

# **RINGKASAN HASIL STUDI TIM REVISI PETA GEMPA INDONESIA 2010**

**Disiapkan oleh:**

## **Tim Revisi Peta Gempa Indonesia**

Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., PhD. (Teknik Sipil ITB - Ketua)

Ir. I Wayan Sengara, MSCE., PhD. (Teknik Sipil ITB – Wakil Ketua)

Fahmi Aldiamar, ST., MT. (Litbang Jalan PU-Sekretaris)

Prof. Sri Widiyantoro, MSc., PhD. (Geofisika ITB)

Wahyu Triyoso, MSc., PhD. (Geofisika ITB)

Danny Hilman Natawidjaja, PhD. (Geoteknologi LIPI)

Ir. Engkon Kertapati (Pusat Penelitian Geologi)

Dr. Irwan Meilano, MSc. (Geodesi ITB)

Drs. Suhardjono (BMKG-Geofisika)

Ir. M. Asrurifak, MT. (Teknik Sipil ITB)

Ir. M. Ridwan, Dipl. E. Eng. (Litbang Permukiman PU)



AUSTRALIA-INDONESIA  
FACILITY FOR  
DISASTER REDUCTION



BANDUNG, 1 JULI 2010

# Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010

Masyhur Irsyam<sup>1</sup>, Wayan Sengara<sup>2</sup>, Fahmi Aldiamar<sup>3</sup>, Sri Widiyantoro<sup>4</sup>, Wahyu Triyoso<sup>4</sup>, Danny Hilman<sup>5</sup>, Engkon Kertapati<sup>6</sup>, Irwan Meilano<sup>7</sup>, Suhardjono<sup>8</sup>, M. Asrurifak<sup>9</sup>, M. Ridwan<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Teknik Sipil ITB – Ketua, <sup>2</sup> Teknik Sipil ITB – Wakil Ketua, <sup>3</sup> Litbang Jalan PU-Sekretaris, <sup>4</sup> Geofisika ITB, <sup>5</sup> Geoteknologi LIPI, <sup>6</sup> Pusat Penelitian Geologi, <sup>7</sup> Geodesi ITB, <sup>8</sup> BMKG-Geofisika, <sup>9</sup> Teknik Sipil ITB, <sup>10</sup> Litbang Kim PU

## Abstrak

Pertemuan kaji ulang SNI 03-1726-2002 pada tanggal 30 November 2009 di Jakarta yang dikoordinir oleh Departemen Pekerjaan Umum dan didukung oleh berbagai instansi pemerintah, universitas, maupun asosiasi profesi telah menyepakati untuk segera merevisi SNI 03-1726-2002 dengan membentuk Tim Revisi Peta Gempa Indonesia. Makalah ini berisi hasil studi yang telah dilakukan oleh tim dalam rangka penyusunan peta *seismic hazard* Indonesia. Penyusunan peta dilakukan berdasarkan metode probabilitas total dengan menggunakan model sumber gempa tiga dimensi.

Berbagai parameter sumber gempa yang digunakan berasal dari berbagai publikasi, penelitian sebelumnya dari para anggota tim, dan informasi terkini yang didapatkan selama studi ini sehingga makalah ini merangkum dan mengintegrasikan dalam analisis lanjutan kajian-kajian dan studi-studi yang telah dilakukan sebelumnya. Sumber-sumber gempa yang mempengaruhi Indonesia dikelompokkan ke dalam sumber gempa subduksi, sumber gempa *fault*, dan sumber gempa *background* dengan *recurrence model* yang meliputi *truncated exponential*, *pure characteristic*, dan kombinasi keduanya. Berbagai fungsi atenuasi digunakan sesuai dengan mekanisme sumber gempa, termasuk fungsi atenuasi NGA. Guna memperhitungkan *epistemic uncertainty*, digunakan *logic tree* dengan mempertimbangkan *recurrence model*, magnituda maksimum, dan berbagai fungsi atenuasi.

Tahapan yang digunakan untuk analisis *seismic hazard* ini meliputi: 1) *review* dan studi literatur mengenai kondisi geologi, geofisika dan seismologi dalam mengidentifikasi aktifitas sumber gempa di wilayah Indonesia, 2) pengumpulan dan pengolahan data-data kejadian gempa yang terekam di wilayah Indonesia, 3) pemodelan zona sumber gempa berdasarkan referensi model yang telah ada dan sesuai untuk wilayah Indonesia, 4) perhitungan parameter-parameter seismik yang meliputi *a-b parameter*, magnituda maksimum dan *slip-rate*, 5) analisis *seismic hazard* menggunakan Teorema Probabilitas Total, dan 6) pembuatan peta gempa Indonesia yang berupa peta percepatan maksimum dan spektra di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 10% dan 2% untuk masa layan bangunan 50 tahun atau setara dengan periode ulang gempa 475 dan 2475 tahun.

Penentuan parameter sumber gempa yang digunakan berasal dari katalog gempa terbaru dan informasi sesar aktif. Katalog gempa yang digunakan mulai dari tahun 1900 hingga 2009 serta katalog yang telah direlokasi hingga tahun 2005. Pemodelan sumber gempa yang digunakan meliputi sumber gempa sesar, sumber gempa subduksi dan sumber gempa *background*. Sumber gempa sesar dan subduksi menggunakan model tiga dimensi (3D) yang sudah memperhitungkan hasil tomografi untuk kondisi geometri dan data GPS untuk nilai *slip-rate*,

sedangkan sumber gempa *background* menggunakan model *gridded seismicity*. Fungsi atenuasi yang digunakan adalah *Next Generation Attenuation* (NGA), dimana fungsi atenuasi ini disusun dengan menggunakan data gempa global (*worldwide data*).

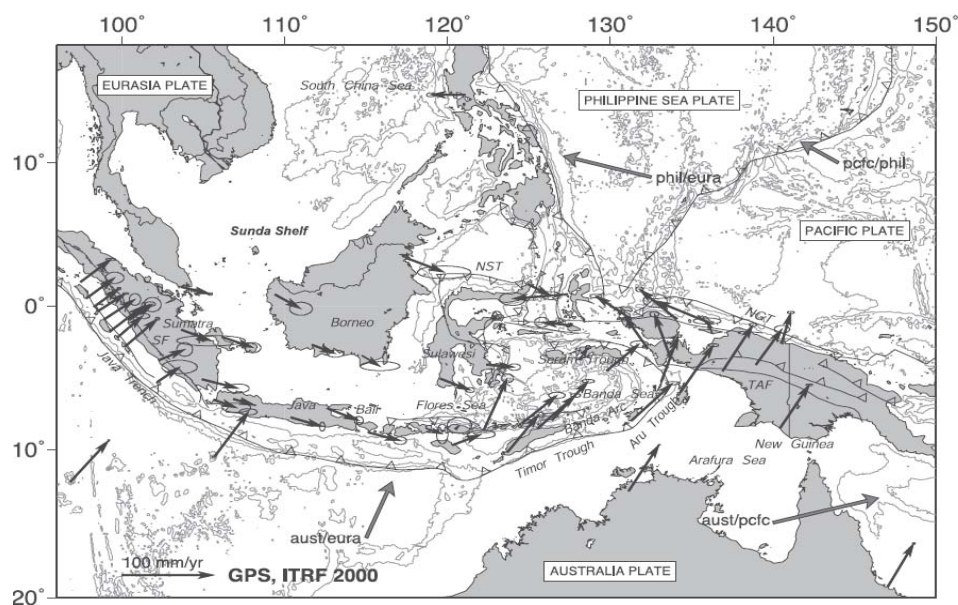
Hasil studi ini berupa peta PGA dan spektra percepatan untuk perioda pendek (0.2 detik) dan perioda 1 detik dengan kemungkinan terlampaui 10% dalam 50 tahun (gempa 475 tahun) dan 2% dalam 50 tahun (gempa 2475 tahun). Peta-peta ini selanjutnya diusulkan untuk menjadi revisi peta gempa yang saat ini digunakan dalam SNI 03-1726-2002.

**Kata kunci:** *seismic hazard*, model sumber gempa, probabilitas total, atenuasi, *slip-rate*, tomografi.

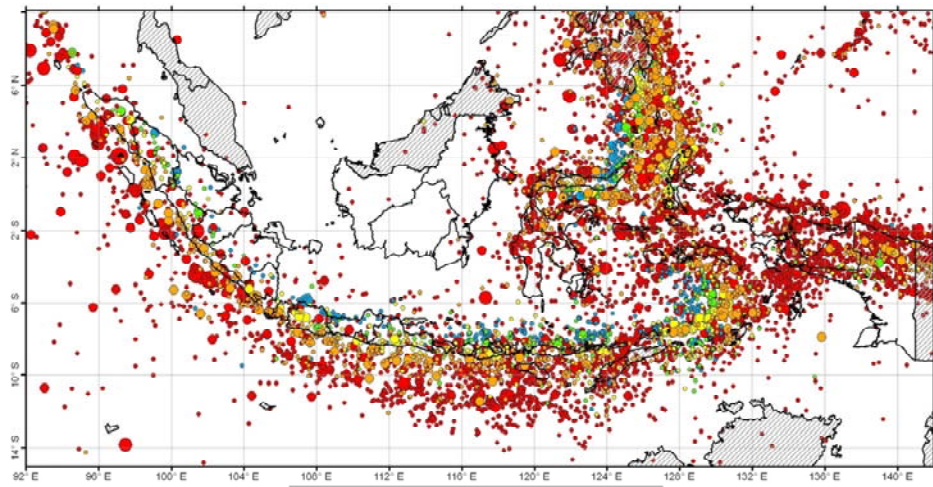
## 1. Latar Belakang

### 1.1. Sejarah Kegempaan

Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia (Gambar 1) dan membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks (Bird, 2003). Keberadaan interaksi antar lempeng-lempeng ini menempatkan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi (Milson *et al.*, 1992). Tingginya aktivitas kegempaan ini terlihat dari hasil pencatatan dimana dalam rentang waktu 1897-2009 terdapat lebih dari 14.000 kejadian gempa dengan magnituda  $M > 5.0$ . Kejadian gempa-gempa utama (*main shocks*) dalam rentang waktu tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2. Dalam enam tahun terakhir telah tercatat berbagai aktifitas gempa besar di Indonesia, yaitu Gempa Aceh disertai tsunami tahun 2004 ( $M_w = 9,2$ ), Gempa Nias tahun 2005 ( $M_w = 8,7$ ), Gempa Jogja tahun 2006 ( $M_w = 6,3$ ), Gempa Tasik tahun 2009 ( $M_w = 7,4$ ) dan terakhir Gempa Padang tahun 2009 ( $M_w = 7,6$ ). Gempa-gempa tersebut telah menyebabkan ribuan korban jiwa, keruntuhan dan kerusakan ribuan infrastruktur dan bangunan, serta dana trilyunan rupiah untuk rehabilitasi dan rekonstruksi.



**Gambar 1.** Peta tektonik kepulauan Indonesia dan sekitarnya (Bock *et al.*, 2003).



**Gambar 2.** Data episenter di Indonesia untuk magnituda,  $M > 5.0$  (1900-2009).

### 1.2. Parameter Pergerakan Tanah untuk Perencanaan

Permasalahan utama dari peristiwa-peristiwa gempa adalah: 1) sangat potensial mengakibatkan kerugian yang besar, 2) merupakan kejadian alam yang belum dapat diperhitungkan dan diperkirakan secara akurat baik kapan dan dimana terjadinya serta magnitudanya, dan 3) gempa tidak dapat dicegah. Karena tidak dapat dicegah dan tidak dapat diperkirakan secara akurat, usaha-usaha yang biasa dilakukan adalah: a) menghindari wilayah dimana terdapat *fault rupture*, kemungkinan tsunami, dan *landslide*, serta b) bangunan sipil harus direncanakan dan dibangun tahan gempa.

Pengalaman telah membuktikan bahwa sebagian besar korban dan kerugian yang terjadi akibat gempa disebabkan oleh kerusakan dan kegagalan infrastruktur. Kerusakan akibat gempa dapat dibagi dalam dua jenis, yaitu: 1) kerusakan tidak langsung pada tanah yang menyebabkan terjadinya likuifaksi, *cyclic mobility*, *lateral spreading*, kelongsoran lereng, keretakan tanah, *subsidence*, dan deformasi yang berlebihan, serta 2) kerusakan struktur sebagai akibat langsung dari gaya inersia yang diterima bangunan selama guncangan. Pencegahan kerusakan struktur sebagai akibat langsung dari gaya inersia akibat gerakan tanah dapat dilakukan melalui proses perencanaan dengan memperhitungkan suatu tingkat beban gempa rencana. Oleh karena itu, dalam perencanaan infrastruktur tahan gempa, analisis dan pemilihan parameter pergerakan tanah mutlak diperlukan untuk mendapatkan beban gempa rencana.

Secara umum, dalam perencanaan infrastruktur tahan gempa, terdapat beberapa jenis metoda analisis dengan tingkat kesulitan dan akurasi yang bervariasi. Sesuai dengan metoda analisis yang digunakan, parameter pergerakan tanah yang diperlukan untuk perhitungan dapat diwakili oleh: 1) percepatan tanah maksimum, 2) respon spektra gempa, dan 3) riwayat waktu percepatan gempa (*time histories*).

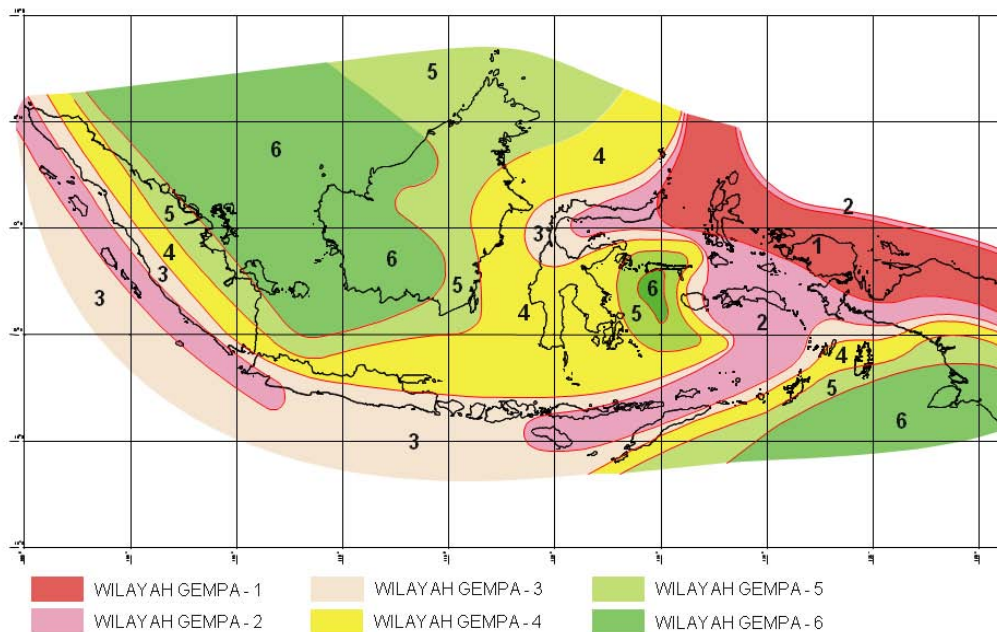
Percepatan tanah maksimum hanya memberikan informasi kekuatan puncak gempa. Respon spektra gempa memberikan informasi tambahan mengenai frekuensi gempa dan kemungkinan efek amplifikasinya. Riwayat waktu percepatan gempa memberikan informasi terlengkap



yaitu berupa variasi besarnya beban gempa untuk setiap waktu selama durasi gempa. Dalam analisis gempa, semakin sederhana suatu metoda analisis berarti semakin sedikit parameter gempa yang diperlukan. Akan tetapi, semakin banyak parameter yang diperlukan umumnya akan menghasilkan perkiraan hasil yang semakin akurat.

### 1.3. Perkembangan Peta *Hazard* Gempa Indonesia

Peta percepatan maksimum gempa di batuan dasar untuk Indonesia pada tahun 1983 mulai digunakan untuk peraturan perencanaan melalui PPTI-UG (Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia untuk Gedung) – 1983 (Gambar 3). Peta gempa ini merupakan hasil studi oleh Beca Carter dalam kerjasama bilateral Indonesia-New Zealand (Beca Carter Hollings dan Ferner, 1978). Peta gempa ini membagi Indonesia menjadi enam zona gempa. Dari peta ini dapat dipilih respon spektra di permukaan tanah dengan memperhitungkan kondisi tanah lokal. Dalam PPTI-UG ini, kondisi tanah lokal dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu tanah keras (*hard soil*) dan tanah lunak (*soft soil*).



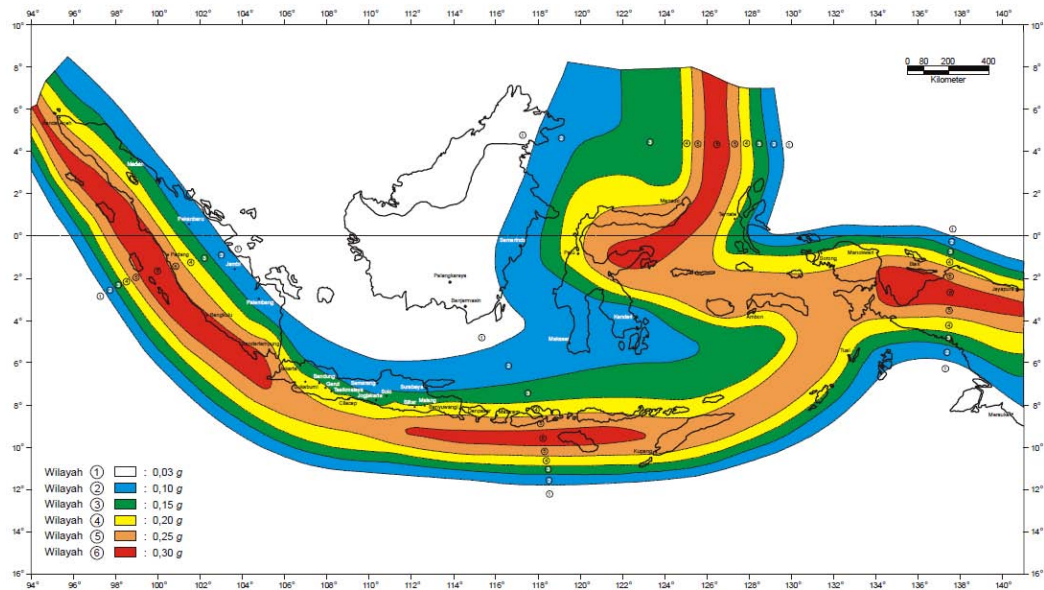
**Gambar 3.** Peta percepatan gempa maksimum Indonesia dalam PPTI-UG 1983.

PPTI-UG 1983 diperbaharui pada tahun 2002 dengan keluarnya Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung SNI 03-1726-2002 (Gambar 4). Peraturan baru ini disusun dengan mengacu pada UBC 1997. Pada SNI 2002 tersebut, penentuan beban gempa rencana dilakukan dengan menggunakan peta gempa. Pada peta gempa yang ada di SNI 2002 tersebut, percepatan maksimum gempa di batuan dasar ( $S_B$ ) telah disusun berdasarkan probabilitas terlampaui 10% untuk masa layan bangunan 50 tahun atau bersesuaian dengan perioda ulang gempa 475 tahun. Peta ini merupakan kompilasi dari empat peta gempa hasil analisis probabilistik dari empat tim peneliti yang berbeda yang mewakili, yaitu a) Universitas (ITB, Firmansyah dan Irsyam, 1999), b) Departemen Pekerjaan Umum (Najoan), c) Pusat Penelitian Geologi (Kertapati), dan d) Konsultan (Shah dan Boen, 1996).

Pada SNI ini, nilai percepatan maksimum dan spektra percepatan di permukaan tanah, ditentukan berdasarkan lokasi dan kondisi tanah lokal. Berbeda dengan peta sebelumnya, kondisi tanah dalam SNI ini dikelompokkan menjadi 3 kategori, yaitu keras (*hard*), sedang (*medium*), dan lunak (*soft*) mengikuti UBC 1997. Kategori tersebut berdasarkan parameter dinamis tanah hingga kedalaman tertentu yang umumnya diambil 30 m di bawah permukaan.

#### 1.4. Kebutuhan Revisi Peta Gempa Indonesia

Sejak diterbitkannya SNI 03-1726-2002, telah terjadi beberapa kejadian gempa besar di Indonesia yang memiliki magnituda lebih besar dari magnituda maksimum perkiraan sebelumnya, seperti Gempa Aceh (2004) dan Gempa Nias (2005). Pertanyaan yang kemudian timbul adalah apakah peta gempa ini masih relevan atau mendesak untuk segera diperbaiki. Di samping itu, pada beberapa tahun terakhir telah dikembangkan metoda analisis baru yang bisa mengakomodasi model atenuasi sumber gempa tiga dimensi (3-D). Hal tersebut bisa menggambarkan atenuasi penjaran gelombang secara lebih baik dibandingkan dengan model 2-D yang digunakan untuk penyusunan peta gempa SNI 03-1726-2002. Selanjutnya penelitian-penelitian yang intensif mengenai fungsi atenuasi terkini dan studi-studi terbaru tentang sesar aktif di Indonesia semakin menguatkan kebutuhan untuk memperbaiki peta gempa Indonesia yang berlaku saat ini.



**Gambar 4.** Peta percepatan gempa maksimum di batuan dasar ( $S_B$ ) Indonesia dalam SNI 03-1726-2002 yang saat ini berlaku di Indonesia.

Kronologis singkat mengenai upaya-upaya yang sudah dilakukan untuk penyempurnaan peta zonasi gempa Indonesia sampai tahun 2008, diuraikan dalam Surahman et al., (2008). Usaha formal untuk penyempurnaan peta gempa Indonesia telah dimulai sejak 2006. Usaha ini diinisiasi oleh Departemen Pekerjaan Umum dengan dukungan dari ITB, LIPI, BMKG, serta asosiasi profesi yang berhubungan dengan industri konstruksi (Irsyam et al, 2007, 2008a dan 2008b). Studi ini juga didukung melalui kerjasama dengan United States Geological Survey (USGS). Selain itu, studi hazard gempa untuk Pulau Sumatra secara terintegrasi dilakukan melalui dukungan penelitian Riset Unggulan Terpadu-KMNRT

(Sengara *et al.* 2007, 2008). Berbagai studi *hazard* kegempaan lanjutan telah dilakukan oleh para anggota tim meliputi Irsyam *et al.* (2009), Sengara *et al.* (2009), Irsyam *et al.* (2010a dan 2010b), Sengara *et al.* (2010), dan Asrurifak *et al.* (2010).

Dalam upaya penyempurnaan peta zonasi gempa Indonesia ini, untuk mengintegrasikan berbagai keilmuan dalam bidang zonasi gempa, maka pada tahun 2009 dibentuk Tim Peta Zonasi Gempa Indonesia dan dengan analisis bahaya gempa probabilistik terintegrasi. Tim ini meliputi ahli-ahli dari seluruh aspek terkait mulai dari geologi gempa, seismologi, tomografi, deformasi crustal, dan gempa geoteknik dan gempa struktur bangunan dalam suatu kajian terintegrasi dengan metoda probabilistik. Input-input geologi mengacu pada Natawidjaja (2002, 2009), Kertapati (1999, 2009), input seismologi dan tomografi diberikan oleh Widiyantoro (2009) dan Triyoso (2009), sedangkan input deformasi *crustal* dan *slip-rate* diberikan oleh Meilano (2010). Kajian dan pengembangan peta dikonsentrasikan untuk Pulau Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara. Kegiatan ini didukung oleh Kementerian Negara Riset dan Teknologi di bawah Deputy Pendayagunaan dan Pemasyarakatan-Analisis Kebutuhan Iptek. Dalam kegiatan ini anggota tim telah bekerja secara intensif dan menghasilkan peta zonasi gempa untuk Pulau Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara untuk periode ulang gempa 475 tahun dan 2475 tahun, atau masing-masing dengan level hazard 10% dan 2% kemungkinan terlewati (*probability of exceedance/PE*) dalam rencana umur bangunan 50 tahun. Beberapa *seismic source model*, khususnya untuk memperhitungkan beberapa patahan aktif telah dilakukan. Model NGA (Next Generation Attenuation) diadopsi untuk atenuasi getaran gempa patahan dangkal. Beberapa *seismic source model* ini masih memerlukan kajian dan penelitian lebih lanjut. Dokumen hasil kajian ini dilaporkan dalam Sengara *et al.* (2009).

PSHA untuk kawasan Indonesia Timur memerlukan dukungan dari ahli-ahli terkait geologi, seismologi, tomografi, deformasi crustal dan gempa geoteknik secara terintegrasi, seperti halnya yang telah dilakukan untuk Pulau Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara oleh Tim Ristek. Oleh karena itu, penyempurnaan zonasi gempa untuk kawasan Indonesia Timur ini dikerjakan oleh Tim-9 yang dibentuk di bawah koordinasi Departemen Pekerjaan Umum. Dalam pelaksanaannya, selain didukung oleh Departemen Pekerjaan Umum, kegiatan Tim-9 ini juga didukung oleh *Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR)* yang berada dalam naungan dan untuk mendukung *Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB)*. Dalam hal ini AIFDR bekerja sama dengan ITB dan Pusat Pemukiman - Departemen Pekerjaan Umum untuk penyempurnaan peta zonasi gempa Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara dan Kawasan Timur Indonesia sampai peta zonasi gempa siap untuk direkomendasikan dalam SNI gempa.

Dalam perencanaan bangunan gedung, telah disepakati bersama bahwa peta gempa Indonesia yang baru akan disusun berdasarkan data-data seismisitas paling terkini, hasil-hasil riset terbaru mengenai kondisi seismotektonik di Indonesia, dan menggunakan analisis dengan model 3-D dengan merujuk pada International Building Code 2009 (IBC 2009) dimana IBC 2009 menggunakan probabilitas terlampaui 2% untuk masa layan bangunan 50 tahun (periode ulang gempa 2475 tahun) sebagai dasar untuk menentukan gempa desain.

## 2. *Seismic Hazard Analysis*

Hasil analisis *hazard*/bencana kegempaan (*seismic hazard analysis/SHA*) berupa percepatan maksimum, respon spektra, dan *time-histories*. Ada dua metoda yang biasa digunakan dalam SHA, yaitu: deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis/DSHA*) dan probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis/PSHA*).

Secara umum metoda DSHA dapat dibagi menjadi empat tahap. Tahap pertama adalah identifikasi sumber-sumber gempa yang meliputi lokasi sumber-sumber gempa, geometri sumber, mekanisme kegempaan, sejarah kegempaan, dan parameter kegempaan seperti magnituda maksimum dan frekuensi keberulangan kejadian gempa. Tahap kedua adalah untuk setiap sumber gempa yang berada di sekitar lokasi studi ditentukan (diskenariokan) parameter gempa yang akan menghasilkan dampak di lokasi studi seperti magnituda yang maksimum dan lokasi kejadian yang terdekat ke lokasi studi. Tahap ketiga adalah menghubungkan parameter sumber gempa dengan parameter pergerakan tanah di lokasi studi dengan menggunakan fungsi atenuasi. Tahap keempat adalah menentukan parameter gempa desain berdasarkan skenario yang menghasilkan parameter pergerakan tanah terbesar (*worst case scenario*).

Metode DSHA umumnya diaplikasikan untuk mengestimasi percepatan gempa untuk konstruksi yang sangat membahayakan jika terjadi kerusakan, seperti bangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) (Irsyam *et al.*, 1999), bendungan besar, konstruksi yang dekat dengan sesar aktif, dan untuk keperluan *emergency response*. Kelebihan metoda ini adalah mudah digunakan untuk memprediksi gerakan gempa pada skenario terburuk. Sedangkan kelemahannya adalah metoda ini tidak mempertimbangkan probabilitas terjadinya gempa dan pengaruh berbagai ketidakpastian yang terkait dalam analisis (Kramer, 1996).

Analisis probabilistik PSHA pada prinsipnya adalah analisis deterministik dengan berbagai macam skenario dan didasarkan tidak hanya pada parameter gempa yang menghasilkan pergerakan tanah terbesar. Perbedaan utama antara pendekatan DSHA dan PSHA adalah pada pendekatan probabilistik (PSHA), frekuensi untuk setiap skenario pergerakan tanah yang akan terjadi juga diperhitungkan. Dengan demikian, pendekatan PSHA juga bisa digunakan untuk memprediksi seberapa besar probabilitas kondisi terburuk akan terjadi di lokasi studi. Metoda ini memungkinkan untuk memperhitungkan pengaruh faktor-faktor ketidakpastian dalam analisis seperti ukuran, lokasi dan frekuensi kejadian gempa. Metode ini memberikan kerangka kerja yang terarah sehingga faktor-faktor ketidakpastian dapat diidentifikasi, diperkirakan, dan kemudian digabungkan dengan metode pendekatan yang rasional untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang kejadian gempa.

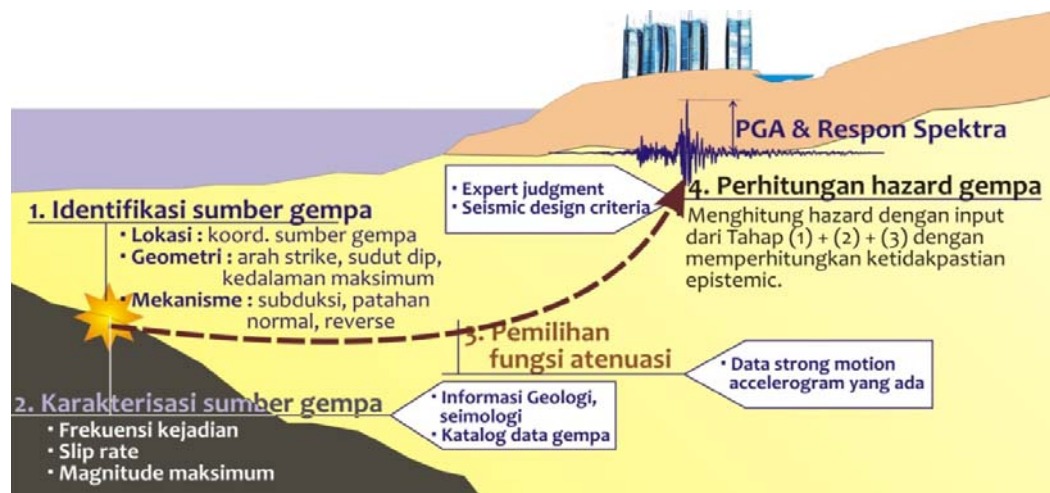
Analisis DSHA dan PSHA pada kenyataannya saling melengkapi. Hasil DSHA dapat diverifikasi dengan PSHA untuk memastikan bahwa kejadian tersebut masih realistis atau mungkin terjadi. Sebaliknya, hasil analisis PSHA dapat diverifikasi oleh hasil analisis DSHA untuk memastikan bahwa hasil analisis tersebut rasional. Lebih jauh, McGuire (2001) menyampaikan bahwa DSHA dan PSHA akan saling melengkapi tetapi dengan tetap memberikan penekanan pada salah satu hasil. Untuk keperluan desain infrastruktur tahan gempa, umumnya digunakan PSHA dengan tingkatan gempa atau probabilitas terlampaui mengikuti SEAOC (1997).

Metode PSHA dikembangkan oleh Cornell (1968), kemudian dilanjutkan oleh Merz dan Cornell (1973). Model dan konsep dari analisis ini tetap dipakai sampai sekarang, namun model dari analisis dan teknik perhitungannya yang terus dikembangkan oleh EERI Committee on Seismic Risk (EERI, 1989) memiliki empat tahap (Gambar 5), yaitu a) identifikasi sumber gempa, b) karakterisasi sumber gempa, c) pemilihan fungsi atenuasi, dan d) perhitungan *hazard* gempa. Teori ini mengasumsikan magnituda gempa  $M$  dan jarak  $R$  sebagai variabel acak independen yang menerus. Dalam bentuk umum teori probabilitas total ini dapat dinyatakan sebagai berikut

$$H(a) = \sum v_i \iint P[A > a | m, r] f_{M_i}(m) f_{R|M_i}(r, m) dr dm \quad 2.1$$

dimana  $v_i$  adalah *annual rate* (dengan magnituda lebih tinggi dari nilai batas  $M_{oi}$ ) pada sumber gempa  $I$ ,  $f_{M_i}(m)$  dan  $f_{R|M_i}(r, m)$  berturut-turut adalah fungsi kepadatan probabilitas magnituda dan jarak.  $P[A > a | m, r]$  adalah probabilitas sebuah gempa dengan magnituda  $m$  pada jarak  $r$  yang memberikan percepatan maksimum  $A$  di lokasi lebih tinggi dari  $a$ .

*Software* untuk PSHA yang digunakan dalam studi ini didapat dari USGS (Harmsen, 2007) dimana input parameter yang digunakan adalah seperti yang dijelaskan pada model sumber gempa dibagian Bab 5. Selain itu, untuk pengecekan dan pembanding digunakan juga *software* EZ-Frisk (Risk Engineering, 2009).



(A) IDENTIFIKASI SUMBER	(B) KARAKTERISASI SUMBER	(C) PEMILIHAN FUNGSI ATENUASI	(D) PERHITUNGAN PROBABILITAS TERLAMPAUI

**Gambar 5.** PSHA untuk mendapatkan pergerakan tanah di batuan dasar.



### 3. Tataan Tektonik

Sebagaimana terlihat dalam Gambar 1, kepulauan Indonesia merupakan tipe struktur busur kepulauan dengan fisografi yang unik, yaitu *trenches*, *arc-trench gaps*, *gravity anomalies*, busur vulkanik dan rangkaian pegunungan muda dengan karakteristik sebaran kedalaman gempa sepanjang zone penunjaman. Fisiografi unik tersebut ditunjukkan dalam bentuk kondisi tektonik dimana di bagian barat laut dan bagian tenggara berturut-turut ditempati oleh lempeng Benua Asia (Paparan Sunda) dan lempeng Benua Australia dimana kedua paparan tersebut membentuk daerah stabil. Di bagian timur laut dan barat daya berturut-turut ditempati oleh lempeng Samudera Pasifik dan Samudera Hindia, sementara di bagian tengah didominasi oleh keratan-keratan benua dan samudera serta oleh kerak bumi intermediate (*intermediate crust*). Daerah di bagian tengah tersebut dikenal juga sebagai daerah transisi.

Keratan-keratan benua tersebut mencerminkan bahwa keratin kerak bumi telah pindah tempat (*allochthone*) sejak jutaan tahun lalu dimana telah bergerak sejauh ratusan kilometer meninggalkan tempatnya dan terus bergerak hingga sekarang. Sebagai contoh adalah fragmen Banggai-Sula yang secara geografis meliputi Kepulauan Banggai, Peleng dan Sula. Keratan benua kecil ini disusun oleh batuan asal benua yang terhanyutkan oleh Patahan Sorong ke arah barat.

Sementara itu, Pulau Sulawesi merupakan pusat benturan ketiga lempeng kerak bumi. Pulau ini seakan dirobek oleh berbagai patahan (*faulting*) dan sesar (*thrusting*) dimana berbagai jenis batuan tercampur sehingga posisi stratigrafinya menjadi sangat rumit. Oleh karena itu, pulau ini memiliki empat buah lengan yang dikenal dengan sebutan Lengan Selatan, Lengan Utara, Lengan Timur, dan Lengan Tenggara. Lengan Utara merupakan Sulawesi *volcanic arc* yang terbentuk sejak zaman neogen akhir (5,44 juta tahun lalu) hingga sekarang dan berkaitan dengan palung subduksi. Lengan Timur dan Lengan Tenggara ditempati oleh jalur batuan ophiolit (*Eastern Sulawesi ophiolite*) dan juga terdapat batuan lain yaitu mandala benua pindahan (*allochthonous continental terrains*) sekalipun dengan ukuran yang kecil. Dengan kata lain, keempat lengan tersebut memiliki sejarah geologi yang kompleks dimana dicirikan oleh proses tektonik yang berbeda satu dengan yang lainnya. Pulau ini dan kepulauan Banggai-Sula merupakan kesatuan mosaik geologi yang disatukan oleh proses tumbukan (*collision*)

Dampak dari benturan antar lempeng kerak bumi yang berbeda jenis tersebut menimbulkan terjadinya penimbunan energi (*stress energy*) di dalam fitur-fitur geologi dan dalam kurun waktu tertentu dimana akan dilepaskan secara tiba-tiba dengan nilai besaran gempa yang beragam. Potensi-potensi gempa bumi yang besar ( $> 7.5$ ) tersebut dapat terjadi di sepanjang batas lempeng kerak bumi (Ruff dan Kanamori, 1983 dan McCann *et al.*, 1987).

Benturan (*collision*) antara Busur Sunda Timur (busur Banda) dengan lempeng Benua Barat Laut Australia membentuk mosaik element–elemen tektonik kompleks yang terdiri dari berbagai fitur morfo-struktur. Oleh karena itu, di tepian timur Paparan Sunda tersebar cekungan tarikan Makassar (*Makassar Extensional Basin*), Palung Doang, Tepian Sulawesi, Palung Spermonde, Punggungan Selayar dan Cekungan Bone. Sementara di bagian selatan ditempati cekungan busur belakang yang terdiri dari Cekungan Bali, Palung Lombok, Cekungan Flores, Sub-Cekungan Wetar. Dampak lainnya adalah terbentuknya patahan-

patahan di Sulawesi, Kalimantan Timur, di bagian utara Nusa Tenggara Timur dan struktur belakang busur (Gambar 6).

Provinsi Papua yang terletak di bagian barat Pulau Nugini sering dipertimbangkan sebagai salah satu daerah yang memiliki kondisi tektonik yang kompleks di dunia. Hal ini diakibatkan benturan dengan sudut miring antara lempeng Samudera Pasifik–Lempeng Caroline yang bergerak ke selatan dengan kecepatan antara 110 mm – 125 mm/thn terhadap tepian lempeng Benua Australia. Benturan miring lempeng-lempeng tersebut menghasilkan gerak patahan-patahan kombinasi *thrusting* dan geser di seluruh pulau Irian meliputi jalur sesar naik Membramo di utara Papua, jalur anjak perdataran tinggi (*the highland thrust belt*) Papua Tengah, Sesar Sorong, Ransiki, Yapen, dan Zone Sesar Tarera–Aiduna yang terkonsentrasi di sekitar Papua Barat, kepala dan leher burung Papua. Dengan kata lain, dapat disimpulkan bahwa Parit Nugini merupakan fitur tektonik utama yang dapat menggambarkan batas antara Lempeng Pasifik dan Lempeng Australia.

#### **Gambar 6.** Tektonik utama Indonesia.

Zona subduksi yang terjadi di bagian selatan wilayah Indonesia dikenal dengan sumber gempa Busur Sunda yang membentang dari bagian barat Pulau Andaman di bagian barat sampai Pulau Banda di bagian timur. Di bagian timur dari Busur Sunda membentang Busur Banda yang dimulai dari bagian timur Pulau Sumbawa yang membentang ke timur di bawah Pulau Timor melengkung berlawanan arah jarum jam ke arah utara melewati Pulau Seram dan membentang ke arah barat hingga pulau Buru. Di bagian timur wilayah Indonesia, terjadi pertemuan antara sumber gempa dari barat dan jalur gempa Busur Banda dengan jalur gempa akibat benturan atau pertemuan Lempeng Australia dengan Lempeng Pasifik. Zona-zona subduksi utama wilayah Indonesia tersebut merupakan zona-zona sumber gempa yang memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kejadian gempa yang telah lalu dan yang akan datang.

*Fault* atau sesar yang terdapat di lempeng tektonik dalam perkembangannya juga mengalami pergerakan dan juga akan memberikan berkontribusi terhadap kejadian gempa. Besarnya magnitudo gempa yang terjadi akibat mekanisme pergerakan *fault* ini bergantung pada luas bidang *fault* yang saling mengunci (*asperity area*) dimana makin luas area *asperity*-nya maka kemungkinan akan kejadian gempanya juga semakin besar. Mekanisme pergerakan *fault* ini bisa berupa *srike-slip*, *reverse* dan *normal*.

#### 4. Katalog Gempa

Dalam membuat model statistik probabilitas dari suatu sumber gempa diperlukan katalog gempa dan data *seismogenic*. Data kejadian gempa historik yang pernah terjadi di wilayah Indonesia dan sekitarnya dikumpulkan dari berbagai sumber, seperti dari a) *Nasional Earthquake Information Center U.S. Geological Survey* (NEIC-USGS), dimana data ini merupakan gabungan dari katalog gempa yang dikeluarkan oleh *The Bureau Central International de Seismologie* (BCIS), *International Seimological Summeries* (ISS), *International Seimological Center* (ISC), *Preliminary Determination of Epicenter* (PDE) dan beberapa katalog perorangan, seperti Abe, Abe dan Noguchi, serta Gutenberg & Richter, b) katalog gempa Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia, c) katalog Centennial dimana merupakan kompilasi katalog Abe, Abe dan Noguchi, Newcomb & McCann, dan d) katalog Pacheco dan Sykes dimana gempa-gempa menengah sampai besar telah direlokasi dan dikoreksi, serta e) katalog gempa yang sudah direlokasi oleh Engdahl (Engdahl *et al.*, 2007) dimana katalog ini berguna untuk mengontrol geometri dari patahan. Data yang dipilih adalah data dalam perioda tahun 1900 sampai tahun 2009 dengan batasan koordinat 10°LU - 12°LS dan 90°BT - 145°BT, sedangkan untuk analisis *annual rate* digunakan data dari tahun 1964 sampai tahun 2009.

##### 4.1. Konversi Skala Magnituda

Data-data kejadian gempa yang dikumpulkan dari berbagai sumber umumnya menggunakan skala magnituda yang berbeda-beda. Skala magnituda yang digunakan antara lain adalah *suface wave* magnituda ( $m_s$ ), *Richter local magnitude* ( $M_L$ ), *body wave magnitude* ( $m_b$ ) dan *moment magnitude* ( $M_w$ ). Skala-skala magnituda tersebut harus dikonversi terlebih dahulu menjadi satu skala magnituda yang sama sebelum digunakan dalam analisis resiko gempa. Terdapat beberapa usulan formulasi atau persamaan konversi skala magnituda yang diusulkan peneliti seperti Purcaru dan Berckhemer (1978), Thatcher dan Hanks (1973), dimana rumus-rumus tersebut dibuat dengan menggunakan analisis regresi. Selain itu, Idriss (1985) telah membuat grafik korelasi hubungan antara  $M_w$  dengan  $M_L$ ,  $M_S$ ,  $m_b$ , dan  $M_{JMA}$ . Analisis konversi pada studi ini menggunakan data-data gempa (katalog gempa) wilayah Indonesia yang dikumpulkan dari berbagai sumber diatas. Hal tersebut disebabkan peneliti tidak memiliki data informasi untuk pembuatan persamaan konversi tersebut. Dari data-data tersebut dengan menggunakan analisis regresi didapat rumusan korelasi konversi magnituda untuk wilayah Indonesia seperti yang terlihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Korelasi konversi antara beberapa skala magnituda untuk wilayah Indonesia.

Korelasi Konversi	Jml Data (Events)	Range Data	Kesesuaian ( $R^2$ )
$M_w = 0.143M_s^2 - 1.051M_s + 7.285$	3.173	$4.5 \leq M_s \leq 8.6$	93.9%
$M_w = 0.114m_b^2 - 0.556m_b + 5.560$	978	$4.9 \leq m_b \leq 8.2$	72.0%
$M_w = 0.787M_E + 1.537$	154	$5.2 \leq M_E \leq 7.3$	71.2%
$m_b = 0.125M_L^2 - 0.389M_L + 3.513$	722	$3.0 < M_L < 6.2$	56.1%
$M_L = 0.717M_D + 1.003$	384	$3.0 \leq M_D \leq 5.8$	29.1%

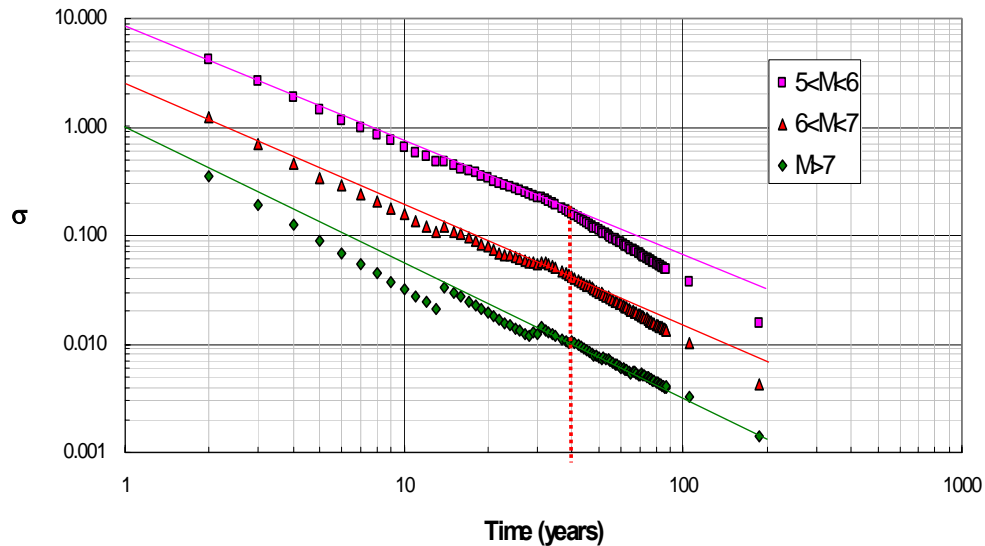
#### 4.2. Analisis Kejadian Gempa Independen

Kejadian-kejadian gempa *dependent* atau gempa ikutan (*foreshock* dan *aftershock*), harus diidentifikasi sebelum data-data kejadian gempa digunakan untuk menentukan tingkat *hazard* gempa. Beberapa kriteria empiris untuk mengidentifikasi kejadian gempa *dependent* telah dilakukan oleh beberapa peneliti, seperti Arabasz dan Robinson (1976), Garner dan Knopoff (1974) dan Uhrhammer (1986). Kriteria ini dikembangkan berdasarkan suatu rentang waktu dan jarak tertentu dari satu kejadian gempa besar.

Dalam studi ini digunakan model Garner dan Knopoff (1974) untuk mencari gempa utama. Hal ini sesuai dengan berbagai analisis yang dilakukan oleh peneliti dengan menggunakan model-model diatas dan diketahui model Garner dan Knopoff (1974) memiliki hasil yang cukup baik. Katalog gempa yang diambil dari berbagai sumber di atas dikumpulkan sampai mencapai lebih dari 70.000 kejadian gempa untuk seluruh wilayah Indonesia dan disortir dengan model Garner & Knopoff (1974) hingga didapatkan *main shock*-nya dengan jumlah 8.151 kejadian gempa.

#### 4.3. Analisis Kelengkapan (*Completeness*) Data Gempa

Proses analisis kelengkapan (*completeness*) data gempa juga dilakukan untuk mengetahui kelengkapan data yang diperlukan dalam proses analisis probabilistik. Ketidaklengkapan data gempa akan mengakibatkan parameter resiko gempa yang dihasilkan menjadi *overestimated* atau *underestimated*. Metode analisis kelengkapan data gempa yang digunakan pada studi ini mengikuti prosedur yang diusulkan oleh Stepp (1973). Hasil analisis kelengkapan data untuk wilayah Indonesia untuk rentang magnituda 5.0-6.0 adalah 44 tahun, rentang magnituda 6.0-7.0 adalah 54 tahun, dan rentang magnituda lebih dari 7.0 adalah 108 tahun. Hasil analisis kelengkapan untuk wilayah Indonesia bisa dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 7.** Model *Completeness* data gempa wilayah Indonesia.

## 5. Model Seismotektonik

Tatanan seismotektonik wilayah Indonesia dari publikasi terkini dan telah dievaluasi secara rinci oleh beberapa peneliti dipakai sebagai acuan untuk pembuatan model sumber gempa dan input parameter PSHA. Model sumber gempa ini diperlukan sebagai hubungan antara data kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat resiko gempa. Zona sumber gempa didefinisikan sebagai area yang mempunyai derajat gempa yang sama, dimana di setiap titik dalam zona tersebut mempunyai kemungkinan yang sama akan terjadinya gempa dimasa mendatang. Model sumber gempa akan memberikan gambaran distribusi episenter kejadian gempa historik, frekuensi kejadian gempa dan pergeseran relatif lempeng (*slip-rate*) dari suatu sumber gempa.

Data utama yang diperlukan dalam membuat model sumber gempa adalah *seismogenic zones*, *focal mechanisms* dan *earthquake catalogues*. Kondisi *seismogenic* ini termasuk geometri atau geomorfologi lempeng tektonik seperti *fault* dan zona subduksi.

Ada tiga model sumber gempa yang digunakan dalam analisis ini, yaitu sumber gempa *fault*, sumber gempa subduksi dan sumber gempa *background*.

### 5.1. Model Sumber Gempa Fault

Model sumber gempa fault ini juga disebut sebagai sumber gempa tiga dimensi karena dalam perhitungan probabilitas jarak, yang dilibatkan adalah jarak dari site ke *hypocenter*. Jarak ini memerlukan data *dip* dari fault yang akan dipakai sebagai perhitungan probabilitas tersebut.

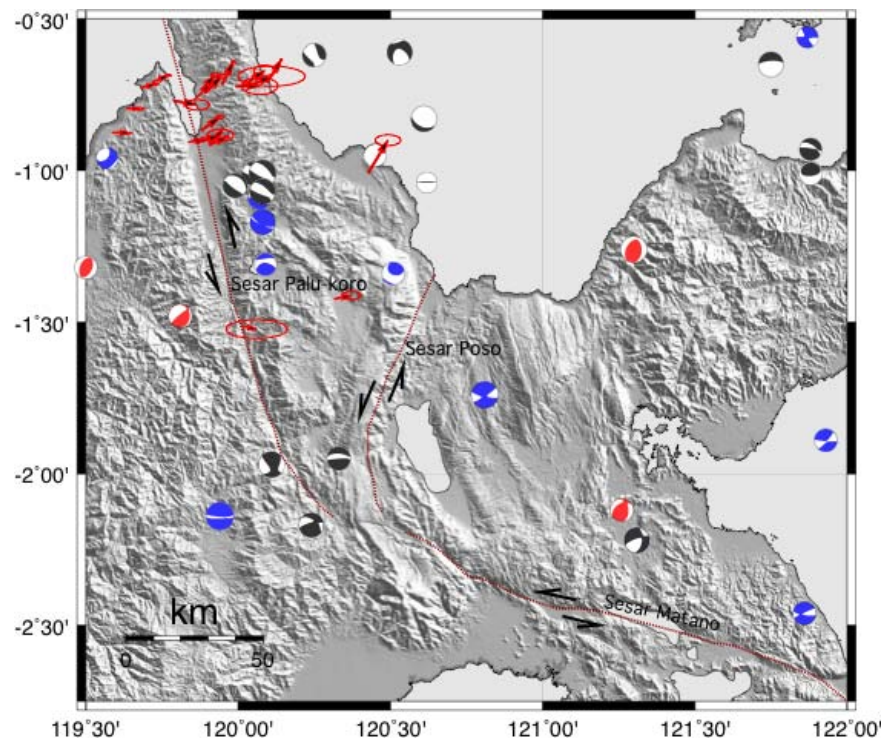
Parameter-parameter yang diperlukan untuk analisis probabilitas dengan model sumber gempa sesar adalah *fault trace*, mekanisme pergerakan, *slip-rate*, *dip*, panjang dan lebar *fault*. Penentuan lokasi sesar (*fault trace*) ini berdasarnya dari data-data peneliti yang sudah dipublikasi yang kemudian di *trace* ulang dengan menggunakan data *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) yang berbentuk peta geomorfologi dan data gempa historis yang sudah direlokasi (Gambar 8). Dari hasil *trace* ini didapatkan panjang dari sesar yang



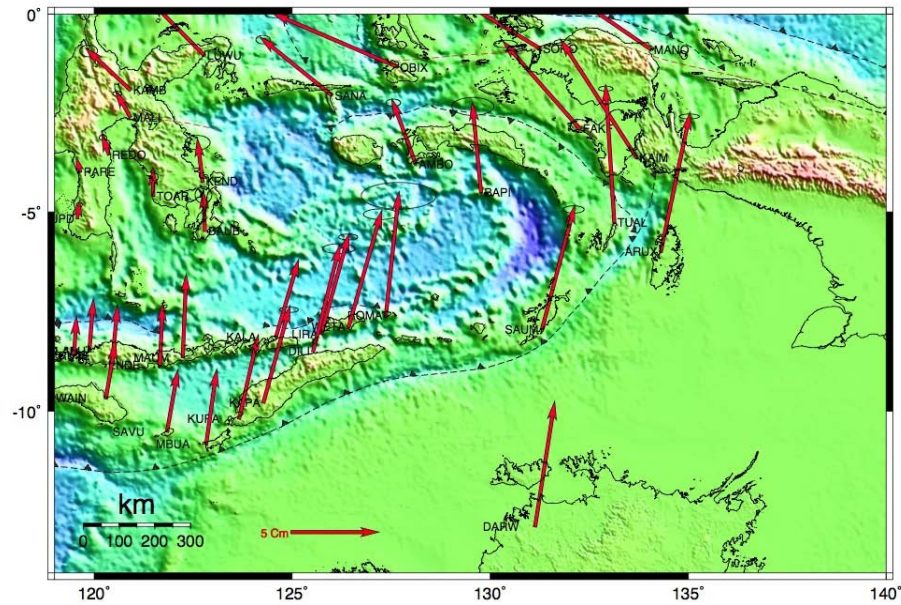
dicari. Data-data yang lain didapatkan dari referensi yang sudah dipublikasi dan hasil diskusi dengan para ahli geologi, geofisika, geodinamika dan seismologi yang tergabung dalam Tim Teknis Revisi Peta Gempa Indonesia.

Besar dan arah pergeseran permukaan (*slip-rate*) bisa didapat melalui metoda survei GPS dengan pengamatan secara teliti di posisi titik-titik dalam suatu jaring secara kontinu ataupun berkala. Contoh model analisis pergeseran permukaan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu di sekitar laut Banda, dimana sumber datanya didapat dari peneliti lain (Gambar 9). Data-data yang diperoleh dari hasil pengukuran GPS pada titik-titik yang telah dipilih ini dapat dipelajari pola dan kecepatan perubahan koordinat dari titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, sehingga dari hasil ini dapat diketahui karakteristik deformasi dan geodinamika sesar yang dikaji berdasarkan hasil hitungan dan model matematis yang berupa analisis regangan tektonik (Gambar 10).

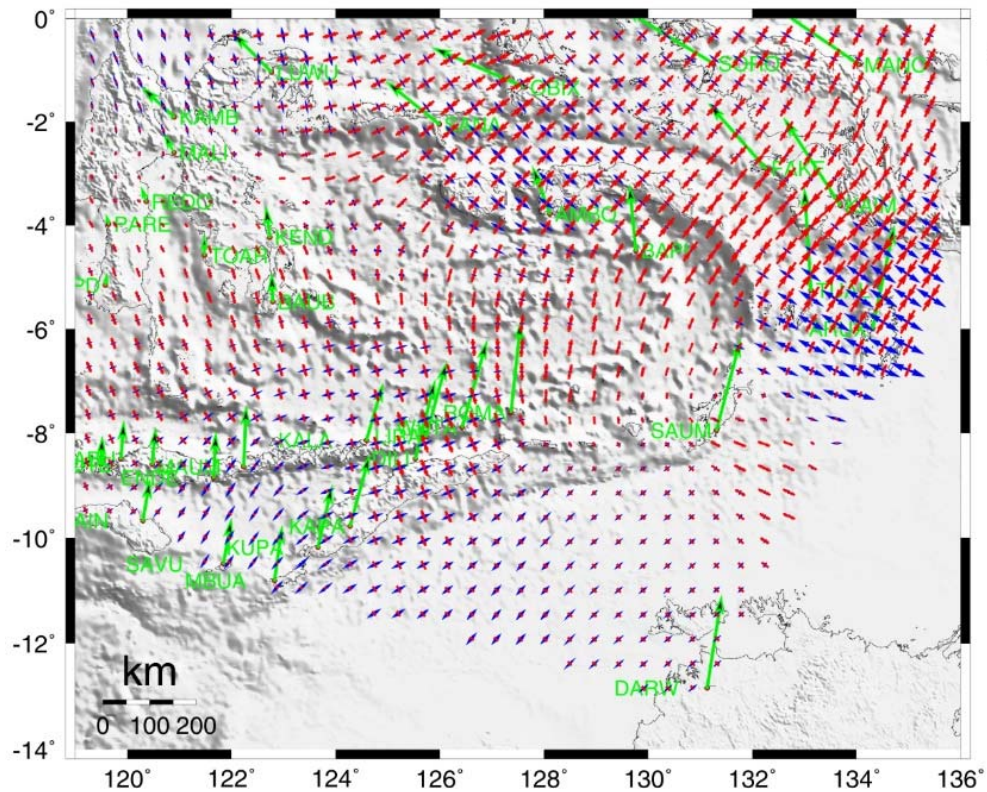
Hasil analisis berupa data dan parameter *fault* Indonesia dalam studi ini terangkum pada Tabel 2 untuk daerah Sumatra dan sekitarnya, Tabel 3 untuk daerah Jawa dan sekitarnya, Tabel 4 untuk daerah Sulawesi dan sekitarnya, dan Tabel 5 untuk daerah Papua dan sekitarnya. Gambar 12 memberikan ilustrasi hasil studi untuk data dan parameter sumber gempa sesar meliputi nama, lokasi, nilai *slip-rate* dan maksimum magnituda desain yang digunakan untuk PSHA.



**Gambar 8.** Penampakan sesar Palu-Koro dan sesar Poso dari data SRTM serta model mekanisme gempa yang terjadi disekitarnya.

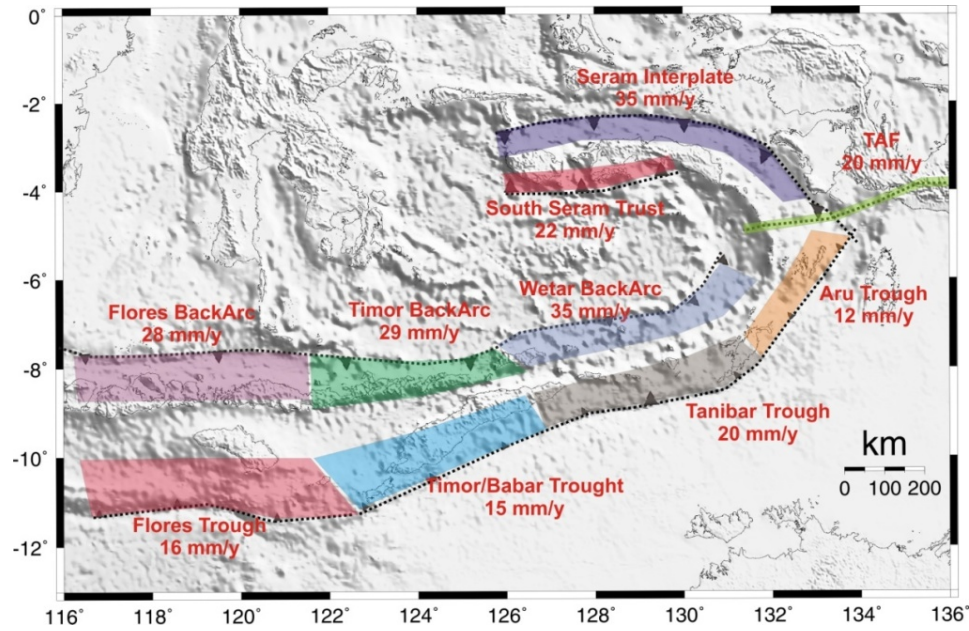


**Gambar 9.** Pergeseran permukaan di sekitar Laut Banda, sumber data Genrich *et al.*, 1996, Rangin *et al.*, 1999, Stevent *et al.*, 2002, Socquet *et al.*, 2006 dan Nugroho *et al.*, 2009.



**Gambar 10.** Regangan tektonik disekitar Laut Banda yang diturunkan dari data pergeseran permukaan.





**Gambar 11.** Lokasi dan *slip-rate* daerah Timor hingga Seram dari data GPS dengan analisis deformasi dislokasi.

**Tabel 2.** Data dan parameter sumber gempa fault untuk daerah Sumatra dan sekitarnya.

Fault		Slip-Rate		Sense Mechanism	Dip	Top	Bottom	L (km)	M <sub>max</sub>
ID	Name	mm/yr	Weight						
1	Aceh	2	1	Strike-slip	90	3	20	230	7.7
2	Seulimeum	2.5	1	Strike-slip	90	3	20	120	7.5
3	Tripa	6	1	Strike-slip	90	3	20	180	7.7
4	Renun	27	1	Strike-slip	90	3	20	220	7.8
5	Toru	24	1	Strike-slip	90	3	20	95	7.4
6	Angkola	19	1	Strike-slip	90	3	20	160	7.6
7	Barumun	4	1	Strike-slip	90	3	20	125	7.5
8	Sumpur	23	1	Strike-slip	90	3	20	35	6.9
9	Sianok	23	1	Strike-slip	90	3	20	90	7.3
10	Sumani	23	1	Strike-slip	90	3	20	60	7.2
11	Suliti	23	1	Strike-slip	90	3	20	95	7.4
12	Siulak	23	1	Strike-slip	90	3	20	70	7.2
13	Dikit	11	1	Strike-slip	90	3	20	60	7.2
14	Ketaun	11	1	Strike-slip	90	3	20	85	7.3
15	Musi	11	1	Strike-slip	90	3	20	70	7.2
16	Manna	11	1	Strike-slip	90	3	20	85	7.3
17	Kumering	11	1	Strike-slip	90	3	20	150	7.6
18	Semangko	5	1	Strike-slip	90	3	20	65	7.2
19	Sunda	5	1	Strike-slip	90	3	20	150	7.6

**Table 3.** Data dan parameter sumber gempa fault untuk daerah Jawa dan sekitarnya.

Fault		Slip-Rate		Sense Mechanism	Dip	Top	Bottom	L (km)	M <sub>max</sub>
ID	Name	mm/yr	Weight						
30	Cimandiri	4	1	Strike-slip	90	3	18	62.2	7.20
31	Opak (Jogja)	2.4	1	Strike-slip	90	3	18	31.6	6.80
32	Lembang	1.5	1	Strike-slip	90	3	18	34.4	6.60
33	Pati	0.5	1	Strike-slip	90	3	18	51.4	6.80
34	Lasem	0.5	1	Strike-slip	90	3	18	114.9	6.50
35	Flores back-arc	28	1	Reverse-slip	45	3	20	504.6	7.80
36	Timor back-arc	30	1	Reverse-slip	45	3	20	468.0	7.50
37	Wetar back-arc	30	1	Reverse-slip	45	3	20	653.0	7.50
38	Sumba normal	10	1	Normal-slip	60	3	18	339.9	8.30
39	South Seram thrust	11	1	Normal-slip	45	3	20	415.5	7.50

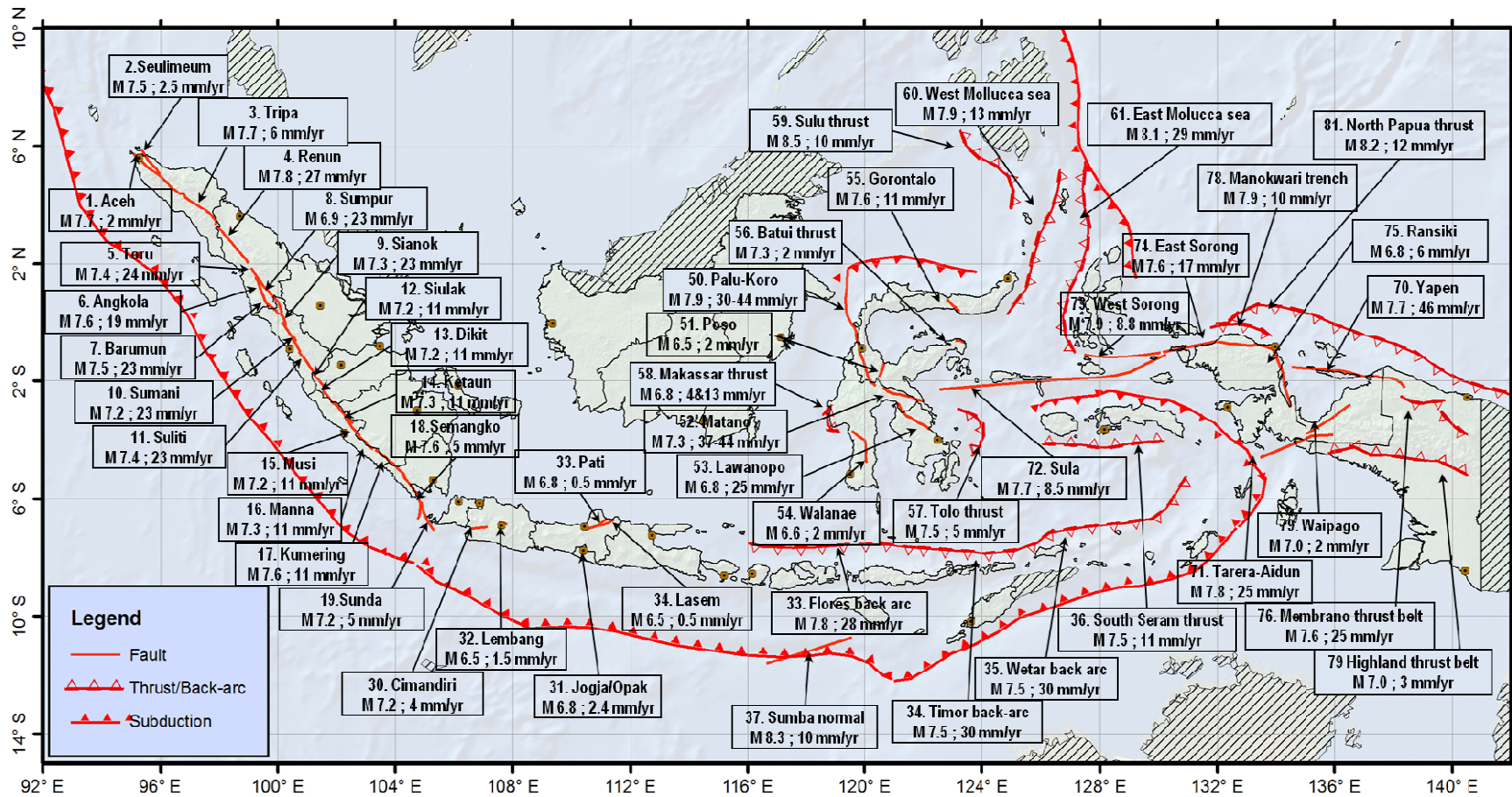
**Table 4.** Data dan parameter sumber gempa fault untuk daerah Sulawesi dan sekitarnya.

Fault		Slip-Rate		Sense Mechanism	Dip	Top	Bottom	L (km)	M <sub>max</sub>
ID	Name	mm/yr	Weight						
50	Palu-Koro	30	0.25	Strike-slip	50	3	18	459	7.94
		35	0.5						
		44	0.25						
51	Poso	2	1	Strike-slip	90	3	18	55	6.93
52	Matano	37	0.5	Strike-slip	90	3	18	541	7.90
		44	0.5						
53	Lawanopo	25	1	Strike-slip	70	3	15	303	7.59
54	Walanae	2	1	Strike-slip	90	3	18	227	7.53
55	Gorontalo	11	1	Strike-slip	80	3	15	93	7.06
56	Batui thrust	2	1	Reverse-slip	40	3	18	48	7.06
57	Tolo thrust	9	0.5	Reverse-slip	25	3	20	220	7.94
		19	0.5						
58	Makassar thrust	4	0.5	Reverse-slip	25	3	20	72	7.46
		13	0.5						
59	Sulu thrust	10	1	Reverse-slip	45	3	18	72	7.19
60	West Molucca sea	13	1	Normal-slip	30	3	30	567	8.47
61	East Molucca sea	29	1	Normal-slip	40	3	30	730	8.47

**Table 5.** Data dan parameter sumber gempa fault untuk daerah Papua dan sekitarnya.

Fault		Slip-Rate		Sense Mechanism	Dip	Top	Bottom	L (km)	M <sub>max</sub>
ID	Name	mm/yr	Weight						
70	Yapen	46	1	Strike-slip	90	3	18	391.4	7.90
71	Tarera Aidun	20	1	Strike-slip	90	3	18	102.2	7.30
72	Sula	8.5	1	Strike-slip	90	3	18	753.6	7.70
73	West Sorong	8.5	1	Strike-slip	90	3	18	292.5	7.90
74	East Sorong	17	1	Strike-slip	90	3	18	420.7	7.60
75	Ransiki	8.5	1	Strike-slip	90	3	18	225.8	7.60
76	West Mamberambo	22	1	Reverse-slip	30	3	20	150.4	7.12
77	East Mamberambo	22	1	Reverse-slip	30	3	20	113.3	7.90
78	Manokwari	10	1	Reverse-slip	20	3	20	218.1	7.90
79	Waipago	2	1	Strike-slip	90	3	20	203.5	6.80
80	Highland thrust belt	10	1	Reverse-slip	20	3	18	522.0	7.20
81	North Papua thrust	12	1	Normal-slip	20	3	20	1176.1	8.20





Gambar 12. Magnitudo maksimum dan *slip-rate* dari sumber-sumber gempa.

## 5.2. Model Sumber Gempa Subduksi

Sumber gempa subduksi adalah model yang didapat dari data seismotektonik yang sudah teridentifikasi dengan baik. Parameter dari model ini meliputi lokasi subduksi yang dituangkan dalam koordinat *latitude* dan *longitude*, kemiringan bidang subduksi (*dip*), *rate*, dan *b-value* dari areal subduksi yang bisa didapatkan dari data gempa historis, serta batas kedalaman area subduksi.

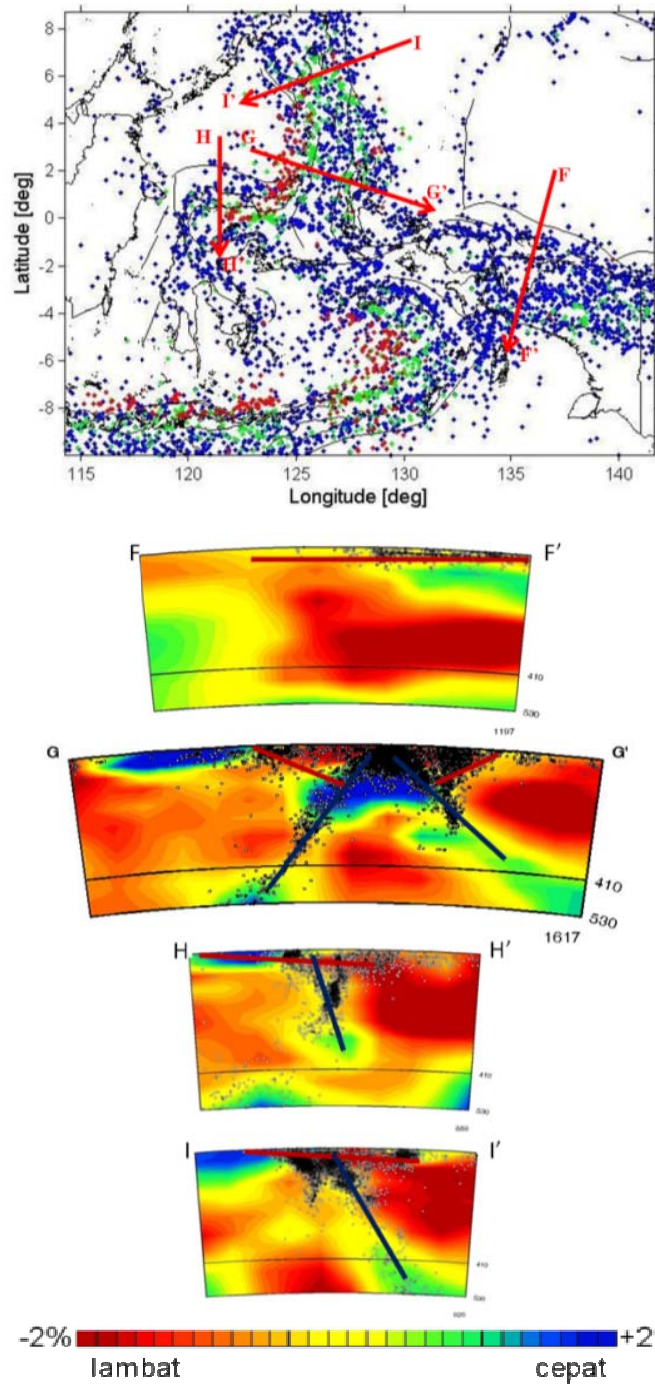
Kemiringan bidang subduksi didapat dari model Tomografi (Gambar 13) yang dikerjakan oleh Widiyantoro (2009) dan dari bantuan *software open source* Z-Map (Weimer, 2001) (Gambar 14). Batas kedalaman maksimum dari sumber gempa ini adalah 50 km atau merupakan daerah *Megathrust*. Untuk daerah yang lebih dalam ( $> 50$  km) diwakili oleh model sumber gempa *deep background* yang merupakan gempa-gempa *benioff*. Sumber-sumber gempa subduksi yang digunakan adalah *Megathrust* segmen Andaman-Sumatra, *Megathrust* segmen Nias (Mid-1) Sumatra, *Megathrust* segmen Siberut (Mid-2) Sumatra, *Megathrust* segmen Jawa, *Megathrust* segmen Sumba, *Megathrust* segmen Timor, *Megathrust* segmen Laut Banda, *Megathrust* segmen Utara Sulawesi, dan *Megathrust* segmen Pilipina.

Perhitungan nilai-*b* (*b-value*) untuk sumber gempa subduksi dilakukan dengan cara mengambil data-data gempa historis yang ada di daerah *Megathrust* tersebut, kemudian dilakukan analisis statistik dengan model Maximum Likelihood (Aki, 1965). Contoh hasil dari analisisnya bisa dilihat pada Gambar 15 untuk segmen Andaman & Nias Sumatra.

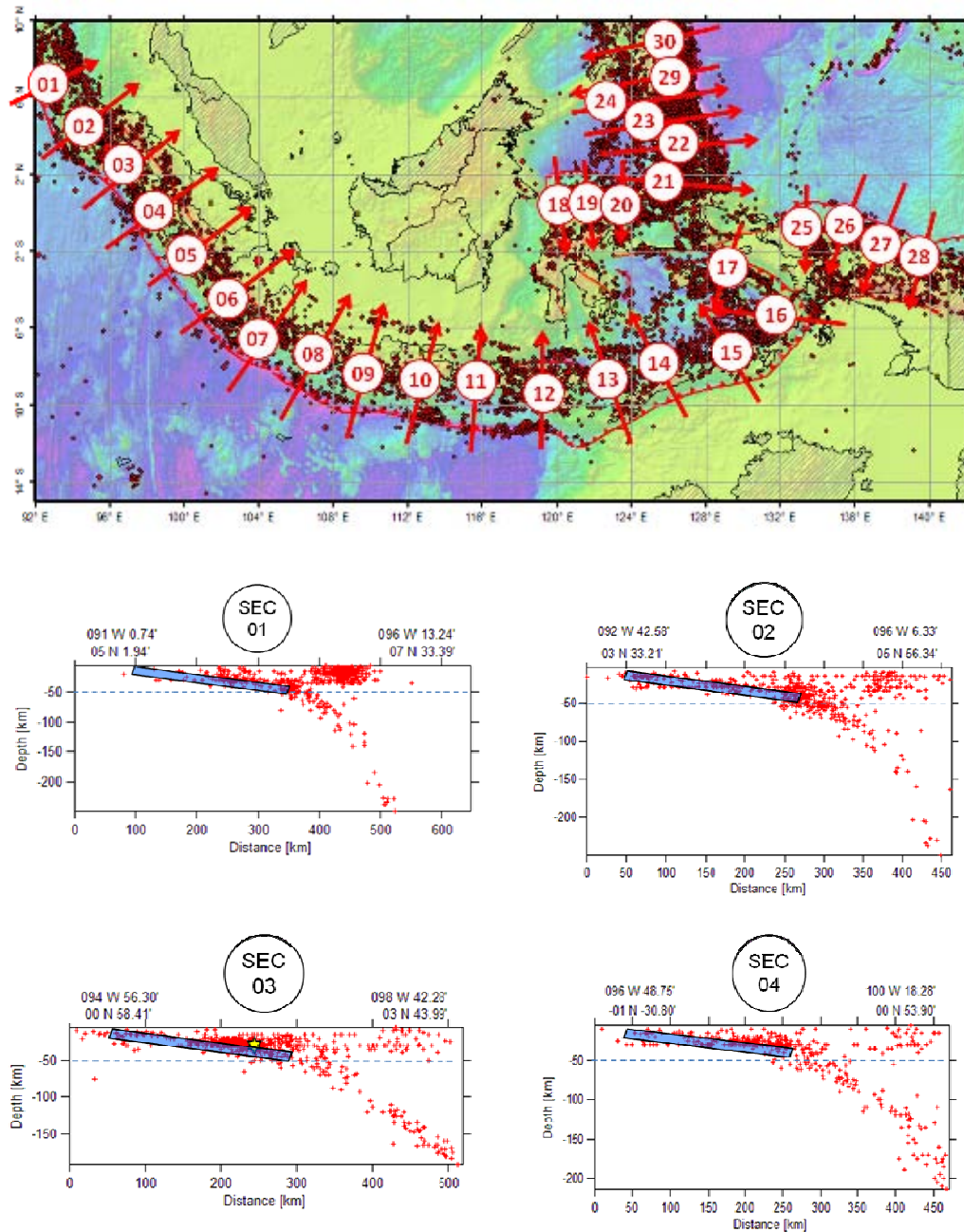
Nilai magnituda maksimum, *a-b value* serta besarnya  $M_{max}$  historis untuk sumber gempa subduksi *interface* atau *Megathrust* yang banyak mempengaruhi nilai kegempaan wilayah Indonesia bisa dilihat pada Tabel 6. Parameter dan pemodelan segmen-segmen subduksi tersebut diatas bisa dilihat pada Gambar 16.

**Tabel 6.** Data dan parameter sumber gempa subduksi (*Megathrust*).

No	Megathrust	$M_{max}$ History	<i>b-val</i>	<i>a-val</i>	$M_{max}$ (Desain)	
					GR	Char
1	Andaman-Sumatra	9.2 (26-12- 2004)	0.826	4.69	8.0	9.2
2	Nias (Mid-1 Sumatra)	8.7 (28-03-2005)	0.878	4.71	8.7	8.7
3	Siberut (Mid-2 Sumatra)	8.5 (12-09-2007)	0.970	5.35	8.5	8.5
4	Southern Sumatra	7.9 (04-06-2000)	1.050	5.76	8.2	8.2
5	Java	8.1 (27-02-1903)	1.100	6.14	8.1	8.1
6	Sumba	7.8 (11-08-1937)	1.200	6.81	7.8	-
7	Timor	7.9 (20-10-1938)	1.600	9.09	7.9	-
8	North Banda Sea	7.9 (01-03-1948)	1.200	7.26	7.9	-
9	South Banda Sea	7.1 (23-04-1964)	1.340	7.56	7.0	-
				7.56	7.4	-
10	Northern Sulawesi	7.9 (01-01-1996)	0.914	4.82	8.2	-
11	Philippine	8.2 (14-04-1924)	0.878	4.64	8.2	-

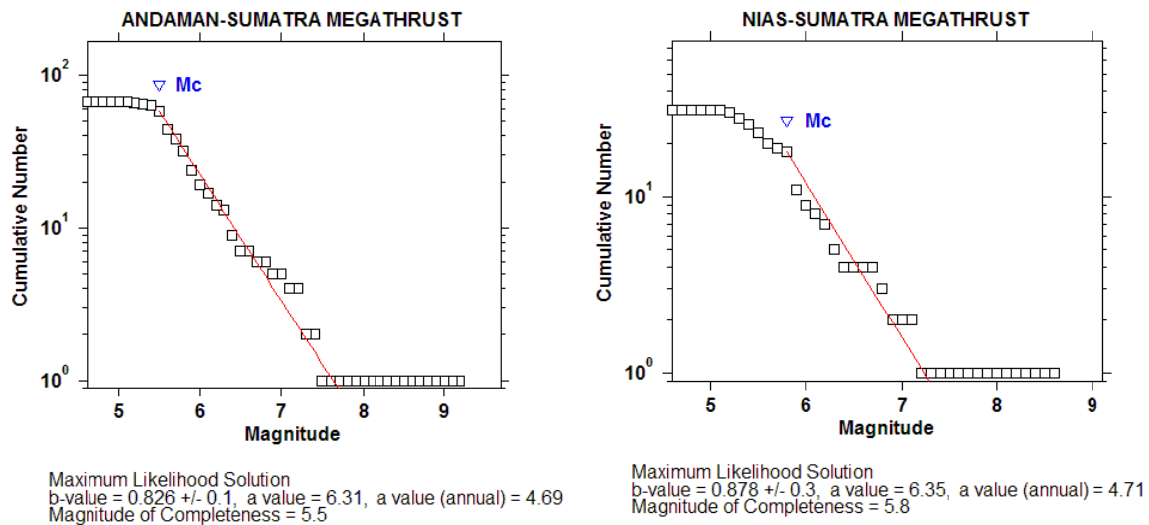


**Gambar 13.** Lokasi potongan melintang segmen subduksi Utara Sumatra, Laut Maluku, Laut Pilipina dan Papua dengan data gempa yang sudah direlokasi serta interpretasi sudut subduksi Papua (F-F'), Laut Maluku (G-G'), Utara Sulawesi (H-H'), dan Laut Pilipina (I-I') berdasarkan tomogram seismik gelombang P (Widiyantoro, 2009) dari data hiposenter hasil relokasi (Engdahl *et al.*, 2007)

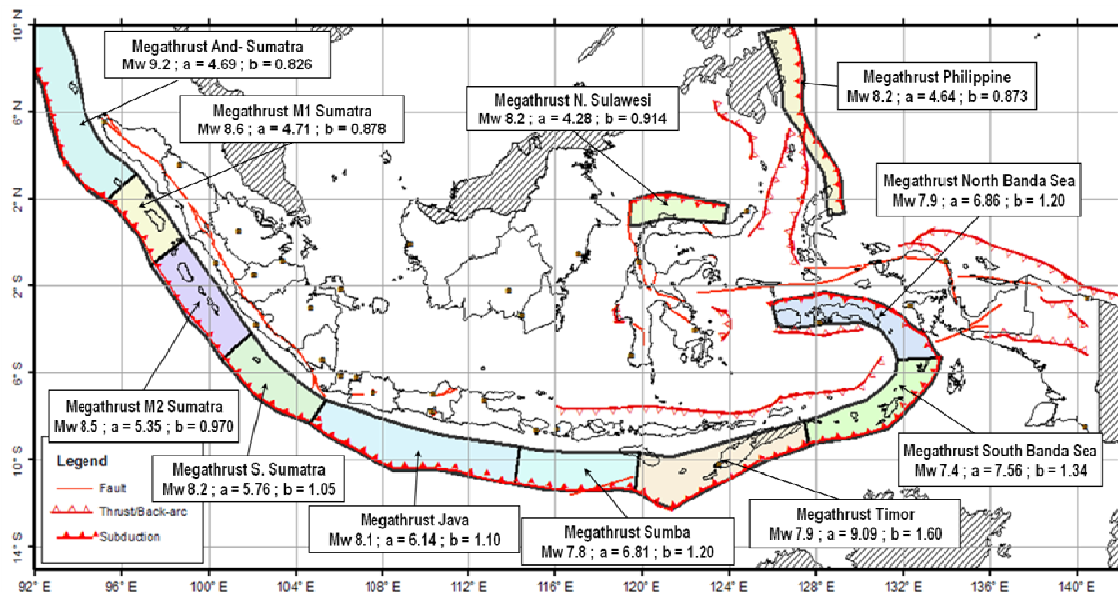


**Gambar 14.** Lokasi potongan melintang subduksi (*Megathrust*) dengan data gempa yang sudah direlokasi (Engdahl *et al.*, 2007) dengan software Z-Map (Weimer, 2001) serta interpretasi sudut subduksi (*Megathrust*) Sumatra.





**Gambar 15.** Hasil analisis  $a$  &  $b$ -value untuk segmen Andaman-Sumatra dan Nias (Mid 1 Sumatra) *Megathrust*.



**Gambar 16.** Model segmentasi dan parameter sumber gempa subsuksi (*Megathrust*) Wilayah Indonesia.

### 5.3. Model Sumber Gempa Background (*Gridded Seismicity*)

Model *gridded (smoothed) seismicity* digunakan untuk mengestimasi *rate* dari kejadian gempa sedang yang akan datang di daerah fault dan gempa-gempa acak di luar fault (Petersen *et al.*, 2008). Model ini memprediksikan bahwa kejadian gempa yang lebih besar kemungkinan dapat terjadi di daerah sekitar gempa-gempa kecil sampai sedang yang telah terjadi sebelumnya. Oleh karena itu, pada daerah yang data *fault*-nya belum teridentifikasi dengan jelas, tetapi di daerah tersebut mempunyai sejarah kejadian gempa, maka model ini sangat sesuai. Kejadian Gempa Jogja tahun 2006 dengan magnituda  $M = 6.4$  adalah salah satu

contoh, dimana di daerah tersebut sebelumnya teridentifikasi faultnya belum jelas dan gempa historis yang terjadi hanya gempa-gempa kecil saja.

Model *gridded seismicity* digunakan untuk sumber gempa *background* berdasarkan pada laju gempa (*seismicity rates*) secara *spatially smoothed* (Frankel, 1995). *Seismicity rate* dari model ini didapatkan dari perhitungan gempa di *grid cell* dengan dimensi  $0.1^\circ$  *longitude* kali  $0.1^\circ$  *latitude*. Perhitungan ini menggambarkan kemungkinan maksimum estimasi dari  $10^a$  (Weichert, 1980) untuk sel tersebut untuk gempa di atas  $M_{ref}$ . Nilai grid  $n_i$  lalu dilakukan *smoothed spatially* dengan mengalikan dengan fungsi Gaussian bersama-sama dengan *corelation distance c*. Untuk tiap sel  $i$ , nilai *smooth*  $\hat{n}_i$  diperoleh dari

$$\hat{n}_i = \frac{\sum_j n_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}}{\sum_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}} \quad 5.1$$

dimana nilai  $\hat{n}_i$  dinormalisasi untuk mempertahankan jumlah total peristiwa,  $\Delta_{ij}$  adalah jarak antara sel ke  $i$  dan sel ke  $j$ . Penjumlahan diambil dalam seluruh  $j$  dalam jarak  $3c$  dari sel  $i$ . *Rate* tahunan  $\lambda(u > u_0)$  terlampaui dari gerakan tanah  $u_0$  pada site tertentu ditentukan dari jumlah, dalam keseluruhan jarak dan magnituda seperti ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini.

$$\lambda(u > u_0) = \sum_k \sum_l 10^{\left[\log(N_k/T) - b(M_l - M_{ref})\right]} P(u > u_0 | D_k, M_l) \quad 5.2$$

dimana,  $N_k$  merupakan total dari nilai  $\hat{n}_i$  untuk sel-sel didalam penjumlahan jarak tertentu dari *site*.  $T$  adalah jumlah tahun yang merupakan jumlah tahun katalog yang digunakan untuk menentukan  $N_k$ . Nilai parameter- $b$  diambil seragam dalam keseluruhan wilayah.  $P(u > u_0 | D_k, M_l)$  adalah probabilitas bahwa  $u$  pada *site* akan terlampaui  $u_0$ , untuk satu gempa pada jarak  $D_k$ , dengan magnituda  $M_l$ . Faktor pertama dalam penjumlahan adalah *rate* tahunan dari gempa-gempa dalam *bin* jarak  $k$  dan *bin* magnituda  $l$ .

Model *gridded* ini dalam analisisnya dibagi dalam lima interval kedalaman, yaitu *shallow background source* (0–50 km), dan *deep background source* (50–100 km), (100–150 km), (150–200 km) dan (200–300 km).

## 6. Fungsi Atenuasi

Dengan tidak tersedianya data untuk menurunkan suatu fungsi atenuasi di wilayah Indonesia, pemakaian fungsi atenuasi yang diturunkan dari wilayah lain tidak dapat dihindari. Pemilihan fungsi atenuasi ini didasarkan pada kesamaan kondisi geologi dan tektonik dari wilayah dimana fungsi atenuasi itu dibuat. Fungsi atenuasi yang digunakan sebagian besar sudah menggunakan *Next Generation Attenuation* (NGA), dimana atenuasi ini dalam pembuatannya sudah menggunakan data gempa global (*worldwide data*). Dalam analisis studi ini, rumus atenuasi yang digunakan untuk masing-masing model sumber gempa yaitu:

- a. Sumber gempa *shallow crustal*, untuk model sumber gempa *fault* dan *shallow background*:
  - (1) Boore-Atkinson NGA. (Boore dan Atkinson, 2008)
  - (2) Campbell-Bozorgnia NGA. (Campbell dan Bozorgnia, 2008)

- (3) Chiou-Youngs NGA. (Chiou dan Youngs, 2008)
- b. Sumber gempa subduksi *interface (Megathrust)*, untuk model sumber gempa subduksi:
  - (1) *Geomatrix subduction* (Youngs et al., SRL, 1997)
  - (2) Atkinson-Boore BC *rock and global source subduction*. (Atkinson dan Boore, 2003)
  - (3) Zhao et al., *with variable  $V_{s-30}$* . (Zhao et al., 2006)
- c. Sumber gempa Benioff (*deep intraslab*), untuk model sumber gempa *deep background*:
  - (1) AB *intraslab seismicity Cascadia region BC-rock condition*. (Atkinson-Boore, Cascadia 2003)
  - (2) *Geomatrix slab seismicity rock*, 1997 srl. July 25 2006. (Youngs et al., 1997)
  - (3) AB 2003 *intraslab seismicity worldwide data region BC-rock condition*. (Atkinson-Boore, Worldwide 2003)

## 7. Logic Tree

Pendekatan dengan menggunakan *logic tree* memungkinkan untuk penggunaan beberapa alternatif metode atau model dengan menentukan faktor bobot yang menggambarkan persentase kemungkinan keakuratan relatif suatu model terhadap model lainnya. Model ini terdiri dari rangkaian nodal (*node*) yang direpresentasikan sebagai titik dimana model dispesifikan dan cabang yang merepresentasikan model yang berbeda yang dispesifikasikan pada tiap nodal. Penjumlahan probabilitas dari semua cabang yang dihubungkan dengan satu nodal tertentu nilainya harus sama dengan 1.

Dalam menggunakan *logic tree*, satu analisis resiko gempa diselesaikan untuk kombinasi model dan/atau parameter yang berkaitan dengan tiap ujung cabang. Hasil tiap analisis diberikan oleh nilai bobot kemungkinan relatif dari kombinasi cabang, dengan hasil akhir diambil sebagai penjumlahan dari nilai bobot masing-masing.

Model *logic tree* yang dipakai disesuaikan dengan model sumber gempa yang digunakan. Model untuk sumber gempa sesar, subduksi dan *background* seperti yang terlihat pada Gambar 17, 18 dan 19.

Pemakaian *logic tree* dalam PSHA sangat diperlukan akibat adanya faktor ketidakpastian dalam pengelolaan data untuk analisis *seismic hazard*. Dengan adanya model *treatment* ini, data, parameter sumber gempa, dan model atenuasi yang digunakan bisa diakomodir dengan bobot sesuai dengan ketidakpastiannya.

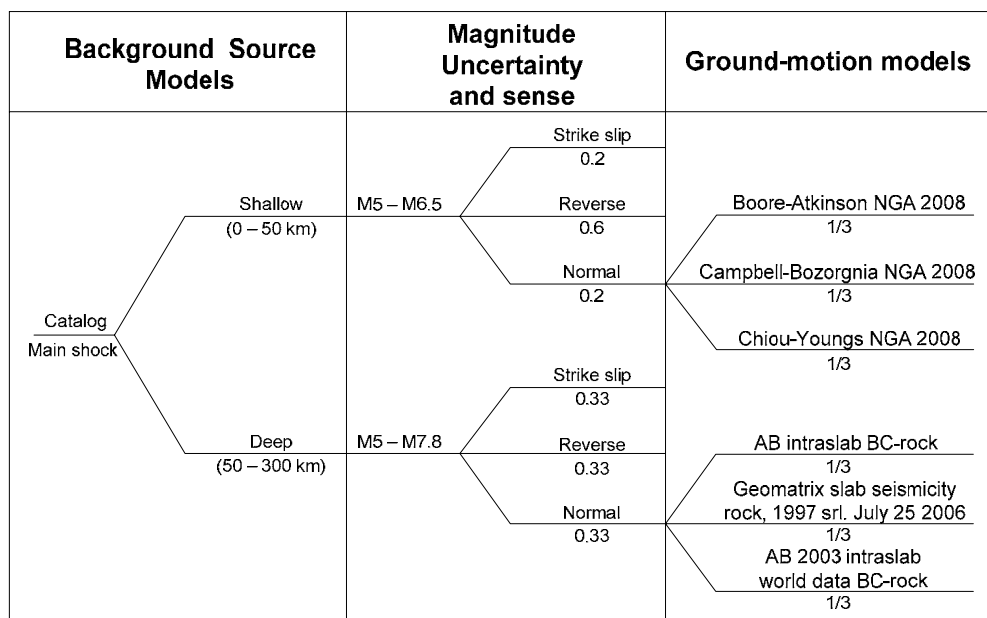


Fault Models	Magnitude uncertainty	Ground-motion models
Fault Trace <div>             Characteristic 0.66             <div> <math>M_{\max} - 0.2</math> 0.2               <math>M_{\max}</math> 0.6               <math>M_{\max} + 2</math> 0.2             </div>             Gutenberg Richter 0.34             <div> <math>M_{6.5} - (M_{\max} - 0.2)</math> 0.2               <math>M_{6.5} - M_{\max}</math> 0.6               <math>M_{6.5} - (M_{\max} + 0.2)</math> 0.2             </div> </div>		
		Boore-Atkinson NGA 2008 1/3
		Campbell-Bozorgnia NGA 2008 1/3
		Chiou-Youngs NGA 2008 1/3
		Boore-Atkinson NGA 2008 1/3
		Campbell-Bozorgnia NGA 2008 1/3
		Chiou-Youngs NGA 2008 1/3

**Gambar 17.** Model *logic tree* untuk sumber gempa sesar (*Fault*).

Subduction Models	Magnitude uncertainty	Ground-motion models
Subd Trace <div>             Characteristic 0.66             <div> <math>M_{\max} - 0.2</math> 0.2               <math>M_{\max}</math> 0.6               <math>M_{\max} + 2</math> 0.2             </div>             Gutenberg Richter 0.34             <div> <math>M_{7.0} - (M_{\max} - 0.2)</math> 0.2               <math>M_{7.0} - M_{\max}</math> 0.6               <math>M_{7.0} - (M_{\max} + 0.2)</math> 0.2             </div> </div>		
		Youngs <i>et al.</i> , SRL, 1997 0.25
		Atkinson-Boore, 2003 0.25
		Zhao <i>et al.</i> , Vs30, 2006 0.5
		Youngs <i>et al.</i> , SRL, 1997 0.25
		Atkinson-Boore, 2003 0.25
		Zhao <i>et al.</i> , Vs30, 2006 0.5

**Gambar 18.** Model *logic tree* untuk sumber gempa subduksi (*Megathrust*).



**Gambar 19.** Model *logic tree* untuk sumber gempa *background*.

## 8. Hasil Perhitungan

Peta hasil studi PSHA untuk percepatan puncak (PGA), spektra 0.2 detik, dan 1.0 detik di batuan dasar untuk kemungkinan terlampaui 10% dalam 50 tahun (atau gempa 475 tahun) dapat dilihat dalam Gambar 20-22. Sedangkan percepatan puncak (PGA), spektra 0.2 detik, dan 1.0 detik di batuan dasar untuk kemungkinan terlampaui 2% dalam 50 tahun (atau gempa 2475 tahun) dapat dilihat dalam Gambar 23-25.

Tim Revisi Peta Gempa Indonesia telah berhasil mempresentasikan hasil peta zonasi gempa Indonesia dalam GIS yang mudah untuk diakses dan telah menyiapkan dukungan teknis yang diperlukan untuk merekomendasikan besarnya beban gempa (respon-spektra desain) untuk perencanaan bangunan gedung yang nantinya akan difasilitasi untuk dapat diakses melalui *website*.

Selain itu, saat ini Tim juga sedang menyiapkan laporan detail seluruh hasil kajian PSHA yang berisi dukungan dokumen masukan-masukan geologi gempa dan pemetaan patahan aktif, seismologi dan tomografi, deformasi crustal, gempa background, dan metodologi PSHA, dan hasil lengkap peta zonasi gempa Indonesia.

## 9. Rekomendasi

Sehubungan dengan rekomendasi untuk jangka pendek, menengah, dan panjang, berikut diberikan beberapa rekomendasi Tim Revisi Peta Gempa yang merupakan penyempurnaan dari rekomendasi sebelumnya yang dihasilkan dari lokakarya sehari “Pengembangan Peta Zonasi Gempa Indonesia Terpadu untuk Membangun Kesiapsiagaan Masyarakat” pada 21 Juli 2009 yang diselenggarakan oleh Kementerian Riset dan Teknologi di Jakarta.

Rekomendasi Rencana Aksi Jangka Pendek sampai Menengah (lima tahun ke depan), yaitu:

- a. Investigasi microseismik untuk pemetaan-patahan yang belum teridentifikasi

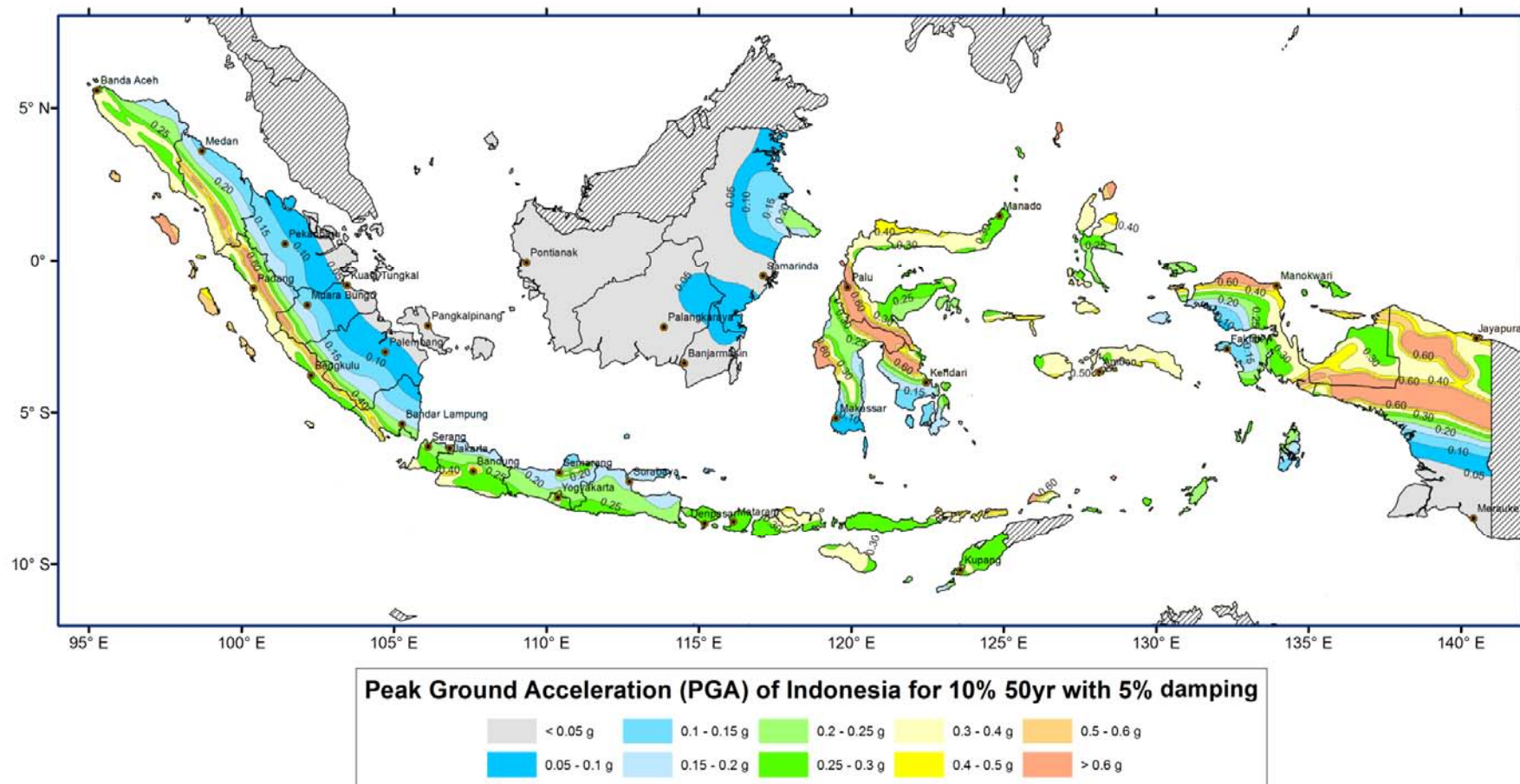
- b. Mempercepat pelaksanaan pemasangan jaringan *strong-motion accelerometer* untuk dapat mengerti karakteristik gempa tersebut dan mengembangkan database *input motion*.
- c. Studi lanjutan mengenai karakteristik gempa beserta studi parameter gempa untuk tiap zona, baik untuk gempa patahan dangkal maupun gempa subduksi.
- d. Pengembangan fungsi atenuasi yang didasarkan pada rekaman *strong-ground motion* gempa-gempa Indonesia.
- e. Melakukan kajian secara berkelanjutan yang diperlukan untuk memberikan masukan dalam upaya jangka menengah penyempurnaan peta gempa Indonesia secara berkala setiap lima tahun sekali, dengan temuan-temuan patahan aktif, pengukuran GPS, dan fungsi atenuasi Indonesia.

Rekomendasi Rencana Aksi Jangka Panjang (2010 dan selanjutnya):

- a. Melakukan riset terhadap patahan-patahan yang dicurigai aktif, namun belum dimengerti karakteristik dan parameter-parameter seismiknya.
- b. Memasang dan memonitoring lebih banyak GPS zona sesar-sesar aktif sepanjang pulau-pulau di Indonesia untuk mendapatkan informasi deformasi *crustal* berupa data kecepatan pergerakan (*slip-rate*) lempeng dan patahan.
- c. Memprogramkan dan melaksanakan penelitian jangka panjang mengenai analisis dan pengolahan data-data *strong motion* untuk pengembangan fungsi atenuasi Indonesia (subduksi dan patahan dangkal) dalam upaya menyempurnakan peta zonasi gempa dalam jangka panjang.
- d. Melakukan penelitian karakteristik getaran gempa hasil pencatatan *strong motion* dari *accelerometer* terpasang dan melakukan kajian perambatan gelombang gempa dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk berbagai klasifikasi *site* serta menemukan faktor-faktor amplifikasi seismik untuk rekomendasi respon spektra desain untuk bangunan dan infrastruktur.
- e. Mengidentifikasi adanya dan pengaruh struktur basin terhadap getaran gempa pada kawasan-kawasan pemukiman dan kawasan-kawasan pengembangan industri. Melakukan penelitian dengan melakukan kajian perambatan gelombang gempa dengan mempertimbangkan struktur basin secara 3-D.

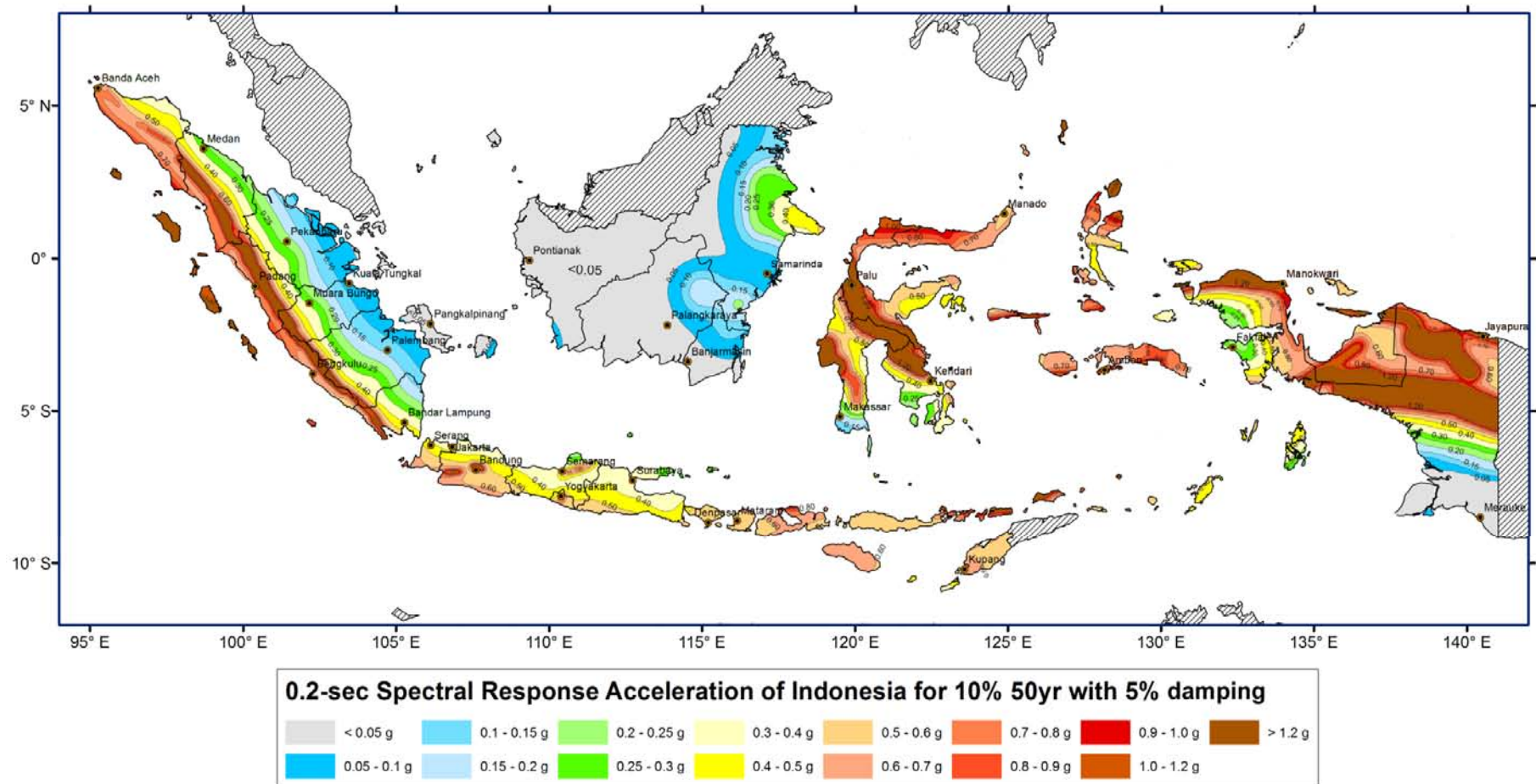
### ***Acknowledgments***

Tim Revisi Peta Gempa Indonesia mengucapkan terima kasih atas dukungan dan bantuan yang diberikan selama studi ini kepada Departemen Pekerjaan Umum, Deputy Pendayagunaan dan Pemasyarakatan Iptek - Kementerian Riset dan Teknologi, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) melalui *AIFDR (Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction)*, dan USGS atas dukungan *software* dan diskusi teknis.



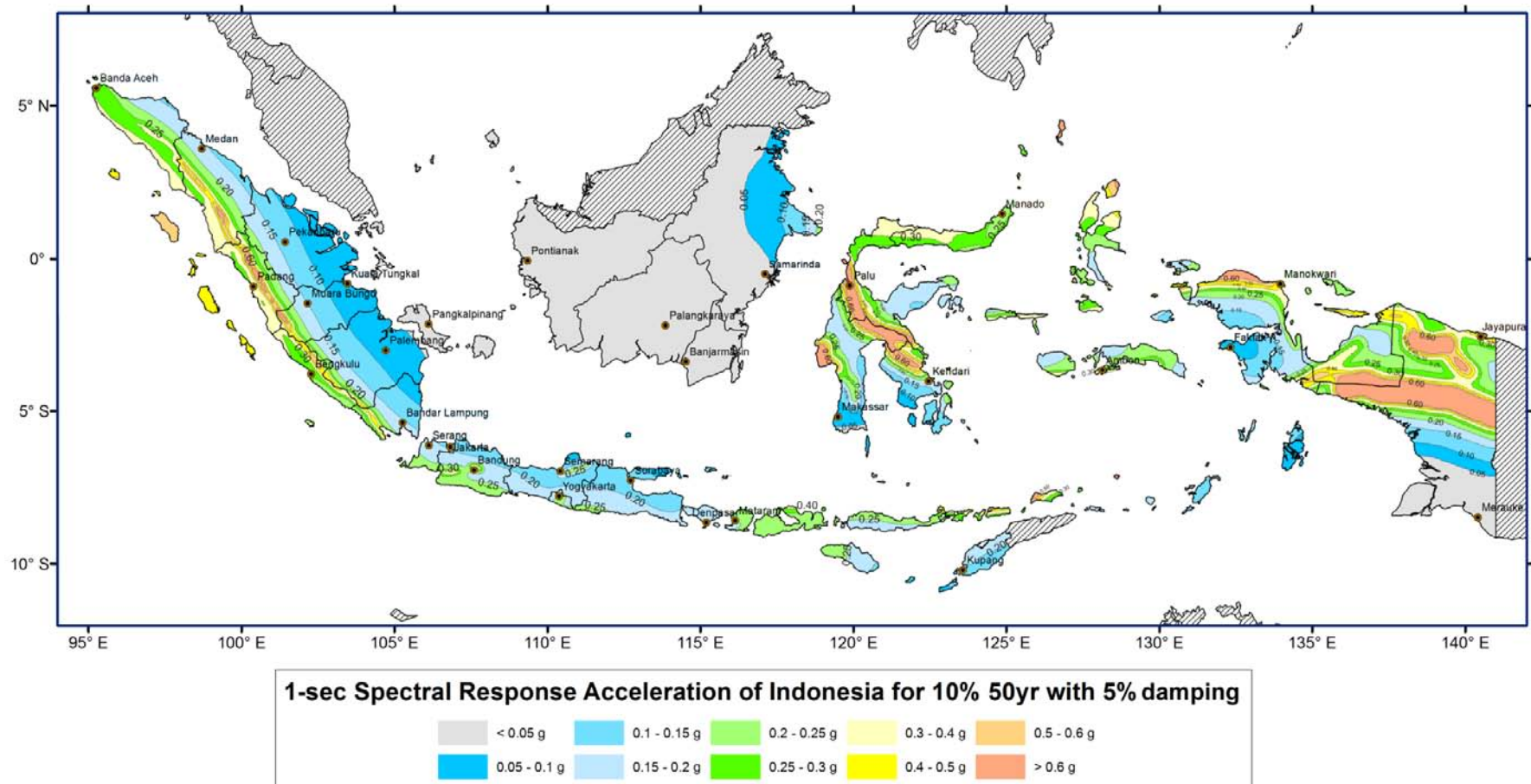
Dibuat dengan data dari Revisi Data Seismik Indonesia 2010.  
 Didukung oleh: Departemen Pekerjaan Umum, Kementerian Negara Riset dan Teknologi, dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR) dan software dari USGS. June 2010

**Gambar 20.** Peta *hazard* gempa Indonesia di batuan dasar pada kondisi PGA ( $T = 0$  detik) untuk 10% *PE* 50 tahun.



Disusun oleh: Tim Riset dan Simulasi Indonesia 2010.  
 Didukung oleh: Departemen Pekerjaan Umum, Kementerian Negara Riset dan Teknologi, dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR) dan software dari USGS. June 2010

**Gambar 21.** Peta *hazard* gempa Indonesia di batuan dasar pada kondisi spektra  $T = 0.2$  detik untuk 10%  $PE$  50 tahun.

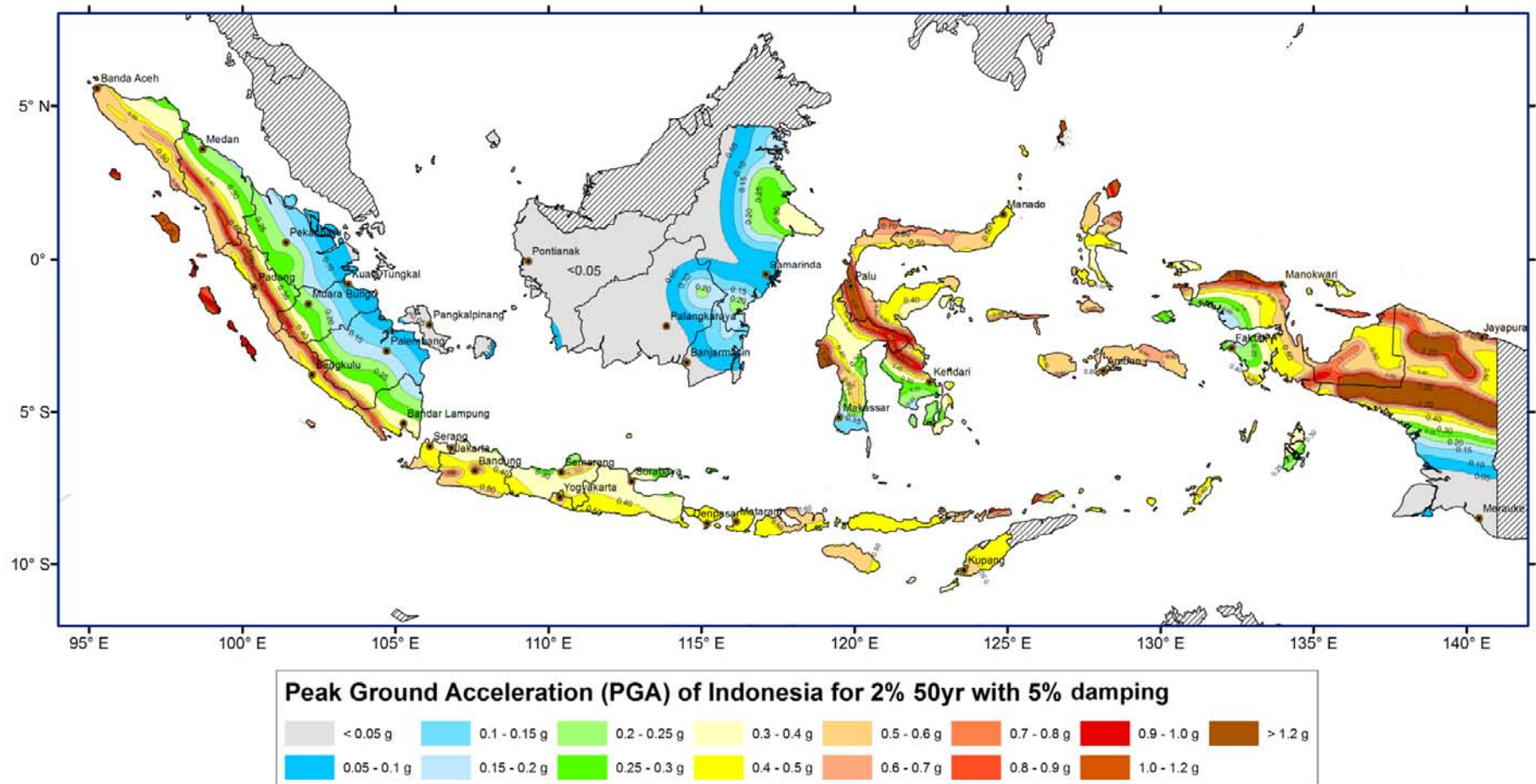


Seismological Survey of Indonesia, 2010.

Didukung oleh: Departemen Pekerjaan Umum, Kementerian Negara Riset dan Teknologi, dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR) dan software dari USGS, June 2010

**Gambar 22.** Peta *hazard* gempa Indonesia di batuan dasar pada kondisi spektra  $T = 1.0$  detik untuk 10% *PE* 50 tahun .



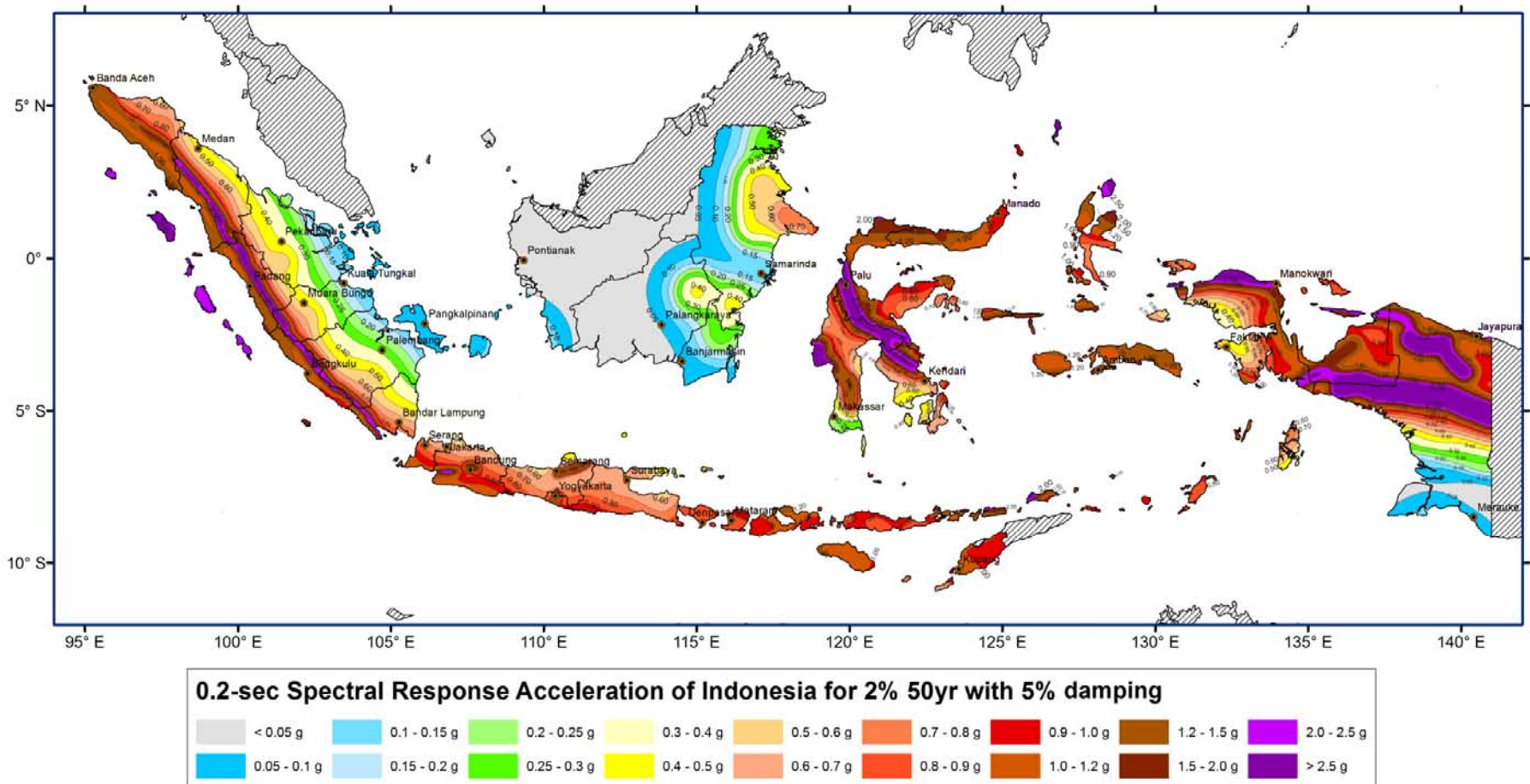


Dikembangkan oleh Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010.

Didukung oleh: Departemen Pekerjaan Umum, Kementerian Negara Riset dan Teknologi, dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR) dan software dari USGS. June 2010

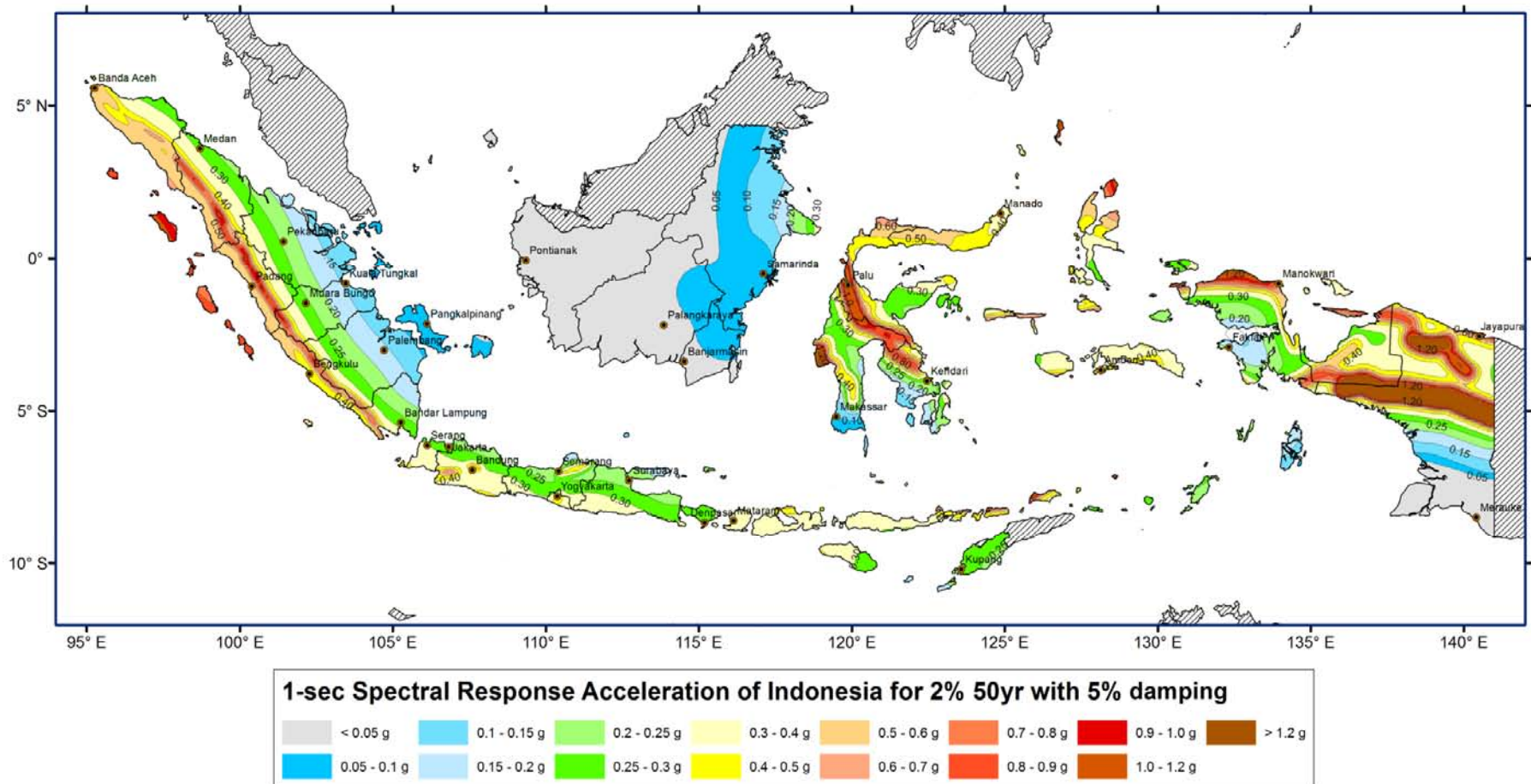
**Gambar 23.** Peta *hazard* gempa Indonesia di batuan dasar pada kondisi PGA ( $T = 0$  detik) untuk 2% *PE* 50 tahun .





Dikembangkan oleh Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010.  
 Didukung oleh: Departemen Pekerjaan Umum, Kementerian Negara Riset dan Teknologi, dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR) dan software dari USGS. June 2010

**Gambar 24.** Peta *hazard* gempa Indonesia di batuan dasar pada kondisi spektra  $T = 0.2$  detik untuk 2% *PE* 50 tahun.



Dikembangkan oleh Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010.  
 Didukung oleh: Departemen Pekerjaan Umum, Kementerian Negara Riset dan Teknologi, dan Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR) dan software dari USGS. June 2010

**Gambar 25.** Peta *hazard* gempa Indonesia di batuan dasar pada kondisi spektra  $T = 1.0$  detik untuk 2% *PE* 50 tahun.

## Referensi

- Aki K., (1965), *Maximum Likelihood Estimate of b value in The Formula  $\log N = a-bM$  and Its Confidence Limits*. Bull. Earthq. Res. Inst. 43,237-240.
- Arabasz, W.J. dan Robinson, R., (1976), *Microseismicity and Geologic Structure in the Northern South Island, New Zealand*, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, Vol. 19, No. 2, pp. 561-1367.
- Asrurifak M., Irsyam M., Budiono B., Triyoso W., Hendriyawan, Widiadnyana Merati dan I Wayan Sengara, (2009), *Peta Spektra Hazard Indonesia Dengan Menggunakan Model Gridded Seismicity Untuk Sumber Gempa Background*, Seminar HAKI “Menuju Praktek Konstruksi Yang Benar” Jakarta, 11-12 Agustus 2009.
- Asrurifak M., Irsyam M., Budiono B., Triyoso W., (2009), *Peta Hazard Sumatra di Permukaan Untuk Berbagai kondisi Tanah Dengan Model Sumber Gempa 3D dan Faktor Amplifikasi Mengikuti IBC-2009*, Prosiding Seminar & PIT XII HATTI, Grand Inna Bali Beach Hotel, Bali, 5-5 November 2009.
- Asrurifak M., Irsyam M., Budiono B., Triyoso W., dan Hendriyawan., (2010), *Development of Spectral Hazard Map for Indonesia with a Return Period of 2500 Years using Probabilistic Method*, J. Civil Engineering Dimension, Vol. 12, No. 1, March 2010, 52-62 ISSN 1410-9530 print / ISSN 1979-570X online.
- Atkinson, G.M., dan Boore, D.M., (2007), *Erratum—Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America*, Bulletin of the Seismological Society of America, v. 97, p. 1032.
- Atkinson, G.M., dan Boore, D.M., (2003), *Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 4, pp 1703-1729.
- Atkinson, G., dan Boore, D., (1995), *New ground motion relations for eastern North America*, Bull. Seismol. Soc. Am. 85, 17– 30.
- Beca Carter Hollings & Ferner, (1979), *Indonesian Earthquake Study*, New Zealand Bilateral Assistance Programme to Indonesia, Vol. 1-7.
- Bird, P., (2003), *An updated digital model of plate boundaries: Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 4, no. 3, 1027, doi:10.1029/2001GC000252, ([http://element.ess.ucla.edu/publications/2003\\_PB2002/2001GC000252.pdf](http://element.ess.ucla.edu/publications/2003_PB2002/2001GC000252.pdf)).
- Boore, D.M., and Atkinson, G.M., (2008), *Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s*: Earthquake Spectra, v. 24, no. 1..
- Campbell, K.W., and Bozorgnia, Y., (2008), *Ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10.0 s*: Earthquake Spectra, v. 24, no. 1.
- Chiou, B., and Youngs, R., (2008), *A NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra*: Earthquake Spectra, v. 24, no. 1.

- Cornell, C.A., (1968), *Engineering Seismic Risk Analysis*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58.
- Crouse, C.B., (1991), *Ground Motion Attenuation Equations for Earthquake on the Cascadia Subduction Zone*, Earthquake Spectra, 7(2), 201-236.
- Departemen Pekerjaan Umum, Ditjen Cipta Karya, Direktorat Masalah Bangunan, (1983), *Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia untuk Gedung*.
- EERI Committee on Seismic Risk, (1989), *The Basic of Seismic Risk Analysis*, Earthquake Spectra, 5(4), 675-702.
- Engdahl, E. R., Villasenor, A., DeShon, H. R., dan 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. Seismol. Soc. Am., 97, S43-S61.
- Firmansyah, J. dan Irsyam M., (1999), *Development of Seismic Hazard Map for Indonesia*, Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan di Indonesia, ITB, Indonesia.
- Firmansyah, J. dan Irsyam M., (2001), *Development of Attenuation Model and Engineering Practice for Confident Level Acceptance Criteria*, Research Report to BP-Arco Bali North, LAPI ITB.
- Frankel, A., (1995), *Mapping seismic hazard in the central and eastern United States*, Seismological Research Letters, v. 66, n.4 p. 8-21.
- Frankel, A.D., Petersen, M.D., Mueller, C.S., Haller, K.M., Wheeler, R.L., Leyendecker, E.V., Wesson, R.L., Harmsen, S.C., Cramer, C.H., Perkins, D.M., dan Rukstales, K.S., (2002), *Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps*, U.S. Geological Survey Open-File Report 02-420.
- Gardner, J.K., dan Knopoff L., (1974), *Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?*, Bulletin of the Seismological Society of America, v. 64, p. 1363–1367.
- Genrich, J., Y. Bock, R. McCaffrey, E. Calais, C. Stevens, dan C. Subarya, (1996), *Accretion of the southern Banda arc to the Australian plate margin determined by Global Positioning System measurements*, Tectonics, 15, 288-295.
- Gutenberg, B. dan Richter, C., (1944). *Frequency of earthquakes in California*. Bull. Seism. Soc. Am., 34:185–188.
- Hall, R, dan Wilson, M.E.J., (2000), *Neogene sutures in eastern Indonesia*, Journal of Asian Earth Sciences 18 (2000) 781–808.
- Harmsen, S., (2007), *USGS Software for Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*, Draft Document, (unpublished).
- Idriss, I.M, (1985), *Evaluating Seismic Risk Engineering Practic*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 1, 255-320.

- Idriss, I.M. (1990), *Response of Soft Soil Sites During Earthquake*, in J.M. Duncan, ed., Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, BiTech Publishers, Vancouver, British Columbia, Vol. 2.
- International Code Council, Inc., (2000), *Internasional Building Code*.
- International Code Council, Inc., (2009), *Internasional Building Code*.
- International Conference of Building Official, (1997), *Uniform Building Code*, Volume 2.
- Irsyam, M., Subki B., Himawan A., Suntoko H., (1999), *Analisis Seismisitas untuk Semenanjung Muria*, Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Gempa, Pemanfaatan Perkembangan Rekayasa Kegempaan dalam Rangka Penyempurnaan Peraturan dan Peningkatan Kepedulian Masyarakat Terhadap Bencana Gempa di Indonesia, hal VI-9-VI-20.
- Irsyam, M., Firmansjah, J., Wangsadinata, W., and Surahman A. (2000) "Development of synthetic ground motions for bedrock of Jakarta", *Proc. 12th WCEE*, Auckland, Paper No 1726.
- Irsyam, M., Hendriyawan, Dangkua D.T., Kertapati E.K., Hoedajanto D., Hutapea B.M., Boen T., Petersen M.D., (2007), *Usulan Revisi Peta Bencana Kegempaan Wilayah Indonesia untuk Pulau Jawa*, Prosiding Kolokium Hasil Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Bandung.
- Irsyam M., Hoedajanto D., Kertapati E, Boen T., Petersen M.D., Dangkua D., Asrurifak M., (2007), *Usulan Revisi Peta Hazard Kegempaan Wilayah Indonesia*, Paper Seminar HAKI, Konstruksi Tahan Gempa Di Indonesia, Jakarta, 21-22 Agustus 2007.
- Irsyam, M., Dangkua, D.T., Hendriyawan, Hoedajanto, D., Hutapea, B.M., Kertapati, E., Boen, T., dan Petersen, M.D., (2008), *Proposed Seismic Hazard Maps of Sumatra and Java Islands and Microzonation Study of Jakarta City, Indonesia*, Journal of Earth System Science, accepted for publication.
- Irsyam, M., Hendriyawan, Dangkua D.T., Kertapati E.K, Hutapea B.M., Sukamta D., (2008), *Usulan Ground Motion untuk Batuan Dasar Kota Jakarta dengan Perioda Gempa 500 Tahun untuk Analisis Site Spesific Response Spectra*, Prosiding Konferensi HAKI, Jakarta 19-20 Agustus.
- Irsyam M., Asrurifak M., Hendriyawan, Budiono B., Triyoso W., Hutapea B., (2008), *Development of Spectral Hazard Maps for Proposed Revision of Indonesia Seismic Building Code*, 3<sup>rd</sup> International Seminar on Earthquake Disaster Mitigation, Bandung, 27 Nopember 2008.
- Irsyam M., Asrurifak M., Hendriyawan, Budiono B., Triyoso W., Hutapea B., (2008), *Usulan Revisi Peta Seismic Hazard Indonesia Dengan Menggunakan Metode Probabilitas Dan Model Sumber Gempa Tiga Dimensi*, Prosiding Seminar HATTI, 18-19 Nopember 2008, ISBN 978-979-96668-6-4.
- Irsyam M. dan Asrurifak M., (2009), *Analisis Seismic Hazard Dengan Model Sumber Gempa 3-Dimensi Untuk Usulan Revisi Peta Gempa Indonesia SNI 03-1726-2002*, Seminar Mengelola Resiko Bencana di Negara Maritim Indonesia, diselenggarakan oleh Majelis Guru Besar ITB, 24 Januari 2009.

- Irsyam, M., Asrurifak M., Budiono B., Triyoso W., Merati W., Sengara I., dan Anita Firmanti., (2009), *Development of Spectral Hazard Map for Indonesia Using Probabilistic Method by Considering Difference Values of Mmax for Shallow Background Sources*, The 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing Countries, November 2-3, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.
- Irsyam, M., Asrurifak M., Hendriyawan, B Budiono, Triyoso W., dan Anita Firmanti, (2010), *Development of Spectral Hazard Maps for Proposed Revision of Indonesia Seismic Building Code*, Geomechanic and Geoengineering an International Journal, Vol. 5. No. 1, 35-47, DOI: 10.1080/17486020903452725.
- Irsyam, M., Asrurifak M., Hendriyawan, Latif H, Razali N., dan Anita Firmanti., (2010), *Seismic Hazard Map of Indonesia and Geotechnical and Tsunami Hazard Assessment for Banda Aceh*, International Conference on Geotechnics/Earthquake Geotechnics Toward Global Sustainability, Januari 12-14, Kyoto Sustainability Initiative, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Irsyam M., Asrurifak M., Budiono B., Triyoso W., and Anita Firmanti A., (2010), *Indonesia Spectral Hazard Map at Ground Surface for Earthquake Resistance Building Design*, The 5th Kyoto University Southeast Asia Forum, Conference of Earth and Space Science, Bandung 7-8 January 2010.
- Kertapati, E., (1999), "Probabilistic Estimates of the Seismic Ground Motion Hazard in Indonesia", *Proc: National Conference on Earthquake Engineering*, Indonesian Earthquake Engineering Association, Bandung.
- Kertapati, E.K., A. Soehaemi, A. Djuhanda, (1992), *Seismotectonic Map of Indonesia*, 1:5,000,000 scale, Geol. Res. Dev. Center, Bandung.
- Kertapati, E.K., Setiawan, J. H., Marjiyono, (2006), *Revisi Potensi Sumber-sumber Gempa di Indonesia*, Seminar Konstruksi Indonesia di Millenium ke-3, 22-23 Agustus 2006, Jakarta.
- Kertapati, E., (2009), *Personal Communication*.
- Kijko, A. dan Sellevol, M.A., (1992), *Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files Part II, Incorporation of Magnitude Heterogeneity*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, No. 1, pp. 120-134.
- Kramer, S.L., (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, New Jersey, Prentice Hall.
- Kulkarni, R.B., Youngs, R.R., dan Coppersmith, K.J., (1984), *Assessment of Confidence Interval for Results of Seismic Hazard Analysis*, Proceedings, 8<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, San Fransisco, Vol. 1.
- Mangkoesebroto, S. P., (1998) "Evaluation and Recommendation for Improvement of Indonesian Buildings Structural Design Code (In Indonesian)", *Strategic Research Report*, Institute for Research, Institut Teknologi Bandung and Institute for Human Settlements, Department of Public Works, Bandung, Indonesia.
- Mangkoesebroto, S. P., Surahman A., Batubara, S., and Irawan, P., (2003), "Investigation of full-scale concrete beam column subassemblies". *Proc. Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Bali, Indonesia, ISBN: 979-3507-047, Paper No 138/RCS-159.



- McCaffrey, R., (1996). *Slip Partitioning at Convergent Plate Boundaries of SE Asia*, in Hall, R. and Blundell, D. (eds.), 1996. Tectonic Evolution of Southeast Asia, Geological Society Special Publication No. 106, London, pp. 3-18.
- McGuire, R.K., (2001), *Deterministic vs. Probabilistic Earthquake Hazards and Risk*, Risk Engineering Inc, Publication Paper.
- Meilano I., (2009), *Slip-rate Estimation from Crustal Deformation Observation*, Workshop Peta Zonasi Gempa Indonesia Terpadu Untuk Membangun Kesiapsiagaan Masyarakat, RISTEK 21 Juli 2009, Jakarta.
- Meilano, I., M. Ando, Kimata, F., K. Tadokoro, H. Nakamichi, D. Muto, T. Okuda, Z.A. Hasanuddin, K Mipi A, B. Setyadji, H. Andreas, M. Gamal, Arif, A., (2006), Aftershock locations and rupture characteristics of the 2006 May 27, Yogyakarta-Indonesia earthquake. AGU Fall Meeting 11-15 December.
- Meilano, I., Abidin, H.Z., Heri Andreas, Irwan Gumilar, I., Sarsito, D.A., Subarya, C., Kimata, F., Hanifa, N.R., (2009), Geodetic GPS Observation in the West Java Island : Plate Coupling and Active Fault Strain Accumulation. *Programme and Abstracts The Seismological Society Of Japan*, Fall Meeting.
- Meilano, I, Ohta, Y., Kimata, F., T. Ito, D. Darmawan, H. Andreas, H.Z., Abidin, M.A., Kusuma, D. Sugiyanto dan Agustan, (2007), Two Years GPS Observation in Aceh, *The 3rd Investigation Report of 2004 Northern Sumatra Earthquake*, 7-10, Graduate School of Environmental Studies Nagoya University, February.
- Merati, W., and Widagdo, P. , (1996), “The effects of column stirrup and longitudinal beam reinforcement on exterior beam-column joint under cyclic loading”, *Computational Methods and Testing for Engineering Integrity*, Computational Mechanics Publications, T. V. Duggan (Ed.), ISBN 1-85312-412-5, pp 217 – 226.
- Merati W., Sidi, I., and Surahman A., (1996), “Indonesian earthquake zonation development”, *Proc: 12th WCEE*, Acapulco, Mexico, Paper No 1618.
- Merati W., Sidi, I., Irsyam, M., and Surahman, A., (1997), “Identification and Evaluation of Earthquake Parameters and its Mitigation Through Provision of Indonesian Seismic Building Code (In Indonesian)”, *Strategic Research Report*, Institute for Research, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.
- Milson, J., Masson D., Nichols G., Sikumbang N., Dwiyanto B., Parson L., Kallagher H., (1992), *The Manokwari Trough and The Western End of The New Guinea Trench*, Tectonics, 11, 145-153.
- Merz, H.A. dan Cornell, C.A (1973). *Aftershocks in Engineering Seismic Risk Analysis*. Report R73-25. Massachusetts: Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge.
- Natawijaya, D.H., (2002), Neotectonics of Sumatran Fault ang Paleogeodesy of the Sumatran Subduction Zone. *Doctor of Philosophy Thesis*. California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Natawidjaja D.H., Sieh K., Chlieh M., Galetzka J., Suwargadi B.W., Cheng H., Edwards R.L., Avouac J.P., dan Ward S.N., (2006), Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls, *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 111, B06403, doi:10.1029/2005JB004025.

- Natawidjaja D.H. dan Triyoso, W., (2007), The Sumatran Fault Zone - From Source To Hazard, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 1, No. 1 (2007) 21–47.
- Natawidjaja, D.H., (2010), *Personal Communication*.
- Najoan, T.F., Suharjo, A., Buditomo, A., Wibowo, S., Rizaldi, Nasution, R.B., (1999), *Peta Zona Gempa Indonesia untuk Penentuan Percepatan Gempa Maksimum di Permukaan*, Prosiding Konferensi Nasional Rekayasa Kegempaan, Bandung, Nopember.
- Nugroho, H., *et al.*, (2009), *Plate Boundary Reorganization in The Active Banda Arc–Continent Collision: Insights From New GPS Measurements*, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2009.01.026.
- Pacheco, J.F., dan Sykes, L.R., (1992), *Seismic Moment Catalog of Large Shallow Earthquakes, 1900 to 1989*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No. 3, pp. 1306-1349.
- Purcaru, G. and Berckhemer, H., (1978). *A magnitude scale for very large earthquakes*. *Tectonophysics*, 49, 189–198.
- Petersen, M.D., Dewey, J., Hartzell, S., Mueller, C., Harmsen, S., Frankel, A.D., dan Rukstales, K., (2004), *Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the southern Malaysian Peninsula: Tectonophysics*, v. 390, p. 141–158.
- Petersen, Mark D., Mueller, Charles S., Frankel, Arthur D., Zeng, Yuehua, (2008) *Spatial Seismicity Rates and Maximum Magnitudes for Background Earthquakes*, USGS Open-File Report.
- Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Genrich, J.F., Puntodewo, S.S.O., Rais, J., Subarya, C., dan Sutisna, S., (2000), *One century of tectonic deformation along the Sumatran fault from triangulation and Global Positioning System surveys*, *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 28,343–28,361.
- Rangin, C., Le Pichon, X., Mazzotti, S., Pubellier, M., Chamot-Rooke, N., Aurelio, M., Walpersdorf, A., dan Quebral, R., (1999), *Plate convergence measured by GPS across the Sundaland/Philippine Sea Plate deformed boundary-The Philippines and eastern Indonesia*, *Geophysical Journal International*, v. 139, p. 296–316.
- Ruff, L., dan Kanamori H., (1983), *The Rupture Process and Asperity Distribution of Three Great Earthquakes from Long-Period Diffracted P-waves*, *Phys. Earth Planet. Inter.* 31:202-30.
- Reiter, L. (1990), *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. Columbia University Press, New York.
- SEAOC Vision 2000 Committee, (1997), *Performance Based Seismic Engineering*, Structural Engineers Association of California, California.
- Sengara, I.W., Irsyam, M., Susila, G.M., (2003), *Seismic Hazard and Site Response Analysis for City of Jakarta and Denpasar*, *Proceedings of the Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Bandung Institute of Technology, Bali.

- Sengara, I.W., Delitriana dan Kertapati, E., (2003), *PSHA dengan model 3-D untuk Pulau Irian Jaya*, Laporan Penelitian (*unpublished*), Laboratorium Geoteknik, Pusat Penelitian Antar Universitas, Institut Teknologi Bandung.
- Sengara, I.W., Hendarto, Natawidjaja, D.H., Triyoso, W., (2006), *Preliminary Probabilistik Seismic Hazard analysis of Sumatera for Input to Indonesia Seismic Zonation*, Seminar on The active Geosphere KAGI 21 ITB Univ. Kyoto and Institut Teknologi Bandung.
- Sengara, I.W. et al., (2006), *Ground Shaking and Reconnaissance Survey of Aceh and Nias Earthquakes Related to Geotechnical Engineering*, Earthquake Spectra, Volume 22, Number S4, June.
- Sengara, I.W., Hendarto, Sumiartha, P., Natawidjaja, D.H., and Triyoso, W., (2007), *Seismic hazard and Zonation of Sumatra Island using 3-D seismic source Zoning*, Research Report RUT XII to Institute for Research and Community Services – ITB and to Indonesian Ministry of Research and Technology, Center for Disaster Mitigation, Institut Teknologi Bandung.
- Sengara, I.W., Hendarto, Natawidjaja, D.H., and Triyoso, W., (2008), *Probabilistic Seismic Hazard Mapping for Sumatra Island*, Proceeding of International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM08), Jakarta.
- Sengara, I.W., (2008), *Seismic Hazard and Microzonation for a District in Banda Aceh City Post 2004 Great Sumatra Earthquake*, Proceedings 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering”, Beijing, China.
- Sengara, I.W., Hakam A., Putra, H.G., Sudinda, T, and Sukamdo, P., (2009), *Seismic Hazard Zoning for West Sumatra and Microzonation of City of Padang*, International Symposium on GeoInformatics and Zoning for Hazard Mapping -2009 (GIZ2009), Kyoto, Japan, December 3-4.
- Sengara, I.W., (2009), *Development of Earthquake Scenario for Three Different Sites Within City of Jakarta*, Proceeding of Sattelite Conference of International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt.
- Sengara, I.W., Merati, W., Irsyam, M., Natawidjaja, D.H., Kertapati, E., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Meilano, I., Sumiartha, P., Hendarto, Daryono, M., Abuhuroyroch, K.M., (2009), *Pengembangan Peta Zonasi Gempa Indonesia dan Rekomendasi Parameter Design Seismik dengan Analisis Bahaya Gempa Probabilistik Terintegrasi (Pulau Sumatra, Jawa, dan Nusa Tenggara)*”, Laporan Pekerjaan untuk Kementerian Riset dan Teknologi-Deputi Pendayagunaan dan Pemasyarakatan-Analisis Kebutuhan Iptek, Juni.
- Sengara, I.W., (2010), *An Integrated Seismic Hazard Investigation for City of Bandung*, Asahi Glass Foundation Research Report, Institute for Research and Community Service, ITB.
- Shah, H.C., dan Boen, T., (1996), *Seismic Hazard Model for Indonesia*, RMS internal document. 21 pp. (*unpublished but cited in GSHAP, 1999*).
- Sieh, K., Natawidjaja, D., (2000), *Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia*, J. Geophys. Res. 105, 28295–28326.

- Silver, E.A., Reed, D., dan McCaffrey, R., (1983), *Back Arc Thrusting in the Eastern Sunda Arc, Indonesia: A Consequence of Arc Continent Collisin*, Journal of Geophysical Research, Vol. 88, No. B9, pp 7429-7448.
- Simandjuntak, T.O. dan Barber, A.J., (1996), *Contrasting Tectonic Styles in the Neogene Orogenic Belts of Indonesia*, in Hall, R. and Blundell, D. (eds.). 1996 Tectonic Evolution of Southeast Asia, Geological Society Special Publication No. 106, London, pp. 3-18.
- Simons W. J. F., el al. (2007). *A Decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sunda Land Motion And Boundaries*, J. Geophysics. Res., 112.B06420. doi: 10.1029/2005JB003868.
- Socquet, A., Vigny, C., Chamot-Rooke, N., Simons, W., Rangen, C., and Ambrosius, B., (2006), *India and Sunda plates motion and deformation along their boundary in Myanmar determined by GPS*: Journal of Geophysical Research, v. 111, B05406, doi: 10.1029/2005JB003877, 11 p.
- Standar Nasional Indonesia, (2002), *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung* (SNI 03-1726-2002), Badan Standardisasi Nasional.
- Stevens, C. W., R. McCaffrey, Y. Bock, J. F. Genrich, M. Pubellier, and C. Subarya, (2002), *Evidence for Block Rotations and Basal Shear in the World's Fastest Slipping Continental Shear Zone in NW New Guinea*, in Plate Boundary Zones, S. Stein and J. Freymueller, editors, AGU Geodynamics Series 30, 87-99.
- Stepp, J.C. (1973), *Analysis of the Completeness of the Earthquake Hazard Sample in the Puget Sound Area*, NOAA Technical Report, ERL 267-ESL 30, Boulder, CO.
- Surahman, Adang, Sengara, IW., Merati, W., (2008), *Probabilistic Seismic Hazard Assessment and Structural Performance Against Seismic Actions*, Proceeding of International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM08), Jakarta.
- Thatcher, W., dan T.C. Hanks, (1973), *Source Parameter of Southern California earthquakes*, J. Geophysic, Res., 78, 8547-8576.
- Triyoso, W., (2009), *Personal Communication*.
- Uhrhammer, R.A. (1986), *Characteristics of Northern and Central California Seismicity*, Earthquake Notes, Vol. 57, No. 1, pp. 21.
- USGS, NEIC. (2008), *Seismic Hazard of Western Indonesia*, Map prepare by United State of Geology Survey, URL [http://earthquake.usgs.gov/research/hazmap/product\\_data/](http://earthquake.usgs.gov/research/hazmap/product_data/)
- Weichert, D.H. (1980), *Estimation of the Earthquake Recurrence Parameters for Unequal Observation Periods for Different Magnitudes*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 70, No. 4, pp. 1337-1346.
- Wells, D.L., dan Coppersmith, K.J., (1994), *New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacements*: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 84, p. 974-1002.

- Widiyantoro, S., (2008), *Seismic tomography reveals a saddle-shaped structure of the subducted oceanic lithosphere in the upper mantle beneath North Sumatra*, Proceedings of the Indonesian Association of Geophysics (HAGI) Annual Meeting.
- Widiyantoro, S. (2009), *Seismicity and Structure of Lithospheric Slab Beneath The Sunda Arc, Indonesia*, SE Asian Gateway Evolution International Conference, 14-17 September 2009, Royal Holloway University of London.
- Widiyantoro, S., Pesicek, J. D., dan Thurber, C. H., (2010), *Subducting Slab Structure below the Eastern Sunda Arc Inferred from Non-linear Seismic Tomographic Imaging*, J. Geol. Soc. London, (in press).
- Wiemer, S., (2001), *A software package to analyze seismicity: ZMAP*. Seismological Research Letters, 72(2):373–382.
- Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J., dan Humphrey, J.R., (1997), *Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes*. Seismol. Res. Lett. 68, 58–73.
- Zhao John X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H., dan Somerville, P., (2006), *Attenuation Relations of Strong Motion in Japan using site classification based on predominant period*, Bull. Seismol. Soc. Am., 96, 898.