Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Sri Widiyantoro

GEO-TOMOGRAFI: USAHA UNTUK MENEROPONG INTERIOR BUMI DAN MITIGASI BENCANA GEMPA

9 Februari 2008
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada penulis

Judul: Pidato Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung
GEO-TOMOGRAFI:
USAHA UNTUK MENEROPONG INTERIOR BUMI
DAN MITIGASI BENCANA GEMPA

Hak Cipta ada pada penulis

Data katalog dalam terbitan

WIDIYANTORO, Sri
Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung:
GEO-TOMOGRAFI: USAHA UNTUK MENEROPONG INTERIOR BUMI
DDAN MITIGASI BENCANA GEMPA
Disunting oleh Sri Widiyantoro

Bandung: Percetakan cv. Senatama Wikarya, 2008
vi+53 h., 17,5 x 25 cm
1. Pendidikan Tinggi 1. Sri Widiyantoro

Percetakan cv. Senatama Wikarya, Jalan Sadang Sari 17 Bandung 40134
Telp. (022) 70727285, 0811228615; E-mail:paulusuyanto@yahoo.co.id

Kata Pengantar

Segala sembah dan puji syukur pertama-tama saya haturkan kepada Tuhan yang Maha Esa, Khalik langit dan bumi yang atas kasih, karunia dan perkenanNya penulis dimampukan untuk berkarya sampai sekarang ini. Ucapan terima kasih yang setinggi-tingginya dengan segala kerendahan hati saya tujukan kepada yang terhormat Majelis Guru Besar, Institut Teknologi Bandung yang telah memberi kesempatan kepada penulis untuk menyampaikan Pidato Ilmiah ini di hadapan sidang pleno Majelis Guru Besar, Institut Teknologi Bandung.

Buku Pidato Ilmiah ini berisi paparan singkat tentang kontribusi penulis dalam bidang seismologi, khususnya dalam pengembangan teknik pencitraan tomografi struktur tiga-dimensi (3D) kerak dan mantel bumi dengan memanfaatkan data gempa. Dari hasil tomografi regional dengan pendekatan non-linier diperoleh citra resolusi tinggi dari struktur 3D zona subduksi yang terdapat di Indonesia dan berbagai tempat lain di dunia. Sedangkan dari hasil pengembangan tomografi global, misalnya, untuk pertama kali dibuktikan bahwa subduksi litosfer samudera dapat mencapai batas mantel dan inti bumi pada kedalaman hampir 3000 km. Model bumi 3D hasil pencitraan geo-tomografi ini sangat bermanfaat untuk memahami tidak hanya struktur bumi secara rinci, tetapi juga sifat fisis batuan dan proses tektonik yang terdapat di bagian dalam (interior) dari planet bumi kita. Selanjutnya, rencana kegiatan riset tentang analisis prediktabilitas gempa bumi dipaparkan dengan singkat. Pada bagian akhir buku ini diberikan

Rekaman Karya Ilmiah (daftar publikasi terpilih dan citation index) dan juga Curriculum Vitae penulis.

Pidato Ilmiah ini merupakan bagian dari bentuk pertanggung-jawaban akademik dan komitmen saya sebagai guru besar baru. Selain itu buku Pidato Ilmiah ini penulis persembahkan kepada para guru/dosen saya terdahulu. Tanpa jasa beliau-beliau ini, tentu sangat sulit bagi saya untuk dapat mencapai keberhasilan seperti sekarang. Semoga paparan singkat ini dapat memberikan gambaran tentang betapa pentingnya pengembangan riset seismologi/kegempaan lebih lanjut untuk Indonesia yang sangat rawan akan bencana gempa bumi.

Sri Widiyantoro

Daftar Isi

		Halaman
	Kata Pengantar	iii
	BAGIAN I : PENDAHULUAN	1
1	Pendahuluan Umum	1
2	Landasan Teori dan Kajian Pustaka	3
	BAGIAN II : KONTRIBUSI PENULIS DALAM PENGEMBANGAN GEO-TOMOGRAFI	10
3	Presentasi Model Tomografi Regional	10
4	Presentasi Model Tomografi Global	22
	BAGIAN III : RENCANA PENELITIAN LANJUT	36
5	Prediktabilitas Gempa Bumi	36
6	Penutup dan Harapan	37
	Ucapan Terima Kasih	40
	Daftar Pustaka	42
	Rekaman Karya Ilmiah (Publikasi dan Citation Index)	46
	Curriculum Vitae	51

BAGIAN I : PENDAHULUAN

1 Pendahuluam Umum

Gempa bumi raksasa dengan magnitudo 9,3 pada skala Richter yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2004 di samudera Hindia di sebelah selatan/dekat Aceh telah menimbulkan tsunami yang menurut data terkini telah mengakibatkan lebih dari 200.000 orang meninggal. Sementara tragedi kemanusiaan yang luar biasa tersebut masih berlangsung, gempa besar dengan magnitudo 8,7 pada skala Richter berikutnya terjadi di dekat Nias pada tanggal 28 Maret 2005. Kedua gempa besar ini masing-masing diikuti oleh rentetan gempa dengan magnitudo yang meskipun lebih kecil, tetapi telah menimbulkan kekhawatiran berkepanjangan. Terlebih lagi setelah kejadian gempa-gempa besar ini ternyata beberapa gunungapi meningkat aktivitas seismiknya.

Memasuki tahun 2006 bencana gempa bumi dan tsunami di atas telah disusul juga oleh bencana gunung Merapi yang dalam waktu berminggu-minggu atau bahkan sampai bulanan telah memuntahkan awan panas dan lava pijar dalam volume yang sangat besar. Masih dalam periode gawat Merapi, tiba-tiba gempa bumi Yogya-Jateng terjadi pada tanggal 27 Mei 2006 yang lagi-lagi merenggut ribuan jiwa. Pada saat penderitaan tersebut masih berlangsung, gempa bumi yang cukup kuat kembali menggoncang Pulau Jawa pada tanggal 17 Juli 2006 dengan sumber gempa terletak di selatan Jawa Barat dan menimbulkan tsunami yang telah menerjang kawasan wisata Pangandaran dan sekitarnya. Pada tahun 2007 ini juga terjadi gempa merusak lagi di

Sumatera, yaitu di Solok 6 Maret 2007 dan di sebelah Tenggara Bengkulu 12 September 2007 dengan magnitudo di atas 8 pada skala Richter.

Dalam makalah ini hasil studi tomografi seismik (gempa bumi) yang telah penulis tekuni selama lebih dari sepuluh tahun terakhir akan digunakan untuk menjelaskan tentang kejadian rentetan gempa bumi dan tsunami di tanah air belakangan ini. Penjelasan akan dimulai dengan: (i) dasar teori tomografi seismik; (ii) kajian pustaka yang tidak hanya berhubungan dengan teknik pencitraan tomografi, tetapi juga yang terkait dengan usaha prediksi gempa; (iii) hasil pencitraan tomografi untuk struktur tiga-dimensi (3D) zona penunjaman lempeng samudera di bawah busur kepulauan Indonesia, dengan fokus pembahasan untuk Sumatera dan Jawa; dan (iv) diskusi yang akan difokuskan pada implikasi tektonik/geodinamika dari tomogram seismik untuk Sumatera, Jawa dan Bali, dan strategi untuk prediksi gempa. Di sini akan ditunjukkan bahwa investigasi tomografi, yaitu teknik pencitraan yang telah terlebih dahulu berhasil digunakan dalam bidang kedokteran, juga telah berhasil diterapkan untuk masalah kebumian dengan sangat baik. Selanjutnya, hasil pencitraan tomografi global di mana penulis telah berkontribusi secara signifikan akan dipaparkan bersama dengan implikasinya untuk pola konveksi mantel bumi. Bagian akhir makalah ini berisi suatu usulan untuk penelitian tentang analisis prediktabilitas gempa bumi dengan mengintegrasikan berbagai metode dan data guna membangun model prediktabilitas gempa destruktif di Indonesia. Hal ini sangat penting dalam membantu

upaya mitigasi bencana gempa bumi seiring dengan sering terjadinya gempa besar dan merusak di tanah air.

2 Landasan Teori dan Kajian Pustaka

Dalam studi tentang interior bumi sampai sekarang belum dapat dilakukan pengukuran secara langsung (”in situ”) dikarenakan kedalaman pusat bumi mencapai sekitar 6370 km. Untuk itu diperlukan metode-metode pengukuran secara tak langsung yang dapat memberikan deskripsi fisis mengenai isi bumi dari kerak sampai dengan bagian yang terdalam (inti bumi). Dalam hal ini seismologi merupakan pendekatan yang sering digunakan.

Seorang ilmuwan dari Kroasia (**Andrija Mohorovicic**, 1857–1936) sekitar seabad yang lalu sudah menyadari pentingnya seismologi untuk mempelajari bumi sampai kedalaman yang terdalam. Ia mengungkapkan tujuan studi seismologi dengan pernyataan berikut: “... *The goal of seismology is to study the interior of the Earth, and to continue where the geologist stops, and it has in modern seismographs a sort of binoculars that enables us to look into the largest of depths ...*”.

Pernyataan **Andrija Mohorovicic** ini sekarang terbukti benar dengan ditemukannya bukti-bukti seismik yang menunjukkan bahwa bumi dapat dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu: kerak, mantel dan inti. Studi geologi terbatas sampai pada kedalaman sekitar 700 km, di mana gempa bumi masih dapat terjadi. Sedangkan struktur bumi di bawah kedalaman tersebut diungkap melalui studi seismologi, terutama melalui pencitraan tomografi seismik.

Dalam bab ini dijelaskan landasan teori terutama tentang pencitraan tomografi seismik yang telah ditekuni oleh penulis selama lebih dari satu dekade terakhir dan kajian pustaka yang relevan dengan perkembangan teknik pencitraan tomografi terkini dan usaha prediksi gempa bumi. Prediksi gempa yang hanya berdasarkan data statistik tentu akan sangat sulit untuk mendapatkan hasil yang diharapkan. Untuk itu riset kegempaan yang terintegrasi sangatlah diperlukan.

2.1 *Teori pencitraan geo-tomografi*

Salah satu pendekatan yang diperlukan dalam usaha mitigasi bencana dan prediksi gempa adalah dengan mengetahui struktur interior bumi secara rinci. Dengan demikian tempat-tempat rawan gempa dapat diperkirakan dengan baik. Untuk tujuan ini maka pencitraan tomografi seismik merupakan teknik yang relevan untuk diterapkan.

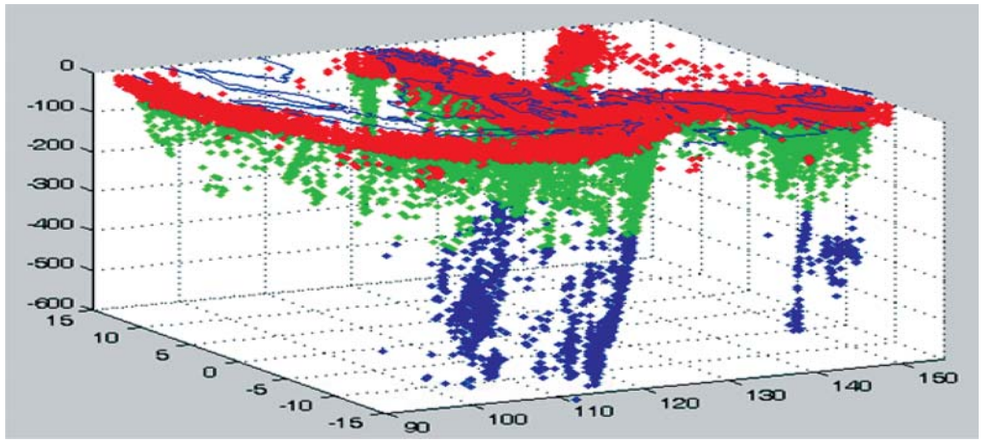
Pencitraan tomografi secara umum dapat didefinisikan sebagai suatu rekonstruksi dari sebuah benda dari observasi besaran fisis yang merepresentasikan efek dari penjalaran suatu bentuk radiasi melalui benda yang diamati tersebut. Teknik pencitraan tomografi telah berhasil digunakan dalam bidang kedokteran, di mana teknik ini merupakan dasar untuk *Computerized Tomography* (*CT*) *scanning* yang diaplikasikan untuk memperoleh tomogram (*slice picture*) dari tubuh manusia dengan resolusi tinggi. Akhir-akhir ini *CT scanning* berhasil dikembangkan untuk memperoleh tomogram yang mempunyai resolusi sangat tinggi dengan teknik *Magnetic Resonance Imaging* (*MRI*). Teknik serupa juga telah berhasil diterapkan untuk mempelajari struktur 3D bawah

permukaan bumi baik pada skala global dan regional dengan menggunakan data gempa bumi. Teknik pencitraan struktur interior bumi ini selanjutnya disebut sebagai pencitraan geo-tomografi.

2.2 *Tahapan dalam proses pencitraan tomografi seismik*

Dalam penelitian yang hasilnya disajikan dalam makalah ini metode yang digunakan untuk membuat model zona subduksi 3D di bawah Sumatera, Jawa dan Bali adalah pencitraan tomografi non-linier dengan menggunakan data waktu tiba gelombang seismik. Metode ini meliputi beberapa tahapan utama seperti: (i) parameterisasi model 3D; (ii) penjejakan sinar (*ray tracing*) seismik 3D; (iii) inversi yang meliputi proses *update* model 3D; dan (iv) tes resolusi model 3D. Parameterisasi model 3D menggunakan *non-uniform grid*, yaitu gabungan antara model global dan lokal dengan ukuran grid/blok yang berbeda. Dengan parameterisasi model ini jumlah grid global dan lokal mencapai sekitar 300.000 dan merepresentasikan jumlah *unknown* atau kolom matriks. Ukuran grid ini relatif kecil untuk pemodelan pada skala regional, di mana *ray bending* sudah tidak bisa diabaikan lagi. Oleh karena itu dalam studi ini digunakan *ray tracing* 3D dengan memanfaatkan teknik *pseudo bending* (Koketsu dan Sekine, 1998). Sedangkan untuk menyelesaikan problema inversi telah digunakan salah satu metode *CG*, yaitu teknik *LSQR* (Paige dan Saunders, 1982) yang merupakan pengembangan dari teknik *SVD*. Tahap akhir sebelum dilakukan interpretasi terhadap tomogram yang dihasilkan adalah tes resolusi. Tes ini sangat penting, sebab biasanya tidak seluruh bagian dari model 3D yang dihasilkan mempunyai resolusi yang bagus. Hal ini disebabkan terutama oleh

distribusi gempa dan seismograf yang acak atau terkonsentrasi pada area tertentu saja. Dengan demikian interpretasi hanya dapat dilakukan pada bagian model yang mempunyai resolusi tinggi. Seluruh tahapan ini telah dijelaskan secara rinci dalam makalah kami sebelumnya (Widiyantoro dan van der Hilst, 1996 dan 1997 untuk pendekatan linier; dan Widiyantoro *dkk*., 2000 untuk pendekatan non-linier).



Gambar 1. Plot seismisitas di bawah Busur Kepulauan Indonesia secara 3D untuk kurun waktu mulai 1964 sampai dengan 2005. Data diambil dari katalog gempa global hasil kompilasi Engdahl *dkk*. (1998 dan 2007). Simbol: segi empat merah merepresentasikan gempa dangkal ($h \leq 70$ km); hijau, gempa menengah (70 km $< h \leq$ 300 km; dan biru, gempa dalam ($h >$ 300 km), di mana h = kedalam sumber gempa (hiposenter). Di sini terlihat bahwa hanya ada sedikit gempa yang terjadi di Kalimantan.

Data yang digunakan dalam pencitraan geo-tomografi untuk studi pada skala regional/global diambil dari sumber alam, yaitu gempa bumi. Sedangkan untuk investigasi skala lokal digunakan sumber buatan (ledakan dinamit). Dalam makalah ini data yang digunakan

adalah data gempa bumi regional (Gambar 1), karena obyek yang diteliti adalah zona subduksi di bawah Indonesia (khususnya untuk struktur 3D kerak dan mantel di bawah Busur Sunda). Data gempa yang digunakan adalah waktu tiba gelombang P (primer/longitudinal) dan S (sekunder/transversal). Data ini diambil dari katalog data gempa global dengan akurasi tinggi hasil proses ulang (*re-processing*) oleh Engdahl *dkk*. (1998 dan 2007). Proses ulang yang dimaksud meliputi antara lain: (i) re-identifikasi fasa gelombang seismik; dan (ii) relokasi hiposenter. Dari hasil *re-processing* ini maka hanya data dengan kualitas tinggi saja yang digunakan, sedangkan data dengan kualitas rendah dieliminasi dari katalog. Data dengan kualitas tinggi seperti ini sangat penting untuk menghasilkan citra tomografi seismik yang handal.

2.3 *Kajian pustaka*

Teknik pencitraan tomografi seismik telah mulai dikembangkan sejak pertengahan tahun 1970-an. Publikasi pertama tentang tomografi seismik ditulis oleh Aki dan Lee (1976). Sejak itu berbagai tulisan mengenai tomografi seismik mulai bermunculan yang disebabkan oleh kehandalan dari metode ini dalam mendeliniasi struktur 3D interior bumi.

Penelitian tentang struktur 3D mantel bumi di bawah Indonesia telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, yaitu oleh Fukao *dkk*. (1992), Puspito *dkk*. (1993), dan Widiyantoro dan van der Hilst (1996 dan 1997). Semua publikasi ini telah menggunakan pendekatan inversi linier. Pendekatan linier semacam ini tentu mempunyai keterbatasan, di mana struktur rinci (dengan skala kecil) tidak dapat dicitrakan dengan

baik. Pendekatan non-linier untuk pertama kali dikembangkan dalam pencitraan tomografi global (seluruh mantel bumi) oleh Bijwaard dan Spakman (2000), dan Widiyantoro *dkk.* (2000). Kedua kelompok peneliti ini secara independen telah mengembangkan metode non-linier tersebut dalam waktu yang hampir bersamaan. Pendekatan non-linier ini merepresentasikan *state-of-the-art* dari teknik pencitraan tomografi seismik.

Sedangkan untuk prediksi gempa bumi, usaha telah dimulai sejak berabad-abad yang lalu. Ilmuwan Cina Chang Heng sudah berusaha membuat seismoskop (pencatat gempa) pada 132 tahun sebelum Masehi (AD). Akan tetapi perkembangan usaha prediksi gempa ini sangat lambat dan bahkan sampai sekarang beberapa ilmuwan masih berdebat sengit mengenai apakah gempa bumi sebenarnya dapat diramal atau tidak (Geller *dkk*., 1997; Kagan, 1997).

Seismologi tidak diragukan lagi telah memberikan kontribusi yang sangat berharga kepada pemahaman tentang gempa, terutama tentang apa yang terjadi saat bagian bumi tiba-tiba mengalami ruptur/*rupture* (Widiwijayanti *dkk*., 1996). Seismologi juga memberikan penjelasan yang baik tentang pergerakan tanah, persamaan yang mendeskripsikan gerakan tanah, hal-hal yang mendasari bermacam-macam peri laku gempa, dan bagaimana fenomena gempa cocok dengan gambaran tektonik lempeng. Bahkan hadirnya pencitraan tomografi di bidang kebumian telah memberikan harapan baru.

Hal yang relatif masih kurang adalah pengenalan akan proses-proses di dalam bumi sebelum gempa terjadi. Salah satu manifestasi dari proses-proses ini kelihatannya adalah terbangkitnya arus listrik di

dalam kerak bumi (Varotsos dan Alexopoulos, 1984). Arus ini kemungkinan mengandung informasi penting jauh sebelum ruptur batuan terjadi. Fakta bahwa pengetahuan kita tentang proses yang terjadi di dalam bumi masih sangat terbatas ini haruslah diambil sebagai tantangan, dan bukan dalih untuk menjauhi studi semacam ini.

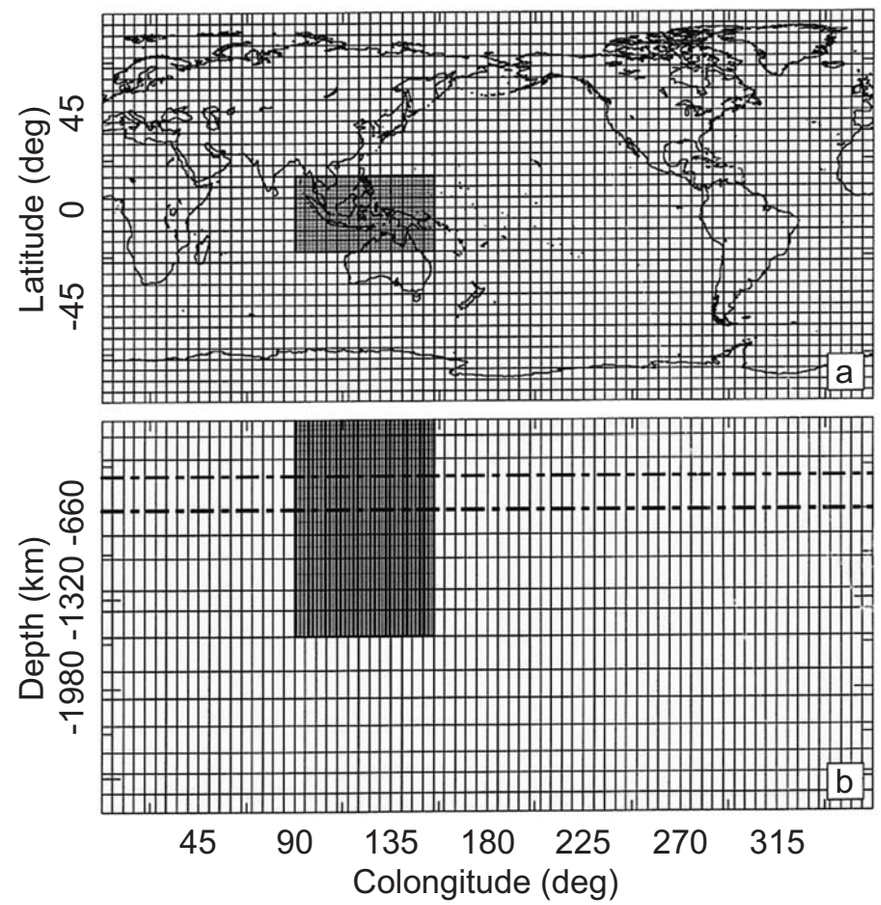
Untuk itu seismologi akan semakin lengkap jika disertai dengan analisis proses pra (sebelum) gempa dengan memanfaatkan data seperti *ground-based ULF electromagnetic* dan TEC (*total electron content*) dari GPS (Jhuang *dkk*., 2005). Oleh karena di dalam prediksi tentu juga melibatkan dimensi waktu maka analisis deret waktu perlu dilakukan. Dalam hal ini penggunaan *adaptive fuzzy logic* (Jamshidi *dkk*., 1993; Yan *dkk*., 1994) dengan aplikasi konstrain dari berbagai data, yaitu: seismik, vulkanik, GPS dan geo-elektrik tentu akan sangat bermanfaat.

BAGIAN II : KONTRIBUSI PENULIS DALAM PENGEMBANGAN GEO-TOMOGRAFI

Penelitian penulis sejak pertengahan 1990an telah menghasilkan model tomografi regional dan global dengan resolusi tinggi. Sebagai contoh, model global yang telah penulis buat untuk pertama kali dapat membuktikan bahwa penunjaman lempeng samudera berumur tua (>100 Ma) bisa mencapai batas antara mantel dan inti bumi pada kedalaman hampir 3000 km. Penulis untuk pertama kali juga telah memperkenalkan teknik pencitraan tomografi global secara non-linier, khususnya untuk model kecepatan gelombang S dengan menggabungkan informasi dari data gempa dengan panjang gelombang yang berbeda (*short* dan *long wavelength*). Dalam dua bab berikut akan dipresentasikan beberapa model tomografi regional dan global yang telah penulis hasilkan.

3 Presentasi Model Tomografi Regional

Dalam bab ini tomogram seismik regional hasil inversi non-linier, khususnya untuk Busur Sunda dipresentasikan secara rinci. Tomogram ini dibuat dengan menggunakan paremeterisasi model 3D seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2, di mana untuk zona subduksi di Indonesia digunakan ukuran blok yang relatif kecil. Bersamaan dengan presentasi tomogram seismik ini juga dibahas mengenai implikasi tektonik dari informasi yang terkandung dalam tomogram tersebut.



Gambar 2. Parameterisasi model 3D gabungan (regional dan global). Masing-masing menggunakan blok dengan ukuran 0,5° x 0,5° dan 5° x 5°. (a) Parameterisasi model dalam arah horisontal, dan (b) parameterisasi model dalam arah vertikal di sepanjang ekuator. Tebal lapisan bervariasi dari 35 km untuk kerak sampai dengan 200 km untuk mantel bumi bagian bawah.

Berikut ini disajikan beberapa tomogram yang diambil dari potongan-potongan horisontal dan vertikal melalui model tomografi hasil inversi data gelombang P dan S. Kuantitas yang diplot pada

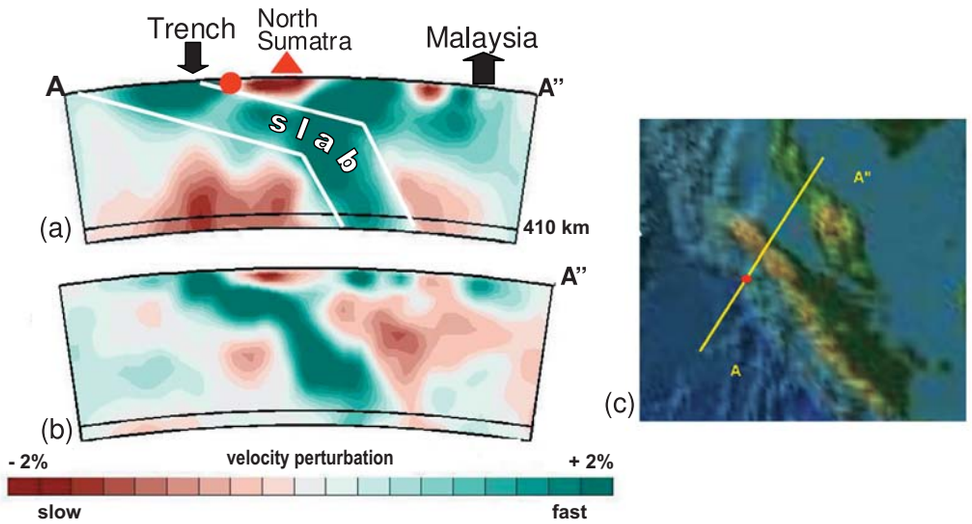
tomogram seismik adalah deviasi kecepatan rambat gelombang relatif terhadap model kecepatan bumi 1D (model *ak135* oleh Kennett *dkk*., 1995).

3.1 *Model tomografi seismik untuk Sumatera*

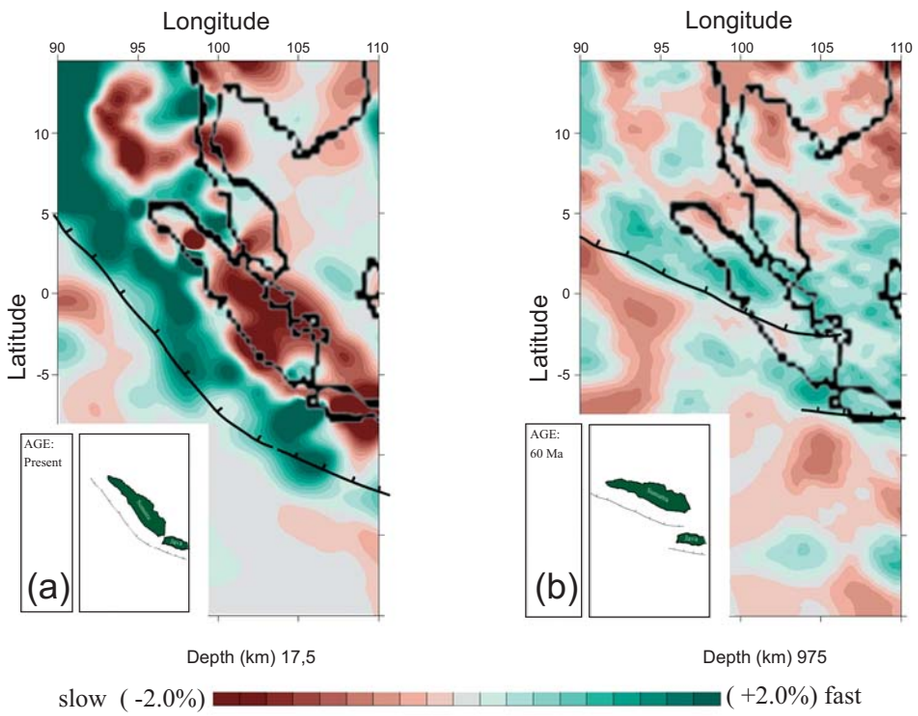
Seperti telah ditunjukkan dalam Gambar 3, profil tomogram seismik mengindikasikan bahwa subduksi litosfer samudera Hindia di bawah Sumatera Utara sangat landai, terutama di mantel bumi bagian paling atas. Hal ini kemungkinan telah disebabkan oleh adanya subduksi miring di Sumatera. Di samping itu subduksi landai ini ternyata juga berkorelasi dengan usia yang relatif muda dari litosfer samudera yang menunjam di bawah Sumatera dibandingkan dengan usia litosfer samudera di sepanjang Andaman dan Jawa (Widiyantoro dan van der Hilst, 1996). Sudut penunjaman landai seperti ini dapat menimbulkan *seismic coupling* atau gesekan yang kuat oleh karena gaya gravitasi bekerja dengan efektif pada dua lempeng yang bersinggungan. Gesekan kuat antar lempeng ini menjelaskan mengapa rentetan gempa besar terjadi di sepanjang lepas pantai barat Sumatera.

Peta tomogram seismik yang ditunjukkan dalam Gambar 4 mengindikasikan posisi Sumatera saat sekarang dan 60 Ma yang lalu. Posisi slab (area dengan anomali kecepatan tinggi yang memanjang) di mantel bawah yang menggambarkan posisi Sumatera puluhan juta tahun yang lalu tersebut ternyata terletak lebih ke sebelah utara dari posisinya sekarang. Hal ini memberikan implikasi bahwa Sumatera telah berotasi searah jarum jam. Hamilton (1979) menginterpretasikan bahwa rotasi ini diperkirakan telah berlangsung selama waktu *Cenozoic*

sebagai akibat dari tumbukan kontinen India dengan Eurasia. Oleh tumbukan ini maka Asia Tenggara, termasuk Indonesia bagian barat (Sumatera), terpelanting ke selatan dan membentuk semacam putaran dengan Sumatera sebagai pusatnya. Rotasi inilah yang merupakan faktor penting yang menyebabkan zona subduksi di sepanjang Sumatera tidak frontal, tetapi miring (*oblique*).



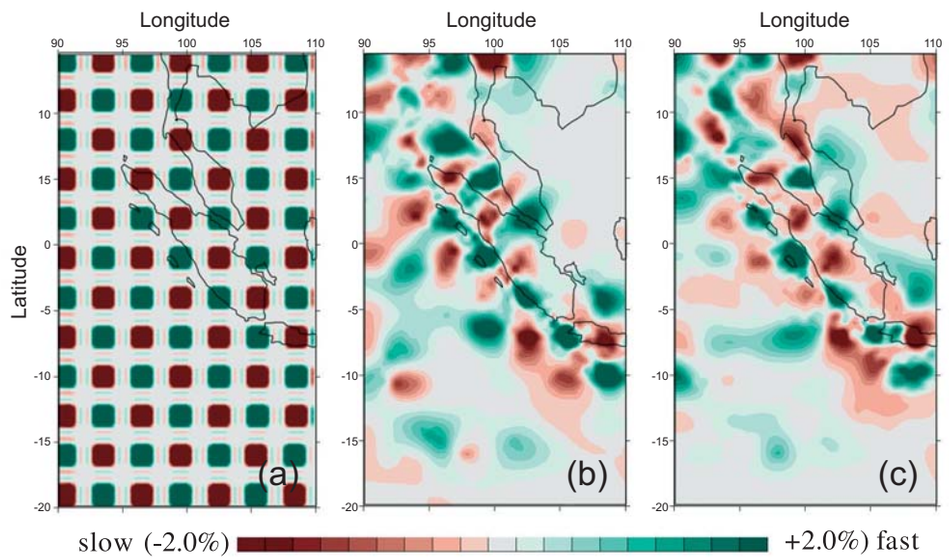
Gambar 3. (a) Penampang vertikal gelombang P yang memotong lokasi gempa besar (26 Desember 2004) di Sumatera Utara (titik merah) yang diturunkan dengan menggunakan data sebelum gempa Aceh (Engdahl *dkk*., 1998), (b) sama seperti (a), tetapi diturunkan dengan data yang kebanyakan diperoleh dari gempa-gempa setelah 26 Desember 2004 (Engdahl *dkk*., 2007), dan (c) lokasi penampang pada (a) dan (b) yang ditunjukkan dengan garis lurus warna kuning.



Gambar 4. Peta anomali seismik gelombang P. (a) Model untuk lapisan kerak bumi, dan (b) untuk mantel bawah. Anomali kecepatan diplot relatif terhadap model kecepatan bumi 1D (*ak135* oleh Kennett *dkk*., 1995). *Inset* di (a) dan (b) masing-masing adalah posisi Sumatera sekarang dan 60 Ma berdasarkan interpretasi Sabbeq dan Widiyantoro (2004).

Tes resolusi dalam pencitraan tomografi merupakan tahap yang penting, sebab tidak semua bagian dari model tomografi mempunyai tingkat kepercayaan yang sama. Hal ini dikarenakan oleh sebaran sumber gempa yang acak. Hasil tes resolusi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa struktur slab, terutama di sepanjang Pulau Sumatera, dapat dikonstrain dengan baik oleh cakupan sinar seismik yang digunakan (Gambar 5). Tingkat resolusi model semakin menurun

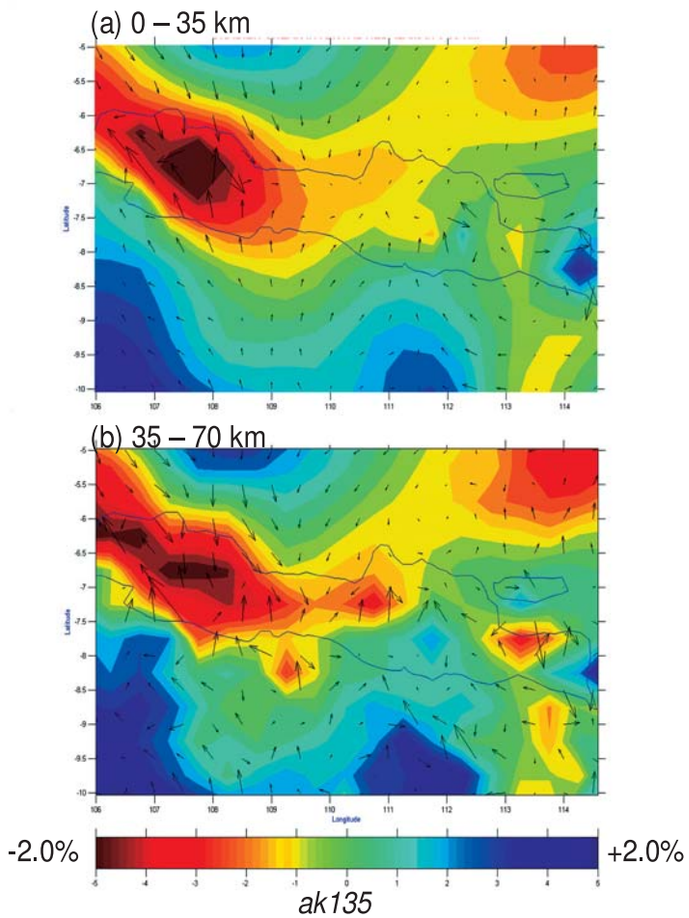
di area yang terdapat hanya sedikit gempa maupun stasiun pengamat, misal: di bawah samudera Hindia dan laut Cina Selatan.



Gambar 5. Contoh hasil tes resolusi. (a) Model input, (b) hasil inversi dengan menggunakan cakupan data gelombang P, dan (c) hasil inversi dengan memakai cakupan data gelombang S. Di sini terlihat bahwa resolusi model di sepanjang Sumatera lebih baik daripada di bawah samudera.

3.2 *Model tomografi seismik untuk Jawa dan Bali*

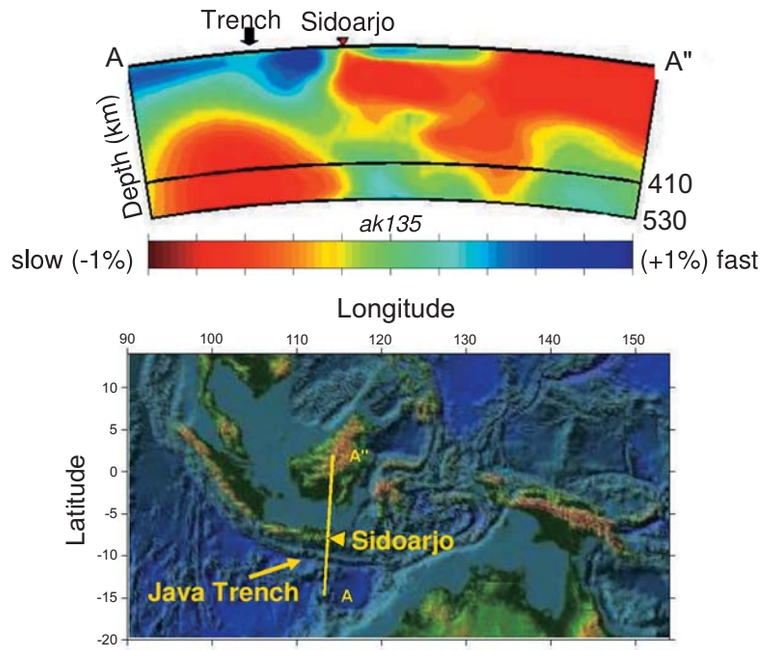
Contoh hasil inversi data gelombang S ditunjukkan pada Gambar 6. Tomogram ini merepresentasikan struktur pada kedalaman sekitar 40 km di bawah Jawa. Di sini terlihat jelas bahwa sesar Opak, yaitu lokasi gempa Yogya-Jateng 27 Mei 2006, diekspresikan sebagai batas antara zona kecepatan rambat gelombang rendah (di sebelah barat) dengan zona kecepatan tinggi (di sebelah timur) yang tercitrakan berada di bawah Jawa bagian tengah.



Gambar 6. Peta anomali seismik gelombang S pada interval kedalaman : (a) 0 – 35 km, dan (b) 35 – 70 km yang diplot relatif terhadap model *ak135*. Sesar Opak, lokasi gempa Yogya-Jateng 27 Mei 2006, terletak di atas batas antara zona kecepatan rendah (di sebelah barat) dengan zona kecepatan tinggi (di sebelah timur) yang terdapat di DIY/Jawa Tengah. Anak panah adalah gradien modulus geser yang mengindikasikan besar dan arah gerakan lempeng bumi.

Sedangkan Gambar 7 menunjukkan penampang vertikal melalui model gelombang P yang memotong Sidoarjo, Jawa Timur. Tomogram

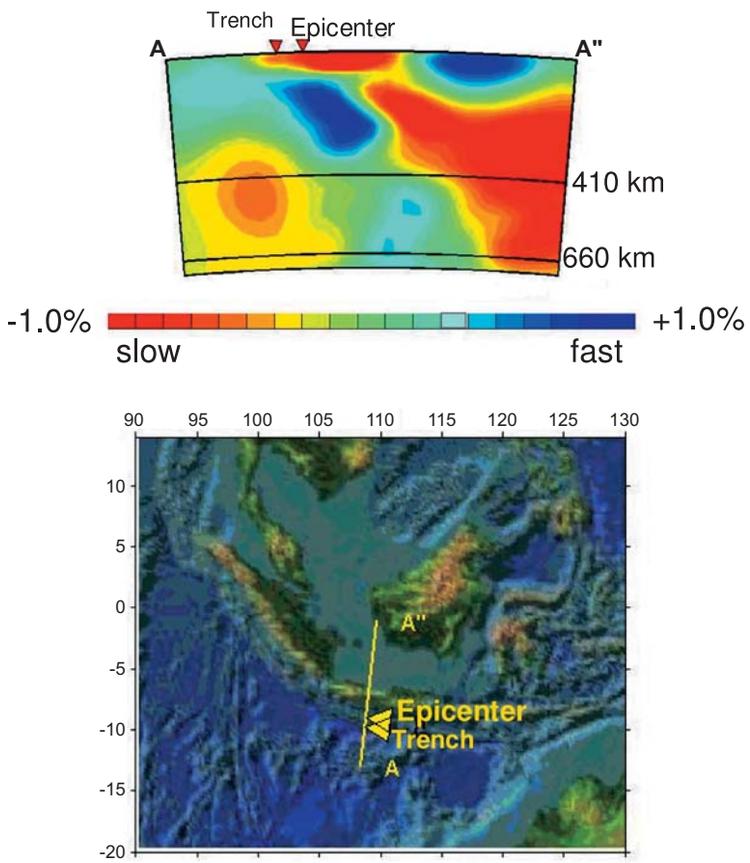
ini mengindikasikan adanya materi mantel bumi yang panas (kecepatan rendah/warna merah) yang naik tepat di bawah Sidoarjo, di mana telah terjadi semburan lumpur panas beberapa hari setelah terjadinya gempa Yogya-Jateng 27 Mei 2006. Observasi ini menunjukkan perlunya melihat struktur bawah permukaan (kerak dan mantel bumi) dalam eksplorasi dan eksploitasi cadangan hidrokarbon.



Gambar 7. Penampang vertikal melalui model gelombang P yang memotong Sidoarjo, Jawa Timur (Widiyantoro, 2006). Lokasi penampang ditunjukkan dengan garis lurus pada panel bawah.

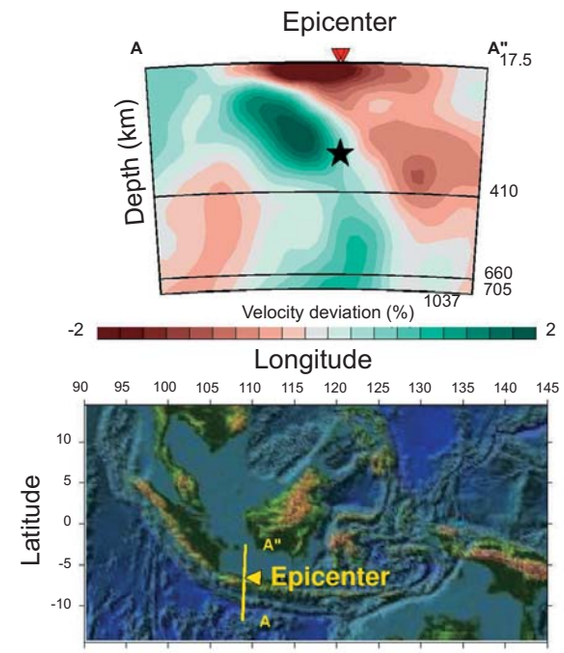
Gambar 8 berikut adalah penampang vertikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, tetapi melalui episenter dari gempa yang membangkitkan tsunami pada tanggal 17 Juli 2006. Dari penampang ini

terlihat dengan jelas bahwa gempa tersebut merupakan hasil dari proses subduksi lempeng samudera Hindia yang membentuk sudut landai, terutama di bagian mantel bumi paling atas. Hal ini sangat mirip dengan mekanisme gempa besar Aceh 26 Desember 2004 (bandingkan dengan Gambar 3).



Gambar 8. Penampang vertikal melalui model gelombang P yang memotong lokasi episenter gempa di selatan Jawa Barat 17 Juli 2006 (Widiyantoro, 2006). Lokasi penampang ditunjukkan dengan garis lurus pada panel bawah.

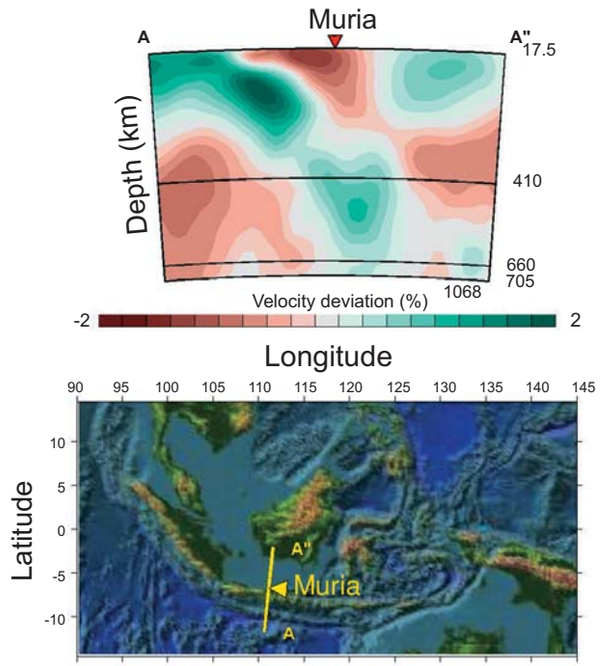
Sedangkan Gambar 9 dan 10 masing-masing menunjukkan penampang vertikal seperti yang diberikan dalam Gambar 7 dan 8, tetapi melalui pusat gempa dalam yang terjadi pada tanggal 9 Agustus 2007 di Laut Jawa di sebelah utara Indramayu (Gambar 9) dan penampang melalui Gunung Muria (Gambar 10).



Gambar 9. Penampang vertikal melalui model gelombang P yang memotong posisi hiposenter gempa (tanda bintang) yang terjadi di bawah Laut Jawa pada tanggal 9 Agustus 2007. Lokasi penampang ditunjukkan dengan garis lurus pada panel bawah.

Dari penampang dalam Gambar 9 dapat dilihat dengan jelas bahwa gempa 9 Agustus 2007 yang dilaporkan mempunyai magnitudo 7,5 pada skala Richter tersebut merupakan hasil dari proses subduksi lempeng samudera Hindia yang membentuk sudut cukup curam.

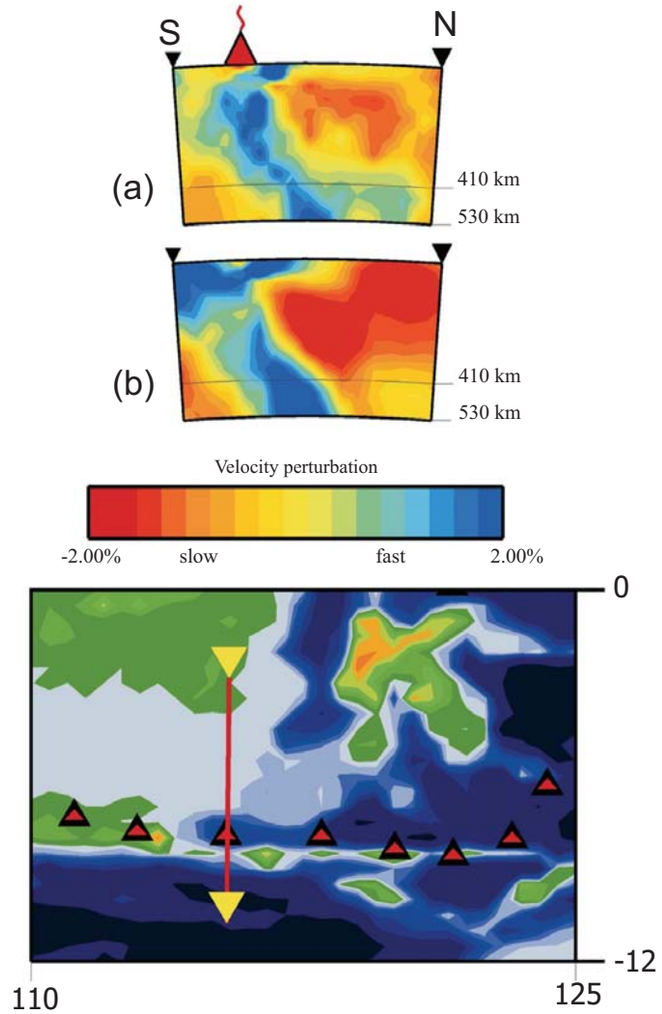
Dengan demikian lokasi sumber gempanya di bawah Laut Jawa sudah cukup dalam (sekitar 290 km) sehingga meskipun energi yang dilepas cukup besar, tetapi tidak menimbulkan kerusakan yang berarti.



Gambar 10. Penampang vertikal melalui model gelombang P yang memotong posisi Gunung Muria di Jawa Tengah. Lokasi penampang ditunjukkan dengan garis lurus pada panel bawah.

Dalam Gambar 11 ditunjukkan sistem subduksi kompleks di bawah Bali. Subduksi utama berasal dari selatan, di mana lempeng Indo-Australia menunjam di bawah busur Sunda. Akan tetapi di samping itu ada juga subduksi dari arah utara. Hal ini disebabkan oleh adanya kerak samudera di utara Bali dan pulau-pulau kecil di sebelah timurnya (Widiyantoro dan Fauzi, 2005). Data sejarah menunjukkan bahwa di

selatan maupun di utara Bali dan pulau-pulau di sebelah timurnya pernah terjadi gempa bumi yang menimbulkan tsunami, antara lain tsunami Flores 1992.



Gambar 11. Penampang vertikal melalui model: (a) gelombang P, dan (b) gelombang S yang memotong Pulau Bali (Widiyantoro, 2006). Lokasi penampang ditunjukkan oleh garis lurus di peta. Simbol segitiga merah menunjukkan lokasi gunung api.

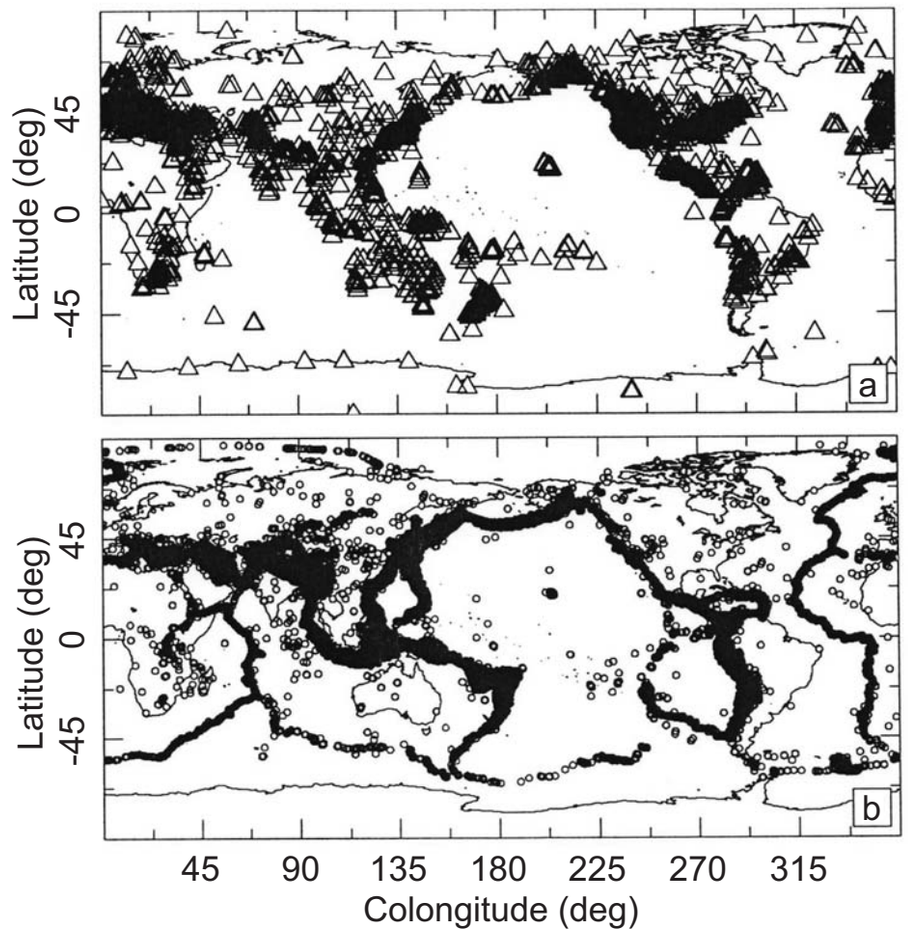
4 Presentasi Model Tomografi Global

Pada presentasi sebelumnya telah ditunjukkan contoh hasil pencitraan tomografi seismik pada skala regional untuk zona subduksi di sepanjang Busur Sunda. Secara umum hasilnya dapat memberikan gambaran rinci tentang konfigurasi slab litosfer samudera yang tersubduksi di bawah litosfer benua. Akan tetapi kedalaman yang biasa digunakan dalam parameterisasi model tomografi seismik regional hanya sampai pada bagian atas dari mantel bawah (~1500 km). Oleh sebab itu nasib (*fate*) dari slab yang menunjam, yaitu sampai berapa dalam, belum dapat diketahui dengan pasti. Pada hal informasi semacam ini akan sangat membantu pemahaman mengenai konveksi/dinamika mantel bumi. Dalam tomografi global seperti yang disajikan dalam bagian ini, parameterisasi model meliputi kerak dan seluruh mantel bumi (dari permukaan sampai pada batas antara mantel dan inti bumi). Oleh sebab itu dari citra tomografi global dapat diketahui sampai seberapa dalam slab litosfer samudera menunjam ke dalam mantel bumi.

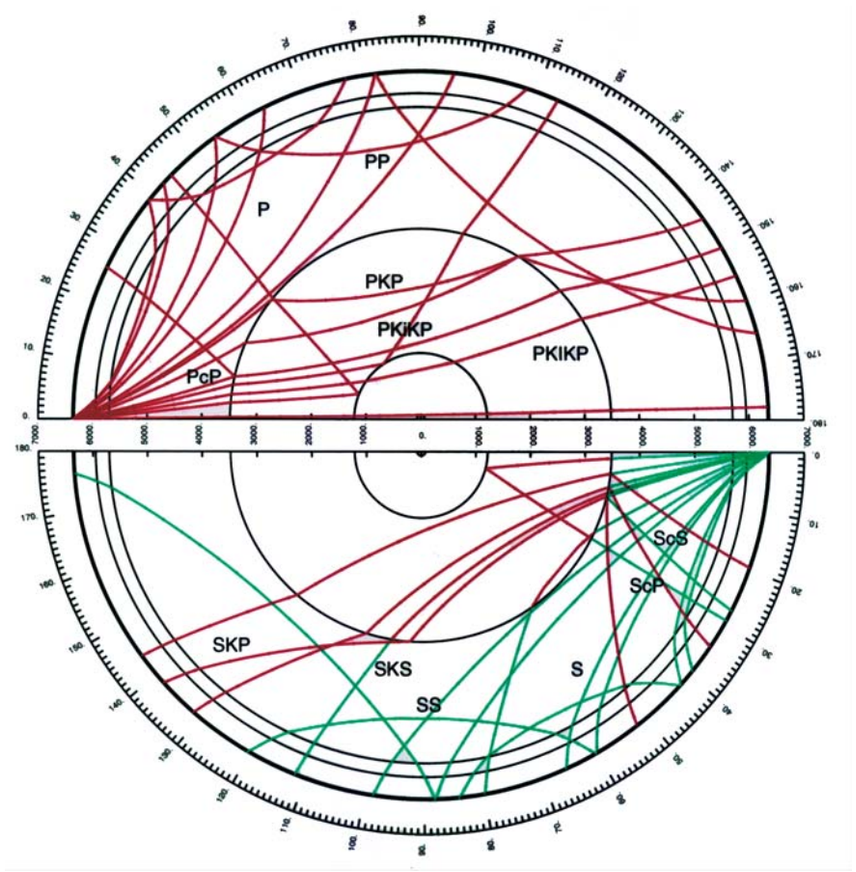
Dalam gambar berikut (Gambar 12) ditunjukkan distribusi global dari kejadian gempa bumi dan stasiun pengamat gempa yang digunakan untuk membuat tomogram global yang dipresentasikan dalam bagian ini. Data yang diplot meliputi data gempa yang terjadi dari tahun 1964 sampai dengan 1995. Lokasi episenter diambil dari data global yang telah dikompilasi oleh Engdahl *dkk.* (1998).

Di sini disajikan beberapa tomogram global dari hasil inversi data gelombang P dan S. Gambar 13 menunjukkan beberapa fasa utama dari gelombang tubuh yang sering digunakan untuk studi tomografi global.

Fasa gelombang yang melewati inti bumi (terutama PKP dan SKS) biasa dimanfaatkan untuk mendeliniasi struktur bagian paling bawah dari mantel dan bahkan struktur inti bumi juga.



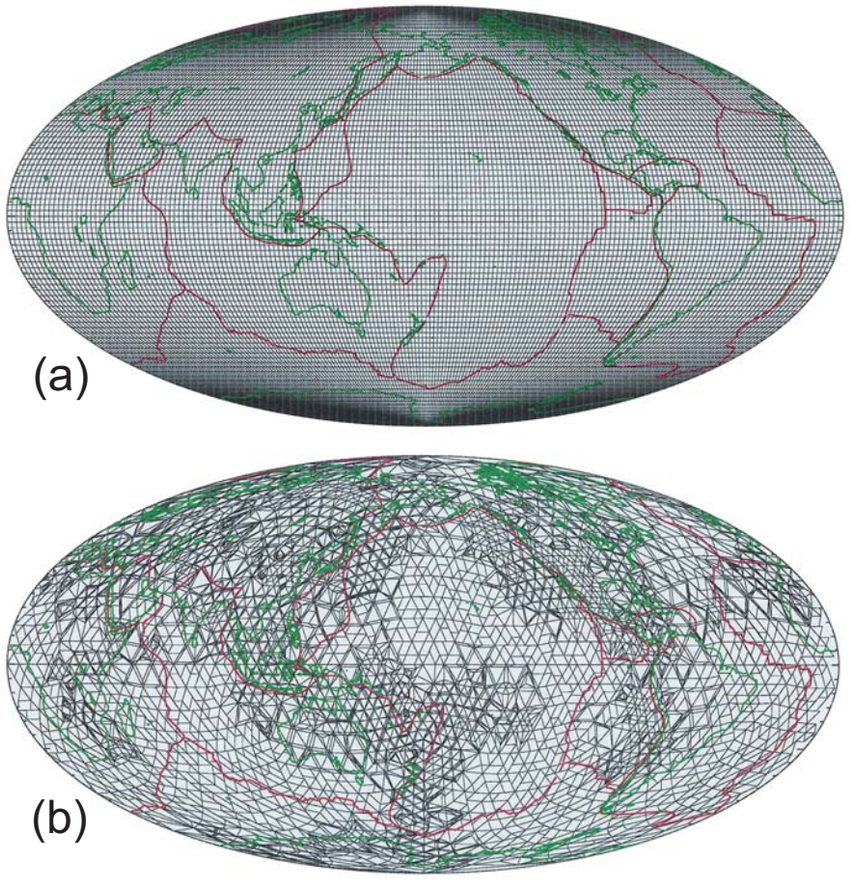
Gambar 12. Distribusi global dari (a) stasiun pengamat gempa, dan (b) episenter dari kejadian gempa antara dari tahun 1964 sampai dengan 1995 (data diambil dari katalog Engdahl *dkk.*, 1998). Pada gambar di atas terlihat bahwa di bawah samudera masih ada *gap*, di mana kejadian gempa maupun stasiun pengamat relatif masih sangat sedikit.



Gambar 13. Lintasan sinar seismik dari beberapa fasa utama gelombang P (garis merah) dan S (garis hijau); *courtesy of B.L.N. Kennett* (1997).

Parameterisasi model global yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan di dalam Gambar 14(a). Di sini digunakan blok dengan ukuran seragam yaitu 2° x 2°, di mana 1° = 111,195 km. Untuk parameterisasi model dalam investigasi tomografi dapat juga digunakan model parameterisasi yang lain. Sebagai contoh adalah *irregular cell* yang dikembangkan oleh Sambridge dan Faletic (2003);

lihat Gambar 14(b). Keuntungan dari pemakaian model parameterisasi dengan ukuran blok yang berbeda adalah bahwa jumlah bilangan yang tidak diketahui (*unknown*) dalam proses inversi bisa ditekan tanpa mengurangi resolusi tomogram untuk suatu area yang diinginkan.

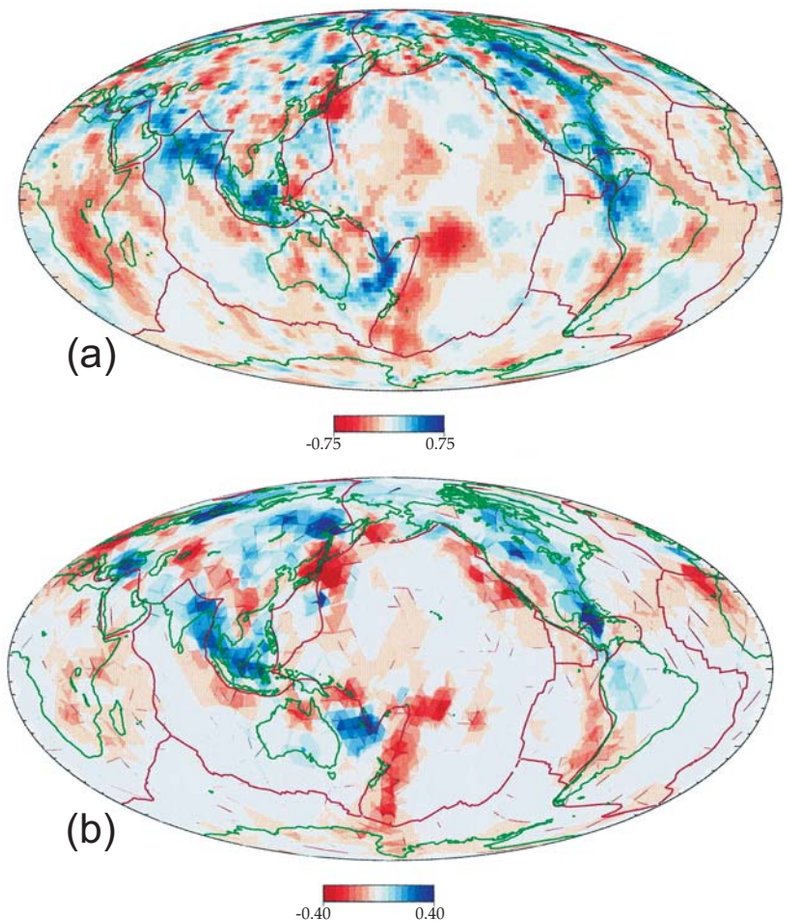


Gambar 14. (a) Parameterisasi model tomografi global dengan ukuran blok yang seragam (Widiyantoro *dkk*., 2000), dan (b) parameterisasi model dengan jenis blok yang beragam (Sambridge dan Faletic, 2003).

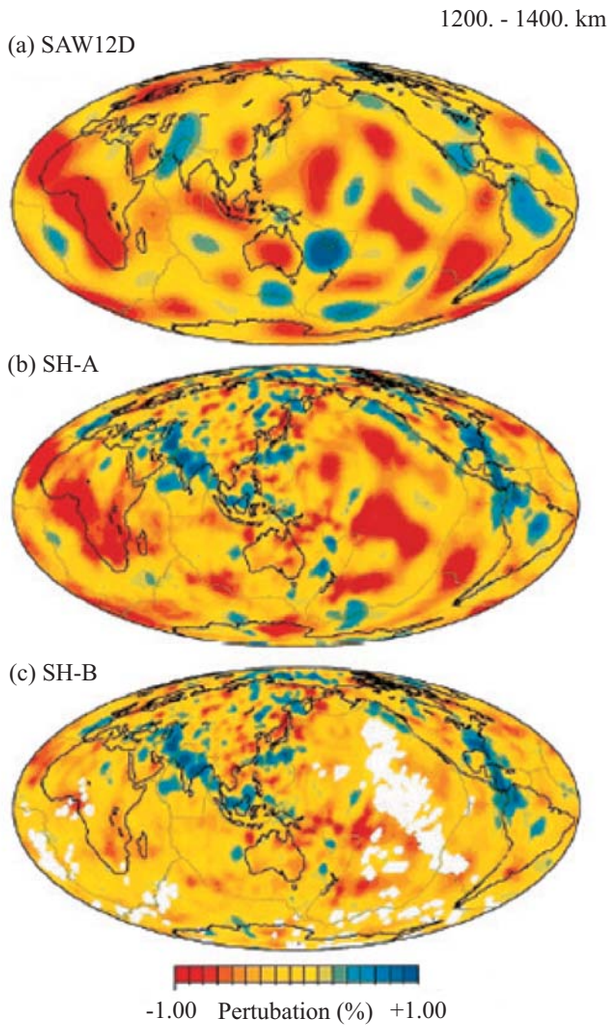
4.1 *Tomogram global gelombang P dan S*

Dalam sub-bab ini dipresentasikan tomogram seismik dari hasil inversi data global. Tomogram yang disajikan diambil dari model tomografi gelombang P maupun S. Selain kedua model ini, ditunjukkan juga citra tomografi hasil inversi simultan dari data gelombang P dan S guna mengekstrak struktur *bulk sound* (inkompresibilitas). Ekstraksi semacam ini sangat penting sebab komponen *bulk sound* dapat digunakan untuk identifikasi mineralogi. Penurunan inversi tomografi simultan tersebut diberikan secara rinci dalam Widiyantoro (1997).

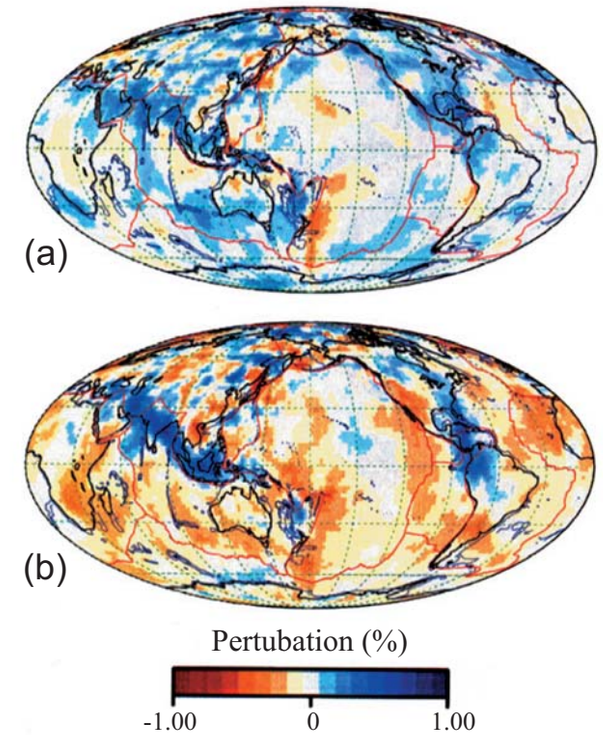
Dalam beberapa gambar berikut secara berurutan disajikan beberapa *cross section* (penampang) horisontal dan vertikal untuk seluruh mantel bumi. Gambar 15 menunjukkan suatu penampang horisontal pada interval kedalaman 1200 - 1400 km dari dua model tomografi global gelombang P yang dibuat dengan menggunakan data yang sama, tetapi dengan parameterisasi model yang berbeda. Kedua model ini menunjukkan dengan jelas adanya slab di bawah benua Eurasia bagian selatan dan di bawah Amerika. Masing-masing slab ini sering disebut sebagai slab *Tethys* dan slab *Farallon*. Kedua slab ini juga dapat dilihat dengan jelas pada model global berdasarkan data gelombang S (Gambar 16) dan model *bulk sound* hasil inversi simultan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 17(a). Sedangkan dari perbandingan kedua model yang ditunjukkan pada Gambar 17 (a dan b) terlihat jelas bahwa struktur gelombang S (*shear*) lebih dominan daripada struktur *bulk sound*, di mana hal ini sepertinya merupakan karakteristik dari mantel bumi bagian bawah.



Gambar 15. Tomogram global pada interval kedalaman 1200 - 1400 km yang diturunkan dengan menggunakan data gelombang P. (a) Model Widiyantoro (1997) hasil inversi dengan parameterisasi model tomografi global dengan ukuran blok yang seragam (Gambar 14a), dan (b) model Sambridge dan Faletic (2003) dengan parameterisasi model yang menggunakan ukuran blok yang beragam (Gambar 14b). Tomogram diplot berdasarkan deviasi kecepatan terhadap model bumi 1D, yaitu model *ak135*. Anomali positif (warna biru) yang memanjang (slab) diinterpretasikan sebagai sisa dari penunjaman samudera *Tethys* di bawah Eurasia bagian selatan dan lempeng *Farallon* di bawah benua Amerika.



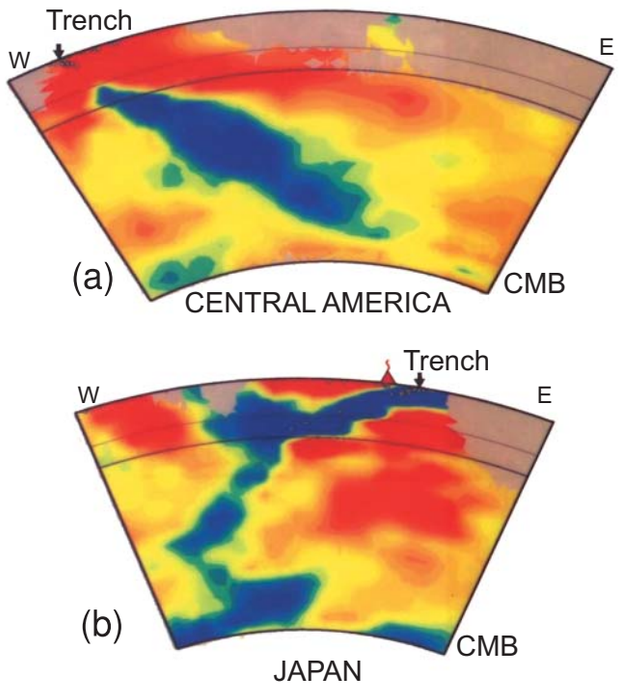
Gambar 16. Tomogram global gelombang S pada interval kedalaman 1200 - 1400 km. (a) Model Li dan Romanowicz (1996) hasil inversi data seismik dengan gelombang panjang (*long wavelength*) yang digunakan sebagai model kecepatan 3D awal oleh Widiyantoro *dkk*. (2000), (b) model gabungan antara hasil inversi data gelombang panjang dan gelombang pendek (*short wavelength*), dan (c) model hasil ekstraksi dari data *short wavelength*. Tomogram diplot berdasarkan deviasi kecepatan terhadap model bumi 1D (*ak135*).



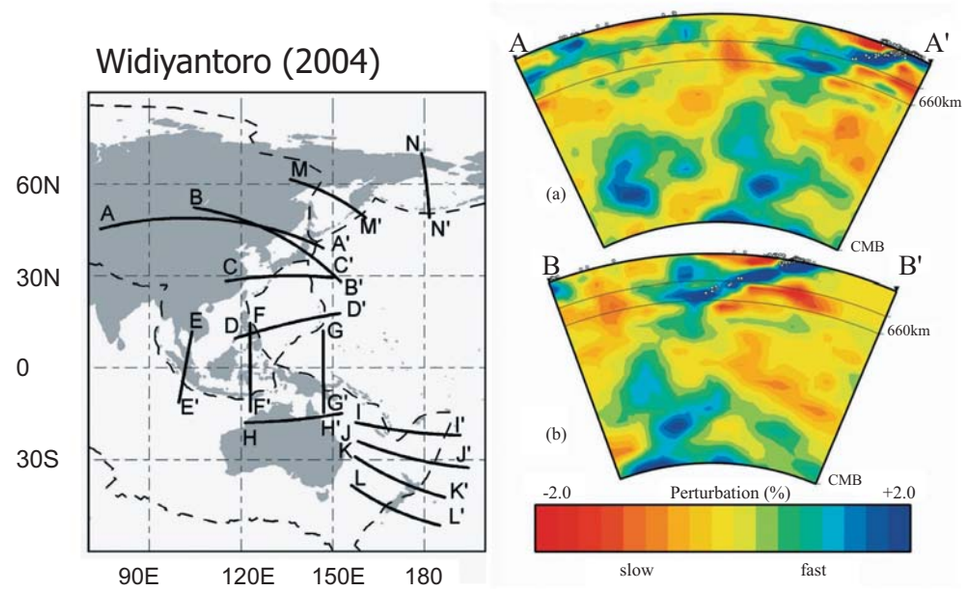
Gambar 17. Tomogram global pada interval kedalaman 1200 - 1400 km hasil inversi simultan dari data waktu tiba gelombang P dan S (Widiyantoro, 1997). (a) Model kecepatan *bulk sound*, dan (b) model kecepatan gelombang S. Tomogram diplot berdasarkan deviasi kecepatan terhadap model bumi 1D (*ak135*).

Untuk menunjukkan pola penunjaman slab secara lebih jelas maka dalam Gambar 18 ditunjukkan dua penampang vertikal di bawah Amerika Tengah dan Jepang. Pada model tomografi ini untuk pertama kali dapat ditunjukkan bahwa slab litosfer samudera yang tersubduksi mampu mencapai batas antara mantel dan inti bumi (Widiyantoro, 1997). Penunjaman slab litosfer samudera yang sangat dalam ini juga didukung oleh citra tomografi global berdasarkan data gelombang S

yang ditunjukkan dalam Gambar 19 (Widiyantoro, 2004). Sedangkan slab-slab yang menunjam di tempat lain kebanyakan terdefleksi pada kedalaman sekitar 660 km (Gambar 20).



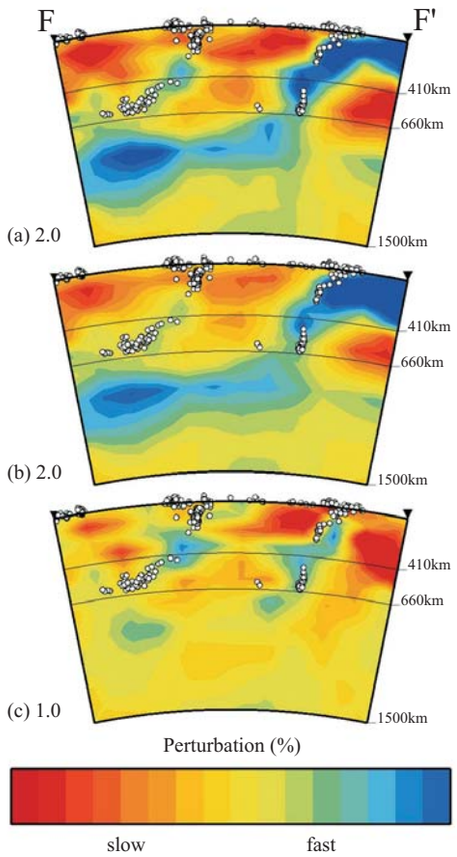
Gambar 18. Penampang vertikal melalui model tomografi global hasil inversi data gelombang P di bawah: (a) Amerika Tengah, dan (b) Jepang. Masing-masing tomogram diplot dari permukaan bumi sampai ke batas antara mantel dan inti bumi (*CMB = Core-Mantle Boundary*), yaitu pada kedalaman hampir 3000 km. Kuantitas yang diplot adalah deviasi kecepatan relatif terhadap model bumi 1D (*ak135*). Dua garis tipis menunjukkan diskontinuitas seismik masing-masing pada kedalaman 410 dan 660 km. Pada gambar ini bagian kerak dan mantel bumi yang tidak dilewati sinar gelombang gempa diblok dengan warna abu-abu.



Gambar 19. Penampang vertikal melalui model tomografi global gelombang S. (a) Penampang memotong Pulau Honshu bagian utara, dan (b) memotong Pulau Honshu bagian tengah di Jepang. Lokasi penampang A-A′ dan B-B′ ditunjukkan pada panel di sebelah kiri.

Implikasi dari pola penunjaman slab litosfer terutama terhadap pola konveksi mantel bumi dibahas pada sub-bab berikut. Beberapa ahli berargumentasi bahwa tektonik lempeng merupakan manifestasi dari konveksi mantel bumi. Berdasarkan model konveksi mantel dangkal, konveksi ini hanya melibatkan lempeng-lempeng litosfer dan mantel bumi sampai kedalaman sekitar 700 km. Sedangkan berdasarkan model konveksi seluruh mantel diperkirakan bahwa sistem konveksi ini melibatkan seluruh bagian mantel bumi. Kedua model ini berarti mengandung asumsi yang berbeda mengenai sifat/kelakuan mantel

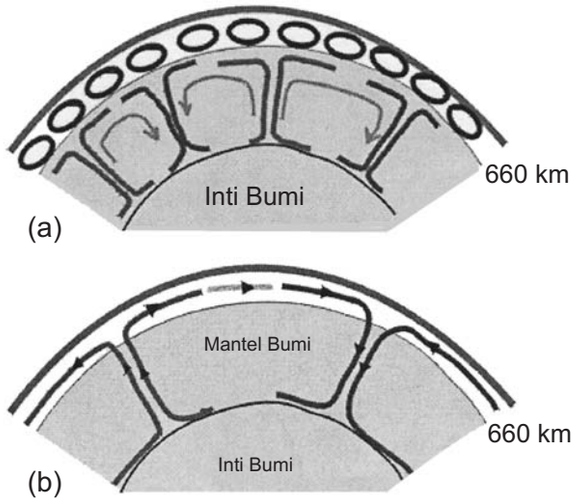
bumi. Konveksi dangkal mengasumsikan bahwa hanya mantel atas yaitu sampai kedalaman sekitar 700 km saja yang bersifat fluida. Sedangkan model konveksi seluruh mantel berasumsi bahwa seluruh lapisan mantel berkelakuan seperti fluida pada skala waktu geologi.



Gambar 20. Penampang vertikal berdasarkan model tomografi global gelombang S melalui Flores (posisi penampang F-F′ dapat dilihat pada Gambar 19). (a) Model hasil inversi non-linier, (b) model hasil inversi linier, dan (c) selisih dari kedua model tersebut yang menunjukkan kontribusi dari pendekatan non-linier, di mana citra lempeng yang menunjam menjadi lebih fokus.

4.2 *Implikasi tomogram global untuk pola konveksi mantel*

Pendapat tentang pola/model konveksi mantel bumi telah menjadi perdebatan yang telah lama berlangsung di kalangan beberapa kelompok ahli kebumian. Kelompok pertama berpendapat bahwa ada dua aliran mantel yang terpisah, yaitu di mantel bagian atas dan mantel bagian bawah (*two-layered mantle convection*). Sedangkan kelompok kedua (terutama para ahli seismologi dan pemodelan numerik untuk konveksi mantel) berpendapat bahwa yang terjadi didalam bumi adalah konveksi mantel dengan satu lapis saja (*whole mantle convection*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 21.



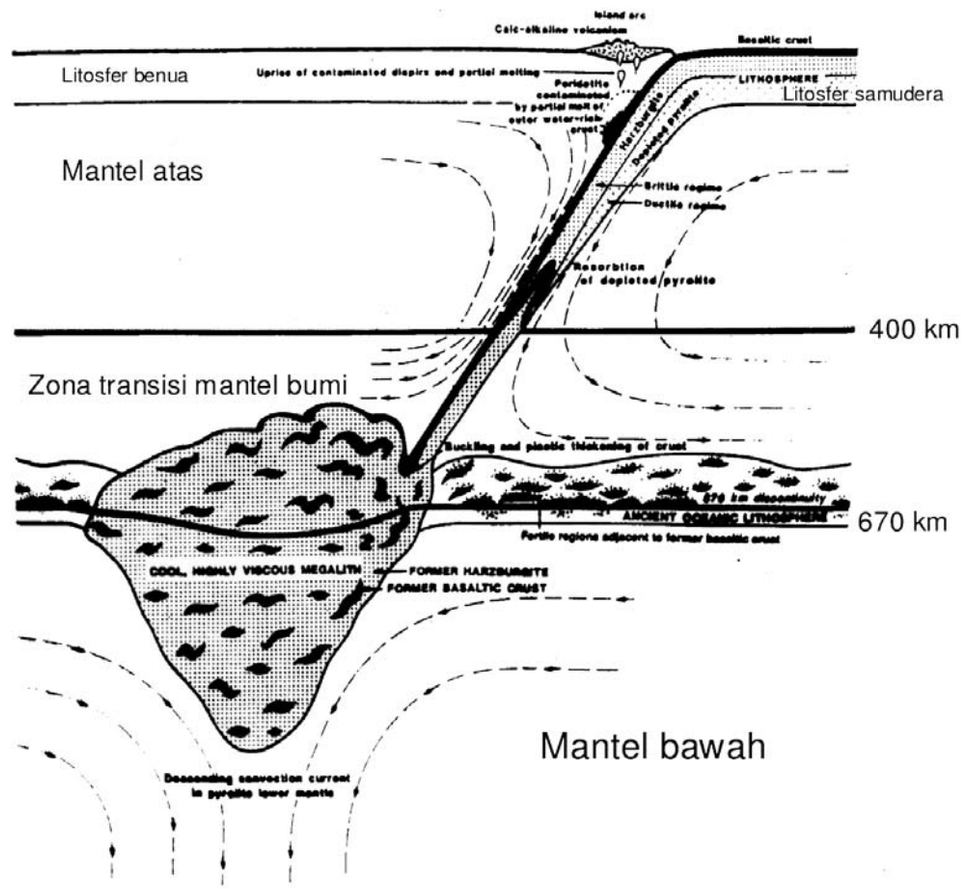
Gambar 21. Kartun untuk model konveksi mantel bumi. (a) Model dua lapis, dan (b) model satu lapis.

Implikasi dari *whole mantle convection* adalah bahwa batas antara mantel bumi bagian atas dan bawah, yang ditandai oleh adanya kontras

kecepatan gelombang seismik dan viskositas, tidak menyebabkan terpisahnya aliran mantel tersebut. Dengan kata lain aliran mantel dapat menembus batas antara mantel atas dan bawah. Ringwood dan Irifune (1988) telah mencoba untuk merekonsiliasi perdebatan di atas dengan mengusulkan model konveksi mantel *hybrid*. Dalam model ini ditunjukkan bahwa batas antara mantel atas dan mantel bawah tidak merupakan penghalang (*barrier*) bagi aliran mantel, tetapi hanya menahan (*resist*) aliran mantel yang melewati batas tersebut. Oleh sebab itu slab litosfer yang menunjam akan tertahan atau terdefleksi di zona transisi mantel (zona yang merupakan batas antara mantel atas dan bawah pada interval kedalaman antara 410 sampai dengan 660 km) yang lama kelamaan akan menembus mantel bumi bagian bawah (Gambar 22). Materi slab yang melewati zona transisi akan terseret oleh sirkulasi aliran mantel bagian dalam sehingga dapat mencapai *CMB*.

Tomogram seismik global yang disajikan dalam sub-bab sebelumnya memberikan gambaran yang sangat bermanfaat untuk memahami proses-proses yang terjadi di dalam bumi, khususnya tentang pola aliran mantel. Beberapa tomogram yang menunjukkan dengan jelas bahwa slab litosfer samudera terdefleksi di dalam zona transisi mantel mendukung kelompok pertama di atas, yaitu yang mengusulkan model konveksi mantel dua lapis. Sebaliknya tomogram yang menunjukkan bahwa penunjaman dapat mencapai mantel bumi bagian paling bawah mendukung model konveksi mantel satu lapis. Dengan demikian hasil tomografi global mendukung kedua model konveksi mantel yang berbeda di atas. Perdebatan tentang model konveksi ini masih terus berlangsung akan tetapi semakin konvergen menuju model konveksi

hybrid (Gambar 22). Model yang terakhir ini cocok dengan observasi di banyak tempat di bumi, misal di Jepang (Gambar 19) dan tempat-tempat lain.



Gambar 22. Kartun tentang model konveksi mantel *hybrid* (Ringwood dan Irifune, 1988). Disini digambarkan bahwa slab litosfer yang tersubduksi tertahan di kedalaman sekitar 670 km dan mengalami akumulasi (penumpukan) materi. Lama-kelamaan materi yang terakumulasi ini akan terseret ke dalam mantel bumi bagian bawah oleh sirkulasi yang terjadi di mantel bawah.

BAGIAN III : RENCANA PENELITIAN LANJUT

5 Prediktabilitas Gempa Bumi

Penelitian tentang prediksi gempa bumi selama ini masih sering terfokus pada studi statistik dengan menggunakan data historis gempa. Pendekatan semacam ini tentu tetap diperlukan, tetapi jelas tidak akan memadai untuk memprediksi gempa bumi yang merupakan fenomena yang sangat kompleks. Pendekatan lain seperti studi seismik, GPS dan SES (*seismo-electric signal*) akhir-akhir ini sudah mulai dikaji tetapi masih secara parsial. Meskipun tomografi seismik merupakan teknik yang handal untuk mencitrakan struktur 3D interior bumi dan sarat dengan implikasi tektonik, akan tetapi dengan tomografi saja tentu usaha prediksi gempa akan jauh dari maksimal.

Oleh sebab itu untuk penelitian lanjut penulis mengusulkan perlunya dilakukan pengembangan model prediktabilitas gempa bumi destruktif dengan mengintegrasikan beberapa metode dan data. Metode yang dapat digunakan meliputi : (i) seismik, khususnya pencitraan struktur 3D bawah permukaan dan simulasi propagasi gelombang gempa; (ii) *fuzzy logic*, untuk analisis deret waktu; (iii) GPS, khususnya tentang pemantauan dan analisis TEC di atmosfer secara kontinu; dan (iv) analisis SES. Dengan demikian berbagai jenis data akan diperlukan, yaitu: data gempa bumi (seismogram lengkap dengan parameter gempanya), data GPS, data SES, citra satelit, dan data aktivitas gunungapi yang kemungkinan juga dapat memberikan sinyal awal sebelum terjadinya gempa besar. Dengan integrasi metode dan kombinasi data ini diharapkan akan diperoleh model prediktabilitas

gempa bumi yang komprehensif sehingga dapat menjadi landasan untuk riset terapan, khususnya di bidang mitigasi bencana gempa bumi.

Permasalahan yang harus diantisipasi dalam usulan riset ini adalah bahwa usaha prediksi gempa pada tahap implementasi akan memerlukan data *real time* dan harus dilakukan secara kontinu. Hal ini tentu perlu melibatkan instansi terkait, seperti Badan Meteorologi dan Geofisika. Sedangkan kendala lain datang dari adanya limitasi data gempa historis. Terutama data sebelum tahun 1964, sebab waktu itu stasiun pengamat masih jarang dan kebanyakan masih menggunakan sistem analog. Akibatnya banyak data yang tidak disertai dengan lokasi hiposenter yang dapat dipercaya atau bahkan beberapa kejadian gempa tidak dilaporkan sama sekali. Hal ini dapat dicoba diatasi dengan algoritma *fuzzy logic* yang selain dapat untuk mengekstrapolasi data deret waktu juga dapat untuk menginterpolasi data.

6 Penutup dan Harapan

Penerapan teknik geo-tomografi untuk pencitraan struktur 3D interior bumi terbukti sangat bermanfaat untuk memahami proses tektonik yang terjadi di dalam bumi. Dari model tomografi regional yang telah dipresentasikan dapat ditarik beberapa kesimpulan berikut: (i) gempa besar Aceh 2004 dan selatan Jawa Barat 2006 yang masing-masing telah membangkitkan tsunami ternyata berhubungan dengan penyusupan lempeng samudera Hindia di bawah Sumatera dan Jawa Barat yang membentuk sudut landai di mantel bumi bagian paling atas. Subduksi landai ini diinterpretasikan telah menyebabkan gesekan yang

kuat antara lempeng samudera Hindia dengan lempeng kontinen Eurasia (Asia Tenggara), sehingga mampu menimbulkan gempa-gempa dangkal dengan kekuatan besar; (ii) gempa Yogya-Jateng 27 Mei 2006 yang terjadi di darat disebabkan oleh pergeseran lempeng kontinen akibat desakan lempeng samudera Hindia yang menunjam di bawah busur kepulauan Sunda; dan (iii) lumpur panas yang terdapat di bawah Sidoarjo terlihat jelas berhubungan dengan adanya materi panas mantel bumi yang naik dan terpusat/mengerucut di bawah wilayah Sidorajo dan sekitarnya.

Sedangkan dari hasil tomografi global untuk pertama kali telah dapat dibuktikan bahwa penunjaman lempeng samudera tua (>100 Ma) bisa mencapai batas antara mantel dan inti bumi pada kedalaman hampir 3000 km. Teknik pencitraan tomografi global secara non-linier juga telah untuk pertama kali diperkenalkan, khususnya untuk model kecepatan gelombang S dengan menggabungkan informasi dari data *short* dan *long wavelength* (Widiyantoro *dkk.,* 2000). Tomogram seismik regional dan global yang dihasilkan dapat digunakan untuk merelokasi hiposenter gempa dengan resolusi tinggi dan selanjutnya bermanfaat untuk mengidentifikasi wilayah potensi gempa dengan lebih komprehensif. Dengan demikian hal ini tentu sangat diperlukan untuk membantu usaha mengurangi resiko bencana gempa bumi di Indonesia pada khususnya dan di sepanjang zona subduksi di dunia pada umumnya.

Target selanjutnya untuk riset kegempaan adalah untuk menguji prediktabilitas kejadian gempa dalam kurun waktu pendek (*short term*). Sejauh ini prediksi jangka panjang (*long-term prediction*) yaitu untuk

orde 100 sampai dengan 200 tahunan sudah mulai memetik hasil yang cukup baik. Prediksi jangka pendek meskipun hasilnya masih belum seperti yang diharapkan sangat perlu untuk terus dikembangkan. Metode dan data yang terintegrasi dan pengamatan kontinu dalam hal ini sangat diperlukan. Harapan penulis ke depan penelitian semacam ini akan dapat didukung baik melalui pendanaan maupun kebijakan secara nasional dan bahkan internasional.♦

Ucapan Terima Kasih

Ada begitu banyak kolega yang kepadanya penulis bermaksud untuk menghaturkan apresiasi yang tinggi atas kontribusi mereka sehingga penulis dapat sampai pada tahap pencapaian sekarang ini. Semoga rangkaian kata-kata singkat berikut paling tidak dapat sedikit mengekspresikan ungkapan rasa terima kasih penulis yang mendalam.

Pertama-tama ucapan terima kasih saya tujukan kepada Prof. Susilo Prawirowardoyo (alm.) yang untuk pertama kali telah memperkenalkan seismologi kepada saya. Selanjutnya saya sampaikan terima kasih kepada beberapa kolega dari luar dan dalam ITB yang sering berkolaborasi dan berdiskusi dengan penulis, antara lain: Dr. Hery Harjono dan Dr. Djedi S. Widarto (Geotek, LIPI), Prof. Mezak A. Ratag dan Dr. Wandono (BMG), Dr. Surono dan Ir. Gede Suantika, M.Si. (PVMBG), para kolega di P2MS-ITB, dan seluruh anggota KK Ilmu dan Teknik Geofisika serta rekan lain di eks-Departemen Geofisika dan Meteorologi, ITB.

Secara khusus penulis berterima kasih kepada Prof. Wiranto Arismunandar, Prof. M.I. Tachyudin Taib (alm.), Prof. Bayong Tjasyono H.K., Prof. Benjamin Soenarko, Prof. Yahdi Zaim, dan Prof. Edy Soewono; juga Prof. Rob van der Hilst (MIT), Prof. Brian Kennett (ANU), dan Prof. Yoshio Fukao (Tokyo University/JAMSTEC) yang telah memberikan rekomendasi tertulis yang sangat membesarkan hati dan membanggakan bagi penulis saat diusulkan ke jabatan Guru Besar. Ucapan terima kasih juga tertuju kepada Prof. M.T. Zen dan Prof. Bambang Hidayat atas dukungan beliau-beliau ini untuk penulis terus

menekuni dan mengembangkan riset di bidang *science*. Tidak lupa penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para pejabat eksekutif dan normatif, rekan dosen, karyawan dan mahasiswa di ITB periode 1981-2008 yang tak tersebutkan namanya satu per satu.

Kepada rekan-rekan di *MU Club* di bawah asuhan Bapak Prof. Wiranto Arismunandar saya ucapkan terima kasih atas semangat yang diberikan untuk terus berusaha menjadi "Manusia Utama". *MU Award* 2007 yang saya terima sungguh terasa sangat istimewa dan membesarkan hati.

Akhirnya, penulis dengan penuh rasa syukur menyampaikan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada keluarga. *Matur sembah nuwun katur Bapak, Ibu; hartelijk dank aan Papa, Mama;* atas segala doa restu, kasih sayang, bimbingan, dan dukungannya. Beribu terima kasih tertuju kepada istri tercinta, Lika, dan anak-anak tersayang, Adri dan Rena, atas cinta kasih, dorongan semangat, pengertian, kesabaran, dan kebersamaannya yang penuh kehangatan dan memberikan inspirasi. Kalian sungguh merupakan karunia Allah yang luar biasa, yang selalu mendatangkan suka cita dan berkat di dalam hidup saya.♦

Daftar Pustaka

Aki K. and Lee, W.H.K., 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: A homogeneous initial model, *J. geophys. Res.*, **81**, 4381-4399.

Bijwaard, H. and Spakman, W., 2000. Non-linear global P-wave tomography by iterated linearized inversion, *Geophys. J. Int.*, **141**, 71-82.

Engdahl, E.R., van der Hilst, R.D. and Buland, R., 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. seism. Soc. Am.*, **88**, 722-743.

Engdahl, E.R., Villasenor, A., DeShon, H.R., and Thurber, C.H., 2007. Teleseismic relocation and assessment of seismicity (1918-2005) in the region of the 2004 Mw 9.0 Sumatra-Andaman and 2005 Mw 8.6 Nias Island great earthquakes, , *Bull. seism. Soc. Am.*, **97**, 43-61.

Fukao, Y., Obayashi, M., Inoue, H. and Nenbai, M., 1992. Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone, *J. geophys. Res.*, **97**, 4809-4822.

Geller R.J., Jackson, D.D., Kagan, Y.Y. and Mulargia, F., 1997. Earthquakes cannot be predicted, *Science*, **275**, 1616-1617.

Hamilton, W., 1979. Tectonics of the Indonesian region, *U.S. Geol. Survey Prof. Paper,* **1078,** 345 pp.

Jamshidi, M., Vadie, N. and Ross, T.J., 1993. Fuzzy logic and control, *Prentice Hall*, USA.

Jhuang, H.K., Liu, J.Y., Chen, Y.I. and Lin, Y.H., 2005. Ionospheric foF2 and TEC anomalies during M $\geq$ 5.0 Taiwan earthquakes, *IWSE*, National Central University, Taiwan.

Kagan, Y.Y., 1997. Are earthquakes predictable?, *Geophys. J. Int.*, **131**, 505-525.

Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R. and Buland, R., 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times, *Geophys. J. Int.*, **122**, 108-124.

Koketsu, K. and Sekine, S., 1998. Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical Earth with discontinuities, *Geophys. J. Int.*, **132**, 339-346.

Li, X.-D. and Romanowicz, B., 1996. Global mantle shear velocity developed using non-linear asymptotic coupling theory, *J. geophys. Res.*, **101,** 22 245–22 272.

Paige, C.C. and Saunders, M.A., 1982. LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares, *ACM Trans. Math. Soft.*, **8**, 43-71 and 195-209.

Puspito, N.T., Yamanaka, Y., Miyatake, T., Shimazaki, K. and Hirahara, K., 1993. Three-dimensional P-wave velocity structure beneath the Indonesian region, *Tectonophysics*, **220**, 175-192.

Ringwood, A.E. and Irifune, T., 1988. Nature of the 650-km seismic discontinuity: implication for mantle dynamics and differentiation, *Nature*, **331**, 131-136.

Sabbeq, S. dan Widiyantoro, S., 2004. Interpretasi tomografi seismik untuk rekonstruksi posisi Sumatera dan Jawa, *Proceedings Himpunan Ahli Geofisika Indonesia*, Pertemuan Ilmiah Tahunan ke-**29**, Yogyakarta.

Sambridge, M. and Feletic, R., 2003. Adaptive whole Earth tomography, *Geochemistry Geophysics Geosystems (G^3)*, **4**, 1-20.

Varotsos, P. and Alexopoulos, K., 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the Earth preceding earthquake, *Tectonophysics*, **110**, 73-98.

Widiwijayanti, C. *dkk*., 1996. Aftershock sequence of the 1994, Mw 6.8, Liwa earthquake (Indonesia) - seismic rupture process in a volcanic arc, *Geophys. Res. Lett*., **23,** 3051-3054.

Widiyantoro, S., 1997. Studies of seismic tomography on regional and global scale, *Ph.D. Thesis*, Australian National University, 256 pp.

Widiyantoro, S., 2004. Subduction zone shear structure in the western Pacific from global non-linear traveltime tomography, *Hans Ertel: Meteorological and Geophysical Fluid Dynamics* (Ed. W. Schroeder) , 321-334.

Widiyantoro, S., 2006. Seismic tomographic imaging: an example of the application of mathematics in Earth sciences and technology, *Prosiding Konferensi Nasional Matematika XIII dan Konggres Himpunan Matematika Indonesia*, 615-623, Semarang.

Widiyantoro, S. and Fauzi, 2005. Note on seismicity of the Bali convergent region in the Eastern Sunda Arc, Indonesia, *Australian Journal of Earth Sciences*, **52**, 379-383.

Widiyantoro, S., Gorbatov, A., Kennett, B.L.N. and Fukao, Y., 2000. Improving global shear-wave travel-time tomography using three-dimensional ray tracing and iterative inversion, *Geophys. J. Int*., **141**, 747-758.

Widiyantoro, S. and van der Hilst, R.D., 1996. Structure and evolution of lithospheric slab beneath the Sunda arc, Indonesia, *Science*, **271**, 1566-1570.

Widiyantoro, S. and van der Hilst, R.D., 1997. Mantle structure beneath Indonesia inferred from high-resolution tomographic imaging, *Geophys. J. Int*., **130**, 167-182.

Yan, J., Ryan, M. and Power, J., 1994. Using Fuzzy logic towards intelligent systems, *Prentice Hall*, London.

Rekaman Karya Ilmiah (Publikasi dan Citation Index)

Papers in Refereed International Journals (selected)

WIDIYANTORO, S., van der Hilst, R.D., Structure and evolution of lithospheric slab beneath the Sunda arc, Indonesia. **Science**, 271, 1566-1570, 1996.

WIDIYANTORO, S., van der Hilst, R.D., Mantle structure beneath Indonesia inferred from high-resolution tomographic imaging. **Geophys. J. Int**., 130, 167-182, 1997.

Grand, S.P., van der Hilst, R.D., WIDIYANTORO, S., Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. **Geol. Soc. Am. Today**, 7, No. 4, 1-7, 1997.

Van der Hilst, R.D., WIDIYANTORO, S., Engdahl, E.R., Evidence for deep mantle circulation from global tomography. **Nature**, 386, 578-584, 1997.

WIDIYANTORO, S., Kennett, B.L.N., van der Hilst, R.D., Extending shear-wave tomography for the lower mantle using S and SKS arrival-time data. **Earth Planets Space**, 50, 999-1012, 1998.

Van der Hilst, R.D., WIDIYANTORO, S., Creager, K.C. & McSweeney, T.J., Deep subduction and aspherical variations in *P*-wavespeed at the base of Earth's mantle. **Geodynamics – AGU Monograph**, 28, 5-20, 1998.

Kennett, B.L.N., WIDIYANTORO, S., van der Hilst, R.D., Joint seismic tomography for bulk-sound and shear wavespeed in the Earth's mantle. **J. Geophys. Res**., 103, 12 469-12 493, 1998.

WIDIYANTORO, S., Kennett, B.L.N., van der Hilst, R.D., Seismic tomography with P and S data reveals lateral variations in the rigidity of deep slabs. **Earth Planet. Sci. Lett**., 173, 91-100, 1999.

Kennett, B.L.N., WIDIYANTORO, S., A low wavespeed anomaly beneath northwestern India - a seismic signature of the Deccan plume? **Earth Planet. Sci. Lett**., 103, 12 469-12 493, 1999.

WIDIYANTORO, S., Gorbatov, A., Kennett, B.L.N., Fukao, Y., Improving global shear-wave delay-time tomography using three-dimensional ray tracing and iterative inversion. **Geophys. J. Int.,** 141, 747-758, 2000.

Gorbatov, A., WIDIYANTORO, S., Fukao, Y., Gordeev, E., Signature of remnant slabs in the North Pacific from P-wave tomography. **Geophys. J. Int**., 142, 27-36, 2000.

Fukao, Y., WIDIYANTORO, S., Obayashi, M., Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region. **Rev. Geophys**., 39, 291-323, 2001.

Gorbatov, A., Fukao, Y., WIDIYANTORO, S., Gordeev, E., Seismic evidence for a mantle plume oceanward of the Kamchatka-Aleutian trench junction. **Geophys. J. Int**., 146, 282-288, 2001.

Gorbatov, A., Fukao, Y., WIDIYANTORO, S., Application of a three-dimensional ray-tracing technique to global P, PP and Pdiff traveltime tomography, **Geophys. J. Int**., 146, 583-593, 2001.

Tandon, K., Lorenzo, J.M., WIDIYANTORO, S., O'Brien, G.W., Variations in inelastic failure of subducting continental lithosphere and tectonic development: Australia - Banda arc convergence. **Plate Boundary Zones – AGU Monograph**, Geodynamics Series 30, 341-357, 2002.

WIDIYANTORO, S., van der Hilst, R.D., Wenzel, F., Deformation of the Aegean slab in the mantle transition zone. **International Journal of Tomography and Statistics**, 1-14, 2004.

Weidle, C., WIDIYANTORO, S., CALIXTO Working Group, Improving depth resolution of teleseismic tomography by simultaneous inversion of teleseismic and global P-wave travel time data – Application to the Vrancea region in southeastern Europe. **Geophys. J. Int**., 162 (3), 811-823, 2005.

WIDIYANTORO, S., Fauzi, Note on seismicity of the Bali convergent region in the Eastern Sunda Arc, Indonesia. **Australian Journal of Earth Sciences**, 52, 379-383, 2005.

Mori, J., Mooney, W.D., Afnimar, Kurniawan, S., Anaya, A.I., WIDIYANTORO, S., The July 17, 2006 Tsunami Earthquake in West Java, Indonesia **Seismological Research Letters**., 78, 201-207, 2007.

Publikasi di Jurnal Nasional Ber-referee/Terakreditasi (terpilih)

WIDIYANTORO, S. & Puspito, N.T., 1998. Struktur 3-D kecepatan gelombang *S* di bawah busur Sunda, *Jurnal Matematika dan Sains*, **3**, No. 2, 97-104.

WIDIYANTORO, S., 1999. New seismic constraints on the three-dimensional lithospheric slab structure beneath Himalaya front, *Jurnal Teknologi Mineral*, **Vol. VI/1**, 28-36.

WIDIYANTORO, S., 1999. A new three-dimensional global shear model derived from short and long wavelength information, *Jurnal Teknologi Mineral*, **Vol. VI/3**, 171-182.

Priyono, A. & WIDIYANTORO, S., 1999. A possible application of seismic tomography to mining purposes, *Indonesian Mining Journal*, **5**, 1-8.

WIDIYANTORO, S., 2002. Migrasi palung Sunda: Implikasi dari citra tomografi seismik, *Jurnal Teknologi Mineral*, **Edisi Khusus**, 45-50.

Naskawan, A., WIDIYANTORO, S. & Winardhi, S., 2002. Tomografi seismik refraksi menggunakan metode shortest path ray-tracing, *Jurnal Teknologi Mineral*, **Vol. IX/1**, 16-26.

Suantika, G. & WIDIYANTORO, S., 2003. Pencitraan tomografi seismik tiga-dimensi gunung Guntur, *Jurnal Teknologi Mineral*, **Vol. X/1**, 30-37.

WIDIYANTORO, S., 2003. Ekspresi seismik batas antara mantel atas di bawah bagian benua tua dan benua muda di Australia, *Jurnal Teknologi Mineral*, **Vol. X/3**, 192-202.

WIDIYANTORO, S., 2003. Complex morphology of subducted lithosphere in the mantle below the Molucca collision zone from non-linear seismic tomography, *Proceedings ITB on Engineering Science*, **Vol. 35 No. 1**, 1-10.

Wandono, WIDIYANTORO, S., Ibrahim, G. & Soewono, E., 2004. Analisis hubungan frekuensi-magnitudo gempa bumi di Bali dan sekitarnya, *Jurnal Matematika dan Sains*, **Vol. 9 No. 3**, 273-277.

Handayani, L. & WIDIYANTORO, 2005. Tracking Back Past Subduction Zones in the Western Pacific Region through Subducted Slab Analysis, *Jurnal Geofisika*, **No. 2**, 17-24.

Wandono, WIDIYANTORO, S., Ibrahim, G. & Triyoso, W., 2006. Citra *Upwelling* di bawah Sumatera Utara Berdasarkan Model Tomografi Gelombang P dan S, *Jurnal Geofisika*, **No. 1**, 6-10.

Nugraha, A.D., Suantika, G. & WIDIYANTORO, S., 2006. Relokasi Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Guntur Menggunakan Model Kecepatan Tiga Dimensi, *Jurnal Geofisika*, **No.2**, 20-26.

Wandono, WIDIYANTORO, S., Ibrahim, G. & Triyoso, W., 2008. Struktur 3D Kecepatan Gelombang P Kerak Bumi dan Mantel Atas di Bawah Toba dan Sekitarnya, *Jurnal Teknologi Mineral*, in press.

Buku/Monograf

WIDIYANTORO, S., 1998. Model tiga dimensi interior bumi hasil inversi global, **Penerapan metode geofisika di Indonesia 1977-1997**, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, Edisi Pertama, 44-51.

WIDIYANTORO, S., 2004. Subduction zone shear structure in the western Pacific from global non-linear traveltime tomography. **Hans Ertel: Meteorological and Geophysical Fluid Dynamics**, 321-334 (ISSN:1615-2824, Editor: Wilfried Schroeder).

WIDIYANTORO, S., 2007. Seismisitas dan Struktur Zona Subduksi Sumatera Utara (dalam Buku **Tsunami Aceh,** Editor: T.A. Sanny).

WIDIYANTORO, S., 2008. Fisika dan Struktur Interior Bumi (Badan Meteorologi dan Geofisika, Jakarta).

Citation Index

Telah mencapai **964** (ISI Web of Knowledge, per 24 Januari 2008)

Curriculum Vitae

Nama : Sri Widiyantoro
Tempat dan Tanggal Lahir : Karanganyar, Solo
5 Desember 1962
Nama Istri dan Anak : Dra. Lika Nindhyani
Adrian I. Widiyantoro
Renata K. Widiyantoro
Alamat Kantor : KK Ilmu dan Teknik Geofisika,
FTTM, ITB, Jl. Ganesa 10, Bandung
Tel (022) 2500494; Fax (022) 2534139;
E-mail: sriwid@geoph.itb.ac.id

Riwayat Pendidikan

1998 – 1999 : Postdoc, ERI, Tokyo University, Tokyo
1994 – 1997 : Ph.D., RSES, Australian National University, Canberra
1990 – 1992 : M.Sc., Geophysical Institute, Kyoto University, Kyoto
1981 – 1986 : Sarjana, Jurusan Geofisika dan Meteorologi, ITB

Riwayat Pekerjaan/Jabatan Fungsional

2007 – : Guru Besar, FTTM, ITB
2002 – 2007 : Lektor Kepala, FIKTM, ITB
2001 – 2002 : Lektor (*inpassing*), FIKTM, ITB
1998 – 2000 : Lektor Muda, FIKTM, ITB
1993 – 1998 : Asisten Ahli, FMIPA, ITB
1987 – 1993 : Asisten Ahli Madya, FMIPA, ITB

Riwayat Jabatan Struktural

2007 – : Ketua, KK Ilmu dan Teknik Geofisika, FTTM, ITB
2007 – : Kepala, Pusat Pemodelan Matematika dan Simulasi, ITB

2006 – 2007 : Sekretaris, Prodi S2 dan S3 Sains Kebumian, FITB, ITB
2004 – 2005 : Wakil Dekan (Sumber Daya), FIKTM, ITB
2004 : Ketua, Dep. Geofisika dan Meteorologi, FIKTM, ITB
2004 : Ketua, Prodi Geofisika, FIKTM, ITB
2001 – 2004 : Sekretaris, Dep. Geofisika dan Meteorologi, FIKTM, ITB
1999 – 2001 : Sekretaris, Prodi Geofisika, FIKTM, ITB

Riwayat Penelitian (Dana Riset)

2008 : International Research Grant, ITB, PI
2007 – 2008 : Riset Insentif, MENRISTEK, PI
2007 : International Research Grant, ITB, PI
2007 – 2008 : National Science Foundation, USA, researcher
2006 – 2008 : Riset BMG, PI
2006 : Riset KK, Institut Teknologi Bandung, PI
2005 : Riset Fakultas, Institut Teknologi Bandung, PI
2005 – 2007 : Hibah Pekerti, MENDIKNAS, Host-PI
2005 – 2007 : Riset Unggulan Terpadu XII, MENRISTEK, Co-PI
2004 – 2006 : Asahi Glass Foundation, PI
2003 – 2005 : Riset Unggulan Terpadu XI, MENRISTEK, Co-PI
2002 – 2004 : Riset Unggulan Terpadu X, MENRISTEK, Co-PI
2000 – 2002 : Riset Unggulan Terpadu VIIIa, MENRISTEK, PI
2000 – 2002 : Riset Unggulan Terpadu VIIIb, MENRISTEK, Co-PI
1999 – 2000 : Indonesia Toray Science Foundation, PI

Riwayat Kerjasama/Kunjungan Riset

2007 : US NSF, University of Wisconsin, Madison (2 minggu)
2006 : KAGI, Kyoto University (2 minggu)
2006 : DAAD, Karlsruhe University (1 bulan)
2005 : KNAW, Utrecht University and TU Delft (2 minggu)
2004 : KAGI, Kyoto University (2 minggu)
2002 : Geophysical Institute, Karlsruhe University (1 bulan)
2001 : MIT (David & Lucile Packard Foundation), MIT (1 bulan)
2001 : Meteorological Research Institute, Tsukuba (1 bulan)
2000 : DAAD, Karlsruhe University (2 bulan)
2000 : Monbusho, Hiroshima Institute of Technology (1 bulan)
1998 : RSES, Australian National University (1 bulan)
1996 : US NSF, MIT (3 bulan)

Riwayat dalam Organisasi Profesi

2007 – : IUGG Representative for ICSU (International Council for Scientific Unions) Asia – Pacific
2003 – : National Correspondent, IASPEI (International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior)
2001 – : Chair, IASPEI/IAVCEI Working Group on Subduction Zones
1992 – : Anggota, HAGI (Himpunan Ahli Geofisika Indonesia)

Riwayat Aktivitas dalam Editorial

2007 – : Editorial Board, Jurnal Meteorologi dan Geofisika, BMG
2005 – : Editorial Board, Jurnal Geofisika, HAGI
2004 – : Editor, International Journal of Tomography and Statistics
2003 – : Editorial Board, Engineering Science - Proceedings ITB
2000 – 2005 : Editorial Board, JTM, ITB
1996 – : Referee untuk Geophysical Journal International, Science, Earth Planetary Science Letters, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Tectonophysics, dan disertasi (dalam dan luar negeri) serta jurnal-jurnal nasional terakreditasi

Penghargaan

2007 : Habibie Award (The Habibie Center)
2007 : HAGI Award (Himpunan Ahli Geofisika Indonesia)
2006 : Dosen Berprestasi Nasional (MENDIKNAS)
2006 : Penghargaan atas prestasi yang dicapai dalam Tridharma Perguruan Tinggi dalam rangka Presentasi dan Pemilihan Dosen Berprestasi Nasional, Terbaik II Nasional (DIRJEN DIKTI)
2005 : Peneliti Utama Terbaik (RUT VIII, MENRISTEK)
2002 : Piagam Satyalancana Karya Sastya 10 Tahun (Presiden RI)
1998 : Best Paper Award (Himpunan Ahli Geofisika Indonesia)
1997 : Penghargaan Publikasi Internasional (MENDIKBUD)
1996 : The Doornbos Memorial Prize (International Union of Geodesy and Geophysics/IUGG)