

Pidato Inagurasi

Prof. Dr. Sri Widiyantoro

sebagai

Anggota Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia

Tomografi Gempa Bumi dan Mitigasi Bencana

5 November 2012

Jakarta

TOMOGRAFI GEMPA BUMI DAN MITIGASI BENCANA

Pidato Inagurasi sebagai Anggota Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jakarta, 5 November 2012

Oleh:

Prof. Dr. Sri Widiyantoro

Abstract

Tomographic imaging represents the reconstruction of an object from observations of physical quantities which represent the effect of the passage of some form of radiation through the object, where each quantity represents the integrated effect of interaction along a slice through the object. A major development has been in the field of medical research, where this approach forms the basis for Computer Tomographic (CT) scanning which has been successfully applied to retrieve high resolution tomograms (slice pictures) of a human body. Medical tomographic imaging includes a three-dimensional structure of the body of a patient, which is usually imaged in terms of spatial absorption anomalies through the intensity of X-ray energy.

The word tomography has been adopted in seismology as a synonym for methods of extracting two- or three-dimensional images of structure. Seismic (earthquake) tomography has developed to be a sophisticated method to study the Earth's interior structure. From studies, on a global scale, we obtained strong evidence for deep mantle circulation that has helped put to rest a long standing debate regarding the scale of mantle convection. Our paper, on the deep mantle structure, is one of the most highly cited papers of the last two decades, regarding the Earth sciences. Other milestones include publications on the structure and dynamics of slabs of subducted lithosphere beneath the Indonesian region (in *Science Magazine*) and the rest of subduction zones worldwide.

Recently, we have used our high resolution tomographic model to assess the subduction zone structure beneath Indonesia in detail. The results of this assessment demonstrate that tomographic imaging represents an important technique in delineating the three-dimensional structure of a subduction zone; which, in turn can help explain the earthquake and tsunami phenomena. The Earth's mantle structure, as revealed in the tomographic model, can provide new ways to better understand the Earth's processes. Such a comprehensive understanding is of particular importance in analyzing the predictability of future earthquakes.

PENDAHULUAN

Tsunami yang dibangkitkan oleh gempa bumi raksasa dengan magnitudo 9,2 yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2004 di samudera Hindia, di dekat Aceh, telah mengakibatkan lebih dari 200.000 orang meninggal. Sementara tragedi kemanusiaan yang luar biasa tersebut masih berlangsung, gempa besar dengan magnitudo 8,7 berikutnya terjadi di dekat Nias pada tanggal 28 Maret 2005. Bencana gempa bumi dan tsunami di atas telah disusul juga oleh bencana gunungapi yang kemungkinan dipicu oleh aktivitas tektonik tersebut.

Di sisi lain gempa bumi yang menimbulkan penjalaran gelombang seismik ternyata memberikan informasi penting mengenai struktur bagian dalam (interior) dari planet bumi kita. Informasi ini terkandung dalam seismogram, yaitu hasil rekaman gerakan tanah akibat suatu gempa. Dalam makalah ini hasil studi tomografi seismik (gempa bumi) yang telah penulis tekuni dipaparkan secara singkat. Dalam bagian berikut akan ditunjukkan bahwa investigasi tomografi, yaitu teknik pencitraan yang telah terlebih dahulu berhasil digunakan dalam bidang kedokteran, juga telah berhasil diterapkan untuk studi kebumian dengan sangat baik.

Makalah ini secara garis besar meliputi: (i) pencitraan tomografi seismik, (ii) kontribusi penulis terkait dengan pengembangan teknik tomografi, dan (iii) riset terkait

dengan mitigasi bencana. Di bagian akhir dari makalah ini akan dipaparkan secara singkat arah riset ke depan yang diperlukan dalam membantu meningkatkan keberhasilan upaya mitigasi bencana secara berkesinambungan seiring dengan sering terjadinya gempa besar dan merusak di tanah air.

TOMOGRAFI GEMPA BUMI

Dalam studi tentang interior bumi sampai sekarang belum dapat dilakukan pengukuran secara langsung ("in situ") dikarenakan kedalaman pusat bumi yang sangat dalam, yaitu 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), seperti seismologi.

Ilmuwan Kroasia (Andrija Mohorovicic, 1857-1936) sekitar seabad yang lalu telah 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 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 dengan pencitraan tomografi seismik.

Milestones

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.

Tahapan Pencitraan Tomografi dan Data

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

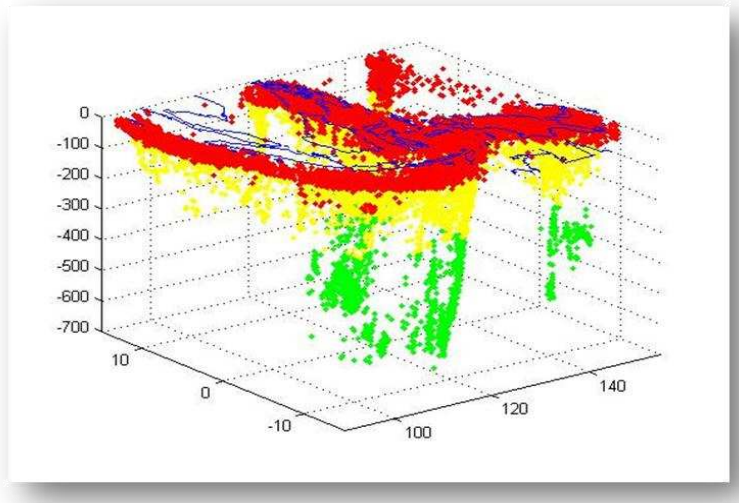
Pencitraan tomografi secara umum dapat didefinisikan sebagai suatu rekonstruksi dari sebuah benda dari observasi besaran fisis yang merepresentasikan efek dari penjalaran suatu bentuk radiasi melalui benda yang diamati tersebut. Teknik pencitraan tomografi telah berhasil digunakan dalam bidang kedokteran, 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.

Penulis telah mengembangkan metode pencitraan tomografi dengan pendekatan non-linier dengan menggunakan data waktu tiba gelombang seismik. Metode ini meliputi beberapa tahapan utama: (i) penyiapan data seismogram, (ii) parameterisasi model 3D, (iii) penjejukan sinar (*ray tracing*) seismik 3D, (iv) inversi yang meliputi

proses *update* model 3D (v) tes resolusi model 3D, dan (vi) interpretasi tomogram. 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 dapat mencapai orde 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 dapat 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 teknik *LSQR* (Paige dan Saunders, 1982). Tahap akhir sebelum dilakukan interpretasi terhadap tomogram yang dihasilkan adalah tes resolusi. Tes ini sangat penting, sebab tidak seluruh bagian dari model 3D yang dihasilkan mempunyai resolusi tinggi yang dikarenakan 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, 2011a dan 2011b untuk pendekatan non-linier).

Data yang digunakan dalam pencitraan tomografi gempa bumi 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).



Gambar 1. Plot hiposenter gempa di bawah Busur Kepulauan Indonesia secara 3D untuk kurun waktu 1964-2005. Data hiposenter diambil dari katalog gempa global hasil kompilasi Engdahl *dkk.* (1998 dan 2007). Simbol: segi empat merah merepresentasikan pusat gempa dangkal ($h \leq 70$ km); kuning, gempa menengah ($70 \text{ km} < h \leq 300$ km); dan hijau, gempa dalam ($h > 300$ km), h = kedalaman sumber gempa (hiposenter).

Data gempa yang digunakan dalam studi ini 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 dengan resolusi tinggi.

KONTRIBUSI PENULIS DALAM PENGEMBANGAN TOMOGRAFI GEMPA BUMI

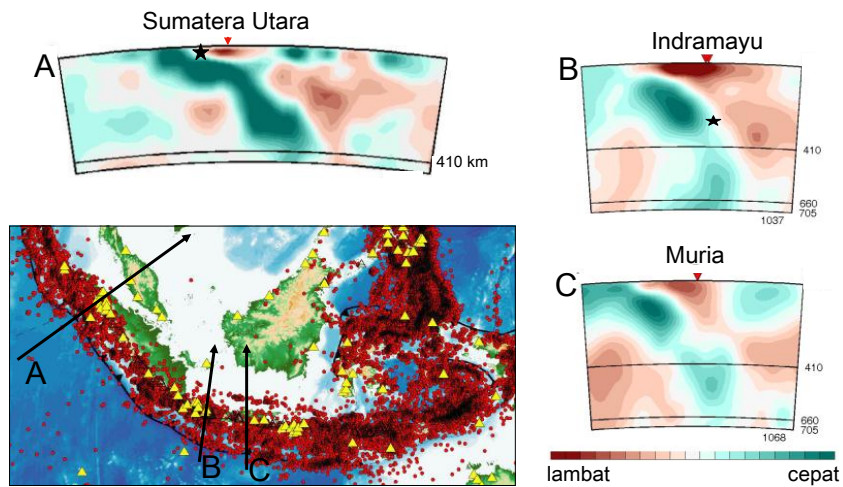
Riset penulis sejak pertengahan 1990an telah menghasilkan model tomografi regional maupun global dengan resolusi tinggi. Sebagai contoh, model global yang telah penulis buat untuk pertama kali dapat membuktikan bahwa penunjaman lempeng samudera berumur tua (>100 Ma) bisa mencapai batas antara mantel 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*). Berikut dipresentasikan beberapa model tomografi regional dan global yang telah penulis hasilkan.

Model Tomografi Regional

Dalam bagian ini tomogram seismik regional hasil inversi non-linier, khususnya untuk Busur Sunda dipresentasikan secara rinci. Tomogram ini dibuat dengan menggunakan

parameterisasi model 3D regional dan global, 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.

Dalam Gambar 2 berikut disajikan beberapa tomogram yang diambil dari potongan-potongan vertikal melalui model tomografi hasil inversi data gelombang P. Kuantitas yang diplot pada tomogram seismik adalah deviasi kecepatan rambat gelombang relatif terhadap model kecepatan bumi 1D (model *ak135* oleh Kennett *dkk.*, 1995). Seperti ditunjukkan dalam Gambar 2, profil tomogram seismik mengindikasikan bahwa subduksi litosfer samudera Hindia di bawah Sumatera Utara sangat landai, terutama di mantel bumi bagian paling atas (penampang A). Hal ini kemungkinan telah disebabkan oleh adanya subduksi miring (*oblique*) 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 (lihat Widiyantoro dan van der Hilst, 1996). Sudut penunjaman landai seperti ini dapat menimbulkan *seismic coupling* atau gesekan yang pada bidang batas dua lempeng yang bersinggungan. Gesekan kuat antar lempeng ini menjelaskan mengapa rentetan gempa besar terjadi di sepanjang lepas pantai barat Sumatera.

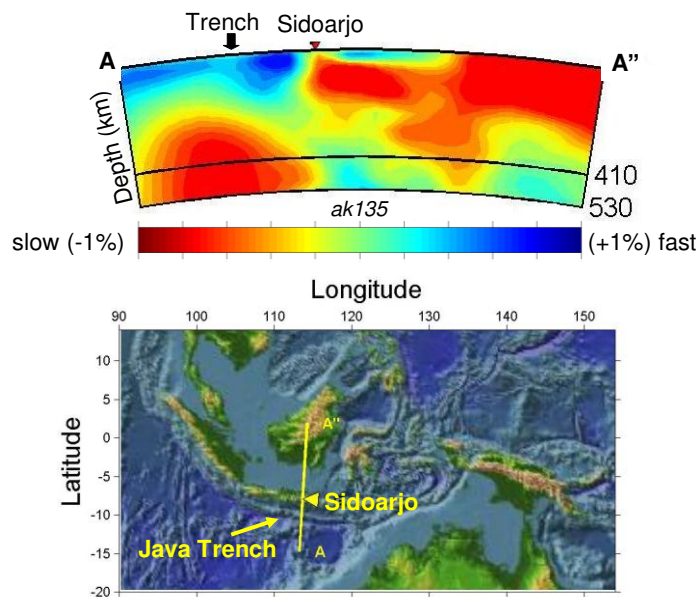


Gambar 2. Tiga penampang vertikal di bawah Jawa dan Sumatera. Litosfer samudera Hindia yang menunjam di bawah Sumatera dan Jawa dicitrakan oleh *slab* berwarna hijau tua pada penampang A, B dan C. Bintang pada penampang A dan B masing-masing menunjukkan posisi hiposenter gempa Aceh $M=9,2$ tanggal 26 Desember 2004 dan gempa di bawah laut Jawa $M=7,5$ pada tanggal 9 Agustus 2007. Posisi ketiga penampang ditunjukkan pada panel bawah bersama dengan plot seismisitas di bawah busur kepulauan Indonesia untuk kurun waktu mulai 1964 sampai dengan 2005 (lihat Gambar 1). Simbol: bulatan merah dan segitiga kuning masing-masing merepresentasikan lokasi episenter gempa dan stasiun pengamat.

Dalam Gambar 2 juga ditunjukkan penampang vertikal melalui pusat gempa dalam yang terjadi pada tanggal 9 Agustus 2007 di Laut Jawa di sebelah utara Indramayu (penampang B) dan penampang melalui Gunung Muria (penampang C). Pada penampang B dapat dilihat dengan jelas bahwa gempa 9 Agustus 2007 yang dilaporkan mempunyai magnitudo 7,5 tersebut merupakan hasil dari

proses subduksi lempeng samudera Hindia yang membentuk sudut cukup curam. Dengan demikian lokasi sumber gempa di bawah Laut Jawa sudah cukup dalam (sekitar 290 km) sehingga meskipun energi yang dilepas cukup besar, tetapi tidak menimbulkan kerusakan yang berarti.

Sedangkan Gambar 3 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 sejak akhir Mei 2006. Observasi ini menunjukkan perlunya melihat struktur bawah permukaan (kerak dan mantel bumi) dalam eksplorasi dan eksploitasi cadangan hidrokarbon.



Gambar 3. Penampang vertikal melalui model tomografi gelombang P yang memotong Sidoarjo, Jawa Timur, sampai

kedalaman 530 km (Widiyantoro, 2006). Lokasi penampang ditunjukkan dengan garis lurus pada panel bawah.

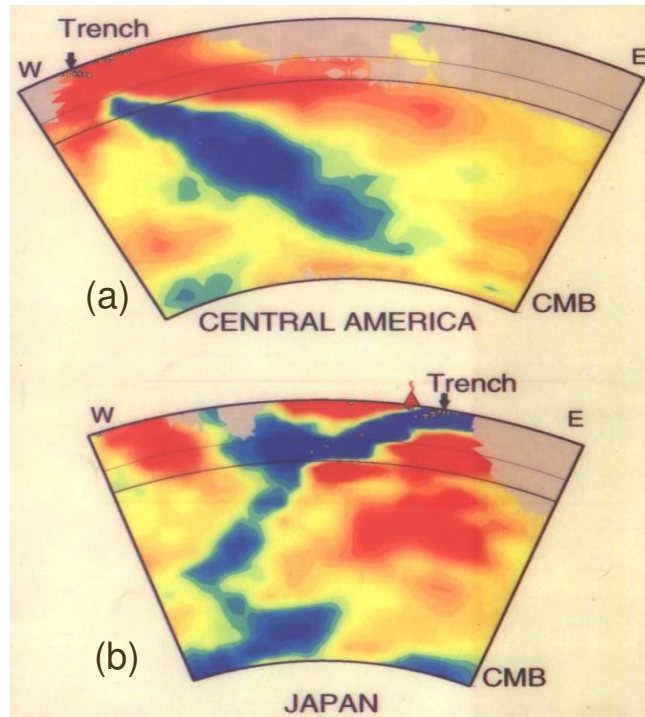
Model Tomografi Global

Pada Gambar 2 dan 3 telah ditunjukkan contoh hasil pencitraan tomografi seismik pada skala regional untuk zona subduksi di sepanjang Busur Sunda bagian barat. 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 berikut 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.

Parameterisasi model global yang digunakan dalam studi ini adalah blok dengan ukuran seragam yaitu $2^\circ \times 2^\circ$, di mana $1^\circ = 111,195$ 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). 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.

Untuk menunjukkan pola penunjaman slab secara lebih jelas maka dalam Gambar 4 ditunjukkan dua penampang vertikal di bawah Amerika Tengah dan Jepang. Dengan 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 (Widiyantoro, 2004). Sedangkan slab litosfer samudera yang menunjam di tempat lain kebanyakan terdefleksi pada kedalaman sekitar 660 km.



Gambar 4. 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. Catatan: model global di atas telah terbit di beberapa jurnal, di antaranya di *Nature*, dan telah memperoleh sitasi lebih dari 1000.

Implikasi dari pola penunjaman slab litosfer terutama terhadap pola konveksi mantel bumi dapat diringkas sebagai berikut. Pada mulanya 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. Selanjutnya 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. Pendapat tentang pola/model konveksi mantel bumi telah menjadi perdebatan yang telah lama berlangsung di kalangan beberapa kelompok ahli kebumihan. 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*).

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. Materi slab yang melewati zona transisi akan terseret oleh sirkulasi aliran mantel bagian dalam sehingga dapat mencapai *CMB*.

Beberapa tomogram seismik 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*.

Model yang terakhir ini cocok dengan observasi di banyak tempat di bumi, misal di Jepang (Gambar 4).

Tomogram seismik regional maupun global di atas memberikan gambaran yang sangat penting untuk memahami proses yang terjadi di dalam bumi, khususnya tentang proses tektonik dan pola aliran mantel. Pemahaman yang komprehensif tentang proses tektonik diperlukan untuk membantu usaha mitigasi bencana akibat kejadian gempa bumi.

MITIGASI BENCANA

Riset maupun studi tentang gempa bumi selama ini masih menekankan pada pemanfaatan data gempa yang telah terjadi untuk memahami fenomena yang telah terjadi tersebut. Sehingga tidak jarang terdengar pertanyaan: "Untuk apa riset tentang kegempaan semacam ini dilakukan?". Hasil yang diharapkan dari riset gempa bumi tentunya bahwa para ahli seismologi dapat memprediksi kejadian gempa secara tepat. Namun demikian hasil riset selama ini belum dapat memenuhi harapan masyarakat luas. Bahkan beberapa ilmuwan terkaitpun masih berdebat sengit mengenai apakah kejadian gempa bumi sebenarnya dapat diprediksi atau tidak (Geller *dkk.*, 1997; Kagan, 1997). Oleh karena itu diperlukan arahan riset kegempaan yang meskipun kejadiannya belum berhasil diprediksi, tetapi paling tidak resiko bencana yang ditimbulkan dapat diminimalkan. Paradigma yang muncul seiring dengan usaha

mitigasi bencana adalah: "*Natural hazards are inevitable; natural disasters are not. How can we reduce aftereffects?*" (pers. comm. Dr. W.-M. Boerner, 2012).

Untuk menjawab tantangan ini, maka riset kegempaan perlu difokuskan secara bertahap pada usaha:

(i) Mitigasi bencana; dalam hal ini riset perlu difokuskan pada identifikasi daerah-daerah yang rawan akan ancaman gempa dan didukung dengan usaha antara lain: (a) penegakan penggunaan kode bangunan/*building codes* dan aturan pembangunan/*construction regulations*, (b) prosedur evakuasi bila terjadi gempa, dan (c) komunikasi massa dalam bentuk sosialisasi dan simulasi bencana yang berkelanjutan.

(ii) Pencegahan (*prevention*); dalam hal ini riset melibatkan prosedur panjang dan interdisiplin ilmu untuk mencegah ancaman/bahaya (*hazard*) menjadi bencana (*disaster*) gempa bumi. Pencegahan semacam ini memerlukan sistem peringatan dini yang efektif, baik *tsunami early warning system*, maupun *earthquake early warning system* yang difokuskan untuk *instrumental response*.

(iii) Prediksi gempa; dalam hal ini diperlukan tidak hanya pendekatan statistik tetapi juga pendekatan deterministik, yaitu pengamatan langsung pada tanda-tanda awal (*precursor*) sebelum terjadinya gempa melalui berbagai fenomena. Misalnya: perubahan *total electron content* (TEC) di ionosfer, dan juga termasuk perubahan alam dan perilaku binatang yang mungkin teramati. Selain seismologi, diperlukan disiplin ilmu lain seperti elektronika/

instrumentasi untuk membuat alat deteksi gempa dengan pita frekuensi yang lebar sehingga mampu misalnya untuk mendeteksi gelombang infrasonik yang dapat memberikan informasi awal sebelum gempa terjadi seperti yang ditangkap oleh beberapa jenis hewan.

Arah Riset ke depan

Penelitian tentang prediksi gempa bumi selama ini masih sering menggunakan pendekatan statistik dengan data historis gempa. Pendekatan semacam ini tentu diperlukan, namun jelas tidak akan memadai untuk memprediksi gempa bumi yang merupakan fenomena yang sangat kompleks. Pendekatan lain seperti studi struktur seismik (tomografi), 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 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 (Jamshidi *dkk.*, 1993, Yan *dkk.*, 1994, dan Joelianto *dkk.*, 2009), (iii) GPS, khususnya tentang pemantauan dan analisis TEC di atmosfer secara kontinu (Jhuang *dkk.*, 2005); dan

(iv) analisis SES (Varotsos dan Alexopoulos, 1984). 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 untuk riset seperti 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, Klimatologi dan Geofisika, dan Badan Informasi Geospasial. Sedangkan kendala lain adalah ketersediaan data gempa historis yang sangat terbatas, terutama sebelum tahun 1964 stasiun pengamat masih jarang dan kebanyakan masih menggunakan sistem analog. Akibatnya terdapat banyak data gempa yang tidak disertai dengan lokasi hiposenter yang dapat dipercaya atau bahkan beberapa kejadian gempa tidak dilaporkan sama sekali.

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. Sekali lagi, 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

Penulis dengan penuh rasa syukur menghaturkan terima kasih dan apresiasi yang tinggi kepada berbagai kolega/pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah memberikan kontribusi penting sehingga penulis dapat sampai pada tahap pencapaian sekarang ini. Khususnya kepada para senior di AIPI yang telah berkenan memberikan kesempatan kepada penulis untuk bergabung sebagai anggota AIPI yang merupakan pengakuan kehormatan tertinggi dalam bidang ilmu pengetahuan di Indonesia.

Referensi

- 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.
- Joelianto, E., Widiyantoro, S., and Ichsan, M., 2009. Time Series Estimation of Earthquake Events using ANFIS with Mapping Function, *International Journal of Artificial Intelligence*, **3**, 37-63.
- 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.
- 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.
- Sambridge, M., and Feletic, R., 2003. Adaptive whole Earth tomography, *Geochemistry Geophysics Geosystems (G³)*, **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.
- 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 travelttime 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 Kongres 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., Gorbатов, 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., Pesicek, J. D., and Thurber, C. H., 2011a. Subducting Slab Structure below the Eastern Sunda Arc Inferred from Non-linear Seismic Tomographic Imaging, *J. Geol. Soc. London*, **355**, 139-155.
- Widiyantoro, S., Pesicek, J. D., and Thurber, C. H., 2011b. Complex structure of the lithospheric slab beneath the Banda arc, eastern Indonesia depicted by a seismic tomographic model, *Research in Geophysics*, **1**, 1-6.
- 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.



*Global Geophysics
Research Group*

*Faculty of Mining and
Petroleum Engineering*

*Institute of Technology
Bandung (ITB),
Bandung 40132,
Indonesia*

*Tel: +62 22 2506282
Fax: +62 22 2534139*

*E-mail:
sriwid@geoph.itb.ac.id*

Bandung, October 2012

Biodata

Sri Widiyantoro is a professor of seismology at ITB, Bandung, Indonesia, where he has spent his academic career since 1987. He has frequently conducted research and study visits at prestigious universities overseas, including MIT and ANU, where he finished his Ph.D. program, and research institutions (e.g. Earthquake Research Institute, Tokyo University) to work with top scientists on collaborative research. His main research interest is in the field of seismology, particularly seismic tomographic imaging. His tomographic models have been published in various journals, including top journals like *Science and Nature*. Alongside his work on large-scale seismological problems, he has engaged actively in consultancy on oil, gas, and geothermal explorations related work in Indonesia, so that he can bring a very broad perspective to his science.

He has received recognition through many awards including the Doornbos Memorial Prize

from the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, the Habibie Award from the Habibie Center, the Science and Technology Award from the Indonesian Toray Science Foundation, and the Australian Alumni Award for Research and Innovation. He has been a Fellow of the Indonesian Academy of Sciences since 2011. He is currently Dean of Faculty of Mining and Petroleum Engineering, ITB, and President for the Indonesian Association of Geophysicists (2012-2014).