

**TOMOGRAFI KECEPATAN SEISMIK 3-D DI BAWAH SELAT SUNDA  
BERDASARKAN DATA *ARRIVAL TIME* BMKG TAHUN 2009 - 2015**

**Oleh :**  
Muhajir Anshori

**Penanggung jawab :**  
Kepala Stasiun Geofisika Kelas II Tretes

**Homepage :** [stageof.tretes.bmkg.go.id](http://stageof.tretes.bmkg.go.id)

**Institution :** [www.bmkg.go.id](http://www.bmkg.go.id)

**Contact Us :** [tremors@yahoo.co.id](mailto:tremors@yahoo.co.id)

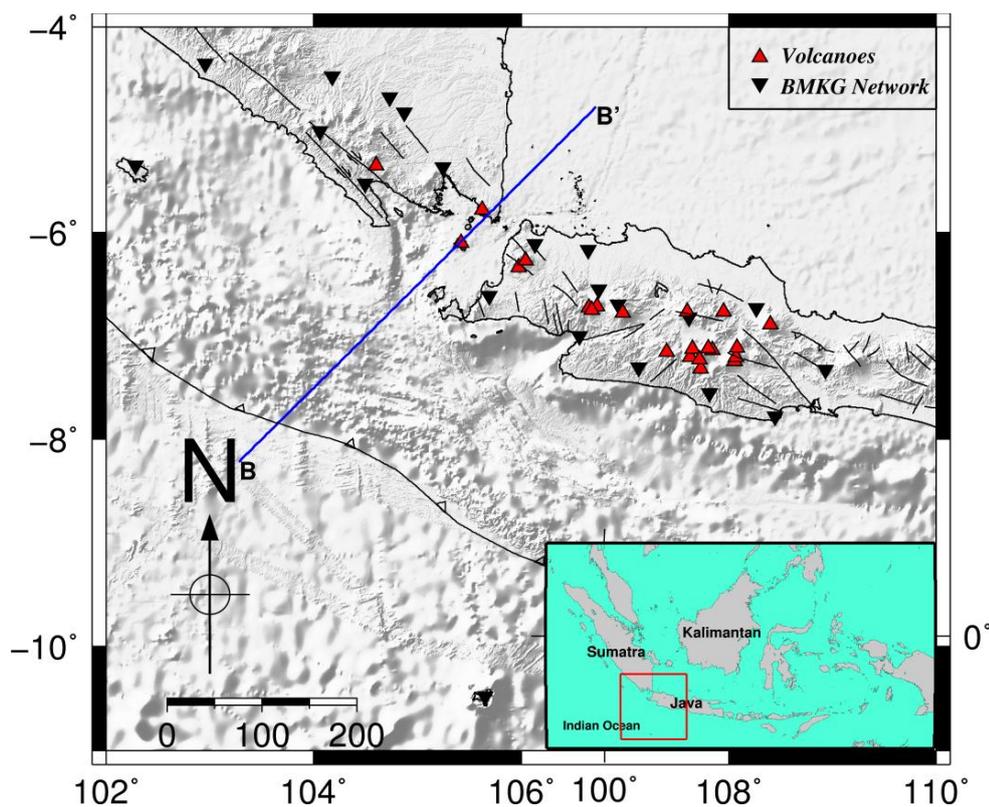


KELOMPOK PENELITIAN  
STASIUN GEOFISIKA KELAS II TRETES  
BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA  
Pasuruan | Mei 2019

## TOMOGRAFI KECEPATAN SEISMİK 3-D DI BAWAH SELAT SUNDA BERDASARKAN DATA *ARRIVAL TIME* KATALOG BMKG TAHUN 2009 - 2015

### 1. Pendahuluan

Selat Sunda terletak pada zona transisi dua sistem penunjaman yang berbeda yaitu subduksi yang hampir tegak lurus di selatan Pulau Jawa serta subduksi *oblique* di barat Pulau Sumatra (Malod dkk., 1995). Banyak bencana besar yang terjadi di daerah Selat Sunda dan sekitarnya seperti gempa bumi Tasikmalaya (2009) yang menyebabkan puluhan korban jiwa dan bangunan hancur, letusan Gunungapi Krakatau (1883) yang menyebabkan tsunami hingga ketinggian mencapai 30 – 40 m (Yokoyama, 1981) serta Gempabumi Pangandaran (2006) yang menyebabkan tsunami setinggi 5 - 8 meter (Ammon dkk., 2006) dengan jumlah korban meninggal dan hilang mencapai ratusan jiwa. Bencana terbaru yang terjadi adalah letusan Gunungapi Anak Krakatau pada 22 Desember 2018 yang menyebabkan tsunami di Propinsi Banten dan Lampung. Fenomena – fenomena bencana besar tersebut merupakan implikasi dari tatanan tektonik yang kompleks daerah Selat Sunda dan Pulau Jawa bagian barat.



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian yaitu Selat Sunda. Garis biru adalah irisan yang tomogramnya akan ditampilkan pada Gambar 7. Garis hitam bergerigi adalah palung subduksi, segitiga merah adalah gunung api dan segitiga hitam adalah stasiun seismik BMKG.

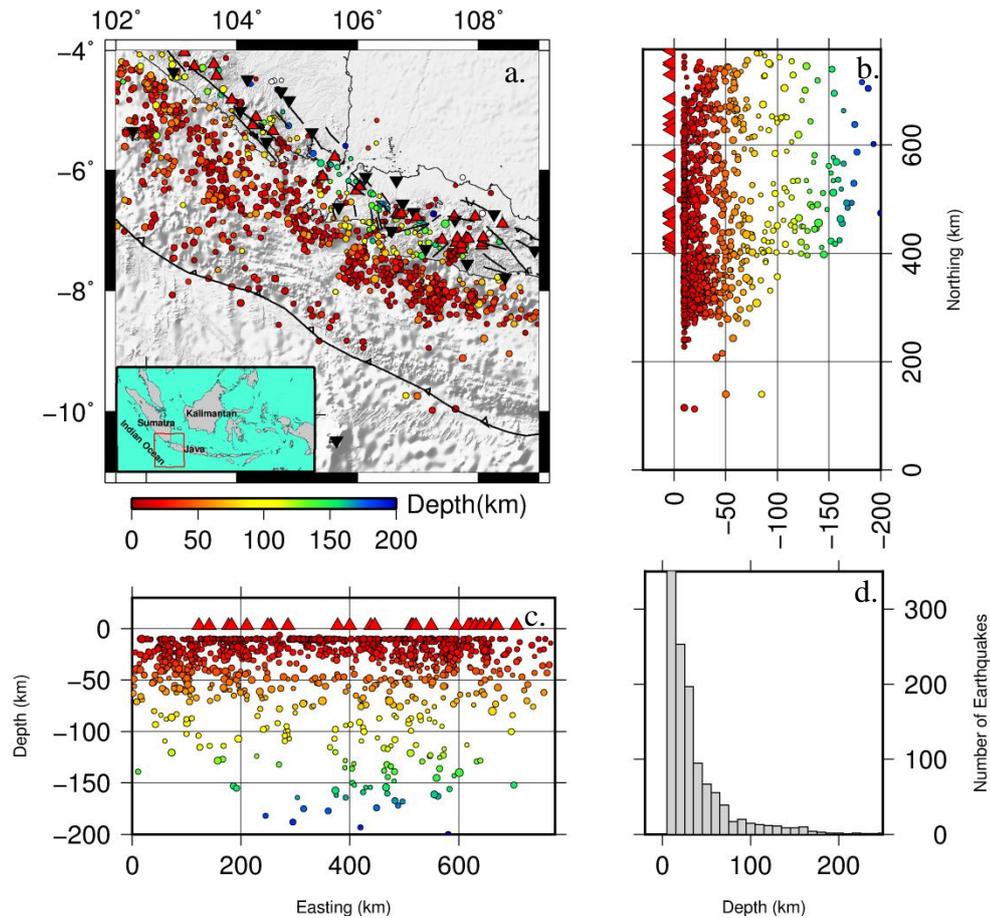
Penelitian - penelitian yang telah dilakukan untuk daerah *Sundaland* dengan pendekatan tomografi seismik diantaranya adalah oleh Widiyantoro dan Hilst (1996, 1997), Puspito dkk. (1993) dan Puspito dan Shimazaki (1995). Studi tomografi untuk wilayah Indonesia oleh Widiyantoro dan Hilst (1996, 1997) menunjukkan bahwa lempeng Indo-Australia yang menunjam di bawah *Sundaland* memiliki pola yang cukup kompleks. Lempeng Samudra Hindia yang menunjam di bawah *Sundaland* masuk sampai mantel bawah di bawah Pulau Jawa dengan mengalami sedikit defleksi. Perbedaan arah dan sudut penunjaman pada proses subduksi terjadi di bawah *Sundaland* bagian barat dan bagian timur dimana pada bagian barat *slab* berumur lebih muda menunjam dengan sudut sekitar  $40^\circ$  dan pada bagian timur menunjam dengan sudut hingga  $60^\circ$ . *Slab* mengalami *detachment* di bawah Pulau Sumatra. Penelitian tomografi di daerah Selat Sunda dan Pulau Jawa bagian barat dalam skala regional telah dilakukan oleh Sakti (2012) dan dalam skala lokal oleh Jaxybulakov dkk. (2011) serta Harjono dkk. (1989). Jaxybulakov dkk. (2011) melakukan pemodelan kecepatan gelombang P di bawah Selat Sunda dimana sistem dapur magma yang berada di bawah kompleks Gunungapi Anak Krakatau dapat tercitrakan dengan baik.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan kecepatan seismik 3-D menggunakan algoritma *simulps12* (Evan dkk., 1994) berdasarkan data *arrival time* katalog BMKG tahun 2009 - 2015. *Simulps12* mampu melakukan inversi untuk menghasilkan model kecepatan seismik 3-D berikut *update* lokasi hiposenternya secara simultan. Oleh karena itu parameter gempabumi yang dihasilkan adalah parameter gempabumi yang telah direlokasi berdasarkan model kecepatan 3-D. Relokasi hiposenter dan pencitraan kecepatan seismik 3 dimensi dapat berguna untuk mempelajari lebih detail tentang kondisi tektonik dan geodinamika daerah Selat Sunda.

## 2. Data dan Metode

### 2.1 Data

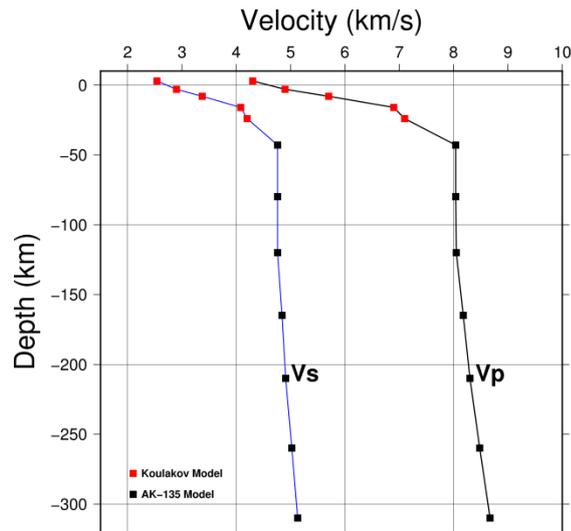
Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data *arrival time* gempabumi katalog BMKG daerah Selat Sunda dan Pulau Jawa bagian barat dari bulan Mei 2009 sampai Desember 2015. Stasiun seismik yang digunakan adalah 20 stasiun jaringan BMKG di daerah Jawa Barat dan Sumatra bagian selatan serta 1 stasiun jaringan Australia. Dua belas stasiun berada di Pulau Jawa bagian barat, 8 stasiun berada di Pulau Sumatra bagian selatan dan 1 stasiun berada di Pulau *Christmast* dengan jarak antara stasiun berkisar antara 30 – 70 km. Jumlah data adalah 1241 *event* gempabumi (Gambar 2) dengan magnitude  $\geq 3$  serta koordinat 102 – 109 BT dan 4 – 9 LS. Data posisi hiposenter katalog BMKG terlihat dominan pada kedalaman 10 km atau terjadi *fix depth* dimana hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh model kecepatan 1-D yang digunakan dalam proses penentuan parameter gempabumi.



Gambar 2. Plot seismisitas katalog BMKG tahun 2009 – 2015, segitiga terbalik warna hitam adalah stasiun seismik, segitiga warna merah adalah gunungapi dan garis hitam bergerigi adalah palung subduksi. (b) dan (c) adalah plot seismisitas berdasarkan kedalaman masing-masing pada arah lintang dan bujur. (d) Histogram sebaran kedalaman gempa bumi.

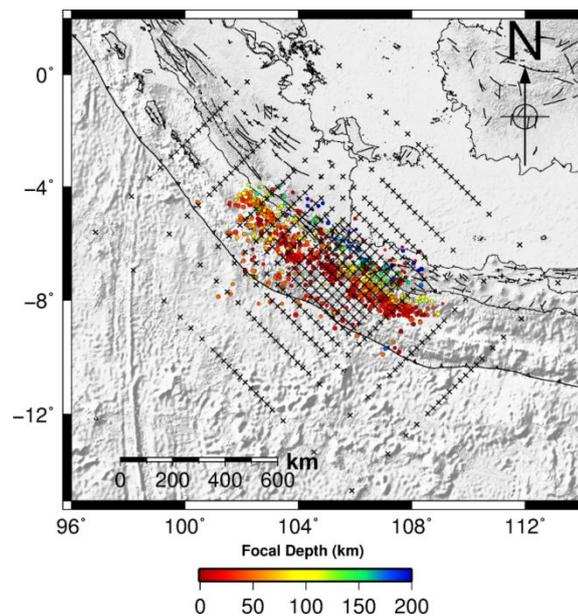
## 2.2 Metode

Pada penelitian dilakukan pemodelan kecepatan seismik 3-D berdasarkan data waktu tempuh gelombang P ( $T_p$ ) dan selisih waktu tempuh gelombang P dan S ( $T_s-p$ ). Pemodelan kecepatan dilakukan untuk menghasilkan variasi nilai kecepatan gelombang P ( $V_p$ ) dan rasio antara kecepatan gelombang P dan S ( $V_p/V_s$ ). Model  $V_p$  ditentukan berdasarkan data waktu tempuh gelombang P yang di peroleh dari selisih antara waktu tiba gelombang P dan *origin time* gempa bumi. Model  $V_p/V_s$  ditentukan berdasarkan data selisih antara waktu tiba gelombang P dan S ( $T_s-p$ ). Secara keseluruhan terdapat 12.718 fase dengan komposisi fase gelombang P dan S masing-masing sebanyak 7.233 dan 5.485 fase.



Gambar 3 Model kecepatan 1-D (Koulakov dkk., 2007) tanda kotak merah dan AK135 (Kennet dkk., 1995) tanda kotak hitam.

Dalam melakukan pemodelan parameter kecepatan gelombang seismik, daerah penelitian di bagi ke dalam beberapa *grid node* (Gambar 4) dimana setiap *grid node* akan diwakili oleh satu nilai kecepatan. Semakin rapat jarak antar *grid node* maka semakin tinggi resolusi tomogram yang mampu dihasilkan. Akan tetapi resolusi tomogram sangat dipengaruhi oleh sebaran hiposenter dan kerapatan stasiun seismik sehingga perlu dilakukan suatu uji resolusi untuk menentukan jarak *grid node* yang paling sesuai dengan kondisi data. Model kecepatan awal 1dimensi yang digunakan adalah gabungan antara model Koulakov dkk. (2007) pada kedalaman 0 – 24 km dan model kecepatan global AK135 (Kennet dkk., 1995) pada kedalaman di bawah 24 km (Gambar 3). Penjejukan sinar gelombang dari hiposenter (*sources*) ke stasiun (*receivers*) dilakukan dengan metode *Pseudo Bending* (Um dan Thurber, 1987) (Gambar 5 a).



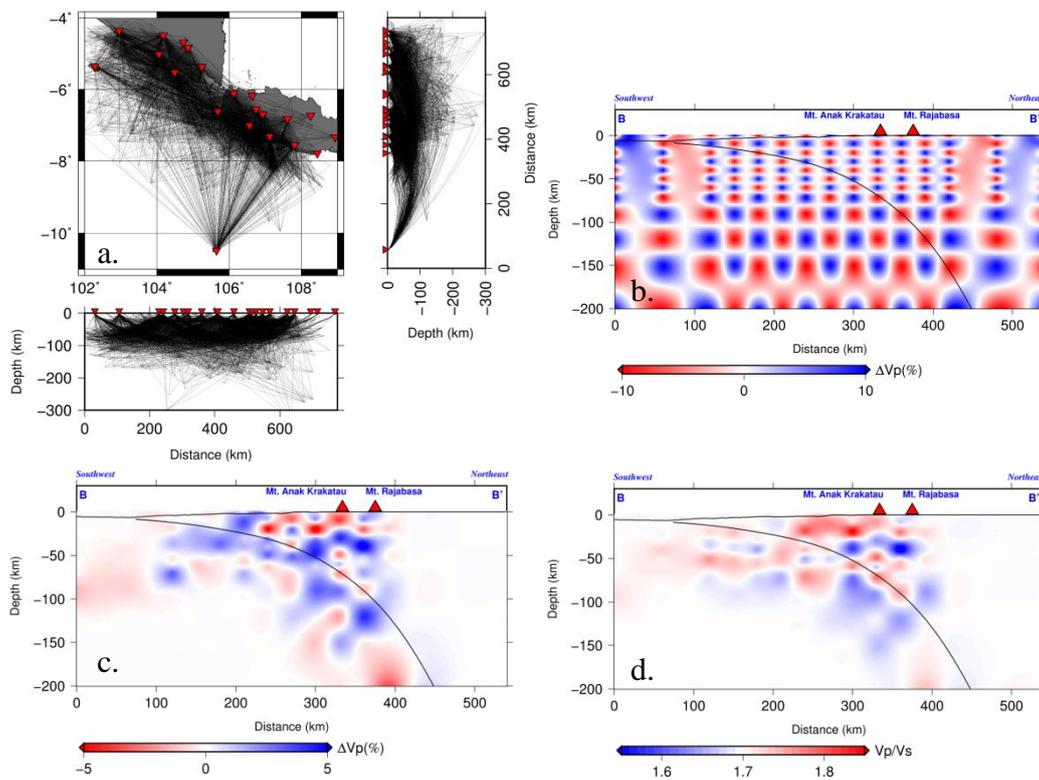
Gambar 4. Daerah penelitian dibagi ke dalam beberapa *grid node*. Tanda silang hitam menunjukkan *grid node*. Tanda bulat menunjukkan episenter gempa bumi katalog BMKG tahun 2009 - 2015 dengan skala warna dan ukuran bulatan masing-masing menunjukkan kedalaman dan magnitude gempa bumi.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Hasil

3.1.1 Hasil Uji Resolusi

Uji Resolusi *checkerboard* dilakukan dengan membuat data sintesis berdasarkan model menyerupai papan catur dengan nilai  $\pm 10\%$  dari model referensi 1-D (Gambar 3). Data sintesis yang diperoleh dilakukan inversi dengan parameterisasi model sama dengan inversi menggunakan data observasi. Hasil inversi model kecepatan yang didapatkan diharapkan kembali kepada model *checkerboard* semula walaupun dengan nilai perturbasi yang lebih rendah daripada model awal. Semakin rapat *raypath* yang melewati suatu daerah maka tingkat pemulihan model akan semakin bagus atau akan kembali pada model *checkerboard* semula.

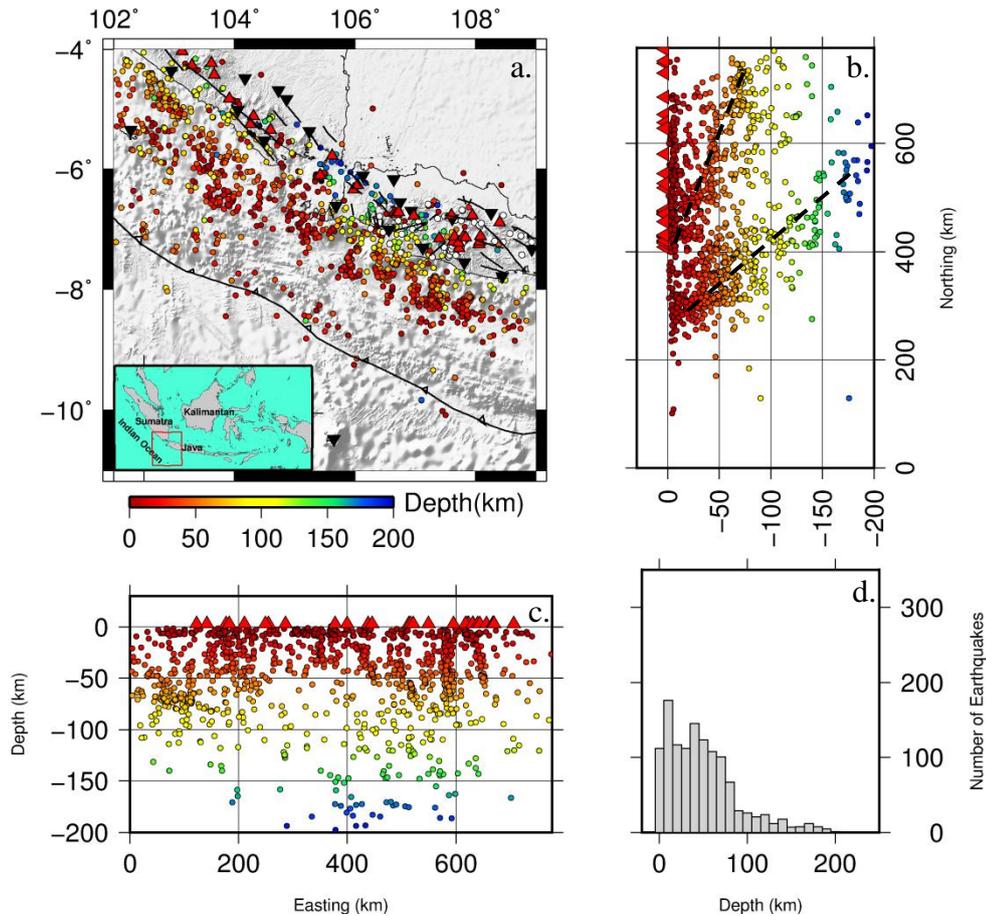


Gambar 5. (a) *Ray path* yang dihasilkan dengan metode *pseudo bending* (Um dan Thurber, 1987). (b) Model awal *checkerboard* dengan nilai perturbasi  $\pm 10\%$ . (c) dan (d) Hasil rekonstruksi model sintesis *checkerboard* untuk irisan seperti pada (Gambar 1) masing-masing untuk Vp dan rasio Vp/Vs.

Berdasarkan hasil pemulihan model *checkerboard* pada irisan vertikal (Gambar 5) didapatkan bahwa model kembali pulih pada kedalaman sekitar 0 hingga 120 km walaupun dengan tingkat pemulihan yang rendah. daerah yang teresolusi dengan baik berada di sekitar *slab* mengingat posisi hiposenter paling dominan adalah seismisitas pada *slab* yang menunjam.

### 3.1.2 Hasil Relokasi Hiposenter

Hasil relokasi hiposenter yang dihasilkan menunjukkan bahwa *fix depth* 10 km menjadi hilang dan berubah posisi membentuk *cluster-cluster* gempa bumi yang berasosiasi dengan beberapa fitur tektonik seperti zona *megathrust*, sesar lokal dan kegempaan di bawah gunung api. Perbedaan pola subduksi Sumatra yang landai dan Subduksi Jawa yang lebih curam tampak jelas pada Gambar 6b ditandai dengan garis putus-putus.

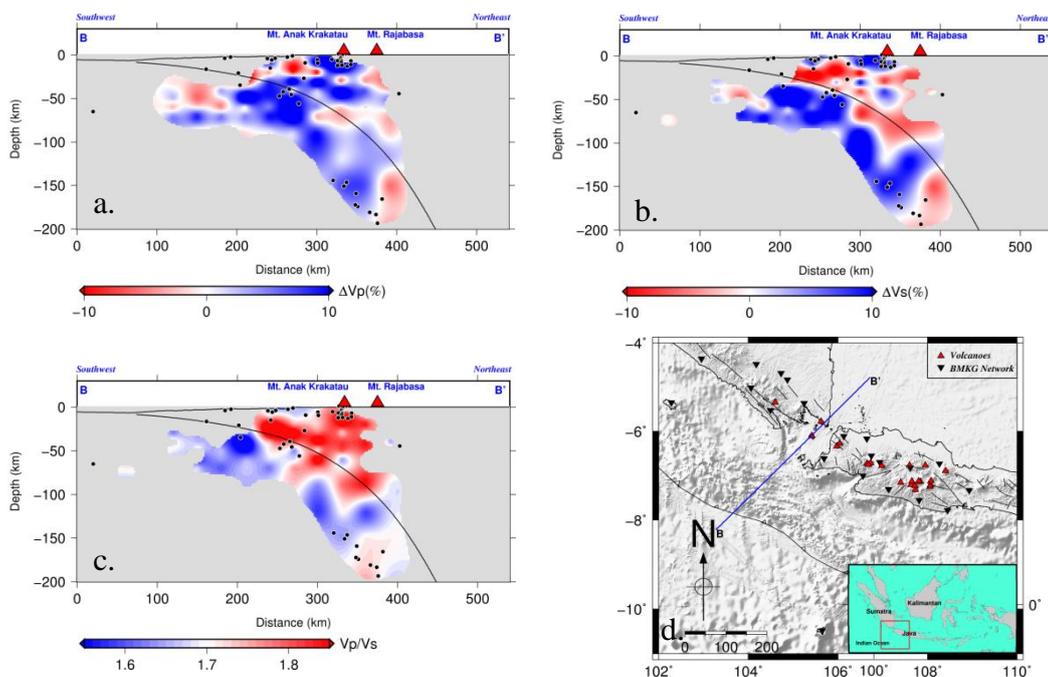


Gambar 6. (a) Plot hasil relokasi hiposenter menggunakan algoritma *simulps12* (Evan dkk., 1994). (b) dan (c) adalah plot seismisitas berdasarkan kedalaman masing-masing pada arah lintang dan bujur. Garis putus-putus menandai pola subduksi Sumatra dan Jawa. (d) Histogram sebaran kedalaman gempa bumi. Keterangan lainnya sama dengan Gambar 2.

### 3.1.3 Tomogram Kecepatan Irisan Vertikal

Hasil pemodelan kecepatan seismik 3 dimensi yang telah dilakukan ditampilkan sebagai tomogram dalam irisan vertikal dengan garis irisan sebagaimana pada Gambar 1. Untuk model  $V_p$  dan  $V_s$  nilai kecepatan tinggi diwakili oleh warna biru sedangkan nilai kecepatan rendah diwakili warna merah. Untuk tomogram rasio  $V_p/V_s$  ditampilkan sebaliknya karena nilai rasio  $V_p/V_s$  tinggi biasa berasosiasi dengan fluida yang bersifat panas pada daerah subduksi dan identik dengan warna merah.

Uji resolusi yang diterapkan pada penelitian ini ada 2 macam yaitu uji resolusi *Checkerboard* (CKB) dan *Diagonal Resolution Element* (DRE). Citra tomogram pada Gambar 7 berikut adalah tomogram  $V_p$ ,  $V_s$  dan rasio  $V_p/V_s$ . Tomogram  $V_p$  dan  $V_s$  ditampilkan dalam persen relatif terhadap model kecepatan 1-D sedangkan rasio  $V_p/V_s$  ditampilkan dalam nilai absolut. Daerah yang kurang dan tidak teresolusi (nilai  $DRE < 0.1$ ) diberi warna abu-abu.



Gambar 7. Tomogram kecepatan pada irisan vertical sebagaimana pada (d). (a) dan (b) Tomogram  $V_p$  dan  $V_s$  yang ditampilkan dalam persen relative terhadap model 1-D (Koulakov dkk., 2007) dan AK135 (Kennet dkk, 1995). (c) Tomogram rasio  $V_p/V_s$ . Bulat hitam adalah hasil relokasi dengan lebar seismisitas sebesar 30 km berpusat pada garis biru (d). Warna abu-abu adalah daerah yang tidak teresolusi berdasarkan nilai  $DRE < 0.1$ . Garis hitam adalah model slab USGS. Segitiga warna merah adalah gunungapi.

### 3.2 Diskusi

Berdasarkan hasil pemodelan kecepatan seismik 3-D yang telah dilakukan tampak bahwa *Slab* yang tersubduksi di bawah Selat Sunda terdeteksi sebagai anomali positif yang cukup jelas baik pada  $V_p$

maupun Vs serta rasio Vp/Vs rendah (Gambar 7). Anomali Vs rendah dan rasio Vp/Vs tinggi tampak jelas pada *plate interface* dengan kedalaman sekitar 100 km diduga merupakan indikator terjadinya *partial melting*. Daerah tersebut bersesuaian dengan letak zona daerah *aseismic gap* sebagaimana dikemukakan oleh Spicak (2002). Menurut Spicak (2002) zona *aseismic gap* yang ditemukan di bawah Selat Sunda adalah manifestasi dari hilangnya sifat *brittle* pada *slab*.

Hipotesis tentang adanya *plume* mantle di bawah Selat Sunda telah dikemukakan oleh Widiyantoro (2003) namun keberadaan *plume* mantel tersebut tidak dapat tercitakan pada penelitian ini karena resolusi tomogram yang tidak mencapai daerah di bawah lithosfer *oceanic*. Keberadaan *plume* mantel tersebut diduga kuat turut mempengaruhi vulkanisme di sekitar Selat Sunda. *Plume* mantel yang berada di bawah lithosfer akan mampu melemahkan lithosfer sehingga lithosfer pada titik kontak tersebut akan bersifat lebih *ductile*. Implikasi dari hal tersebut adalah dehidrasi *slab* yang terjadi akan lebih banyak sehingga memicu adanya *partial melting* yang lebih besar daripada daerah yang lain (Gorbatov dkk., 2001).

Pelemahan lithosfer *oceanic* ditandai dengan terjadinya dehidrasi *slab* yang tinggi sebagaimana dijelaskan oleh Gorbatov dkk. (2001). Hal tersebut diduga terjadi di bawah Selat Sunda yang didukung oleh keberadaan zona *partial melting* yang lebih dangkal daripada zona *partial melting* di bawah Jawa bagian barat. Huchon dan Le Pichon (1984) mengungkapkan bahwa pergerakan *sliver plate* pada *forearc* Sumatra ke arah barat laut akan memicu ekstensi di Selat Sunda. Ekstensi yang terobservasi pada zona *pull-apart* di Selat Sunda kemungkinan menerus hingga ke selatan dan menjadi faktor penyebab runtuhnya prisma akresi di selatan Selat Sunda. Kondisi tektonik ekstensional tersebut berakibat pada terjadinya bukaan di Selat Sunda. Berdasarkan studi petrologi dan hasil analisis gunungapi, reservoir magma untuk letusan Gunungapi Krakatau terkini (1883) seharusnya berada pada kedalaman kurang dari 15 km (Camus dkk., 1987) dengan dimensi reservoir minimal berukuran 10 km atau lebih dari 20 km (Newhall, 1983; Camus dkk., 1987). Keberadaan reservoir magma bagian dalam yang sangat besar kemungkinan berhubungan dengan proses bukaan yang terjadi di Selat Sunda seperti halnya reservoir magma besar yang terdapat pada daerah *Rio Grande Rift* (Brocher, 1981).

Jaxybulakov dkk. (2011) menemukan adanya sistem dapur magma *multilayer* di bawah Gunungapi Anak Krakatau dengan kedalaman dapur magma terdalam berada pada kedalaman sekitar 30 km. Kondisi zona lemah di bawah Gunungapi Anak Krakatau diduga merupakan manifestasi keberadaan dapur magma *multilayer* (Jaxybulakov dkk., 2011) dan reservoir magma besar bagian dalamnya kemungkinan berhubungan dengan proses bukaan yang terjadi di Selat Sunda. Hal tersebut berhasil dikonfirmasi oleh hasil penelitian ini berupa nilai rasio Vp/Vs tinggi di bawah Gunungapi Krakatau dengan dimensi yang cukup besar hingga kedalaman sekitar 50 km.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan struktur kecepatan seismik 3-D yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. *Slab* yang tersubduksi di bawah Selat Sunda tercitrakan sebagai anomali positif  $V_p$ ,  $V_s$  dan rasio  $V_p/V_s$  rendah.
2. Zona lemah di bawah Gunungapi Anak Krakatau tercitrakan sebagai anomali negatif  $V_p$ ,  $V_s$  dan rasio  $V_p/V_s$  tinggi.
3. Zona *partial melting* di bawah Gunungapi Anak Krakatau teridentifikasi sebagai anomali negatif  $V_p$ ,  $V_s$  dan rasio  $V_p/V_s$  tinggi pada kedalaman sekitar 100 km.

**Daftar Pustaka**

- Ammon, C. J., Kanamori, H., Lay, T. dan Velasco, A. A. (2006) : The 17 July 2006 Java tsunami earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33.
- Brocher, T.M. (1981) : Geometry and physical properties of the Socorro, New Mexico, magma bodies. *J. Geophys. Res.*, 86 (B10): 9420-9432.
- Camus, G., Gourgaud, A. dan Vincent, P.M. (1987) : Petrologic evolution of Krakatau (Indonesia): implication for a future activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 33: 299-316.
- Evans, J. R., D. Eberhart-Phillips dan Thurber C. H. (1994) : User's manual for simulps12 for imaging Vp and Vp/Vs : a derivative of the "Thurber" tomographic inversion simul3 for local earthquakes and explosions, *U. S. Geol. Surv. Open File Rep.* 94 – 431.
- Gorbatov, A., Fukao, Y., Widiyantoro, S., dan Gordeev E. (2001) : Seismic evidence for a mantle plume oceanward of the Kamchatka-Aleutian trench junction. *Geophys. J. Int.* 146, 282–288.
- Hamilton, W. (1979) : Tectonics of the Indonesian Region: *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1078, 345 p.
- Harjono, H., Diament, M., Nouaili, L. dan Dubois, J. (1989) : Detection of magma bodies beneath Krakatau Volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam), 14.
- Huchon, P. dan Le Pichon, X. (1984) : Sunda Strait and Central Sumatra Fault. *Geology*, 12: 668-672.
- Jaxybulatov K., Koulakov I., Seht M.I., Klinge K., Reichert C., Dahren B. dan Troll V.R. (2011) : Evidence for high fluid/melt content beneath Krakatau Volcano (Indonesia) from local earthquake tomography, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Malod, J. A., Karta, K., Beslier, M. O. dan Zen Jr., M. T. (1995) : From normal to oblique subduction : tectonic relationships between Java and Sumatra, *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, Vol. 12, 85 - 93.
- Newhall, C.G., Decker, R.W., Sudradjat, A., Tilling, R.I. dan Peteson, D.W. (1983) : A comparison of eruption and magma reservoirs of Krakatau, Mount St. Helens, and Galunggung. *Symposium on 100th Year Development of Krakatau and its Surrounding*, Jakarta 23-27 August, 1983.
- Puspito, N. T., Yamanaka, Y., Miyatake, T., Shimazaki, K. dan Hirahara, K. (1993) : Three-dimensional P-wave velocity structure beneath the Indonesian region." *Tectonophysics*, 220, 175-192.
- Puspito, N. T. dan Shimazaki, K. (1995) : Mantle structure and seismotectonics of the Sunda and Banda arcs, *Tectonophysics*, 215-228.
- Sakti, A.P. (2012) : Pencitraan struktur tiga dimensi kecepatan gelombang P di wilayah Selat Sunda dan Jawa bagian barat menggunakan metode tomografi seismic, Thesis Master, Institut Teknologi Bandung.
- Spicak, A., Hanus, V. dan Vanek J. (2002) : Seismic activity around and under Krakatau Volcano, Sunda Arc : constraints to the source region of island arc volcanics. *Stud. Geophys. Geod.*, 46 (2002), 545–565.
- Um, J. dan Thurber, C. (1987) : A fast algorithm for two point seismic ray tracing, *Bull. Seism. Soc. Am.* 77, 972 – 986.
- Widiyantoro, S. dan Hilst R. V. D. (1996) : Structure evolution of lithospheric slab beneath the Sunda Arc, Indonesia, *Science*, 1566.
- Widiyantoro, S., dan Hilst R. V. D. (1997) : Mantle structure beneath Indonesia inferred from high-resolution tomographic imaging, *Geophys. J. Int.*, 167-182.

- Widiyantoro, S. (2003) : Constraints on upper mantle structure and seismicity beneath the Sunda Strait from teleseismic data, *Joint Convention 2003, Indonesian Geologists Association and Indonesian Geophysicists Association*, Mulia Hotel, December 15-17, 2003, Jakarta.
- Yokoyama, I. (1981) : A geophysical interpretation of the 1883 Krakatau eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 9, h. 359-378.