyantoro[1]

[1] Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
[2] Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi model kecepatan gelombang geser (V_S) dan anisotropi azimutal di Kompleks Gunung Agung-Batur menggunakan *Ambient Noise Tomography* (ANT). Kami menggunakan data seismik kontinu selama 275 hari (Des 2018–Sep 2019) yang direkam oleh 25 stasiun di jaringan temporer *Agung Seismic Experiment* (ASE). Ditemukan anomali kecepatan rendah di bawah Gunung Agung (reservoir magma dangkal), anomali kecepatan tinggi di area pelana dangkal (fondasi batuan masif Kaldera Batur purba), dan anisotropi azimutal kuat dengan arah sumbu cepat NW-SE di area pelana (medan tegangan lokal pengontrol jaringan rekahan dangkal dan intrusi sub-vertikal. Blok padat yang kaku di area pelana dangkal menahan migrasi vertikal magma pada akhir September 2017 sehingga magma terdefleksi menuju reservoir dangkal di Gunung Agung. Hal ini menjelaskan jeda waktu ~2 bulan sebelum erupsi pertama pada 21 November 2017.

Kata Kunci: Sistem Perpipaan Magma, Anisotropi Azimutal, *Ambient Noise Tomography*

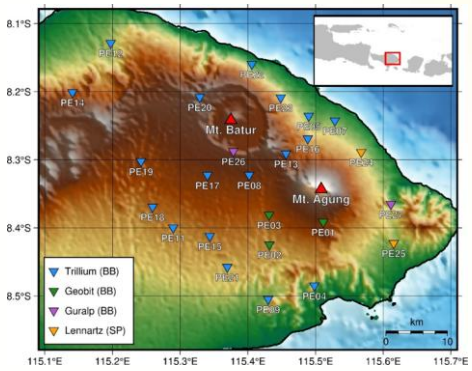
PENDAHULUAN

Kompleks Gunung Agung-Batur mengancam hampir 200.000 penduduk di sekitarnya. Gunung Agung memiliki rata-rata erupsi eksplosif (VEI ≥ 2–3) satu kali per abad, termasuk erupsi katastropik 1963–1964 (VEI 5) yang menewaskan >1.100 jiwa serta krisis vulkanik 2017–2019 yang memicu evakuasi >140.000 jiwa. Aktivitas erupsi simultan Agung-Batur pada tahun 1963 serta *seismic swarm* pra-erupsi 2017 (>800 kejadian/hari) di area pelana Agung-Batur mengindikasikan konektivitas sistem perpipaan magma bertingkat, intrusi sub-vertikal, dan akumulasi fluida hidrotermal.

Studi tomografi seismik terdahulu di Kompleks Gunung Agung-Batur masih berasumsi medium isotropik. Penelitian ini mengintegrasikan analisis anisotropi azimutal berdasarkan metode ANT dengan skema inversi langsung untuk memetakan orientasi rekahan, medan tegangan kerak, dan intrusi sub-vertikal secara komprehensif.

METODOLOGI DAN HASIL

Data yang digunakan adalah data seismik kontinu selama 275 hari (Des 2018–Sep 2019) yang direkam oleh 25 stasiun di jaringan temporer *Agung Seismic Experiment* (ASE). Tahap persiapan data meliputi koreksi respons instrumen, pemfilteran *bandpass* (periode 0,2–20,0 s), *downsampling* (dari 100 Hz ke 25 Hz), normalisasi temporal, dan normalisasi spektral. Fungsi Green Empiris (FGE) komponen ZZ direkonstruksi melalui korelasi silang yang dioptimasi menggunakan metode Welch (segmen 3.600 s, *overlap*75%) dan *Phase-Weighted Stack* (PWS). Kurva dispersi kecepatan fase gelombang Rayleigh (periode 1–15 s, kecepatan 0,5–4,0 km/s) diekstrak melalui teknik transformasi citra dengan ambang batas SNR ≥ 3 dan syarat medan jauh $\lambda \leq \frac{1}{0,8}\Delta$.



Gambar 1. Distribusi stasiun di jaringan ASE.

Tomografi Anisotropi Azimutal: Melakukan pelacakan sinar menggunakan *Fast Marching Method* dan menginversi data waktu tempuh gelombang permukaan secara langsung.

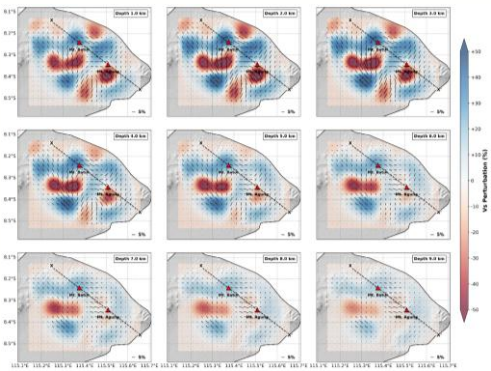
$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{iso} & \mathbf{G}_{AA} \\ \boldsymbol{\lambda}_{iso}\mathbf{L}_{iso} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\lambda}_{AA}\mathbf{L}_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{iso} \\ \mathbf{m}_{AA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

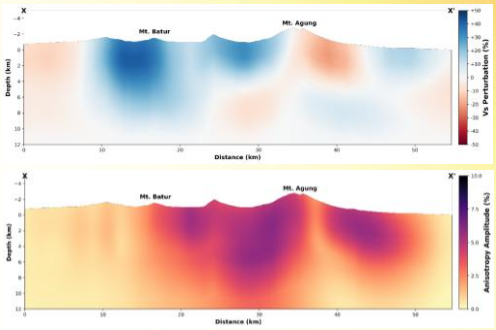
$$A_A = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{G_s}{L}\right)^2 + \left(\frac{G_c}{L}\right)^2} \qquad \phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{G_s}{G_c}\right)$$

Parameterisasi Inversi: Menggunakan ukuran grid horizontal 2,5 km hingga kedalaman 12,0 km. Model awal 1-D berupa kecepatan 1,75 km/s di permukaan dengan gradien 0,15 km/s/km. Parameter regularisasi optimal dipilih berdasarkan analisis kurva-L (*damping* = 3,0; *smoothing* V_S = 7,5; *smoothing* G_cG_s = 3,0). Inversi sebanyak 15 iterasi dapat menurunkan galat RMS data dari 1,86 s menjadi 1,79 s dan menyempitkan residual waktu tempuh dari ±5,0 smenjadi ±1,0 s.

Uji Resolusi Papan Catur: Model sintetik dibuat menggunakan ±15,0% perturbasi V_S berukuran 10×10 km dan ±7,5% amplitudo anisotropi azimutal berukuran 20×20 km dengan ketebalan 4,0 km. Agar menyerupai kondisi data lapangan, ditambahkan Gaussian *random noise* sebesar 0,1 s. Model pemulihan teresolusi sangat baik di kompleks vulkanik utama hingga kedalaman 10 km.



Gambar 2. Penampang horizontal tomografi.



Gambar 3. Penampang vertikal tomografi.

PEMBAHASAN DAN KESIMPULAN

Sistem Perpipaan Magma

Anomali kecepatan rendah di bawah Gunung Agung diinterpretasikan sebagai reservoir magma dangkal. Reservoir dangkal tersebut terkoneksi secara struktural dengan anomali kecepatan rendah di area pelana dalam yang membuktikan keberadaan jalur migrasi magma berupa intrusi sub-vertikal. Selain itu, reservoir dangkal tersebut berasosiasi dengan anisotropi azimutal yang lemah dan arah sumbu cepat yang acak. Hal ini disebabkan oleh rezim termal bersuhu tinggi dan akumulasi lelehan parsial yang mengacaukan orientasi rekahan di kerak atas (Chen et al., 2018).

Orientasi Rekahan & Medan Tegangan Kerak

Di luar kompleks vulkanik utama, arah sumbu cepat didominasi oleh orientasi N-S yang menunjukkan rekahan kerak regional akibat subduksi Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Eurasia. Di area pelana, pola tersebut digantikan oleh anisotropi azimutal kuat dengan arah sumbu cepat NW-SE. Orientasi ini selaras dengan *strike* intrusi sub-vertikal ($N129 \pm 2°E$) yang dikontrol oleh pembebanan topografi lokal (Albino et al., 2019). Di sekitar Gunung Batur serta bagian timur laut dan barat daya area pelana teramati anisotropi azimutal moderat dengan arah sumbu cepat NE-SW. Pola ini menunjukkan struktur sisa keruntuhan Kaldera Batur dan jaringan rekahan dangkal yang sejajar dengan klaster gempa VT (~ N65°E) (Sahara et al., 2021).

Mekanisme Krisis Vulkanik 2017

Anomali kecepatan tinggi di area pelana dangkal diinterpretasikan sebagai blok padat berupa fondasi batuan beku masif sisa Kaldera Batur purba (Gunung Abang). Keberadaan penghalang ini menahan migrasi vertikal magma pada akhir September 2017 sehingga magma terdefleksi menuju reservoir dangkal Gunung Agung. Proses ini menjelaskan adanya jeda waktu sekitar 2 bulan antara puncak krisis seismik dan erupsi freatomagmatik pada 21 November 2017 (Syahbana et al., 2019). Magma yang tertahan memicu pelepasan gas dan transfer panas ke sistem akuifer di sekitarnya. Hal ini menimbulkan tekanan berlebih hidrotermal yang menurunkan tegangan normal efektif batuan dan mereaktivasi jaringan rekahan berarah NE-SW (Sahara et al., 2021).