

STRUKTUR KECEPATAN SEISMİK DI BAWAH GUNUNG MERAPI DAN SEKITARNYA BERDASARKAN STUDI TOMOGRAFI SEISMİK WAKTU TEMPUH

VELOCITY STRUCTURE BENEATH MERAPI VOLCANO AND ITS SURROUNDINGS BASED ON SEISMIC TOMOGRAPHY TRAVEL-TIME STUDY

Mohamad Ramdhan, Said Kristyawan, Andry Syaly Sembiring, Daryono, Priyobudi

¹Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG); Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran, Jakarta Pusat

ABSTRAK Periode erupsi Gunung Merapi yang relatif pendek menjadi penyebab banyaknya ahli ilmu kebumihmenen mempelajari proses yang terjadi, baik di bawah permukaan maupun di bagian puncak gunung api tersebut. Jaringan seismik DOMERAPI yang terdiri dari 53 stasiun seismik digunakan untuk memahami karakteristik reservoir magma utama di bawah Gunung Merapi dengan periode perekaman data dari bulan Oktober 2013 sampai pertengahan bulan April 2015. Sejumlah 464 gempa berhasil dideteksi oleh jaringan seismik DOMERAPI dengan mayoritas gempanya berada di luar jaringan seismik tersebut karena Gunung Merapi pada saat itu berada dalam keadaan tidak aktif. Gempa-gempa yang berada di luar jaringan seismik tersebut digunakan untuk mendelineasi reservoir magma utama di bawah Gunung Merapi. Reservoir magma utama di bawah Gunung Merapi teridentifikasi pada kedalaman sekitar 15 km di bawah permukaan laut

(MSL) yang dicirikan dengan V_p dan rasio V_p/V_s yang tinggi serta V_s yang rendah. Keberadaan reservoir magma dangkal yang berkaitan dengan *fluid percolation* juga teridentifikasi dengan jelas pada studi ini yang berada pada kedalaman kurang dari 5 km di bawah MSL yang dicirikan dengan V_p yang rendah, rasio V_p/V_s yang tinggi dan V_s yang rendah. Adapun keberadaan reservoir magma dalam Gunung Merapi tidak berhasil diidentifikasi pada studi ini karena keterbatasan resolusi data seismik.

Kata kunci: Merapi, DOMERAPI, magma, reservoir, V_p , rasio V_p/V_s , V_s .

ABSTRACT *The relatively short eruption period of Merapi volcano is the reason for many earth scientists to investigate the processes that occur both beneath the surface and at the top of the volcano. The DOMERAPI seismic network consisting of 53 seismic stations was installed to understand the characteristics of the main magma reservoir under the volcano with a period of data recording from October 2013 to mid-April 2015. A total of 464 earthquakes were detected by DOMERAPI seismic network with the majority of the earthquake occurred outside the seismic network because the volcano was inactive at that time. The earthquakes are used to delineate the main magma reservoir beneath the volcano. The main magma reservoir was identified at a depth of 15 km below mean sea level (MSL,) which is characterized by high V_p , a high V_p/V_s ratio and low V_s . The existence of shallow magma reservoirs related to fluid percolation was also clearly identified in this study which was at a depth of less than 5 km below MSL which was characterized by low V_p , a high V_p/V_s ratio and*

Naskah masuk : 5 April 2019
Naskah direvisi : 12 Juni 2019
Naskah diterima : 24 September 2019

Mohamad Ramdhan
Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika,
Kemayoran, Jakarta
Email: mohamad.ramdhan@bmkg.go.id

low Vs. The existence of deep magma reservoir was not identified in this study because of the limited resolution of seismic data.

Keywords: Merapi, DOMERAPI, magma, reservoir, Vp, Vp/Vs ratio.

PENDAHULUAN

Gunung Merapi merupakan salah satu gunungapi tipe *stratovolcano* yang paling aktif di dunia dengan periode erupsi yang relatif pendek sehingga menarik berbagai ahli kebumiharian baik dari dalam maupun luar negeri untuk memahami proses yang terjadi di bawah gunung api tersebut. Erupsi-erupsi dengan rentang waktu yang relatif pendek terjadi pada tahun 1984, 1986, 1992 dan 1994 (Ratdomopurbo and Poupinet, 2000). Erupsi tersebut didominasi oleh aliran piroklasik yang diakibatkan oleh runtuhnya kubah lava (Hidayati et al., 2008). Erupsi tahun 2006 juga termasuk kepada tipe erupsi tersebut (Costa et al., 2013). Erupsi dengan tipe berbeda dan kekuatan yang tinggi (*Volcanic Explosivity Index* (VEI) ~ 4) seperti peristiwa erupsi tahun 2010 terjadi dalam rentang waktu 50 sampai 100 tahun (Komorowski et al., 2013; Luehr et al., 2013; Surono et al., 2012).

Hasil studi proyek MERapi AMphibious EXperiment (MERAMEX) berhasil menjelaskan hubungan antara zona subduksi dan busur gunung api di Jawa bagian tengah khususnya di bawah Gunung Merapi dari struktur kecepatan gelombang P dan S. Hasil studi tersebut menggambarkan dengan jelas keberadaan fluida atau material yang melebur dari *slab* naik menuju ke permukaan di bawah busur vulkanik (Koulakov et al., 2007; Wagner et al., 2007). Hasil studi tersebut diperbarui lagi dengan menggabungkan data katalog gempa BMKG dengan citra *slab* yang lebih jelas (Rohadi et al., 2013). Sejumlah studi tomografi seismik tersebut belum bisa menjelaskan karakteristik reservoir magma Gunung Merapi dalam ukuran skala yang lebih detil karena keterbatasan resolusi data seismik. Studi yang lebih lokal dengan memanfaatkan gempa *volcanotectonic* (VT) menunjukkan bahwa gempa-gempa tersebut terjadi di kedalaman maksimal 5 km di bawah puncak gunung atau 2 km di bawah MSL sehingga untuk reservoir magma yang lebih dalam tidak bisa didelineasi dari gempa-gempa VT.

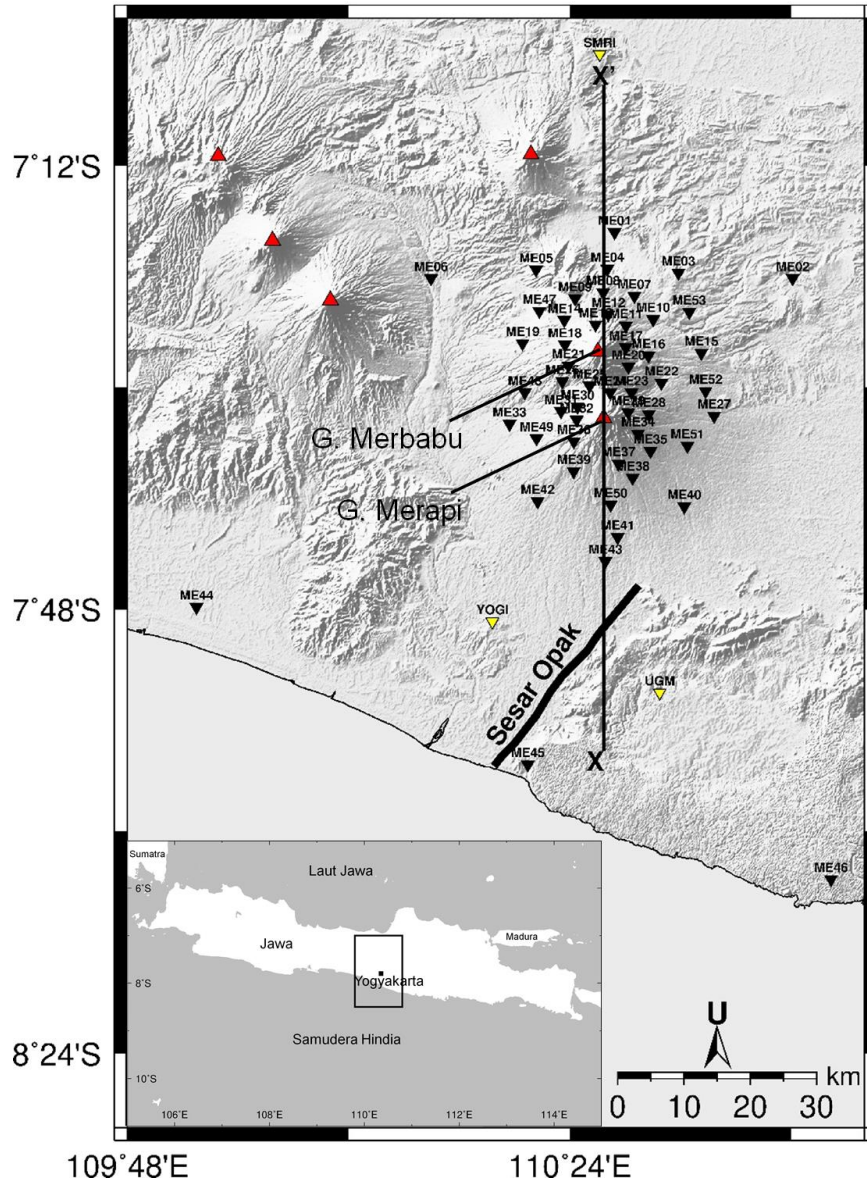
Proyek DOMERAPI dilaksanakan untuk mengetahui keberadaan reservoir magma utama Gunung Merapi yang belum bisa tercitrakan dari hasil studi-studi sebelumnya (Budi-Santoso et al., 2013; Hidayati et al., 2008; Koulakov et al., 2007; Ratdomopurbo and Poupinet, 2000; Wagner et al., 2007). Studi ini mengaplikasikan tomografi seismik waktu tempuh untuk mengetahui keberadaan dan karakteristik reservoir magma di bawah Gunung Merapi berdasarkan gempa-gempa yang sudah terelokasi hiposenternya dari jaringan seismik DOMERAPI dan BMKG (Ramdhan et al., 2017a). Hasil studi pada penelitian ini memperlihatkan peningkatan resolusi data seismik di bawah Gunung Merapi sehingga keberadaan reservoir magma utama di bawah Gunung tersebut bisa teridentifikasi keberadaannya.

DATA DAN METODOLOGI

Data gempa yang digunakan untuk perhitungan tomografi seismik waktu tempuh berada pada rentang 108° - 112° BT dan 6° - 11° LS. Pembatasan data dilakukan karena gempa-gempa yang lain jaraknya cukup jauh terhadap jaringan seismik DOMERAPI. Jika data tersebut tetap disertakan akan menyulitkan ketika harus merapatkan grid di sekitar jaringan seismik tersebut karena akan menyebabkan banyak area yang tidak terlewati oleh *ray path* gelombang seismik. Banyaknya area yang tidak terlewati *ray path* akan menimbulkan ketidakstabilan dalam proses inversinya. 399 dari 464 data gempa berhasil direlokasi hiposenternya (Ramdhan et al., 2017a). Data yang digunakan untuk perhitungan tomografi seismik menggunakan 372 data gempa dengan 70 stasiun seismik (53 jaringan seismik DOMERAPI dan 17 jaringan seismik BMKG). Pembatasan wilayah menjadikan data yang digunakan untuk inversi tomografi seismik menjadi berkurang. Jumlah total fase waktu tiba yang digunakan sebanyak 16101 fase (11074 untuk gelombang P dan 5054 untuk gelombang S). Gambar 1 menunjukkan distribusi stasiun seismik di sekitar area penelitian. Studi ini berbeda dengan studi sebelumnya yang menggunakan jumlah fase gelombang P dan S yang sama (Widiyantoro et al., 2018). Hasil penelitian ini juga merupakan penjelasan lengkap dari hasil studi sebelumnya yang menjelaskan karakteristik sistem magma di bawah Gunung Merapi dari tomogram kecepatan gelombang P saja (Ramdhan et al., 2017b).

Distribusi kerapatan stasiun seismik, posisi episenter dan target daerah penelitian menjadi faktor pertimbangan utama untuk menentukan ukuran grid di suatu area. Daerah penelitian dengan kerapatan stasiun yang tinggi menggunakan ukuran grid yang lebih kecil dibandingkan dengan daerah lainnya karena *ray path* gelombang seismik kebanyakan berkumpul di daerah tersebut. Ukuran grid yang fleksibel ini

pernah diaplikasikan dengan baik untuk studi tomografi seismik waktu tempuh di Sesar San Andreas (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999). Ukuran grid yang fleksibel juga sangat berguna dalam menghemat waktu komputasi. Sebaran distribusi grid dan episenter yang digunakan untuk penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 2. Sedangkan ukuran grid yang digunakanya ditunjukkan oleh tabel 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian dan distribusi seismometer jaringan seismik DOMERAPI (segitiga hitam terbalik) dan BMKG (segitiga kuning terbalik). Jaringan seismik DOMERAPI melingkupi Gunung Merapi dan Merbabu serta Sesar Opak dengan jaringan yang tidak terlalu rapat. Segitiga Merah menunjukkan posisi gunung api. Penampang vertikal tomomgram X-X' (arah selatan-utara) ditunjukkan oleh gambar 3. Gambar inset menunjukkan posisi kota Yogyakarta terhadap area penelitian.

Sinyal waktu tiba gelombang P dan S *dipicking* secara manual sebelum dilakukan penentuan parameter hiposenternya. Parameter hiposenter gempa diproses menggunakan metode Geiger (Geiger, 1912) yang diaplikasikan dengan program Hypoellipse (Lahr, 1999). Metode ini berhasil memetakan sejumlah sesar dari sebaran seismisitas yang terdapat di Jawa Barat (Supendi et al., 2018). Untuk mendapatkan parameter hiposenter yang lebih presisi sebagai input untuk tomografi seismik, katalog gempa tersebut direlokasi terlebih dahulu parameter hiposenternya dengan metode *double-difference* (Waldhauser, 2001; Waldhauser and Ellsworth, 2000). Metode ini telah diaplikasikan secara luas untuk merelokasi parameter hiposenter gempa di Indonesia dari katalog gempa BMKG (Cahyaningrum et al., 2015; Ramadhan and Nugraha, 2013; Sabtaji and Nugraha, 2015; Supendi et al., 2018). Parameter gempa hasil relokasi dan waktu tempuh gelombang seismik (Gelombang P dan S) di setiap stasiun pencatat gempa digunakan sebagai input data untuk perhitungan tomografi seismik waktu tempuh. Perhitungan struktur kecepatan seismik di area Gunung Merapi dan sekitarnya menggunakan

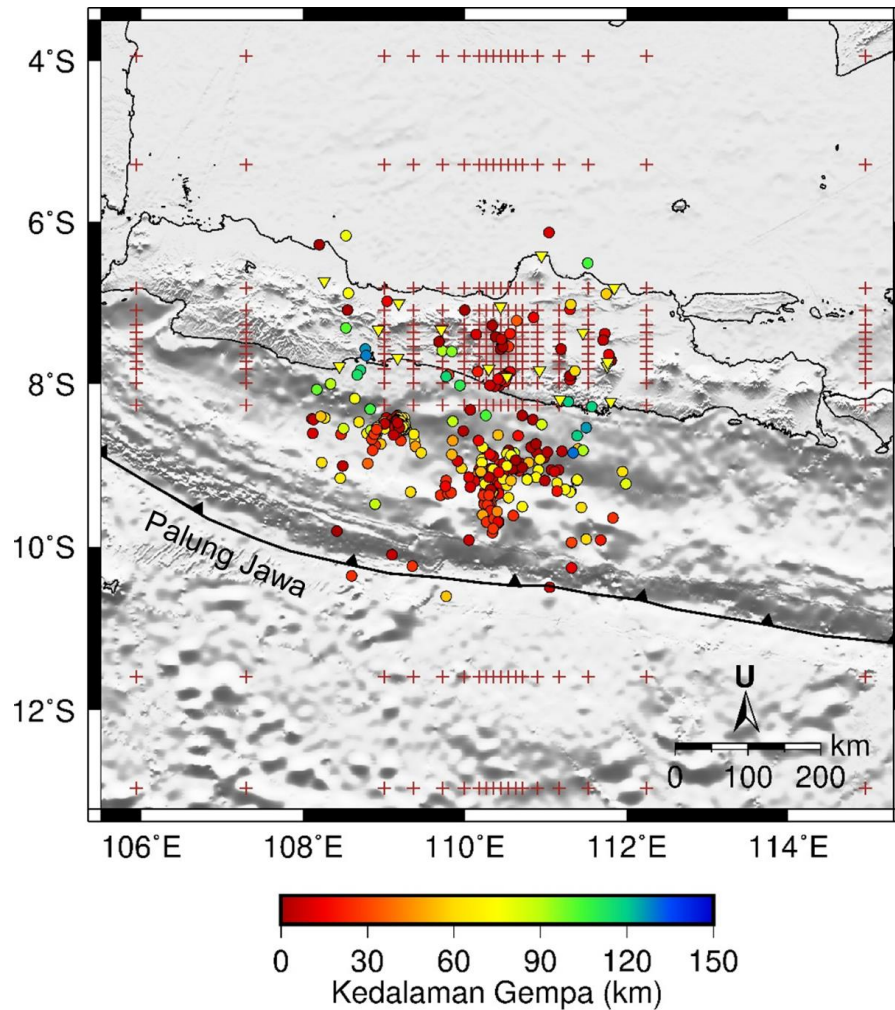
program SIMULPS12 (Eberhart-Phillips, 1993; Evans et al., 1994). Program ini diaplikasikan secara luas untuk studi struktur bawah permukaan di dunia. Struktur sesar di bawah Sesar San Andreas, Amerika Serikat dan *slab* di bawah Shikoku dan Bungo *channel*, Jepang terdeliniasi sangat baik dengan metode yang digunakan pada *software* tersebut (Nugraha and Mori, 2006; Thurber and Eberhart-Phillips, 1999). Tomogram rasio V_p/V_s diurutkan setelah tomogram V_p karena hasil parameter rasio V_p/V_s diinversi secara simultan dengan parameter V_p dan parameter hiposenter. Adapun tomogram V_s merupakan hasil pembagian dari tomogram V_p terhadap rasio V_p/V_s . Jumlah waktu tiba gelombang P dan S idealnya sama untuk setiap kejadian gempa yang direkam oleh setiap stasiun yang merekam kejadian gempa. Tetapi pada kenyataannya jumlah waktu tiba gelombang S lebih sedikit daripada gelombang P karena *onset* gelombang S tidak sejelas *onset* gelombang P. Inversi rasio V_p/V_s merupakan solusi yang digunakan ketika jumlah data waktu tiba gelombang P dan S berbeda sehingga jalur *ray path* gelombang S sama dengan yang digunakan pada gelombang P (Thurber, 1993).

Tabel 1. Ukuran grid 3-D arah horisontal dan vertikal dengan pusat grid berada di Gunung Merapi yang berkoordinat 110.45°E and 7.54°S.

Arah grid	Jarak grid dari pusat model grid (km)
x	-500 -350 -160 -120 -80 -50 -30 -20 -10 0 10 20 30 50 80 120 200 500
y	-600 -450 -80 -50 -30 -20 -10 0 10 20 30 50 80 250 400
z	-200 0 5 10 15 20 25 30 35 50 80 120 270 450

Tabel 2. Model kecepatan 1-D yang menjadi input tomografi seismik waktu tempuh pada penelitian ini (Koulakov et al., 2007).

Kedalaman (km)	V_p (km/s)	V_s (km/sec)
-3	4,30	2,49
3	4,90	2,83
8	5,70	3,29
16	6,90	3,99
24	7,10	4,10
77	7,80	4,51
120	8,05	4,65
165	8,17	4,72
210	8,30	4,80



Gambar 2. Konfigurasi grid yang digunakan untuk perhitungan tomografi seismik waktu tempuh dengan distribusi episenternya. Episenter yang digunakan merupakan hasil dari relokasi hiposenter dengan metode *double-difference* (Waldhauser and Ellsworth, 2000). Segitiga kuning terbalik menunjukkan stasiun-stasiun seismik BMKG yang digunakan pada penelitian ini.

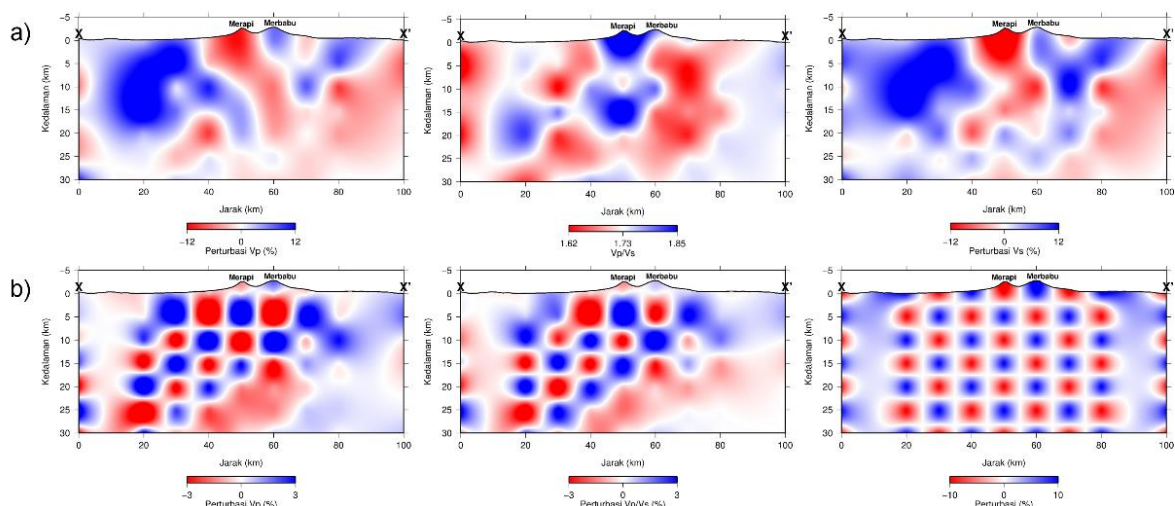
Tomogram V_p , rasio V_p/V_s dan V_s sangat berguna untuk menginterpretasi struktur kecepatan seismik, sifat fisika batuan dan kondisi geologi di area penelitian. Model awal kecepatan untuk gelombang P menggunakan hasil penelitian sebelumnya (Koulakov et al., 2007) dengan rasio V_p/V_s sebesar 1,73 yang dihasilkan dari diagram Wadati (Wadati, 1933). Tabel kecepatan 1-D sebagai input awal untuk inversi tomografi seismik ditunjukkan oleh tabel 2.

Diagram tersebut berasal dari kombinasi data gempa jaringan seismik DOMERAPI dan BMKG (Ramdhan et al., 2017a). Kriteria data yang digunakan untuk perhitungan tomografi seismik waktu tempuh adalah setiap kejadian gempa dicatat paling tidak oleh enam stasiun seismik yang merekam gelombang P dan S atau P saja.

Kriteria tersebut dipilih agar perhitungan inversinya *over-determined* (jumlah data yang digunakan lebih banyak daripada jumlah modelnya). Tomogram V_p dan V_s diplot dalam skala perturbasi terhadap model kecepatan 1-D awal, sedangkan tomogram rasio V_p/V_s diplot dalam nilai absolut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3 (a) menunjukkan penampang vertikal pada tomogram V_p , rasio V_p/V_s dan V_s pada arah selatan-utara yang melewati Gunung Merapi dan Merbabu. Mayoritas sumber gempa yang berada di selatan menyebabkan daerah di sebelah utara Gunung Merapi tidak teresolusi dengan baik sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 3 (b). Studi ini berhasil mendeteksi sejumlah anomali yang terdapat di bawah area Gunung Merapi dan



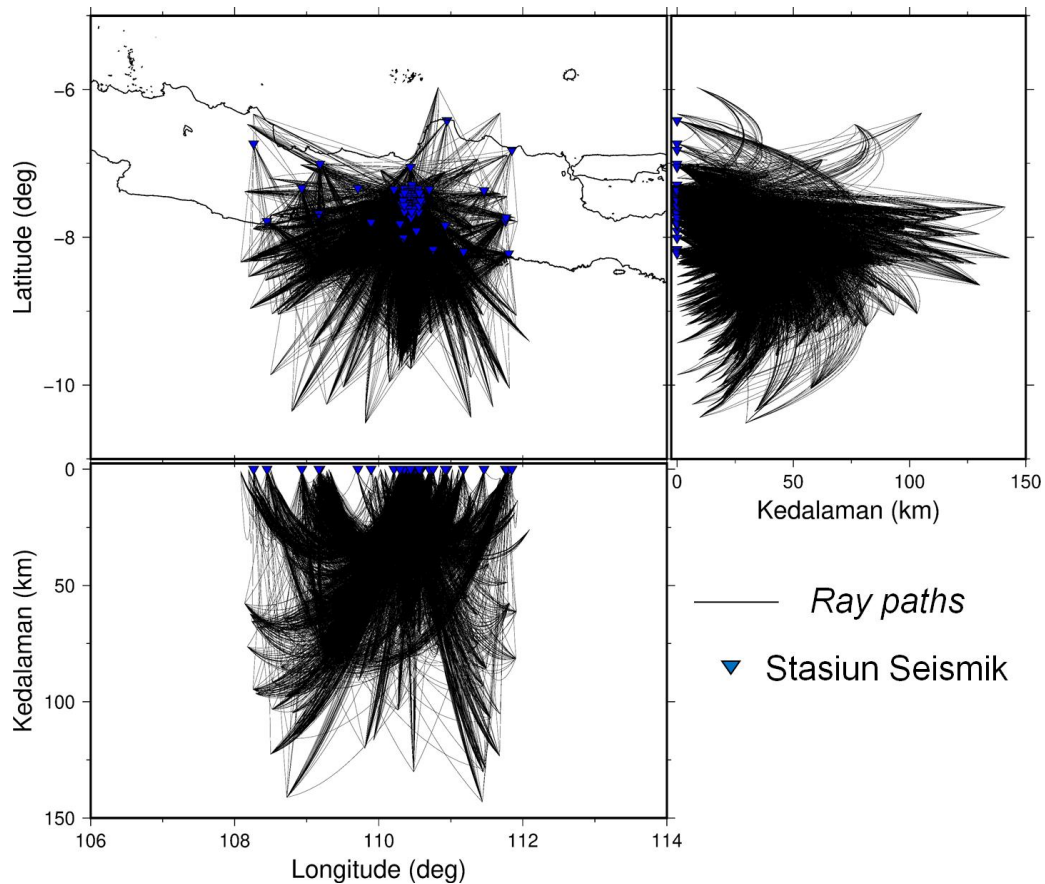
Gambar 3. a). Penampang vertikal arah utara-selatan yang melewati Gunung Merapi dan Merbabu untuk tomogram Vp (sebelah kiri), rasio Vp/Vs (bagian tengah) dan Vs (bagian kanan). **b).** Hasil tes resolusi *checkerboard test* (CRT) pada arah penampang yang sama untuk tomogram Vp (kiri), rasio Vp/Vs (tengah) dan model input CRT (kanan). Area yang bisa diinterpretasi adalah area yang memiliki pola seperti model input CRT.

sekitarnya. Distribusi jejak sinar gelombang seismik (*ray paths*) dengan metode *pseudo bending* (Um and Thurber, 1987) ditunjukkan oleh Gambar 4.

Anomali yang berada di selatan Gunung Merapi memiliki nilai Vp yang tinggi, rasio Vp/Vs yang rendah dan Vs yang tinggi. Anomali tersebut berhubungan dengan Zona Pegunungan Selatan yang berkaitan dengan intrusi batuan beku (Smyth et al., 2008). Intrusi tersebut berkaitan dengan suplai magma pada saat erupsi di masa lalu pada area tersebut. Nilai Vp yang tinggi, rasio Vp/Vs yang rendah dan Vs yang tinggi menunjukkan jalur suplai magma tersebut sudah lama mendingin dan sudah tidak aktif lagi karena jalur pegunungannya telah bergeser ke arah utara (Smyth et al., 2008). Fenomena nilai Vp yang sangat tinggi di bawah gunung api terdapat juga di bawah Gunung Redoubt, Alaska. Di bawah Gunung tersebut terdapat anomali Vp yang tinggi yang berkaitan dengan jalur suplai magma pada saat erupsi yang telah lalu (DeShon et al., 2007). Anomali tersebut terdeteksi cukup jelas pada penampang tomogram horisontal yang ditunjukkan oleh gambar 5. Anomali tersebut juga terdapat di bawah Gunung Sinabung dan di bawah Gunung Augustine (Nugraha et al., 2017; Syracuse et al., 2011). Selain intrusi batuan beku, anomali Vp yang tinggi dan rasio Vp/Vs yang rendah serta Vs yang tinggi kemungkinan besar

juga berkaitan dengan keberadaan batuan gamping di Zona Pegunungan Selatan (Smyth et al., 2008). Batas antara intrusi batuan beku dan batuan gamping tidak bisa terdeteksi karena keterbatasan resolusi data seismik. Keberadaan batuan gamping di Zona Pegunungan Selatan terdapat pada kerak bagian atas sampai menengah sehingga keberadaannya masih terdeteksi sampai kedalaman 10 km (Deegan et al., 2010). Hasil studi ini juga konsisten dengan studi gravitasi terdahulu yang menunjukkan nilai anomali Bouger yang tinggi berada di selatan Gunung Merapi (Smyth et al., 2008; Tiede et al., 2005).

Anomali yang berada tepat di bawah Gunung Merapi memiliki nilai Vp yang rendah, rasio Vp/Vs yang tinggi dan Vs yang sangat rendah sampai kedalaman 5 km. Anomali tersebut kemungkinan besar berkaitan dengan sistem magma dangkal Gunung Merapi yang berupa *fluid percolation* (Widiyantoro et al., 2018). Hasil tersebut konsisten dengan studi petrologi di bawah Gunung Merapi yang menyatakan bahwa reservoir magma dangkal Gunung Merapi berada pada kedalaman kurang dari 5 km (Costa et al., 2013). Sistem magma tersebut pada studi sebelumnya disebut sebagai reservoir magma utama Gunung Merapi yang berada pada kedalaman lebih dari 2 km di bawah MSL atau lebih dari 5 km di bawah puncak Gunung Merapi

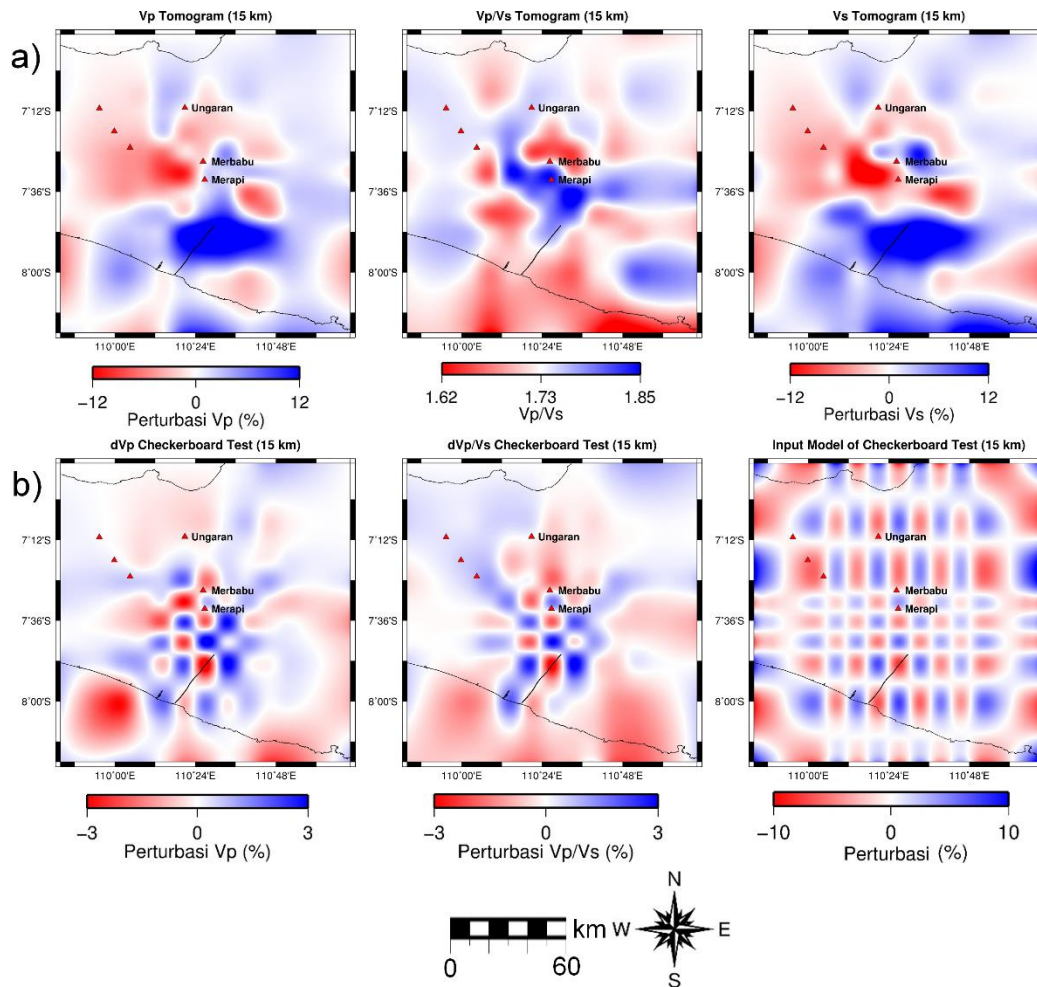


Gambar 4. Distribusi jejak sinar gelombang seismik pada proyeksi horisontal dan vertikal sepanjang *longitude* dan *latitude*.

(Ratdomopurbo dan Poupinet, 2000; Hidayati et al., 2008). Zona tersebut disebut dengan reservoir magma utama karena reservoir magma yang lebih dalam tidak bisa teresolusi oleh gelombang seismik (Ratdomopurbo dan Poupinet, 2000; Hidayati et al., 2008). Hal ini disebabkan oleh kedalaman maksimum gempa VT di bawah Gunung Merapi yang digunakan pada kedua studi tersebut terjadi pada kedalaman maksimal 5 km di bawah puncak (Ratdomopurbo dan Poupinet, 2000; Hidayati et al., 2008). Komposisi magma pada kedalaman ini terdiri dari material *molten* yang naik ke atas lalu berinteraksi dengan batuan gamping yang terbentuk jauh sebelumnya (Deegan et al., 2010). Komposisi magma hasil interaksi tersebut dicirikan dengan adanya mineral kalsit dan volatil CO₂ (Deegan et al., 2010). Nilai rasio Vp/Vs yang tinggi di zona reservoir tersebut disebabkan oleh kandungan material *molten* yang lebih dominan (Mavko, 1980; Nakajima et al., 2001) dan tingginya porositas di batuan tersebut (Widiyantoro et al., 2018). Nilai rasio Vp/Vs yang tinggi pada material *molten* disebabkan oleh

penurunan nilai modulus geser jauh lebih cepat dibandingkan dengan penurunan modulus Bulk. Selain densitas, parameter modulus Bulk sangat menentukan parameter Vp dan modulus geser sangat menentukan parameter Vs.

Anomali pada kedalaman sekitar 15 km memiliki nilai Vp dan rasio Vp/Vs yang tinggi serta Vs yang rendah. Nilai rasio Vp/Vs yang tinggi pada anomali tersebut kemungkinan besar berkaitan dengan sistem magma utama atau menengah Gunung Merapi. Hasil tersebut konsisten dengan studi petrologi yang menyatakan material erupsi tahun 2010 berasal dari reservoir magma pada kedalaman lebih dari 14 km (Drignon et al., 2016). Reservoir magma menengah tersebut kemungkinan besar berkaitan dengan zona rekahan yang berisi fluida dan material *molten*. Fenomena anomali tersebut juga terjadi di bawah Gunung Sinabung dan di sistem geotermal Tarutung, Sumatra Utara (Muksin et al., 2013; Nugraha et al., 2017). Vp yang tinggi di reservoir ini menunjukkan telah terjadi penurunan suhu



Gambar 5. a). Tomogram penampang horisontal V_p (bagian kiri), rasio V_p/V_s (bagian tengah) dan V_s (bagian kanan) pada kedalaman 15 km di bawah MSL. **b).** Tomogram hasil tes CRT pada area yang sama untuk V_p (bagian kiri), rasio V_p/V_s (bagian tengah) dan input model CRT (bagian kanan).

setelah erupsi tahun 2010. Nilai V_p yang tinggi juga disebabkan oleh nilai modulus Bulk yang besar di batuan intrusi. Sedangkan nilai V_s yang rendah disebabkan oleh kehadiran fluida di zona rekahan (Nugraha et al., 2017). Pada erupsi tahun 2010 terjadi pengeluaran material lebih dari 1 km^3 dari reservoir tersebut (Widiyantoro et al., 2018). Jumlah tersebut sangat kecil sekali dibandingkan dengan volume reservoir magma menengah seperti yang tercitrakan pada gambar 3. Hal ini menyebabkan potensi kekuatan erupsi Gunung Merapi di masa yang akan datang bisa lebih besar dari kekuatan erupsi dari tahun 2010.

Studi lain juga menyatakan bahwa sumber erupsi Gunung Merapi pada tahun 2010 berasal dari kedalaman magma 5-30 km (Suroño et al., 2012).

Erupsi pada tahun 2010 dimulai dari kenaikan volume yang cukup besar dari reservoir magma dalam pada kedalaman 30 km menuju reservoir magma menengah dan dangkal. Kenaikan magma tersebut disertai dengan proses pelepasan gas dalam waktu singkat yang menjadi penyebab erupsi eksplosif dengan kekuatan yang sangat besar ($VEI \sim 4$) (Costa et al., 2013; Suroño et al., 2012). Proses pelepasan gas yang singkat tersebut hanya menyebabkan akumulasi energi dan volume kubah lava tidak bertambah secara signifikan. Sumber magma dalam yang berada pada kedalaman 30 km pada studi ini tidak bisa teresolusi dengan baik sebagaimana terlihat dari hasil *checkerboard test*. Untuk mendeteksi keberadaan magma dalam perlu dilakukan studi lanjut dengan metode dan data yang berbeda.

Anomali yang berada di bawah Gunung Merbabu berasosiasi dengan nilai V_p yang tinggi, rasio V_p/V_s yang rendah dan V_s yang tinggi. Hal tersebut konsisten dengan studi gravitasi terdahulu dimana Gunung Merbabu memiliki nilai anomali Bouger yang lebih tinggi dibandingkan dengan Gunung Merapi (Tiede et al., 2005). Parameter kecepatan dan gravitasi tersebut menunjukkan bahwa Gunung Merbabu memiliki aktivitas erupsi yang lebih rendah dibandingkan dengan Gunung Merapi. Erupsi terakhir di Gunung Merbabu terjadi di tahun 1797 (van Hinloopen Labberton, 1921). Anomali V_p dan V_s yang tinggi dengan rasio V_p/V_s yang rendah di bawah Gunung Merbabu kemungkinan besar berkaitan dengan batuan plutonik. Anomali tersebut berkaitan dengan jalur intrusi yang berhubungan dengan proses erupsi di waktu yang telah lalu dan pada saat ini sudah membeku (DeShon et al., 2007; Nugraha et al., 2017; Syracuse et al., 2011). Batuan dengan kecepatan tinggi tersebut berfungsi sebagai batuan penutup magma yang terletak di bawahnya sebagaimana yang terjadi di bawah Gunung St. Helens (Lees, 1992). Selain berkaitan dengan batuan plutonik yang terdapat di bawah Gunung Merbabu, anomali tersebut kemungkinan berkaitan dengan batuan gamping yang berada di bawah gunung tersebut (Deegan et al., 2010). Batas antara batuan intrusi dan batuan gamping tidak bisa teresolusi dengan baik pada studi ini.

Anomali pada kedalaman sekitar 10 km di bawah Gunung Merbabu memiliki nilai V_p yang rendah, rasio V_p/V_s yang tinggi dan V_s yang rendah. Anomali tersebut kemungkinan besar berkaitan dengan reservoir magma gunung api tersebut. Anomali tersebut juga terdapat di bawah sejumlah gunung api di dunia seperti di bawah Gunung Sinabung Sumatra Utara (Nugraha et al., 2017). Posisi magma yang lebih dalam dan volume yang lebih kecil dibandingkan dengan magma Gunung Merapi menjadi penyebab aktivitas erupsi di Gunung Merbabu jauh lebih rendah dibandingkan dengan Gunung Merapi.

KESIMPULAN

Hasil studi tomografi seismik waktu tempuh ini berhasil menjelaskan sistem magma di bawah Gunung Merapi dan sekitarnya untuk kedalaman kurang dari 20 km. Studi ini juga berhasil membuktikan tingkat aktifitas Gunung Merbabu yang lebih rendah dibandingkan dengan Gunung Merapi. Sistem magma Merapi yang terdiri dari

reservoir magma dangkal dan menengah atau utama bisa dijelaskan dari tingginya nilai rasio V_p/V_s . Adapun keberadaan reservoir magma dalam tidak bisa terdeteksi karena keterbatasan resolusi data seismik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang tidak terduga disampaikan kepada *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD), Perancis yang telah membiayai proyek DOMERAPI dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah memberikan akses data waveform gempa sehingga penelitian ini berjalan dengan lancar. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) sebagai mitra utama Proyek DOMERAPI di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Budi-Santoso, A., Lesage, P., Dwiyo, S., Sumarti, S., Subandriyo, Suro, Jousset, P., Metaxian, J.-P., 2013. Analysis of the seismic activity associated with the 2010 eruption of Merapi Volcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Merapi eruption 261, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.03.024>
- Cahyaningrum, A. P., Nugraha, A. D., Nanang, T. P., 2015. Earthquake hypocenter relocation using double difference method in East Java and surrounding areas, in: AIP Conference Proceedings. p. 030021.
- 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*, Merapi eruption 261, 209–235. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.025
- Deegan, F., Troll, V., Freda, C., Misiti, V., Chadwick, J. P., McLeod, C., Davidson, J. P., 2010. Magma-carbonate interaction processes and associated CO₂ release at Merapi Volcano, Indonesia: insights from experimental

- petrology. *Journal of Petrology* 51, 1027–1051.
- DeShon, H. R., Thurber, C. H., Rowe, C., 2007. High-precision earthquake location and three-dimensional *P* wave velocity determination at Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 112. DOI: 10.1029/2006JB004751
- Drignon, M. J., Bechon, T., Arbaret, L., Burgisser, A., Komorowski, J. -C., Martel, C., Miller, H., Yaputra, R., 2016. Preexplosive conduit conditions during the 2010 eruption of Merapi volcano (Java, Indonesia). *Geophysical Research Letters* 43, 11,595-11,602. DOI: 10.1002/2016GL071153
- Eberhart-Phillips, D., 1993. Local earthquake tomography: earthquake source regions. *Seismic Tomography: Theory and Practice* 613–643.
- Evans, J. R., Eberhart-Phillips, D., Thurber, C., 1994. User's manual for SIMULPS12 for imaging *V_p* and *V_p/V_s*; a derivative of the "Thurber" tomographic inversion SIMUL3 for local earthquakes and explosions. US Geological Survey,.
- Geiger, L., 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bull. St. Louis Univ* 8, 56–71.
- Hidayati S, Ishihara K, Iguchi M, Ratdomopurbo, A., 2008. Focal mechanism of volcano-tectonic earthquakes at Merapi volcano, Indonesia. *Indonesian Journal of Physics* 19, 75–82.
- Komorowski, J. -C., Jenkins, S., Baxter, P. J., Picquout, A., Lavigne, F., Charbonnier, S., Gertisser, R., Preece, K., Cholikh, N., Budi-Santoso, A., Surono, 2013. Paroxysmal dome explosion during the Merapi 2010 eruption: Processes and facies relationships of associated high-energy pyroclastic density currents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, Merapi eruption* 261, 260–294. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.01.007
- 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. *J. Geophys. Res.* 112, B08310. DOI: 10.1029/2006JB004712
- Lahr, J., 1999. Revised 2012, HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern. US Geol. Surv. Open-File Rept. 99 23.
- Lees, J. M., 1992. The magma system of Mount St. Helens: non-linear high-resolution P-wave tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 53, 103–116. DOI: 10.1016/0377-0273(92)90077-Q
- 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, 7–19.
- Mavko, G. M., 1980. Velocity and attenuation in partially molten rocks. *Journal of Geophysical Research* 85, 5173. DOI: 10.1029/JB085iB10p05173
- Muksin, U., Bauer, K., Haberland, C., 2013. Seismic *V_p* and *V_p/V_s* structure of the geothermal area around Tarutung (North Sumatra, Indonesia) derived from local earthquake tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 260, 27–42.
- Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A., Zhao, D., 2001. Three-dimensional structure of *V_p*, *V_s*, and *V_p/V_s* beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 106, 21843–21857.
- Nugraha, A. D., Indrastuti, N., Kusnandar, R., Gunawan, H., McCausland, W., Aulia,

- A. N., Harlianti, U., 2017. Joint 3-D tomographic imaging of Vp, Vs and Vp/Vs and hypocenter relocation at Sinabung volcano, Indonesia from November to December 2013. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.09.018
- Nugraha, A. D., Mori, J., 2006. Three-dimensional velocity structure in the Bungo Channel and Shikoku area, Japan, and its relationship to low-frequency earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 33, L24307. DOI: 10.1029/2006GL028479
- Ramadhan, M., Nugraha, A. D., 2013. Study of seismicity around Toba area based on relocation hypocenter result from BMKG catalogue, in: *Padjadjaran International Physics Symposium 2013 (PIPS-2013): Contribution of Physics on Environmental and Energy Conservations*. AIP Publishing, pp. 242–244.
- Ramadhan, M., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Métaxian, J. -P., Saepuloh, A., Kristyawan, S., Sembiring, A. S., Santoso, A. B., Laurin, A., Fahmi, A. A., 2017a. Relocation of hypocenters from DOMERAPI and BMKG networks: a preliminary result from DOMERAPI project. *Earthquake Science*. DOI: 10.1007/s11589-017-0178-3
- Ramadhan, M., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., Saepuloh, A., Métaxian, J. -P., Kristyawan, S., Sembiring, A. S., Santoso, A. B., 2017b. Seismic Travel-time Tomography beneath Merapi Volcano and its Surroundings: A Preliminary Result from DOMERAPI Project, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 012039.
- Ratdomopurbo, A., Poupinet, G., 2000. An overview of the seismicity of Merapi volcano (Java, Indonesia), 1983–1994. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 100, 193–214. DOI: 10.1016/S0377-0273(00)00137-2
- 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, 1–16.
- Sabtaji, A., Nugraha, A. D., 2015. 1-D seismic velocity model and hypocenter relocation using double difference method around West Papua region, in: *AIP Conference Proceedings*.
- 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, in: *Special Paper 436: Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones*. Geological Society of America, pp. 199–222.
- Supendi, P., Nugraha, A. D., Puspito, N. T., Widiyantoro, S., Daryono, D., 2018. Identification of active faults in West Java, Indonesia, based on earthquake hypocenter determination, relocation, and focal mechanism analysis. *Geosci. Lett.* 5, 31. DOI: 10.1186/s40562-018-0130-y
- Surono, Jousset, P., Pallister, J., Boichu, M., Buongiorno, M. F., Budisantoso, A., Costa, F., Andreastuti, S., Prata, F., Schneider, D., Clarisse, L., Humaida, H., Sumarti, S., Bignami, C., Griswold, J., Carn, S., Oppenheimer, C., Lavigne, F., 2012. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano—A '100-year' event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 241–242, 121–135. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.06.018
- Syracuse, E. M., Thurber, C. H., Power, J. A., 2011. The Augustine magmatic system as revealed by seismic tomography and relocated earthquake hypocenters from 1994 through 2009. *Journal of Geophysical Research* 116. DOI: 10.1029/2010JB008129
- Thurber, C., 1993. Local earthquake tomography: velocities and Vp/Vs—theory in *Seismic Tomography: Theory and*

- Practice pp. 563–583 eds Iyer HM, Hirahara K. Chapman & Hall London.
- Thurber, C., Eberhart-Phillips, D., 1999. Local earthquake tomography with flexible gridding. *Computers & Geosciences* 25, 809–818.
- Tiede, C., Camacho, A. G., Gerstenecker, C., Fernández, J., Suyanto, I., 2005. Modeling the density at Merapi volcano area, Indonesia, via the inverse gravimetric problem. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6.
- Um, J., Thurber, C., 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77, 972–986.
- van Hinloopen Labberton, D., 1921. *Oud-Javaansche gegevens omtrent de vulkanologie van Java*.
- Wadati, K., 1933. On the travel time of earthquake waves II. *Geophys. Mag* 7, 101–111.
- Wagner, D., Koulakov, I., Rabbel, W., Luehr, B.-G., Wittwer, A., Kopp, H., Bohm, M., Asch, G., Scientists, M., 2007. Joint inversion of active and passive seismic data in Central Java. *Geophysical Journal International* 170, 923–932.
- Waldhauser, F., 2001. hypoDD-A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations (USGS Numbered Series No. 2001–113), Open-File Report.
- 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, 1353–1368. DOI: 10.1785/0120000006.
- Widiyantoro, S., Ramadhan, M., Métaixian, 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, 13656. DOI: 10.1038/s41598-018-31293-w.