

S Wave Velocity Structure in Non-tectonic Indo-China by Analyzing the Earthquakes in Sumatra-Java in TATO Station, Taiwan

Bagus Jaya Santosa¹

¹ Prodi Geofisika, FMIPA, ITS. Jl. Arif Rahman Hakim 1, Surabaya 60111

Masuk: 7 April 2008, revisi masuk: 27 Nopember 2008, diterima: 7 Januari 2009

ABSTRACT

The velocity structure of S wave under South-East Asia and South China Ocean due to earthquakes in Sumatra-Java subduction zone which data is recorded in TATO, Taiwan seismological station, has been investigated through seismogram analysis in time domain and three components simultaneously. The synthetic seismogram was calculated using GEMINI method, with the inputs are the earth model and the CMT solution of the earthquakes. A low-pass filter with corner frequency of 20 mHz was applied on the seismograms. Applying the deconvolution of unit response on the synthetic seismogram the seismogram comparison was executed in the same unit. The seismogram comparison indicated that the calculation from PREMAN synthetic seismogram deviates significantly from the measured ones. The deviation occurred on the arrival time of surface wave of Rayleigh and Love as well as S body waves. The interpretation results of seismogram analysis using waveform indicate that non-tectonic South-East Asia area in front of subduction zone has strong negative correction of β_v in the upper mantle and with smaller factor also at earth layers below. This result shows stronger vertical anisotropy than one in PREMAN earth model.

Keywords: Seismogram Comparison; Negative Anomaly in Front Area of Subduction Zone, Vertical Anisotropy.

INTISARI

Struktur kecepatan gelombang S yang berada di bawah wilayah Asia Tenggara dan Laut China Selatan telah diselidiki melalui analisis seismogram akibat gempa-gempa bumi pada zona subduksi Sumatra-Jawa yang direkam di stasiun stasiun seismologi TATO, Taiwan, dalam domain waktu dan ketiga komponen ruang secara simultan. Seismogram sintetik dihitung melalui metoda GEMINI, yang *inputnya* adalah model bumi dan solusi CMT gempa bumi. *Low-pass filter* dengan frekuensi sudut 20 mHz dikenakan pada seismogram-seismogram. Penerapan dekonvolusi file tanggap-response pada seismogram sintetik, perbandingan seismogram dilaksanakan dalam satuan sama. Perbandingan seismogram menunjukkan bahwa seismogram sintetik yang dihitung dari model bumi global PREMAN diketahui menyimpang jauh dari seismogram terukur, yang terjadi pada waktu tiba gelombang permukaan Rayleigh dan Love dan juga gelombang ruang S. Hasil interpretasi atas analisis seismogram dengan *waveform* menunjukkan bahwa daerah Asia Tenggara yang berada di depan bidang subduksi dan bersifat non-tektonik memiliki koreksi negatif kuat atas β_v di mantel atas dan dengan faktor yang lebih lemah juga pada lapisan-lapisan mantel di bawahnya. Hasil ini menunjukkan bahwa vertikal anisotropi lebih kuat dibandingkan dalam model bumi PREMAN

Kata Kunci: Perbandingan Seismogram, Anomali Negatif di Depan Bidang Subduksi, Vertikal Anisotropi

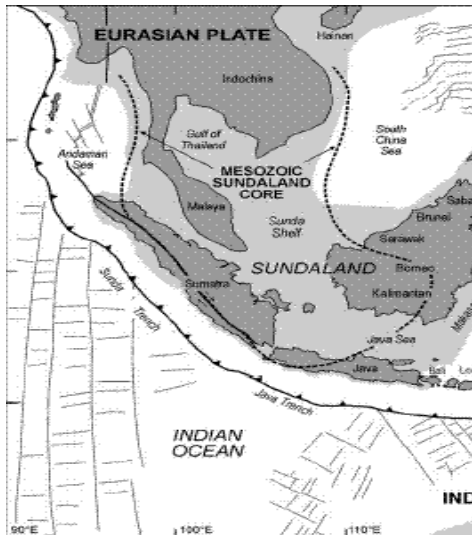
PENDAHULUAN

Tumbukan India-Asia, mengikuti penutupan Samudra Thetys di zaman Mesozoik, menciptakan dan berlanjut membentuk – rangkaian pegunungan Hi-

malaya dan lempeng Tibet. Hal tersebut juga menginduksi regangan yang mengendur luas di Asia Tenggara dan China. Akibat regangan yang mengendur ini, Replumaz et al. (2004) menginterpre-

¹ Email: bjs@physics.its.ac.id

tasikan struktur bumi di daerah Laut Cina Selatan dan Asia Tenggara memiliki anomali kecepatan gelombang P negatif (Gambar 1).



Gambar 1. Prinsip utama geologi di Asia Tenggara (Hall, 2002)

Daerah Indonesia Barat, khususnya pulau Jawa dan Sumatra adalah daerah dengan kondisi tektonik yang kompleks. Di daerah ini lempeng benua bertumbukan dengan lempeng Samudra Hindia. Kanal pegunungan dasar laut (*ridge*) di Laut Antartika memproduksi batuan-batuan baru ke arah lateral, ke utara dan selatan, sebagai bagian dari perputaran mantel. Karena lempeng mengembang secara lateral, batuan baru mende-sak lempeng-lempeng Samudra yang lama ke arah tegak bidang *ridge*. Hal itu mendorong Lautan Hindia dan Benua Australia bergerak ke arah utara, sehingga menumbuk paparan Asia Tenggara, dan menunjam ke bawah Benua Eurasia. Subduksi diberikan ilustrasi dalam Gambar 1 sebagai kurva dengan panah kecil-kecil sepanjang kurva, disebut sebagai palung Laut/*trench*, arah kurva menunjukkan arah dari pergerakan bidang subduksi. Lempeng Samudra bergerak dengan kecepatan rata-rata 11 cm/tahun. Pergerakan ini masih berlangsung hingga kini, menghasilkan gempa-gempa tektonik yang besar. Ini ditandai

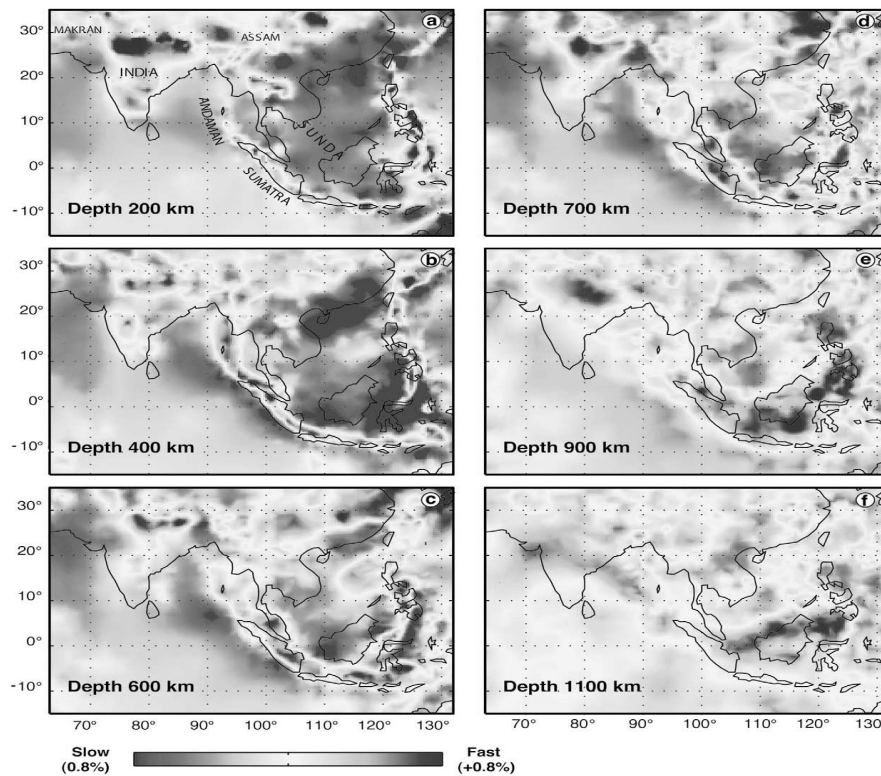
dengan banyak terjadinya gempa-gempa bumi di daerah ini.

Di tahun-tahun terakhir, tomografi gelombang seismik global telah dikembangkan dengan menginversikan data-data *travel-time*, yang datanya disuplai oleh *Internasional Seismological Center* (ISC). Tomografi tersebut khususnya telah sukses pada pemetaan atas tenggelamnya lapisan lithospherik dingin ke dalam mantel, yang berada di sepanjang palung laut aktif dari tepian lempeng-lempeng besar, secara tiga dimensi.

Menurut Replumaz et al. (2004), zona depan bidang subduksi tepian benua di Jawa dan Sumatra, yang ditandai oleh adanya anomali positif, mengalami pemampatan (Gambar 2). Struktur kecepatan seperti ini didapatkan dengan menginversikan data waktu tempuh gelombang P langsung sebanyak $\approx 8 \times 10^6$ buah, fase gelombang pantul pP sebanyak $\approx 0,6 \times 10^6$ buah, dan terbias dalam inti bumi PKP hampir sebanyak 1×10^6 buah. Data sejumlah ini dikumpulkan dari 300.000 gempa-gempa bumi sejak 1 Januari 1964 hingga 31 Desember 2000 (Engdahl et al., 1998). Hal yang sama juga dikerjakan pada sejumlah kecil data selisih absolut waktu tempuh PP-P, PKP-P_{diff}, yang diukur secara akurat melalui korelasi silang *waveform* dari data digital *broad-band* (Grand et al. 1997). Dalam inversi data waktu tempuh digunakan data waktu terhitung yang disimulasikan pada model bumi IASPEI91 (Kennett, 1991).

Hasil analisis gelombang S, gelombang permukaan Love dan Rayleigh yang ditujukan untuk menilai sifat mantel di bawah Asia Tenggara dan Laut Cina Selatan, disajikan dengan menganalisis data seismogram gempa-gempa bumi yang terjadi di sepanjang zona subduksi Jawa-Sumatra, melalui data rekaman di stasiun observasi TATO, Taiwan.

Data seismogram diunduh dari Databank Center IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*). Kedudukan sumber-sumber gempa ditentukan di wilayah Sumatera dan Jawa, Indonesia, Tabel 1 menyajikan gempa-gempa bumi yang dianalisis dalam riset ini, yang direkam di stasiun TATO.



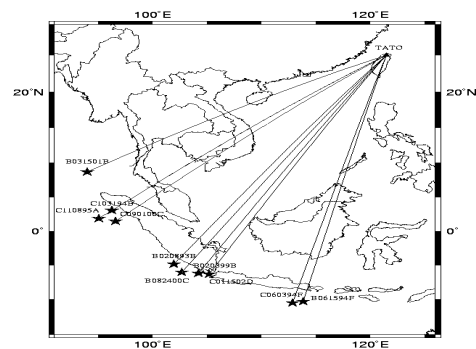
Gambar 2. Penampang horisontal tomografi struktur kecepatan mantel di bawah Asia Tenggara pada kedalaman-kedalaman 200, 400, 600, 700, 900 dan 1100 km (Replumaz et al., 2004)

Tabel 1. Lokasi gempa-gempa bumi di wilayah Sumatera – Jawa yang dianalisis dalam riset ini.

No	Kode Gempa bumi	Lintang	Bujur
1	B031501B	8.66	94,01
2	C103194B	3,03	96,27
3	C110895A	1,44	95,59
4	C090100C	1.85	95.06
5	B020893B	-4,86	101.96
6	B082400C	-6,03	102,69
7	B020399B	-6,19	104,22
8	C011502D	-6.31	105.21
9	C060394F	-10.49	112.87
10	B061594F	-10.28	113.85

Gambar 3 menunjukkan bahwa penjaluran gelombang gempa-gempa bumi di sepanjang zona subduksi. Busur antara episenter gempa dan stasiun TATO merupakan proyeksi vertikal dari

bidang penjaluran gelombang, melalui daerah non-tektonik. Pada zona lempeng tersebut terjadi regangan mengendur, sebagai akibat dari pertumbukan (kolisi) antara lempeng Benua India terhadap lempeng benua Eurasia.



Gambar 3, Proyeksi vertikal bidang-bidang penjaluran gelombang dari episenter-episenter gempa bumi ke stasiun observasi TATO (Taiwan)

Untuk menghitung waktu tempuh sintetik fasa-fasa gelombang ruang utama, digunakan program TTIMES secara komputerisasi, dengan mengikuti artikel dari Bulland and Chapman (1981) yang diperoleh dari <http://orfeus.knmi.nl>. Waktu-waktu tempuh sintetik digunakan sebagai petunjuk untuk mengidentifikasi fasa-fasa gelombang dalam seismogram. Untuk menghitung seismogram sintetik, digunakan program yang berbasis metoda GEMINI (Green's function of the Earth by MINor Integration) (Dalkolmo, 1993; Friederich dan Dalkolmo, 1995).

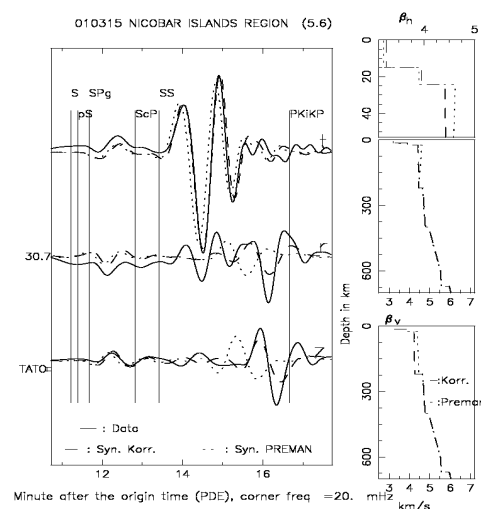
Program GEMINI tersebut berprinsip pada perhitungan minor fungsi-fungsi Green's atas suatu model bumi dengan kedalaman sumber gempa tertentu. Fungsi-fungsi Green's diekspansikan (diintegrasikan) dengan memenuhi kondisi syarat-syarat batas di titik terdalam gelombang, titik kedalaman sumber dan permukaan bumi. Ekspansi fungsi Green's dituliskan dengan variabel bebas sebagai frekuensi kompleks, dengan memasukkan *trick damping* ($\omega + i\sigma$) untuk menghindari *time aliasing*. Metoda GEMINI sendiri ekuivalen dengan Metoda Sumasi Mode, hanya berbeda pada penggunaan variabel bebasnya. Momen tensor gempa bumi, dirinci dalam baris ketiga solusi CMT (*Centroid Moment Tensor*). Data tersebut digunakan untuk menghitung koefisien-koefisien fungsi Green's yang diselesaikan dengan menggunakan aturan Cramer; dengan sisi kanan terdiri atas deret koefisien moment tensor. Koordinat sumber gempa diletakkan seolah-olah berada pada Kutub Utara, dan koordinat-koordinat stasiun observasi diubah ke bentuk sudut episentral dan sudut azimuth, yang kemudian dikembangkan fungsi Harmonik Sferis. Program DISPEC (termasuk paket GEMINI) selanjutnya membaca fungsi Green yang telah dihasilkan tersebut dan membentuk perkalian atas koefisien-koefisien ekspansi Moment Tensor dan fungsi Harmonik Sferis, menjumlahkannya, dan menghasilkan seismogram sintetik dalam domain frekuensi kompleks. Program MONPR (paket GEMINI) memindahkan seismogram sintetik dari domain frekuensi kompleks ke dalam domain waktu, namun sebelumnya dikenakan filter lolos

rendah Butterworth dan inverse RESPONSE file dari sistim peralatan seismometer di stasiun penerima. Yaitu dengan mendeskripsikan perubahan fase dan amplifikasi dari sistim peralatan, ketika mengubah input dari kecepatan/percepatan pergerakan tanah menjadi output tegangan [mV].

Pergerakan tanah direkam oleh seismometer direkam dalam 3 Kartesian komponen, yaitu US, TB dan Z. Komponen-komponen horisontal seismogram (komponen US dan TB) terukur harus diputar dengan sumbu Timur-Barat yang diarahkan pada busur kecil, dari stasiun observasi ke sumber gempa (Gambar 3). Hal tersebut ditujukan untuk mendekomposisi gerak gelombang dalam ruang 3D menjadi komponen-komponen P-SV dan SH. Dengan demikian, seismogram sintetik dapat dibandingkan dengan seismogram terukur dalam satuan dan arah gerakan yang sama.

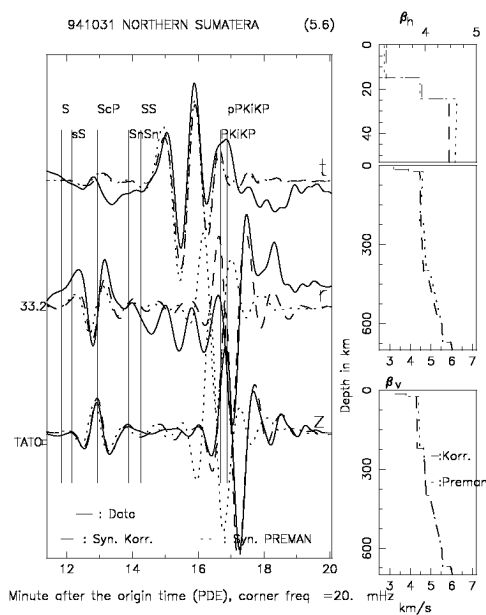
PEMBAHASAN

Gambar 4. menyajikan pengepasan seismogram gempa bumi B031-501B, Kepulauan Nicobar yang direkam di stasiun TATO. Kita dapat melihat bahwa model bumi global PREMAN (Dziewonski and Anderson, 1981) memberikan *waveform* Love sintetik yang datang sedikit lebih awal daripada *waveform* Love terukur, sedangkan pengamatan pada gelombang Rayleigh sintetik datang jauh di depan gelombang Rayleigh terukur.



Gambar 4. Pengepasan seismogram gempa gempa Nicobar di TATO

Model bumi dikoreksi, sehingga memberikan seismogram sintetik yang bagus pada gelombang permukaan Love dan Rayleigh dan juga gelombang ruang SV dan SH. Ini diperoleh dengan mengubah gradien β_h pada lapisan mantel atas menjadi positif dan memberikan koreksi negatif pada koefisien-koefisien awal polinomial yang menggambarkan struktur kecepatan β pada lapisan-lapisan mantel hingga kedalaman 730 km.

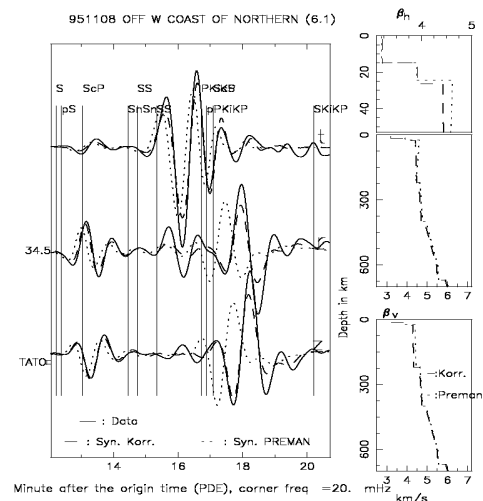


Gambar 5. Pengepasan seismogram Sumatra Utara di TATO

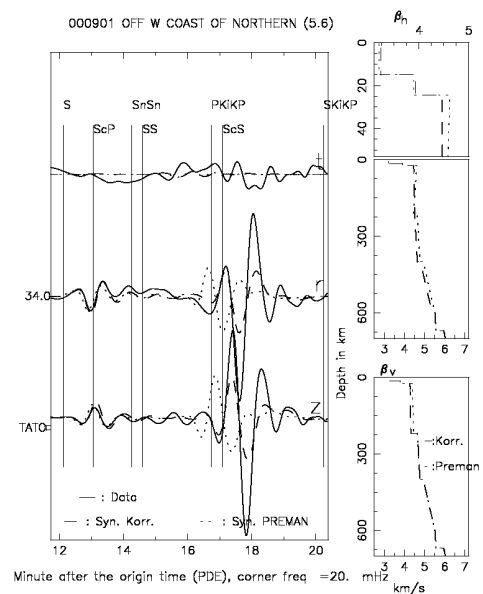
Gambar 5 menunjukkan ilustrasi tentang pengepasan seismogram gempa bumi C103194B, di Sumatra Utara yang direkam di stasiun TATO. Kita lihat dalam komponen-komponen sferoidal (r dan z), bahwa sintetik seismogram yang dihitung dari model bumi PREMAN datang jauh lebih awal dari gelombang Rayleigh dan datang sedikit lebih awal dari gelombang S. Ini menunjukkan bahwa koreksi negatif yang lebih besar harus dikenakan pada β_v di lapisan mantel atas dan koreksi negatif lemah di lapisan-lapisan mantel bawahnya hingga kedalaman 730 km.

Gambar 6 menyajikan analisis seismogram gempa C110895A, palung laut Sumatra Utara di stasiun TATO. Kita dapat melihat, bahwa seismogram sintetik dari PREMAN pada gelombang Rayleigh datang lebih awal daripada wave-

form terukurnya, sedang waveform Love datang sedikit lebih awal. Seismogram sintetik dari model bumi dikoreksi memberikan pengepasan yang bagus pada gelombang Rayleigh dengan nyata dan juga pada gelombang SV. Di komponen t, waveform gelombang Love juga didekati dengan lebih baik melalui model dikoreksi.



Gambar 6. Pengepasan seismogram gempa Palung Sumatra Utara di TATO

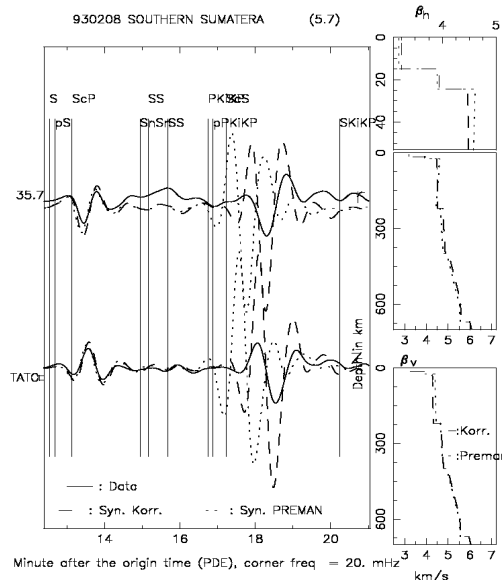


Gambar 7. Pengepasan seismogram gempa Palung Sumatra Utara di TATO

Analisis dan pengepasan seismogram gempa bumi C090100C, palung laut Sumatra Utara dapat kita lihat pada Gambar 7. Karena data kualitas pada

komponen t buruk, maka analisis dikerjakan hanya pada gelombang Rayleigh dan SV melalui komponen-komponen r dan z. Koreksi negatif koefisien-koefisien β_v orde nol di lapisan-lapisan mantel, dengan koreksi negatif besar pada lapisan mantel atas. Sementara lapisan-lapisan mantel di bawahnya dianalisis berdasarkan hasil koreksi negatif lemah.

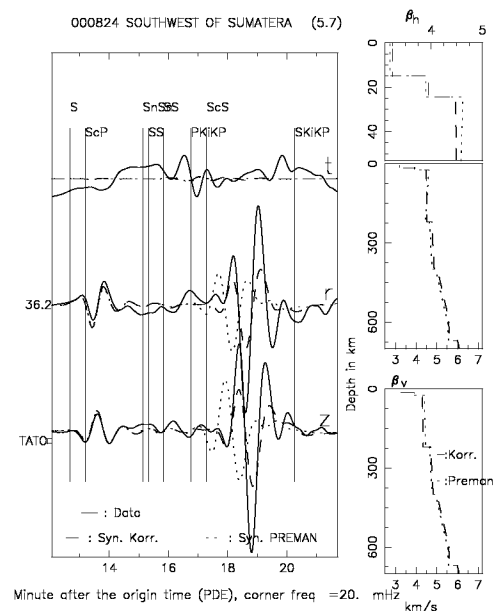
Gambar 8 menyajikan analisis dan pengepasan seismogram gempa bumi B020893B yang terjadi di palung laut Sumatra Selatan, dimana seismogram direkam di stasiun TATO. Kita dapat melihat, bahwa amplitudo gelombang SV sintetis mendekati amplitudo gelombang SV terukur. Namun amplitudo gelombang Rayleigh sintetis jauh lebih tinggi daripada amplitudo Rayleigh terukur. Oleh karena itu pengepasan hanya dilakukan dengan tujuan mendapatkan pengepasan yang baik pada waktu tempuh dari amplitudo maksimum Rayleigh. Ketidaksesuaian tinggi amplitudo di dua ragam gelombang ini disebabkan oleh kekurang akuratan dalam penentuan solusi CMT gempa bumi (Dreger, 2002).



Gambar 8. Pengepasan seismogram gempa Palung Sumatra Selatan di TATO

Gambar 9 menyajikan analisis seismogram gempa bumi B082400C, palung laut Sumatra Selatan yang direkam di stasiun TATO. Kualitas data pada komponen t buruk, sehingga pengepasan seismogram hanya dikerjakan di dua

komponen r dan z. Kita dapat melihat bahwa harus dikenakan koreksi negatif kuat pada β_v di lapisan mantel atas untuk mendapatkan pengepasan pada gelombang Rayleigh. Sementara lapisan-lapisan mantel di bawahnya tidak perlu dikoreksi, karena gelombang SV juga telah disimulasikan dengan baik.

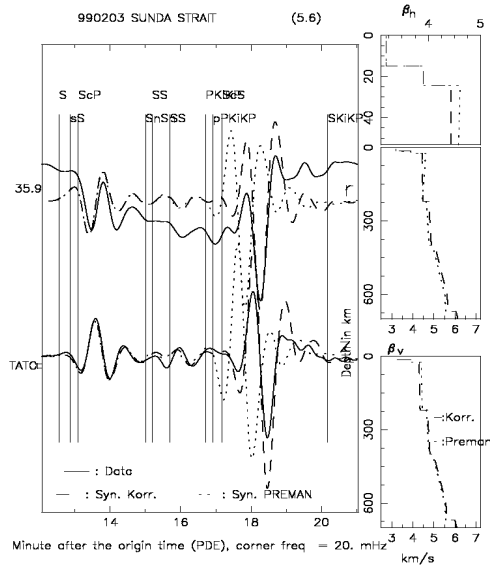


Gambar 9. Pengepasan seismogram gempa Palung Sumatra Selatan di TATO

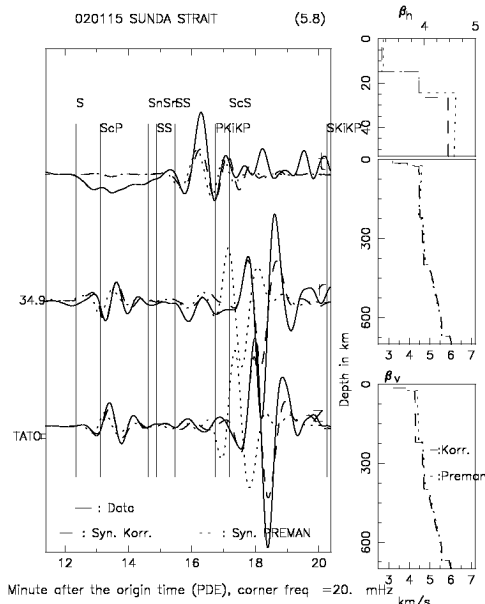
Analisis dan pengepasan seismogram B020399B yang terjadi di Selat Sunda yang direkam di stasiun TATO ditunjukkan dalam gambar 10. Seismogram sintetis yang dibentuk dari model bumi PREMAN memiliki bentuk yang menyimpang dari gelombang Rayleigh terukur, mereka datang lebih awal dengan distribusi tinggi amplitudo yang berbeda di maksimum pertama dan kedua gelombang Rayleigh, sementara Rayleigh terukur memiliki pola amplitudo yang menguncup. Model bumi dikoreksi memberikan kesepadanan yang lebih baik pada pola distribusi maksimum-maksimum gelombang Rayleigh dan waktu tiba yang mendekati gelombang Rayleigh terukur. Ini diperoleh dengan mengenakan koreksi pada β_v dan penggunaan gradien β_h positif di lapisan mantel atas.

Gambar 11 menyajikan analisis dan pengepasan seismogram gempa bumi C011502D, Selat Sunda yang datanya

direkam di stasiun TATO. Kita dapat melihat bahwa model bumi dikoreksi memberikan seismogram sintetik yang lebih mirip pada seismogram terukur, daripada seismogram sintetik yang dibentuk dari model bumi PREMAN. Koreksi negatif utama adalah pada β_v di lapisan mantel atas.



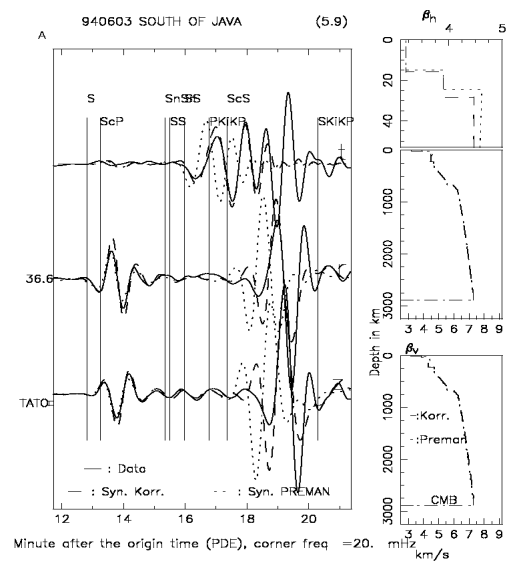
Gambar 10. Pengepasan seismogram gempa Selat Sunda di TATO



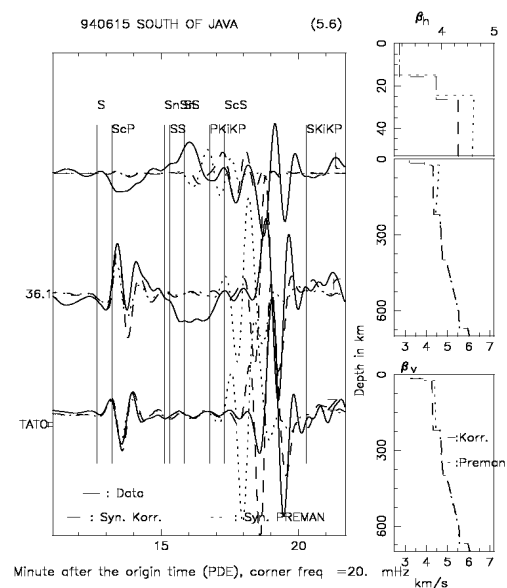
Gambar 11. Pengepasan seismogram gempa Selat Sunda di TATO

Gambar 12 menyajikan analisis dan perbandingan seismogram gempa

bumi C060394F Palung Jawa Selatan yang terjadi pada tanggal 3 Juni 1994 dimana direkam di stasiun TATO. Kita dapat melihat pengepasan seismogram sintetik yang dihitung dari model bumi dikoreksi mendekati seismogram terukur dengan bagus sekali, baik pada awal dari gelombang Love (merupakan gelombang SS), gelombang Rayleigh dan gelombang-gelombang SV dan SH. Amplitudo besar di bagian akhir dari gelombang Love tidak dapat disimulasikan sama sekali oleh kedua seismogram sintetik.



Gambar 12. Pengepasan seismogram gempa Palung Jawa Selatan di TATO



Gambar 13. Pengepasan seismogram gempa Palung Jawa Selatan di TATO

Gambar 13 menunjukkan perbandingan seismogram terukur dengan sintetikanya dari sebuah gempa bumi B0-61594F yang terjadi di Palung Jawa Selatan yang terjadi pada 15 Juni 1994, berselang 12 hari dengan gempa yang disajikan dalam gambar 12, dimana data direkam di stasiun TATO. Kita dapat melihat, bagaimana menyimpangnya seismogram sintetik yang dibentuk oleh model bumi PREMAN terhadap seismogram terukur. Model bumi dikoreksi memberikan seismogram sintetik yang mendekati osilasi-osilasi utama dalam gelombang permukaan Love dan Rayleigh, dan pengepasan juga diperoleh pada gelombang SV.

Model bumi PREMAN disajikan dengan sifat vertikal anisotropi pada lapisan mantel atas. Setelah riset ini, kita dapat melihat bahwa pada semua gempa bumi yang dianalisis, menunjukkan bahwa waktu tiba yang lebih awal pada gelombang permukaan Rayleigh sintetik dari model PREMAN. Hal itu menuntut koreksi negatif pada struktur kecepatan β_v dengan besaran yang cukup besar. Hal itu menunjukkan bahwa vertikal anisotropi lebih besar dan berbeda dengan yang dituliskan dalam model bumi PREMAN. Untuk mendapatkan pengepasan pada gelombang S (SV dan SH) pada seismogram-seismogram beberapa gempa bumi, diperlukan koreksi negatif dengan besaran yang lebih lemah pada lapisan-lapisan mantel hingga kedalaman 730 km. Ini menunjukkan bahwa sifat vertikal anisotropi terjadi pada lapisan-lapisan mantel di bawah mantel atas. Sifat anisotropi ini tidak dimanfaatkan dalam penelitian seismologi yang didasarkan pada data waktu tempuh gelombang, karena kita sulit sekali mengamati perbedaan waktu tiba gelombang S di ketiga komponen Kartesian. Hasil riset ini melengkapi hasil riset dari Replumaz et al. (2004) tentang struktur kecepatan S di bawah Asia Tenggara dan Laut China Selatan.

Penentuan solusi CMT gempa bumi, yang dilaksanakan dengan Rutin CMT (Dregger, 2002), mengandaikan model bumi yang isotrop, dikenal sebagai model bumi 1066B, dimana dihitung fungsi-fungsi Green untuk berbagai keda-

laman sumber gempa, dan rekonstruksi seismogram sintetik dengan kekuatan tensor CMT divariasikan dengan Metoda Monte Carlo, dengan memperhatikan spektrum absolut seismogram. Fungsi obyektif dari inversi CMT adalah perbandingan seismogram dalam domain waktu, namun eksekusi hanya dilakukan dengan frekuensi hingga 16 mHz. Sedangkan program GEMINI pada riset ini menghitung seismogram sintetik hingga 40 mHz, 2,5 kali lebih tinggi. Oleh karena itu sebaiknya rutin Green yang dipakai dalam inversi CMT digantikan dengan rutin GEMINI, sehingga perbandingan seismogram dapat dikerjakan pada frekuensi yang lebih tinggi.

KESIMPULAN

Perbandingan seismogram menunjukkan, bahwa seismogram sintetik dari gempa-gempa bumi Sumatera-Jawa yang direkam di TATO, yang dihitung dari model bumi awal PREMAN, menunjukkan waktu-waktu tiba yang lebih awal daripada fasa gelombang terukur sepadannya, pada gelombang Rayleigh. Koreksi dikenakan dengan mengubah gradien β_h , menjadi positif, dan koefisien-koefisien orde nol β_v pada fungsi polinomial kecepatan gelombang di setiap lapisan mantel dikoreksi. Koreksi negatif adalah utama pada β_v , untuk mendapatkan pengepasan pada gelombang Rayleigh. Koreksi juga diupayakan pada gelombang-gelombang ruang S dan SS. Ini menunjukkan bahwa sifat vertikal anisotropi lebih kuat daripada yang dicantumkan dalam model bumi PREMAN dan juga terjadi pada lapisan-lapisan mantel di bawah mantel atas.

Koreksi negatif besar terjadi di lapisan mantel atas. Ini menyatakan bahwa bagian mantel yang mengalami peregangannya akibat proses tektonik dimana benua India menumbuk Benua Asia, memiliki anomali kecepatan negatif pada lapisan mantel atas dan lapisan-lapisan di bawahnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Dr. Dalkolmo dan Prof. Friederich yang telah bersama-sama saya mengembangkan program GEMINI, juga ke-

pada Prof. Wielandt. Terima kasih juga ditujukan kepada IRIS (International Seismological Network) yang telah menyediakan data seismogram untuk riset ini dan juga software-software pelengkapannya. Program utama dituliskan dengan software non-comersial Intel FORTRAN dan gambar-gambar dalam paper ini dituliskan dengan software PGPLOT dan GMT. Riset ini didanai oleh Dana Hibah Penelitian Dasar DIKTI no. 019/SP3/PP/DP2M/II/2006.

DAFTAR PUSTAKA

- Bulland, R. and Chapman, C., 1983. Travel time Calculation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1271 – 1302.
- Dalkolmo, J., 1993. *Synthetische Seismogramme fuer Eine Sphaerisch Symmetrische, Nichtrotierend Erde durch Direkte Berechnung der Greenschen Funktion*, Diplomarbeit, Inst. fuer Geophys., Uni. Stuttgart.
- Dreger, D.S., 2002. *Time-Domain Moment Tensor INVerse Code (TD-MT_INV)*, The Berkeley Seismological Laboratory (BSL), Report Number 8511,
- Dziewonski, A.M. and Anderson, D.L., 1981. Preliminary reference Earth model, *Phys. of the Earth and Plan. Int.*, 25, 297 – 356.
- Engdahl, E.R., Van Der Hilst, R.D., and Buland, R.P., 1998. Global Teleseismic Earthquake Relocation with Improved Travel Times and Procedures for Depth Determination, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 722 - 743.
- Friederich, W. and Dalkolmo, J., 1995. Complete Synthetic Seismograms for a Spherically Symmetric Earth by a Numerical Computation of the Green's Function in the Frequency Domain, *Geophys. J. Int.*, 122, 537 - 550.
- Grand, S.P., Van Der Hilst, R.D., and Widiantoro, S., 1997. Global Seismic Tomography; A Snapshot of Convection in the Earth, *GSA Today*, 7, 1 - 7.
- Hall, R., 2002. Cenozoic Geological and Crust Tectonic Evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer Based Reconstructions, Model and Animations, *Journ. Of Asian Earth Sciences*, 20, 353 – 431.
- Kennett, B.L.N., IASPEI 1991, *Seismological Tables*, Research School of Earths Sciences, Australian National University.
- Replumaz, A, Kárason, H, van der Hilst, R. D., Besse, J. and Tapponnier, P., 2004. 4-D Evolution of SE Asia's Mantle from Geological Reconstructions and Seismic Tomography, *Earth and Planetary Science Letters*, 221, 103 – 115.