LAPORAN HASIL PENELITIAN

23 - 11 - 2006
Hd
ki
260/ka/2006 - S.1 (1)
551.220 72 ARM -

STUDI KARAKTERISTIK FISIS SUMBER GEMPABUMI DI WILAYAH SUMATERA BARAT

Oleh :

Ketua : Drs. Akmam, M.Si
Anggota 1. Drs. Letmi Dwridal, M.Si
2. Dr. Ir. Badrul Mustafa Kemal, DEA

DIBIAYAI OLEH DP2M
SURAT PERJANJIAN NO: 006/SP3/PP/DP2M/II/2006
DIREKTORAT JENDERAL PENDIDIKAN TINGGI
DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2006

DAFTAR ISI

		Halaman
HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR		i
RINGKASAN DAN SUMMARY		ii
PRAKATA		ix
PENGANTAR		x
DAFTAR ISI		xi
DAFTAR TABEL		xii
DAFTAR GAMBAR		xiii
DAFTAR LAMPIRAN		xiv
I.	**PENDAHLUAN**	1
	A. Latar Belakang Masalah	1
	B. Rumusan Masalah	5
	C. Batasan Masalah	5
	D. Pertanyaan Penelitian	5
II.	**TINJAUAN PUSTAKA**	6
	A. Kondisi Tektonik Sumatera dan Subduksi Lempeng Indo-Australia	6
	B. Segitiga Bola Le Pichon	9
	C. Percepatan Tanah dan Intensitas Gempa	11
	D. Hubungan Frekuensi, Magnitudo dan Energi Gempa Bumi	12
III.	**TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN**	14
	A. Tujuan Penelitian	14
	B. Manfaat Penelitian	14
IV.	**METODA PENELITIAN**	14
	A. Metode Penelitian	14
	B. Desain Penelitian	16
V.	**HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**	20
	A. Hasil Penelitian	20
	1. Sudut Subduksi dan Kecepatan Penujaman	20
	2. Magnitudo dan Percepatan Tanah	22
	B. Pembahasan	24
VI.	**KESIMPULAN DAN SARAN**	31
	A. Kesimpulan	31
	B. Saran	31
DAFTAR PUSTAKA		33
LAMPIRAN		

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR

1.	Judul Penelitian	: Studi Karakteristik Fisis Sumber Gempabumi di Wilayah Sumatera Barat
2.	Ketua Peneliti	
	a. Nama Lengkap dan Gelar	: Drs. Akmam, M.Si
	b. Jenis Kelamin	: Laki-laki
	c. Pangkat/Golongan	: Pembina/IV.a
	d. NIP	: 131 669 070
	e. Jabatan Fungsional	: Dosen/Lektor Kepala
	f. Fakultas/Jurusan	: FMIPA/ Fisika
	g. Perguruan Tinggi	: Universitas Negeri Padang
	h. Pusat Penelitian	: Universitas Negeri Padang
3.	Jumlah Tim Peneliti	: 3 (tiga) orang
4.	Lokasi Penelitian	: Laboratorium Fisika Bumi Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang
5.	Kerjasama dengan Instansi Lain a. Nama Instansi b. Alamat	
6.	Masa Penelitian	: 10 bulan
7.	Biaya yang Diperlukan	: Rp. 19.700.000,-

Terbilang : Sembilan Belas Juta Tujuh Ratus Ribu Rupiah

Padang, 30 Oktober 2006

Mengetahui,
Dekan FMIPA UNP

Drs. Ali Amran, M.Pd, M.A, PhD.
NIP. 130 353 264

Ketua Peneliti,

Drs. Akmam, M.Si
NIP. 131 669 070

Menyetujui
Ketua Lembaga Penelitian
Universitas Negeri Padang

Prof. Dr. H. Anas Yasin, M.A
NIP. 130 365 634

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

STUDI KARAKTERISTIK FISIS SUMBER GEMPABUMI
DI WILAYAH SUMATERA BARAT

Oleh:
Akmam*, Letmi Dwridal*, Badrul Mustafa Kemal**

RINGKASAN DAN SUMMARY

SUMMARY

Subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia berlangsung secara terus menurus membentuk kepalauan Mentawai dan Sumatera aktif secara tektonik dan vulkanik. Tingkat keaktifan tektonik kawasan ini dapat dipelajari melalui aktifitas subduksi lempeng yang bertinjau berdasarkan kecepatan, sudut dan kedalaman subduksi. Penyusupan lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia menyebabkan terbentuknya zona deformasi aktif di kepulauan Mentawai dan pulau Sumatera. Perilaku kegempaan pada suatu daerah dapat dipelajari melalui karakteristik fisis sumber gempabumi antara lain melalui magnitudo, energi gempa dan percepatan tanah.

Untuk itu dilakukan penelitian dasar deskriptif yang bertujuan untuk mengetahui pola subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia dengan menggunakan data sekunder berupa catatan gempa di Sumatera Barat tahun 1900 sampai dengan tahun 2005 yang tersedia di BMG Padang Panjang. Kecepatan dan sudut subduksi lempeng dihitung menggunakan formula Le Pichon dan formula karekteristik gempa ditentukan menggunakan metoda kuadrat terkecil.

Hasil penelitian menunjukan rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia dikawasan Sumatera Barat dan sekitarnya adalah $31{,}33^0$ dengan kecepatan subduksi relatif rata-rata sebesar 6,32 cm/tahun dan kecepatan normalnya adalah 4,93 cm/tahun. Formula menghitung percepatan tanah khusus untuk Sumaera barat dan sekitarnya adalah: $\log \alpha = 0.421\ I + 0.146 M_L + 0.746 \log \Delta - 2.844$, dimana magnitude lokal $M_L = 0.415\ I_0 - 0.795 \operatorname{Log} H + 3.334$, dan intensitas gempa pada episenter $I_o = I + 3 \log (\Delta n/H) + 0.01(\Delta - H)$.

STUDI KARAKTERISTIK FISIS SUMBER GEMPABUMI
DI WILAYAH SUMATERA BARAT

Oleh:
Akmam*, Letmi Dwridal*, Badrul Mustafa Kemal**

RINGKASAN

I. Pendahuluan

Pulau Sumatera merupakan salah satu pulau yang sangat aktif seismisitasnya, hal ini disebabkan oleh eksistensi zona penunjaman *(subduction zone)* lempeng Indo-Australia yang menyusup ke bawah lempeng Eurasia, sehingga membentuk jalur-jalur gempa bumi (Jalur gempa Trans-Mediteranian). Pada jalur Trans-Mediteranian ini terdapat patahan besar kerak bumi yang membelah pulau Sumatera yang dikenal dengan patahan besar Sumatera *(Great Sumatera Fault).*

Zona subduksi ini merupakan daerah zona seismik aktif, dimana gempa bumi tektonik baik dangkal, menengah maupun dalam sering terjadi. Zona subduksi ini terbentuk karena dua lempeng bergerak saling menekan dengan kecepatan yang sangat lambat dan lempeng yang mengalami pembengkokan membentuk sudut subduksi. Besar sudut subduksi dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang diberikan lempeng di atasnya. Tatanan tektonik Sumatera dengan Zona subduksinya sangat menarik sebagai objek penelitian kegempaan dan penataan tata ruang pada masa mendatang:

Karakteristik fisis sumber gempa bumi tektonik pada zona subduksi seperti di Sumatera Barat dan pantai baratnya dapat dipelajari melalui pola penyusupan lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia, yang dapat dinyatakan dengan sudut penunjaman (sudut subduksi). Permasalahan yang muncul sekarang adalah bagaimana pola penyusupan lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera Barat serta berapa besar sudut subduksi yang dihasilkan. Mengingat begitu pentingnya pola penunjaman lempeng diketahui untuk mendapatkan solusi dari permasalahan perlu dilaksanakan penelitian untuk mengetahui pola penujaman (subduksi) lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera Barat.

Analisa terhadap gempa tektonik berperan dalam meletakkan kerangka dasar mempelajari gaya pengontrol terbentuknya beberapa zona deformasi aktif di litosfer bumi. Kekuatan deformasi di litosfer berhubungan dengan sifat fisis dan mekanis deformasi bahan akibat perubahan suhu dan tekanan mantel bumi. Karakteristik fisis sumber gempa dapat diketahui melalui pola penyusupan litosfer dan parameter gempabumi (magnitudo, energi gempa dan percepatan tanah).

Melihat pergerakan lempeng di Indo-Australia (lempeng Hindia) dan sistem sesar Sumatera Barat dan sesar Mentawai, menyebabkan kawasan ini sangat menarik sebagai objek penelitian kegempaan dalam rangka meletakkan dasar pemikiran penanggulangan (mitigasi) bencana gempa kedepan.

Efek yang ditimbulkan oleh gempa tektonik erat hubungannya dengan struktur litosfer dimana sumber gempa tersebut. Struktur litosfer tidak sama untuk semua daerah. Perbedaan struktur litosfer tersebut, tentu akan menghasilkan percepatan tanah maksimum yang berbeda pula. Hal ini menyebabkan banyaknya formula yang didapatkan secara empiris.

Melihat pada kondisi di atas, muncul permasalahan baru bagaimana pola penyusupan lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia yang dinyatakan dengan kecepatan, sudut dan kedalaman subduksi dan karakteristik fisis sumber gempa bumi pada zona subduksi ini yang dinyatakan dengan percepatan tanah maksimum, intensitas, magnitudo energi gempa.

Informasi tentang pola penyusupan lempeng dan karakteristik fisis sumber gempa bumi pada zona subduksi di pantai pulau Sumatera, serta peta distribusi percepatan tanah maksimum pada suatu daerah, sangat berguna untuk menentukan langkah-langkah antisipasi terhadap mengurangi resiko gempabumi dan tsunami di pantai barat Sumatera Barat nantinya.

II. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Sesuai dengan latar belakang permasalahan, maka dilaksanakan penelitian yang tujuan untuk

1. Mengetahui pola penunjaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia yang dinyatakan dengan kedalaman penyusupan, sudut penunjaman dan rata-rata kecepatan penunjaman.
2. Membuat formula untuk menghitung percepatan tanah maksimum khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya
3. Membuat formula untuk menghitung magnitudo lokal dari sumber gempa khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya
4. Membuat formula untuk menghitung energi gempa khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya
5. Membuat peta distribusi percepatan tanah maksimum dan intensitas maksimum oleh gempa di kawasan Sumatera Barat dan pantai baratnya.

Selasainya penelitian diharapkan bermanfaat untuk

1. Pengembangan mata kuliah Geodinamika dan Seismologi Gempa Bumi pada Jurusan Fisika atau program Studi Geofisika dan Fisika Bumi
2. Meletakkan fondasi pemikiran untuk meminimalisasi bencana gempa dan tsunami
3. Meletakkan fondasi pemikiran untuk mengembangan tata ruang pada kota dan kabupaten di Sumatera Barat
4. Membantu percepatan penyelesaian skripsi mahasiswa S-1 pada program Fisika Jurusan Fisika FMIPA UNP

III. Metoda Penelitian

Data penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari stasiun Badan Meterologi dan Geofisika Padangpanjang yang terekam dalam bentuk analog. Data yang akan digunakan adalah data gempa tektonik mulai tahun 1900 – 2005 untuk daerah penelitian 88.5^0BT–102^0BT dan 1^0LU–3.5^0 LS, dengan magnitudo gempabumi lebih dari 4.0 skala Richter.

Variabel bebas penelitian ini adalah cepat rambat gelombang seismik (gelombang gempa tektonik yang terdiri dari cepat rambat gelombang primer dan gelombang sekunder) yang terdapat di Sumatera Barat dan pesisir baratnya. Variabel tergantungnya adalah percepatan tanah masimum, intensitas gempa, magnitudo dan jarak episenter gempa dan kedalaman episenter gempa

Karakteristik fisis sumber gempabumi diestimasi dari bentuk respon bumi terhadap gangguan yang diterimanya. Respon bumi tersebut dapat dilihat dari bentuk persamaan respon, seperti persamaan magnitudo, persamaan percepatan tanah maksimum. Untuk mendapatkan harga konstanta, seperti p,q dan r pada persamaan Murphy dan O'Brein termodifikasi dan a,b,c dan d dan pada persamaan Richter termodifikasi, digunakan metoda kuadrat terkecil yaitu dengan mengkonvolusikan parameter fisis bumi (konstanta yang akan dicari) dengan parameter fisis gempa sebagai berikut:

$$c_t = \sum_{t=0}^{m} f_s b_{t-s}$$

dimana c_t menyatakan harga parameter hasil perhitungan, b_s menyatakan parameter fisis bumi dan f_s menyatakan parameter gempabumi (magnitudo gempa, percepatan tanah maksimum dan sebagainya). Bila d_t menyatakan harga parameter hasil pengamatan, maka beda harga pengamatan dengan harga perhitungan adalah

$$I = \sum_{t=0}^{m+n} (d_t - c_t)^2 = \sum_{t=0}^{m+n} \left(d_t - \sum_{s=0}^{m} f_s b_{t-s} \right)^2$$

Perbedaan harga pengamatan dengan harga perhitungan akan minimum, apabila harga differensial parsial terhadap setiap koefisien persamaan parameter gempabumi sama dengan nol yaitu:

$$\frac{\partial I}{\partial f_i} = \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} - \sum_{s=0}^{m} f_s \left(\sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} \right) = 0$$

atau

$$\sum_{s=0}^{m} f_s \sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} = \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} \text{ , untuk i = 0,1,2 ...}$$

dimana

$$\sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} = \phi_{t-s} \text{ dan } \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} = g_i$$

dalam ϕ_t merupakan autokorelasi dari parameter fisis bumi dan g_i merupakan korelasi silang antara parameter fisis bumi dan harga parameter hasil pengamatan.

Desain Penelitian

Agar lebih memudahkan dalam mengorganisir pelaksanaan program, maka penelitian ini dibagi atas tiga tahap sebagai berikut:

1. Tahap persiapan, dimana pada tahap ini dilakukan pengurusan izin pemakaian data seismogram yang terdapat di stasiun BMG Padangpanjang. Kemudian dilanjutkan dengan pembuatan program (*software)* untuk menghitung nilai prediksi persamaan *Likelihood* dan perhitungan harga konstanta persamaan Donovan dan Richter dengan metoda kuadrat terkecil.

2. Tahap Pengolahan Data
   a. Pola Penunjaman Lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia

      Setiap kejadian gempa tektonik tahun 1900 – 2005 dikelompokkan menurut posisi episentrum dan hiposentrum (kedalaman titik pusat gempa). Kemudian sudut penyusupan (subduksi) dan kedalaman penunjaman dihitung menggunakan parameter jarak episentrum dan kedalaman hiposentrum gempa menggunakan formula Le Pichon.

$$\cos\Omega = \cos\theta\cos\theta^1 + \sin\theta\cos(\psi - \psi^1)$$

dimana Ω sudut didepan tali busur terbentuk oleh perputaran titik dipermukaan bumi dari A ke P terhadap pusat bumi. Berdasarkan harga dapat dihitung sudut penunjaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia, dimana dalam hal ini θ adalah sudut colatitude, Ψ adalah longititude rotasi bumi, θ' adalah colatitude Ψ' adalah longititude titik pada bidang batas lempeng. Kecepatan pergerakan dengan arah garis normal dihitung dengan

$$v_n = \sin^{-1}\left\{\frac{\sin(\varphi - \varphi')\cos\theta}{\sin\Omega}\right\} \qquad (3)$$

dimana φ besar sudut oleh proyeksi titik A (batas pertemuan lempeng) dan pusat rotasi lempeng terhadap pusat bumi dan α sudut yang dibentuk oleh penunjaman lempeng terhadap garis normal. Kecepatan pergerakan relatif lempeng dihitung dengan persamaan:

$$\upsilon_r = \omega r \sin\Omega \qquad (4)$$

dimana dalam hal ini ω adalah kecepatan sudut, *r* adalah jari-jari bumi 6371 km.

b. Karakateristik Fisis Sumber Gempa

Karakateristik fisis sumber gempa yang akan ditentukan adalah persamaan magnitudo gempa, intensitas gempa pada episenter gempa dan percepatan tanah maksimum, energi sumber gempa dan magnitudo lokal untuk daerah Sumatera Barat dan pesisir pantai baratnya. Pekerjaan utama pada tahap ini adalah menentukan konstanta p, q , r menggunakan metoda kuadrat terkecil (*least square)*, dengan bentuk persamaannya

$$\sum M = \Delta r + p\sum I_0 + q\sum \log H$$
$$\sum MI_0 = r\sum I_0 + p\sum I_0^2 + q\sum I_0 \log H$$
$$\sum M \log H = r\sum \log H + p\sum I_0 \log H + q\sum \log H^2$$

Kemudian bila m = M - [M], $i_0 = I_0 - [I_0]$, dan h = H – [H] yang merupakan deviasi terhadap nilai rata-rata, sehingga ketiga persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$\sum mi_0 = r\sum mi_0 + p\sum i_0^2 + q\sum i_0 \log h$$
$$\sum m \log h = r\sum \log h + p\sum i_0 \log h + q\sum \log h^2$$

dimana

$$\sum m^2 = \sum M^2 - \Delta[M]^2$$
$$\sum i_0^2 = \sum i_0^2 - \Delta[i_0]^2$$
$$\sum (\log h)^2 = \sum (\log H)^2 - \Delta[\log H]^2$$
$$\sum (mi_0) = \sum MI_0 - \Delta[M][I_0]$$
$$\sum (m \log h) = \sum (M \log H) - \Delta[M][\log H]$$
$$\sum (i_0 \log h) = \sum (I_0 \log H) - \Delta[I_0][\log H]$$

dengan metoda elimimasi, maka akan diperoleh harga p, q dan r.

Setelah harga konstanta p, q, dan r didapatkan, maka diperolehlah formula untuk menghitung magnitudo sumber gempabumi khusus untuk Sumatera Barat dan pesisir pantai baratnya.

Setelah harga konstan p, q, dan r diperoleh, pekerjaan berikutnya adalah menentukan harga konstanta a, b, c dan d. Harga konstanta ini juga diperoleh dengan menggunakan metoda kuadrat terkecil (*least square)*, dengan menggunakan persamaan

$$\log \alpha_{ac} = aI + bM - c\log\Delta + d$$

$$\sum I \log \alpha_{ac} = a\sum I^2 + b\sum MI - c\sum I \log\Delta + d\sum I$$

$$\sum M \log \alpha_{ac} = a\sum IM + b\sum M^2 - c\sum M \log\Delta + d\sum M$$

$$\sum \log \alpha_{ac}{}^2 = a\sum I \log \alpha_{ac} + b\sum M \log \alpha_{ac} - c\sum \log\Delta \log \alpha_{ac} + d\sum \log \alpha_{ac}$$

$$\sum \log\Delta \log \alpha_{ac} = a\sum I \log\Delta + b\sum M \log\Delta - c\sum \log\Delta^2 + d\sum \log\Delta$$

Sistem persamaan di atas diselesaikan untuk memperoleh harga konstanta a, b, c dan d. Berdasarkan harga konstanta yang diperoleh didapatkan formula percepatan tanah maksimum khusus untuk wilayah Sumatera Barat dan pantai baratnya. Berdasarkan formula tersebut dihitung percepatan tanah maksimum di daerah Sumatera Barat dan kepulauan Mentawai yang kemudian dituangkan dalam bentuk peta kontur dua dimensi. Berdasarkan hubungan magnitudo dan intensitas gempa, ditentukan persamaan energi yang dihasilkan untuk gempa di wilayah Sumatera Barat.

Tahap Interpretasi

Setelah pola subduksi diperoleh, dibuat gambaran penyusupan lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia yang berlangsung di pantai barat Sumatera Barat. Kemudian dilakukan interpretasi untuk memprediksi parameter gempa dan periode gempa yang akan datang. Hasil pengolahan data tentang percepatan tanah maksimum, magnitudo lokal dan energi gempa dipetakan agar mudah diinterpretasikan. Untuk memvalidasi formulasi yang diperoleh, maka hasil perhitungan berdasarkan formula yang diperoleh dibandingan dengan hasil perhitungan dengan rumus empiris Richter, Donovan dan Kawashumi.

IV. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia pada kawasan Sumatera Barat dan sekitarnya adalah $31{,}33^0$ dengan kecepatan subduksi relatif rata-rata sebesar 6,32 cm/tahun dan kecepatan normalnya adalah 4,93 cm/tahun. Kecepatan penujaman terbesar terdapat sekitar Pulau Spora dengan kecepatan relatif 6,36 cm/tahun dengan sudut penujaman $30{,}70^0$ dan kedalaman subduksi maksimum adalah 135 km. Kecepatan relatif terkecil terdapat disekitar Palau Siberut dengan kecepatan penujaman 6,26 cm/tahun dengan sudut subduksi $32{,}07^0$ yang terdapat disekitar Pulau Pagai, dengan kedalaman subduksi 89 km.

Setelah dilakukan analisa terhadap data gempa bumi dari tahun 1900 sampai dengan tahun 2005, diperoleh persamaan-persamaan sebagai berikut:

1. Formula untuk menghitung magnitudo lokal dari sumber gempa khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu $M_L = 0.415\ I_0 - 0.795\ \text{Log}\ H + 3.334$, dengan intensitas gempa pada episenter $I_o = I + 3 \log (\Delta/H) + 0.01\ (\Delta - H)$.
2. Formula untuk menghitung energi gempa khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu $\text{Log}\ E = 5.24 + 1.44\ ML$
3. Formula untuk menghitung percepatan tanah maksimum oleh gempa tektonik khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu

$\log \alpha_{ac} = 0.421\, I + 0.146\, M_L + 0.746 \log \Delta - 2.844.$

Berdasarkan persamaan yang diperoleh di atas, maka diperoleh peta distribusi percepatan tanah minimum sebesar 51.67 gal dengan dan percepatan tanah maksimum sebesar 723.09 gal. Daerah yang mempunyai percepatan maksimum adalah adalah Kabupaten Solok yaitu sebesar 723.09 gal sedangkan daerah yang memiliki percepatan tanah maksimum terendah adalah Kota Payakumbuh yaitu sebesar 286.47 gal.

Sesuai dengan konstribusi penelitian ini dan berdasarkan hasil analisa data maka disarankan hal-hal sebagai berikut:

1. Sebaiknya hasil penelitian dapat dijadikan sebagai pengembangan mata kuliah Geodinamika dan Seismoligi Gempa Bumi pada Jurusan Fisika atau program Studi Geofisika dan Fisika Bumi
2. Agar diperoleh akurasi yang lebih baik, formula-formula di atas masih perlu divalidasi dengan menggunakan metoda lain dan menggunakan data yang lebih banyak lagi
3. Hasil penelitian ini dapat dikembangkan untuk pengaturan tata ruang yang lebih baik di Sumatera Barat
4. Mengingat begitu berbahanya efek dari gempa, maka hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai fundasi dasar untuk menetapkan kebijaksanaan mitigasi gempa bumi pada masa mendatang

PRAKATA

Puji syukur alhamdulillah kami ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua, sehingga kami dapat menyelesaikan penelitian ini. Dalam mengerjakan penelitian ini kami banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu izinkan kami pada kesempatan ini mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Direktur Jenderal Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat yang telah bersedia mendanai penelitian kami ini.
2. Bapak Tim Reviewer Penelitian Dasar yang telah bersedia menyeleksi dan memberi masukan dan penilaian terhadap kelayakan penelitian ini.
3. Bapak Rektor UNP, Bapak Dekan FMIPA UNP, Bapak Ketua Lembaga Penelitian UNP dan Bapak Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang beserta staf yang telah memfasilitasi kami melaksanakan penelitian ini.
4. Bapak Kepala BMG Padangpanjang yang telah memperkenankan kami menggunakan data gempa yang terdapat di BMG Padangpanjang.
5. Kepada rekan-rekan staf Jurusan Fisika FMIPA UNP yang dengan kerjasamanya telah membantu kami dalam melaksanakan penelitian ini.
6. Rekan-rekan mahasiswa yang terlibat aktif dalam penelitian ini yang telah bersedia mengedit dan mengenter data penelitian.
7. Semua semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu pada lembaran ini

Kami berharap bantuan dan fasilitas yang telah kami terima ini mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT.

Penelitian ini kami kerjakan dalam rangka mencari landasan dasar yang kuat untuk mitigasi gempa dan untuk mencari landasan solusi untuk mengurangi bencana gempa di Sumatera Barat pada masa mendatang. Disamping itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk pengembangan perkuliahan Geodinamika dan Seimologi Gempa Bumi pada Jurusan Fisika FMIPA UNP khususnya dan pada lembaga pendidikan serta lembaga sejenis lain umumnya. Kami menyadari bahwa laporan penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu kritik dan saran yang konstruktif sangat kami harapkan. Terakhir semoga hasil penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Padang, Oktober 2006
Tim Peneliti

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

PENGANTAR

Kegiatan penelitian mendukung pengembangan ilmu serta terapannya. Dalam hal ini, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang berusaha mendorong dosen untuk melakukan penelitian sebagai bagian integral dari kegiatan mengajarnya, baik yang secara langsung dibiayai oleh dana Universitas Negeri Padang maupun dana dari sumber lain yang relevan atau bekerjasama dengan instansi terkait.

Sehubungan dengan itu, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang bekerjasama dengan Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Ditjen Dikti Depdiknas dengan surat perjanjian kerja Nomor : 006/SP3/PP/DP2M/II/2006, tanggal 1 Februari 2006, bersedia membiayai pelaksanaan penelitian fundamental dengan judul **Studi Karakteristik Fisis Sumber Gempabumi di Wilayah Sumatera Barat.**

Kami menyambut gembira usaha yang dilakukan peneliti untuk menjawab berbagai permasalahan pembangunan, khususnya yang berkaitan dengan permasalahan penelitian tersebut di atas. Dengan selesainya penelitian ini, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang telah dapat memberikan informasi yang dapat dipakai sebagai bagian upaya penting dalam peningkatkan mutu pendidikan pada umumnya. Di samping itu, hasil penelitian ini juga diharapkan memberikan masukan bagi instansi terkait dalam rangka penyusunan kebijakan pembangunan.

Hasil penelitian ini telah ditelaah oleh tim pembahas usul dan laporan penelitian, kemudian untuk tujuan diseminasi, hasil penelitian ini telah diseminarkan ditingkat Universitas Negeri Padang. Mudah-mudahan penelitian ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pada umumnya, dan peningkatan mutu staf akademik Universitas Negeri Padang khususnya.

Pada kesempatan ini, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini. Secara khusus, kami menyampaikan terima kasih kepada Direktur Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Ditjen Dikti Depdiknas yang telah memberi dana untuk pelaksanaan penelitian ini. Kami yakin tanpa dedikasi dan kerjasama yang terjalin selama ini, penelitian ini tidak akan dapat diselesaikan sebagaimana yang diharapkan dan semoga kerjasama yang baik ini akan menjadi lebih baik lagi di masa yang akan datang.

Terima kasih

Padang, Oktober 2006
Ketua Lembaga Penelitian
Universitas Negeri Padang

Prof. Dr. H. Anas Yasin, M.A
NIP. 130 365 634

DAFTAR ISI

		Halaman
HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR		i
RINGKASAN DAN SUMMARY		ii
PRAKATA		ix
PENGANTAR		x
DAFTAR ISI		xi
DAFTAR TABEL		xii
DAFTAR GAMBAR		xiii
DAFTAR LAMPIRAN		xiv
I.	PENDAHLUAN	1
	A. Latar Belakang Masalah	1
	B. Rumusan Masalah	5
	C. Batasan Masalah	5
	D. Pertanyaan Penelitian	5
II.	TINJAUAN PUSTAKA	6
	A. Kondisi Tektonik Sumatera dan Subduksi Lempeng Indo-Australia	6
	B. Segitiga Bola Le Pichon	9
	C. Percepatan Tanah dan Intensitas Gempa	14
	D. Hubungan Frekuensi, Magnitudo dan Energi Gempa Bumi	16
III.	TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	17
	A. Tujuan Penelitian	17
	B. Manfaat Penelitian	18
IV.	METODA PENELITIAN	18
	A. Metode Penelitian	18
	B. Desain Penelitian	19
V.	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	22
	A. Hasil Penelitian	
	1. Sudut Subduksi dan Kecepatan Penujaman	22
	2. Magnitudo dan Percepatan Tanah	24
	B. Pembahasan	26
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	33
	A. Kesimpulan	33
	B. Saran	33
DAFTAR PUSTAKA		35
LAMPIRAN		37

DAFTAR TABEL

Nama Tebel	Halaman
Tabel 1. Posisi kutub rotasi lempeng, akibat gerak relatif dua lempeng yang berdekatan	11
Tabel.2 Hubungan percepatan tanah maksimum dengan intensitas skala Mercalli dan Intensitas skala Jepang	16
Tabel 3. Posisi batas pertemuan lempeng untuk setiap penampang	23
Tabel 4. Besar sudut *subduksi* lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia untuk tiap-tiap penampang di pantai barat Sumatera Barat	23
Tabel 5: Daftar hasil perhitungan konstanta persamaan parameter fisis karakteristik gempa tektonik di Sumatera Barat dan pesisir pantainya	24
Tabel 6. Nilai percepatan tanah maksimum berdasarkan koordinat bujur dan lintang	25
Tabel 7. Harga percepatan tanah maksimum, minimum dan rata-rata pada setiap kabupaten/kota di Sumatera Barat	30
Tabel 8. Harga percepatan tanah maksimum, minimum dan rata-rata pada setiap kecamatan di Sumatera Barat	30

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Zona subduksi antara lempeng samudera dan benua	6
Gambar 2. Morpologi subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia	7
Gambar 3. Kondisi subduksi lempeng Indo-Ausralia pada lempeng Asia dan Aspek Kegempaanya	8
Gambar 4. Kutub rotasi lempeng	9
Gambar 5. Posisi kutub rotasi lempeng	10
Gambar 6. Geometri untuk menentukan posisi kutub rotasi lempeng	10
Gambar 7. Gambar segitiga Le Pichon untuk menentukan sudut penunjaman lempeng samudera ke lempeng benua	11
Gambar 8. Pendekatan geometri speris segitiga pada bola	12
Gambar 9. Geometri segitiga bola Le Pichon	12
Gambar 10: Vektor penunjaman lempeng samudera ke lempeng benua.	13
Gambar 11: Peta episenter gempa bumi untuk daerah Sumatera Barat dan sekitarnya periode 1900 – 2005	37
Gambar 12: Pola penujaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia untuk setiap jurus berdasarkan data seismitivitas	38 - 42
Gambar 13: Peta kontur percepatan tanah maksimum oleh gempa tektonik di Sumaera Barat Berdasarkan Kabupaten Tahun1900 – 2005	43
Gambar 14: Peta kontur percepatan tanah maksimum dengan grid oleh gempa tektonik di Sumaera Barat berdasarkan kabupaten tahun 1900 – 2005	44
Gambar 15: Peta distribusi intensitas gempa tektonik Sumatera Barat dan sekitarnya berdasarkan data gempa tahun1900 - 2005	45
Gambar 16. Segmen garis jurus pengamatan subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia pada Sumatera Barat	46
Gambar 17: Foto udara segmen sesar Air Mancur Padangpanjang	47
Gambar 18: Foto udara segmen sesar Lubuk Sikaping	47
Gambar 19: Foto udara sesar segmen sesar Sianok Bukittinggi	48
Gambar 20: Foto udara segmen sesar Ngalau Payakumbuh	48
Gambar 21: Foto udara segmen sesar Kotabaru Padangpanjang	49
Gambar 22: Foto udara segmen sesar Singkarak	49
Gambar 23: Foto udara segmen sesar Muarolabuh Solok Selatan	50
Gambar 24: Foto udara segmen sesar Alahanpanjang Solok	50
Gambar 25 : Sesar Lubuk Sikaping tanpak dari Barat Laut ke Tenggara	51
Gambar 26 : Sesar Padangpanjang	51
Gambar 27 : Ngalau Payakumbuh tanpak dari dasar ngalau	51
Gambar 28 : Rengkahan pada dinding sesar Muarolabuh	52
Gambar 29: Ngalau Payakumbuh	52
Gambar : 30 Malibau Anai tanpak dari dari atas	52
Gambar 31: Muaro labuh Solok Selatan	53

DAFTAR LAMPIRAN

Nama Lampiran	Halaman
Lampiran 1: Peta episenter gempa bumi untuk daerah Sumatera Barat dan sekitarnya periode 1900 - 2005	37
Lampiran 2 : Pola penujaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia untuk setiap jurus berdasarkan data seismik	38
Lampiran 3 : Peta distribusi percepatan tanah oleh gempa tektonik di kawasan Sumatera Barat dan pesisir pantainya	43
Lampiran 4 : Peta Distribusi intensitas gempa tektonik di Sumatera Barat dan sekitarnya	45
Lampiran 5: Segmen garis jurus pengamatan subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia pada Sumatera Barat.	46
Lampiran 6: Foto udara lokasi segmen sesar aktif di Sumatera Barat (Google Digital Foto) yang diakses 10 Oktober 2006	47
Lampiran 7: Foto darat lokasi segmen sesar aktif di Sumatera Barat	51
Lampiran 8: Personalia Penelitian	54
Lampiran 9: Artikel Ilmiah yang telah diseminar nasional pada tanggal 10-11 Juli 2006 pada pertemuan BKS PTN Indonesia Bagian Barat di Universitas Andalas Padang	55
Lampiran 10 : Draf artikel 2 (Buram artikel 2) dengan judul Subduksi Lempeng Indo-Australia Pada Lempeng Eurasia Di Pantai Barat Sumatera Barat	66

I. PENDAHLUAN

A. Latar Belakang Masalah

Sumatera merupakan salah satu pulau yang aktif seismisitasnya, hal ini disebabkan oleh eksistensi zona penunjaman *(subduction zone)* lempeng Indo-Australia yang menyusup ke bawah lempeng Eurasia, sehingga membentuk jalur-jalur gempa bumi. Jalur gempa bumi yang melewati pulau Sumatera disebut jalur gempa Trans-Mediteranian. Pada jalur Trans-Mediteranian ini terdapat patahan besar pada kerak bumi yang membelah pulau Sumatera, dikenal dengan patahan besar Sumatera *(Great Sumatera Fault)*. Tatanan tektonik Sumatera ini sangat menarik dijadikan sebagai objek penelitian kegempaan dalam rangka meletakkan dasar pemikiran penanggulangan *(mitigasi)* bencana gempa bumi ke depan.

McCaffrey et. al. (1985) mengestimasi terdapatnya kerak benua sampai kedalaman (30-40) km dan adanya mekanisme pergerakan bidang sesar pada berbagai kedalaman pusat gempa di sepanjang busur Sumatera. Kemudian Posavec et. al. (1973) mengungkapkan bahwa zona sesar Sumatera didominasi oleh pergerakan lateral secara terus menerus lempeng Indo-Australia ke lempeng Sumatera (lempeng Eurasia). Curray et. al. (1977) meramalkan bahwa *zona Benioff* yang terdapat di sepanjang busur Sumatera dapat berubah dengan cepat kedalamannya dan bentuknya. Hal ini menandakan bahwa struktur zona di sepanjang busur Sumatera sangat kompleks dan dinamis.

Sumatera Barat yang terdapat pada bagian pesisir barat pulau Sumatera bagian tengah memiliki banyak sesar aktif seperti sesar Pasaman yang terdiri dari sesar Talu dan Lubuksikaping, sesar Bukittinggi yang terdiri dari sesar Maninjau dan Marapi, sesar Padangpanjang terdiri dari sesar Singkarak dan sesar Tandikat, sesar Batusangkar, sesar Muarolabuh, semua daerah yang dilewati oleh sesar di atas rawan terhadap gempabumi (Tjokrosapoetro: 1993). Disamping sesar-sesar di atas, terdapat juga sesar Mentawai yang sangat aktif.

Adanya sistem sesar tersebut di atas, mengakibatkan Sumatera dan pesisir Baratnya mudah mengalami deformasi dan rawan terhadap gempa bumi dan tsunami. Mengacu kepada kondisi tersebut, wajarlah kiranya kalau kawasan Sumatera umumnya, Sumatera Barat khususnya merupakan daerah yang mempunyai aktifitas kegempaan yang cukup tinggi dengan kedalaman *hiposenter* kurang dari 50 km. Hal

ini terbukti dengan banyaknya gempa yang terjadi di pulau Sumatera selama periode 1905-2005, dengan kedalaman rata-rata 50 km.

Subduksi merupakan pertemuan (tumbukan) dua lempeng akibat adanya pergerakan lempeng yang saling mendekat, yaitu antara lempeng benua dengan lempeng samudera. Pergerakan kedua lempeng saling menekan, sehingga terjadi pembengkokan pada lempeng samudera yang lebih berat dan elastis (sudut *subduksi*) yang kemudian menyusup ke bawah lempeng benua yang ringan dan rapuh. Sebagai contoh, *subduksi* yang terdapat di Sumatera Barat terbentuk akibat pergerakan secara *konvergen* lempeng Indo-Australia ke Eurasia, dimana lempeng Indo-Australia menunjam dan menyusup ke bawah lempeng Eurasia.

Proses penunjaman ini memberikan bentuk morpologi pada permukaan bumi dan terbentuknya palung-palung yang dalam pada batas penunjaman *lithosfer*. Proses tumbukan ini menyebabkan terjadinya deformasi dan kompressi di daerah lempeng benua yang dekat dengan daerah tumbukan dan terjadinya intrusi magma yang membentuk busur vulkanik.

Zona subduksi ini merupakan daerah zona seismik aktif, dimana gempa tektonik baik dangkal, menengah maupun dalam biasanya terjadi di sepanjang zona ini. *Zona subduksi* ini terbentuk karena dua lempeng bergerak saling menekan dengan kecepatan yang sangat lambat dan lempeng yang mengalami pembengkokan membentuk sudut *subduksi*. Besar sudut *subduksi* dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang diberikan lempeng di atasnya. Jika tekanan dan regangan tumbukan dua lempeng tektonik melampaui batas elastisitas dan *ductile deformation*, maka lempeng akan patah, (Skinner:1987:407-408), akibatnya kerak bumi patah secara tiba-tiba, sehingga menimbulkan gempa bumi.

Karakteristik fisis sumber gempa bumi tektonik pada *zona subduksi* seperti di Sumatera Barat dan pantai baratnya dapat dipelajari melalui pola penyusupan lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia, yang dapat dinyatakan dengan sudut penunjaman (sudut *subduksi*). Berdasarkan pola penunjaman lempeng dapat diestimasi (diprakirakan) bencana gempa bumi kedepan, sehingga resiko gempa bumi dapat diminimalkan.

Permasalahan yang muncul sekarang adalah bagaimana pola penyusupan lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera Barat serta

berapa besar sudut *subduksi* yang dihasilkan. Mengingat begitu pentingnya pola penunjaman lempeng diketahui untuk mendapatkan solusi dari permasalahan perlu dilaksanakan penelitian untuk mengetahui pola penujaman (*subduksi)* lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera Barat dan karakteristis fisis gempa tektonik yang terjadi disini.

Analisa terhadap gempa tektonik berperan dalam meletakkan kerangka dasar mempelajari gaya pengontrol terbentuknya beberapa zona deformasi aktif di litosfer bumi. Kekuatan deformasi di litosfer berhubungan dengan sifat fisis dan mekanis deformasi bahan sebagai akibat dari perubahan suhu dan tekanan mantel bumi. Karakteristik fisis sumber gempa dapat diketahui melalui pola penyusupan litosfer dan parameter gempabumi (magnitudo, energi gempa dan percepatan tanah).

Menoleh kepada pergerakan lempeng Indo-Australia (lempeng Hindia) dan sistem sesar Sumatera Barat dan sesar Mentawai yang menyebabkan kawasan ini sangat menarik sebagai objek penelitian kegempaan dalam rangka meletakkan dasar pemikiran penanggulangan (mitigasi) bencana gempa kedepan. McCaffrey et. al. (1985) mengestimasi terdapatnya kerak benua sampai kedalaman (30-40) km dan adanya mekanisme pergerakan bidang sesar pada berbagai kedalaman pusat gempa di sepanjang busur Sumatera. Kemudian Posavec et. al . (1977) mengungkapkan bahwa zona sesar Sumatera didominasi oleh pergerakan lateral secara terus menerus lempeng Indo-Australia dan lempeng Sumatera. Curey et. al. (1989) meramalkan bahwa zona Benioff yang terdapat disepanjang busur Sumatera dapat berubah dengan cepat kedalaman dan bentuknya. Hal ini menandakan bahwa struktur zona disepanjang busur sumatera sangat kompleks dan dinamis.

Mengacu kepada kondisi di atas, wajarlah kiranya kalau kawasan Sumatera umumnya, Sumatera Barat khususnya merupakan daerah yang mempunyai aktifitas kegempaan cukup tinggi dengan kedalaman episenter kurang dari 50 km. Hal ini terbukti banyak gempa yang terjadi di Pulau Sumatera selama periode 1905 – 2005 seperti Tarutung (1937), Kerinci (1909, 1995), Padangpanjang (1926, 2002), Muarolabuh (1943), Liwa (1932, 1994), Alas (1916, 1921), Aceh (1964, 1979, 2004), Bengkulu (2000) dan Nias (2005), Tarutung (1987), Mentawai (2005) dan lain sebagainya. McCann (1987), M.T. Zen (1987) mengungkapkan bahwa semua pusat gempa di atas sangat berkaitan dengan sistem sesar Sumatera dan penyusupan

lempeng Hindia (Indo-Australia) pada lempeng Eurasia. Kondisi ini menyebabkan pada Sumatera bagian barat dan sekitarnya rawan terhadap gempa tektonik dan bencana tsunami.

Mengingat begitu kompleks dan rumitnya tatanan tektonik,sehingga banyaknya gempabumi yang terjadi di Sumatera Barat dan pantai baratnya memunculkan pertanyaan yaitu bagaimana karakteristik fisis sumber gempabumi yang disebabkan oleh aktivitas subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia. Sampai saat ini karakteristik fisis sumber gempa yang terdapat pada zona ini masih menjadi polemik yang harus dicarikan solusinya.

Karakteristik sumber gempa tektonik pada zona penyusupan seperti di Sumatera Barat dan pantai baratnya dapat dipelajari melalui pola penyusupan lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia dan percepatan tanah maksimum yang disebabkan oleh gempa. Permasalahan yang muncul disini adalah bagaimana pola penyusupan lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia serta bagaimana efeknya terhadap daerah di atasnya.

Efek yang ditimbulkan oleh gempa tektonik erat hubungannya dengan struktur litosfer dimana sumber gempa tersebut berada. Struktur litosfer tidak sama untuk semua daerah tergantung kepada proese dan jenis batuan serta mineral pembentuknya. Perbedaan struktur litosfer tersebut, tentu akan menghasilkan percepatan tanah maksimum yang berbeda pula. Hal ini menyebabkan banyaknya formula yang didapatkan secara empiris, seperti formula Murphy dan O'Brein, Richter, Kawashumi, Donovan, Esteva dan lain sebagainya, digunakan untuk menginterpretasikan suatu peristiwa gempa dan menentukan percepatan tanah maksimum berbagai daerah yang dilanda gempa. Subardjo dan Piccanusa (1998) menemukan bahwa kesemua formula di atas tidak memberikan hasil yang sama.

Melihat pada kondisi di atas, muncul permasalahan baru bagaimana formula yang dapat digunakan untuk menentukan percepatan tanah maksimum daerah Sumatera Barat dan sekitarnya atau berapa besarkah koreksi harga konstanta yang terdapat pada setiap formula-formula yang telah ditemukan para ahli sebelum ini yang cocok untuk menentukan parameter fisis sumber gempabumi di Sumatera Barat dan pesisir pantai baratnya. Formula baru ini perlu ditemukan dalam rangka

memudahkan membuat ramalan periode ulang gempa dan tempat dimana gempa berikutnya akan terjadi.

Kemudian dengan mengetahui pola penyusupan lempeng dan karakteristik fisis sumber gempa bumi pada zona subduksi di pantai pulau Sumatera, serta peta distribusi percepatan tanah maksimum pada suatu daerah, sangat berguna untuk menentukan langkah-langkah antisipasi terhadap mengurangi resiko gempabumi dan tsunami di pantai barat Sumatera Barat nantinya.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah di atas, maka rumusan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimanakah pola penunjaman lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia dan bagaimana parameter fisis gempa yang dihasilkannya.

C. Batasan Masalah

Mengingat keterbatasan waktu dan sarana pendukung lainnya, maka dibuat batasan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Data yang digunakan adalah data Gempa Tektonik yang terdapat pada BMG Padangpanjang dari tahun 1900-2005
2. Pola penujaman ditinjau berdasarkan sudut subduksi dan kecepatan subduksi yang dihitung menggunakan segitiga Le Pichon
3. Parameter gempa tektonik yang dikaji adalah magnitudo, intensitas, percepatan tanah dan energi gempa.

D. Pertanyaan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah di atas, pertanyaan penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pola penunjaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia yang dinyatakan dengan kedalaman penyusupan, sudut penunjaman dan rata-rata kecepatan penunjaman.
2. Bagaimana bentuk formula untuk menghitung percepatan tanah maksimum khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya
3. Bagaimana bentuk formula untuk menghitung magnitudo lokal dari sumber gempa khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya
4. Bagaimana bentuk formula untuk menghitung energi gempa khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya

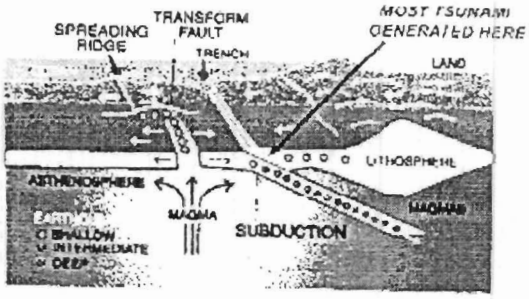
5. Bagaimana bentuk peta distribusi percepatan tanah maksimum dan intensitas maksimum oleh gempa di kawasan Sumatera Barat dan pantai baratnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Kondisi Tektonik Sumatera dan Subduksi Lempeng Indo-Australia

Tektonik lempeng adalah suatu teori yang menerangkan proses dinamika bumi, pembentukan jalur pegunungan, jalur gunung api, jalur gempa bumi, dan cekungan endapan di muka samudera yang diakibatkan oleh pergerakan lempeng. Turcotte (1982) menjelaskan bahwa kerak bumi dapat diibaratkan sebagai sebuah rakit yang sangat kuat dan relatif dingin mengapung di atas astenosfer yang liat dan sangat panas. Hal ini menyebabkan stabilitas litosfer sangat tergantung kepada proses yang berlangsung di astenosfer.

Kerak bumi (litosfer) yang berbentuk lapisan batuan menutupi seluruh permukaan bumi, akibat adanya aliran panas (arus konveksi) yang mengalir di dalam astenosfer menyebabkan kerak bumi pecah menjadi beberapa bagian lempeng kerak bumi. Lempeng tersebut dapat berupa kerak benua, kerak samudera dan kerak benua-samudera. Sumber panas dalam bumi berasal dari peluruhan radioaktif spontan yang berlangsung pada lapisan astenosfer dan inti bumi. Panas tersebut menghasilkan arus konveksi yang merupakan sumber kekuatan utama penyebab terjadinya pergerakan lempeng. Pergerakan lempeng tersebut diilustrasikan seperti Gambar 1.

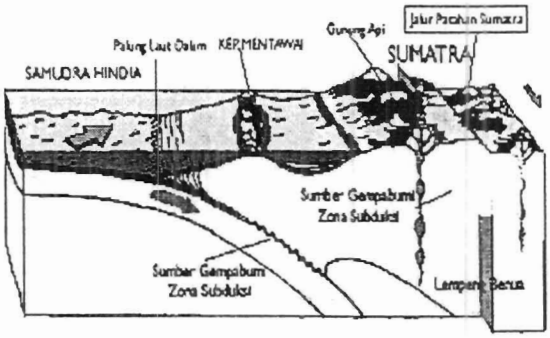


Gambar 1. Zona subduksi antara lempeng samudera dan benua
(Turcote: 1982 : 11)

Gambar 1, memperlihatkan bahwa pada zona subduksi terbentuk palung, yang diikuti oleh pemekaran dasar samudera. Pergerakan lempeng saling mendekati ini akan menyebabkan terjadinya tumbukan, dimana salah satu dari lempeng (lempeng samudera yang berberat jenis lebih besar) akan menunjam ke bawah lempeng benua yang lebih ringan. Pergerakan lempeng kerak bumi yang saling bertumbukan tersebut

membentuk zona subduksi seperti Gambar 1. Pergerakan tersebut menghasilkan gaya yang bekerja baik, horizontal maupun vertikal dan akan membentuk pergunungan, lipatan, jalur gunungapi, pensesaran, dan jalur gempabumi yang bersifat dinamis dan rawan terhadap deformasi. Selain itu juga terbentuk berbagai jenis cekungan pengendapan batuan sedimen seperti palung (parit), cekungan busurmuka, cekungan antar gunung dan cekungan busurbelakang. Setiap wilayah tektonik memiliki ciri atau indikasi tertentu, baik batuan, mineralisasi, struktur maupun kegempaanya. Daerah penunjaman membentuk suatu palung yang dalam, yang biasanya merupakan jalur gempa bumi yang kuat. Dibelakang jalur penunjaman akan terbentuk rangkaian kegiatan magmatik dan gunungapi serta berbagai cekungan pengendapan.

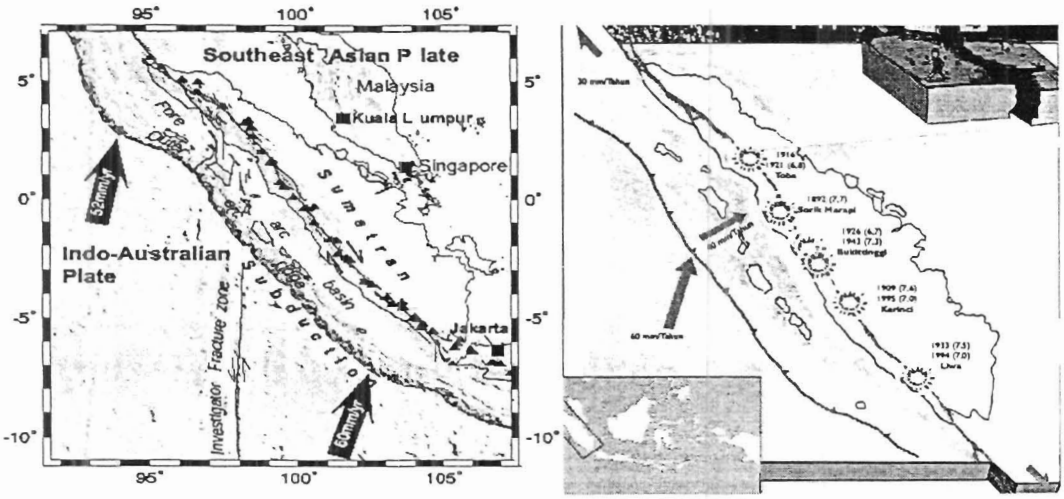
Subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia membentuk morpologi pada kepulauan Mentawai, kepulauan Batu dan pulau Sumatera seperti Gambar 2 berikut:



Gambar 2: Morpologi subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia (Dani Natawijaya, dkk : 2004)

Gambar 2 memperlihatkan bahwa lempeng Indo-Ausralia bergerak menuju dan menunjam ke lempeng Eurasia di depan pulau Sumatera. Bagian lempeng yang menunjam ke bawah kepulauan Mentawai, Nias dan Batu melekat pada batuan di atasnya, sehingga pergerakan ini memampatkan batuan di atasnya. Pemampatan ini berlangsung secara terus menerus, sehingga apabila mampatan batuan tersebut melampaui elastistas batuan pendukungnya, maka batuan tersebut akan patah. Patahnya batuan ini diikuti oleh gempa tektonik.

Kecepatan pergerakan lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia dekat pulau Sumatera dan Mentawai seperti diperlihatkan Gambar 3



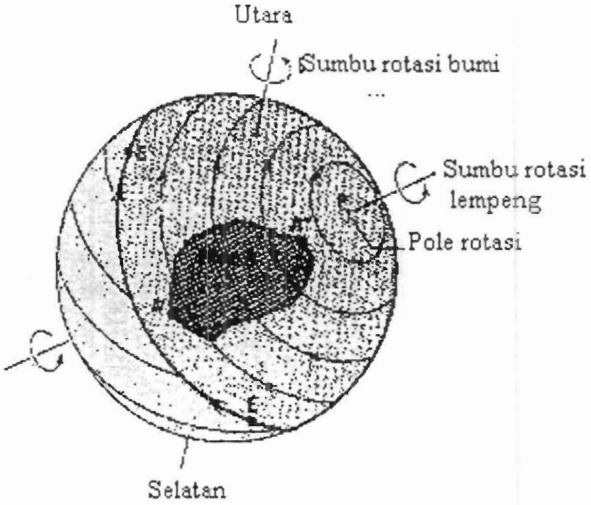
Gambar 3. Kondisi subduksi lempeng Indo-Ausralia ke lempeng Asia dan aspek kegempaanya (Dani Natawijaya, dkk: 2004)

Gambar 3, memperlihatkan bahwa di pesisir barat Sumatera banyak terdapat sesar (patahan) naik (thrust fault) yang juga mungkin bercampur dengan gerakan "Sea floor spreading" (bukaan, rengkahan lantai samudra) di Andaman yang berlanjut menjadi sesar (Natawidjaya: 1995, McCann : 1987). Penjelasan ini diperkuat oleh Diament, et. al, (1992), menyatakan bahwa *the geodynamic evolution of the western part of the Sunda arc is controlled by the change from frontal subduction of the Indo-Australian plate along Java to oblique subduction along Sumatra.* Selanjutnya, Le Pichon (1984), McCann (1987) menjelaskan bahwa gaya-gaya pengonrol pergerakkan tergantung kepada variasi kedalaman zone Bienioff dan kedalaman penetrasi zona penyusupan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa sumber gempabumi di Sumatera umumnya adalah patahnya pertemuan lempeng-lempeng yang biasa disebut dengan zona subduksi aktif di daratan Sumatera dan samudera Hindia (Ahmad dan Mulyana: 1995, Ahmad:1995). Evolusi geodinamika yang berlangsung di bagian barat Sumatera menyebabkan Sumatera rentan terhadap gempa tektonik seperti terlihat pada Gambar 3b.

Berdasarkan hasil penelitian Minster dan Jordan (1978) tentang susunan tektonik lempeng dan kenematika lempeng Asia Tenggara memperkirakan bahwa konvergensi pergerakan busur Sunda sepanjang azimuth di sekitar N20E bervariasi antara 7.8 cm/tahun sampai dengan 6 cm/tahun. Kemudian Natawijaya (2004) dalam reset tentang busur Sunda memperkirakan kecepatan penujaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia sebesar 60 mm/tahun.

B. Segitiga Bola Le Pichon

Segitiga bola Le Pichon dikembangkan untuk menentukan besar sudut dan kecepatan subduksi lempeng tektonik pada suatu tempat. Segitiga Le Pichon bertitik dari teori Euler yang menyatakan bahwa *which states that the movement of a portion of a sphere a cross its surface as uniquely defined by a single angguler rotation about a pole of rotation. The pole of rotation and its antipole point on the opposite diameter of the sphere are the only twopoints which remain in a fixed position relative to the moving portion* (Kearey and Vine : 2004). Kemudian Skinner and Porter (1987) mengungkapkan bahwa pergerakan setiap lempeng litosfer dipermukaan bumi dapat digambarkan sebagai sumbu rotasi pemekaran. Pernyataan di atas dapat digambarkan seperti Gambar 4 berikut:

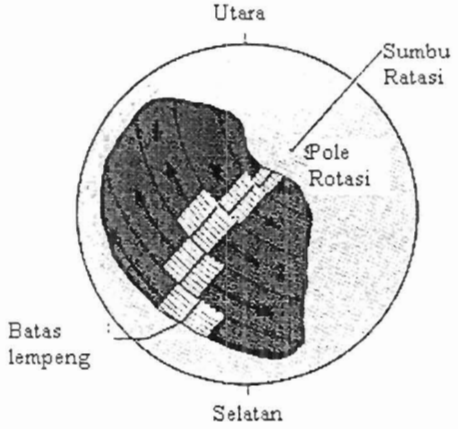


Gambar 4. Kutub rotasi lempeng (Skinner and Porter :1987 : 483, dan Kearay and Vine: 2004: 46)

Gambar 4, menunjukkan bahwa pergerakan lempeng A dikontrol oleh kecepatan rotasi disekitar sumbu pemekaran. Pada Gambar 4, titik P merupakan kutub rotasi lempeng, yaitu titik dimana sumbu rotasi lempeng mencapai permukaan bumi. Titik P diambil sebagai titik diam yang merupakan titik tetap pada lingkaran setengah bola. Titik E adalah titik batas dari lingkaran setengah bola yang bergerak sepanjang E - E' dengan kecepatan yang tinggi. Titik yang terletak antara P dengan E bergerak dalam dua ketentuan, yaitu makin dekat jarak titik dengan kutub rotasi lempeng, maka titik akan bergerak semakin lambat, sebaliknya makin jauh jarak titik dari kutub rotasi lempeng, maka titik akan bergerak semakin cepat, (Skinner:1987:479). Pada Gambar 4, lempeng A bergerak dari Timur ke Barat

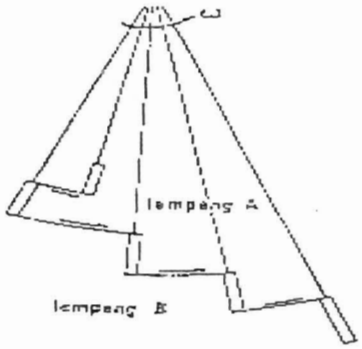
MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

terhadap sumbu rotasi lempeng. Titik A' bergerak lebih cepat dari titik A'', karena jarak titik A' ke kutub rotasi lempeng lebih jauh dari jarak titik A'' ke kutub rotasi lempeng. Untuk mengetahui posisi kutub rotasi lempeng digunakan Teorema Euler, yaitu dengan melihat hubungan antara sumbu rotasi lempeng, batas lempeng dan sesar transform, seperti pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Posisi kutub rotasi lempeng (Skinner:1987:479)

Sketsa geometri menentukan pusat rotasi dapat dilukis Gambar 6 berikut:



Gambar 6. Geometri untuk menentukan posisi kutub rotasi lempeng (Turcotte:1982:33)

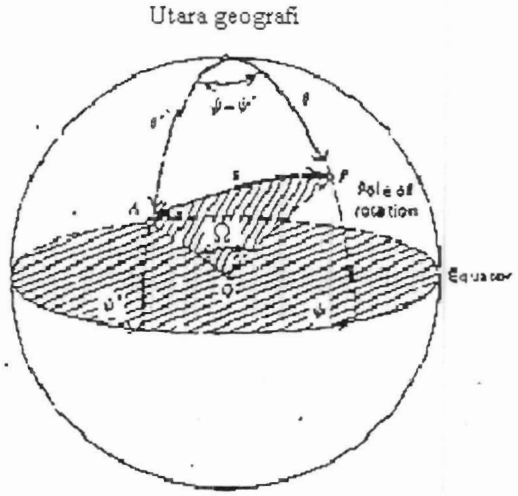
Berdasarkan teori Euler di atas dan bantuan Gambar 6, diperoleh posisi kutub rotasi lempeng untuk pergerakan antar lempeng besar yang berdekatan seperti diperlihatkan pada Tabel 1

Tabel 1. Posisi kutub rotasi lempeng, akibat gerak relatif dua lempeng yang berdekatan

No	Lempeng	Latitudo (N)	Longitudo (E)	ω (deg/Myr)
1	Nort American-Pacifik	48,8	-73,9	0,85
2	**Indian Australian-Eurasian**	**19,7**	**38,5**	**0,70**
3	African-Eurasian	25,2	-21,2	0,10
4	Eurasian-Pacifik	60,6	-78,9	0,98
5	African-Antartic	9,5	-41,7	0,15
6	Nort American-Sout American	66,6	-37,3	0,36

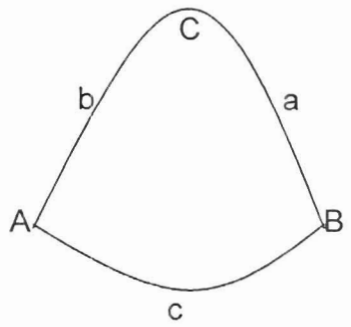
Sumber: (Turcotte:1982, LIPI:2005)

Kemudian Skinner and Porter (1987) menyatakan bahwa kecepatan gerak setiap titik pada lempeng tergantung kepada jarak pemekaran dari pole. Kecepatan subduksi ekivalen dengan pemekaran samudera, seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Berdasarkan itu dikembangkan metoda perhitungan kecepatan subduksi lempeng sumudera ke lempeng benua dengan menggunakan segitiga Le Pichon dengan bantuan Gambar 7



Gambar 7: Gambar segitiga Le Pichon untuk menentukan sudut penunjaman lempeng samudera ke lempeng benua

Dengan bantuan Gambar 7 dan aturan bola (Tjia:1993), dimana segitiga bola (sferis) merupakan segitiga yang terbentuk oleh busur-busur lingkaran pada permukaan bola, seperti terlihat pada Gambar 8.

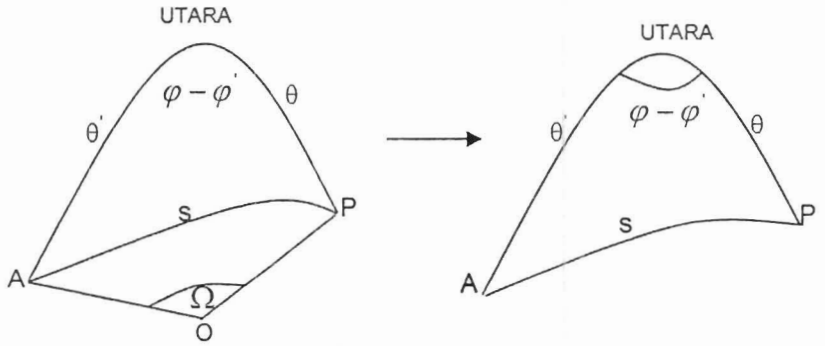


Gambar 8. Pendekatan geometri speris segitiga pada bola (Tjia:1993:19)

dimana A adalah sudut yang berhadapan dengan tali busur a, B adalah sudut yang berhadapan dengan tali busur b dan C adalah sudut yang berhadapan dengan tali busur c, maka berlaku aturan aturan kosinus

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A \qquad (1)$$

Segitiga bola (sferis) di atas ekivelen dengan segitiga bola Le Phicon, sehingga dengan mensubsitusikan pola Gambar 8 ke Gambar 7, maka diperoleh Gambar 9 berikut:

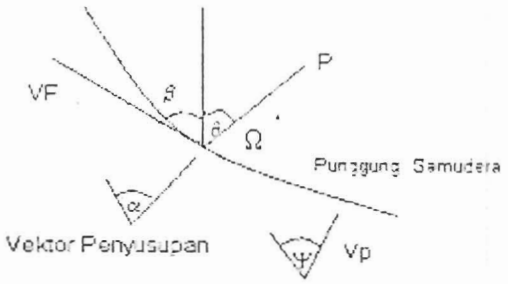


Gambar 9. Geometri segitiga bola Le Pichon (Turcotte:1982:33)

dimana A adalah sudut di depan tali busur θ, P adalah sudut di depan tali busur θ' dan $\varphi - \varphi'$ adalah sudut di depan tali busur s. Besar sudut yang dibentuk oleh tali busur s sama dengan besar sudut Ω. Berdasarkan Gambar 9 dan menggunakan aturan Cosinus (persamaan 1) di atas, maka formula segi tiga bola Le Pichon yang merupakan sudut kemiringan subduksi (Turcotte : 1982 : 32) yaitu:

$$\cos\Omega = \cos\theta \cos\theta^1 + \sin\theta \cos(\psi - \psi^1) \qquad (2)$$

dimana Ω sudut didepan tali busur terbentuk oleh perputaran titik dipermukaan bumi dari A ke P terhadap pusat bumi. Berdasarkan harga dapat dihitung sudut penunjaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia. dalam hal ini θ adalah sudut colatitude, Ψ adalah longititude rotasi bumi, θ' adalah colatitude Ψ' adalah longititude titik pada bidang batas lempeng seperti terlihat pada Gambar 3. Kecepatan penunjaman lempeng ditentukan melalui perhitungan vektor penyusupan dan kecepatan penyusupan rata lempeng seperti Gambar 10 :



Gambar 10: Vektor penunjaman lempeng samudera ke lempeng benua.

McCaffrey (1991) merumuskan kecepatan penunjaman lempeng dengan :

$$v_n = \frac{v_p \sin(\alpha - \psi)}{\sin(\alpha - \beta)} \tag{3}$$

dimana β adalah sudut yang dibentuk oleh arah pergerakan dengan garis normal, V_p kecepatan rata-rata menyusupan lempeng. Persamaan (3) dapat dimodifikasi menjadi:

$$v_n = \sin^{-1}\left\{\frac{\sin(\varphi - \varphi')\cos\theta}{\sin\Omega}\right\} \tag{4}$$

dimana φ besar sudut oleh proyeksi titik A (batas pertemuan lempeng) dan titik P (pusat rotasi lempeng) terhadap pusat bumi dan α sudut yang dibentuk oleh penunjaman lempeng terhadap garis normal. Kecepatan pergerakan relatif lempeng dihitung dengan persamaan:

$$\upsilon_r = \omega r \sin\Omega \tag{5}$$

dimana dalam hal ini ω adalah kecepatan sudut, *r* adalah jari-jari bumi 6371 km.

C. Percepatan Tanah dan Intensitas Gempa

Percepatan tanah maksimum berkaitan dengan struktur batuan dan intensitas gempa. Percepatan tanah maksimum merupakan nilai terbesar percepatan tanah pada suatu wilayah akibat getaran gempabumi dalam periode tertentu. Percepatan tanah maksimum dapat diukur langsung menggunakan *accelegraf* atau *strongmotion* yang dipasang pada suatu tempat. Namun pemasangan jaringan pengukuran tersebut sampai di Sumatera Barat belum efektif, maka perlu kiranya dibuat suatu pendekatan untuk menghitung percepatan tanah maksimum tersebut. Permasalahan yang akan dianalisa pada penelitian ini adalah karakteristik hubungan magnitudo, intensitas, jarak dan kedalaman episenter sumber gempabumi. Magnitudo adalah skala kekuatan gempa (jumlah energi yang dipancarkan) pada sumbernya yang dinyatakan dengan skala Richter. Intensitas gempa adalah besarnya amplitudo getaran gempa pada suatu tempat yang berpengaruh terhadap makluk hidup dan benda mati yang ditandai dengan skala kerusakan, biasanya dinyatakan dengan skala MMI (*Modified Mercceli Intensity)*.

Beberapa formula yang telah pernah digunakan untuk menghitung percepatan tanah maksimum, antara lain:

1. Rumus empiris Murphy dan O'Brein

   Murphy dan O'Brein dalam Subardjo, et. al. (1998) menuliskan persamaan empiris percepatan tanah maksimum pada suatu tempat dengan

$$\log \alpha_{ac} = aI + b\,M - c\log\Delta + d \qquad (6)$$

   dimana α_{ac} adalah percepatan tanah maksimum, I, intensitas gempa pada titik yang akan dianalisa, M, magnitudo gempa dan Δ, jarak episenter (km). Magnitudo dihitung dengan menggunakan hubungan empiris Vanek, et. al (1962) termodifikasi yaitu

$$M = p\,I_0 + q\log H + r \qquad (7)$$

   dimana I_0 intensitas gempa pada episenter, H, kedalaman episenter, sedangkan p,q, dan r adalah konstanta akan ditentukan dalam penelitian ini menggunakan metoda kuadrat terkecil. Kemudian intensitas gempa pada sumber gempa diprediksi menggunakan persamaan:

$$I_0 = \frac{(M - q\log H - r)}{p} \qquad (8)$$

2. Formula Empiris Kawashumi

Rumusan Kawashumi dalam Suwarta et. al. menghitung percepatan tanah maksimum dengan menggunakan persamaan

$$\log \alpha_{ac} = M - 5.45 + 0.00084(\Delta - 100) + \{0.43429 \log(100/\Delta)\}^{-1} \quad (9)$$

3. Formula Richter (1952) merumuskan percepatan tanah maksimum dengan

$$\log \alpha_{ac} = \frac{I}{3} - 0.5 \quad (10)$$

dimana $\log I = M_L - LogI_0$, M_L adalah magnitudo lokal dari suatu sumber gempa pada suatu tempat dan intensitas gempa maksimum pada episenter adalah

$$I_0 = P - Q \log \Delta \quad (11)$$

harga P dan Q adalah konstanta yang akan dihitung mengunakan metoda kuadrat terkecil.

Kemudian berdasarkan pengamatan dan penelitian, ternyata intensitas gempabumi suatu daerah tergantung pada percepatan tanah yang timbul didaerah tersebut. Guternberg – Richter serta Ishimoto secara empiris menurunkan suatu hubungan antara percepatan tanah dan intensitas gempabumi suatu daerah sebagai berikut :

$$\alpha_{arc} = 0.8 \times 10^{0.5(I-1)} \quad (12)$$

I = Skala intensitas Jepang (JMA)

Dengan rumus empiris tersebut di atas, diperoleh hubungan antara percepatan tanah maksimum dengan intensitas skala Mercalli dan intensitas skala Jepang dapat dituliskan seperti Tabel. 2 berikut :

Tabel.2 Hubungan percepatan tanah maksimum dengan intensitas skala Mercalli . dan intensitas skala Jepang

Skala JMA	Percepatan Maksimum (gal)	Skala MMI	Percepatan Maksimum (gal)
0	0 – 0.8	I	0 – 1
I	0.8 – 2.5	II	1 – 3
II	2.5 – 8.0	III	3 – 7
III	8.0 – 25.0	IV	7 – 18
IV	25.0 – 80.0	V	18 – 32
V	80.0 – 250.0	VI	32 – 69
VI	250.0 – 400	VII	69 – 149
VII	> 400	VIII	149 – 323
		IX	323 – 695
		X	695 – 1491
		XI	1491 – 3226
		XII	> 3226

Sumber : Ismail Sulaiman:1989.

D. Hubungan Frekuensi, Magnitudo dan Energi Gempa Bumi

McCann, et. al (1987), mengungkapkan bahwa perbedaan umur subduksi pemekaran dasar samudera berkaitan dengan perbedaan bentuk energi regangan yang dilepaskan, sebagai refleksi dari sejumlah aktivitas seismik dan magnitudo maksimum gempabumi. Gutenberg dan C.F. Richter (1952) telah menemukan secara empiris hubungan antara frekuensi kejadian gempa, N, dan magnitudo, M yaitu:

$$\log N = p - q\,M \qquad (13)$$

dengan p dan q adalah tetapan positif yang sangat tergantung kepada kondisi batuan di daerah kajian. Hal ini sesuai dengan pendapat McCann (1987) yang menyatakan bahwa pada busur Sumatera terlihat korelasi silang (cross correlation) magnitudo maksimum gempabumi dengan kondisi alamiah batuan bagian atas lempeng (samudera terhadap benua). Dengan menggunakan bentuk distribusi kumulatif gempa terhadap magnitudo, persamaan (13) dapat ditulis menjadi:

$$\log N = p' + qM \qquad (14)$$

dimana

260/KI/2006-S.1(1)
551.22072
AKM

$$p' = p - \log(q \ln 10) \tag{15}$$

dengan q menyatakan parameter keaktifan gempabumi yang erat kaitannya dengan sifat struktur tektonik suatu daerah, p dan p' menyatakan parameter yang tergantung kepada lamanya periode pengamatan dan seismisitas suatu daerah. Harga p dan q dapat dihitung dengan metoda *maximum Likehood* (Aki, K : 1965) yaitu:

$$q = \log\left\{\frac{e}{\overline{M} - M_0}\right\} \tag{16}$$

dengan $\overline{M}$ merupakan magnitudo rata-rata dan M_0 adalah magnitudo minimum. Batas atas dan bawah harga q untuk tingkat signifikansi 95% adalah

$$\begin{aligned} q_{atas} &= q(1 + 1.96/N^{1/2}) \\ q_{bawah} &= q(1 - 1.96/N^{1/2}) \end{aligned} \tag{17}$$

dimana N merupakan frekuensi kumulatif gempa bumi. Dengan mensubsitusikan persamaan (15) ke persamaan (11) maka didapat:

$$p = \log N(M > M_0) + \log(q \ln 10) + qM_0 \tag{18}$$

Selanjutnya, Gutenberg dan Richter (1952) mengestimasi hubungan energi dengan magnitudo gempa dengan persamaan

$$\log(E) = 1.5M_L + 11.8 \tag{19}$$

dengan

$$M_L = \log I - \log I_L \tag{20}$$

dimana I adalah intensitas maksimum gempa pusat gempa dan I_0 adalah intensitas gempa lokal.

III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

A. Tujuan Penelitian

Sesuai dengan latar belakang permasalahan dan pertanyaan penelitian serta tinjauan pustaka, maka tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui pola penunjaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia yang dinyatakan dengan kedalaman penyusupan, sudut penunjaman dan rata-rata kecepatan penunjaman.
2. Membuat formula untuk menghitung percepatan tanah maksimum khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya

3. Membuat formula untuk menghitung magnitudo lokal dari sumber gempa khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya
4. Membuat formula untuk menghitung energi gempa khusus untuk daerah Sumatera Barat dan pantai baratnya
5. Membuat peta distribusi percepatan tanah maksimum dan intensitas maksimum oleh gempa di kawasan Sumatera Barat dan pantai baratnya.

B. Manfaat Penelitian

Dengan selasainya penelitian diharapkan bermanfaat untuk

1. Pengembangan mata kuliah Geodinamika dan Seismologi Gempa Bumi pada Jurusan Fisika atau program Studi Geofisika dan Fisika Bumi
2. Meletakkan fondasi pemikiran untuk meminimalisasi bencana gempa dan tsunami
3. Meletakkan fondasi pemikiran untuk mengembangan tata ruang pada kota dan kabupaten di Sumatera Barat
4. Membantu mempercepat penyelesaian skripsi mahasiswa S-1 pada program Fisika Jurusan Fisika FMIPA UNP

IV. METODA PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Data penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari stasiun Badan Meterologi dan Geofisika Padangpanjang yang terekam dalam bentuk analog. Data yang akan digunakan adalah data gempa tektonik mulai tahun 1900 – 2005 untuk daerah penelitian 88.5^0BT–102^0BT dan 1^0LU–3.5^0LS, dengan magnitudo gempabumi lebih dari 4.0 skala Richter.

Penelitian deskriptif akan berusaha mengambarkan kondisi suatu daerah dengan melihat hubungan sebab-akibat dari variabel terkait. Variabel bebas penelitian ini adalah cepat rambat gelombang seismik (gelombang gempa tektonik yang terdiri dari cepat rambat gelombang primer dan gelombang sekunder) yang terdapat di Sumatera Barat dan pesisir baratnya. Variabel tergantungnya adalah percepatan tanah masimum, intensitas gempa, magnitudo dan jarak episenter gempa dan kedalaman episenter gempa.

Karakteristik fisis sumber gempabumi diestimasi dari bentuk respon bumi terhadap gangguan yang diterimanya. Respon bumi tersebut dapat dilihat dari

bentuk persamaan respon, seperti persamaan magnitudo, persamaan percepatan tanah maksimum. Untuk mendapatkan harga konstanta, seperti p,q dan r pada persamaan Murphy dan O'Brein dan a,b,c dan d dan pada persamaan Richter, digunakan metoda kuadrat terkecil yaitu dengan mengkonvolusikan parameter fisis bumi (konstanta yang akan dicari) dengan parameter fisis gempa sebagai berikut:

$$c_t = \sum_{t=0}^{m} f_s b_{t-s} \tag{21}$$

dimana c_t menyatakan harga parameter hasil perhitungan, b_s menyatakan parameter fisis bumi dan f_s menyatakan parameter gempabumi (magnitudo gempa, percepatan tanah maksimum dan sebagainya). Bila d_t menyatakan harga parameter hasil pengamatan, maka beda harga pengamatan dengan harga perhitungan adalah

$$I = \sum_{t=0}^{m+n} (d_t - c_t)^2 = \sum_{t=0}^{m+n} \left(d_t - \sum_{s=0}^{m} f_s b_{t-s} \right)^2 \tag{22}$$

Perbedaan harga pengamatan dengan harga perhitungan minimum, apabila harga differensial parsil persamaan (22) terhadap setiap koefisien persamaan parameter gempabumi sama dengan nol. Dengan demikian diperoleh:

$$\frac{\partial I}{\partial f_i} = \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} - \sum_{s=0}^{m} f_s \left(\sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} \right) = 0 \tag{23}$$

atau

$$\sum_{s=0}^{m} f_s \sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} = \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} \text{ , untuk i = 0,1,2 ...} \tag{24}$$

dimana

$$\sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} = \phi_{t-s} \text{ dan } \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} = g_i \tag{25}$$

dalam ϕ_t merupakan autokorelasi dari parameter fisis bumi dan g_i merupakan korelasi silang antara parameter fisis bumi dan harga parameter hasil pengamatan.

B. Desain Penelitian

Agar lebih memudahkan dalam mengorganisir pelaksanaan program, maka penelitian ini dibagi atas tiga tahap seperti berikut:

Tahap Persiapan

Pada tahap ini dilakukan pengurusan izin dan pembuatan *Momerandum of Understanding* (MoU) dalam pemakaian data seismogram yang terdapat di stasiun

BMG Padangpanjang. Kemudian dilanjutkan dengan pembuatan program (*software*) untuk menghitung nilai prediksi persamaan *Likelihood* dan perhitungan harga konstanta persamaan Donovan dan Richter dengan metoda kuadrat terkecil, dengan menggunakan persamaan 24 dan 25. Sedangkan anggota lain bersama tenaga teknis lapangan ditugaskan untuk mengumpulkan data dari kejadian setiap gempa tahun 1900 – 2005 dan mengklasifikasikannya menurut kekuatan dan lokasi sumber gempa dan memetakannya. Gempa yang berkekuatan kurang dari 4.0 skala Richter tidak dijadikan sebagai data yang akan diolah.

Tahap Pengolahan Data

1. Pola Penunjaman Lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia

   Data gempa tahun 1900 – 2005, dikelompokkan atas beberapa penampang dari Barat Laut-Tenggara, dalam arah Barat Daya-Timur Laut dengan lebar 0,5°, seperti terlihat pada Lampiran 5 atau Gambar 16. Setelah data dikelompokkan, data diplot dalam bentuk grafik hubungan kedalaman pusat gempa dengan posisi *episenter* gempa. Kemudian sudut penyusupan (subduksi) dan kedalaman penunjaman dihitung menggunakan parameter jarak episentrum dan kedalaman titik pusat gempa menggunakan formula Le Pichon atau persamaan (2). Kecepatan penyusupan lempeng Indo-Ausralia ke lempeng Eurasia dihitung menggunakan persamaan (4) dan (5). Hasil pengeplotan *hiposenter* dengan posisi *episenter* gempa untuk setiap penampang akan memberikan pola penunjaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia di Pantai Barat Sumatera Barat

2. Karakteristik Fisis Sumber Gempa

   Karakateristik fisis sumber gempa yang akan ditentukan adalah persamaan magnitudo gempa, intensitas gempa pada episenter gempa dan percepatan tanah maksimum, energi sumber gempa dan magnitudo lokal untuk daerah Sumatera Barat dan pesisir pantai baratnya. Pekerjaan utama pada tahap ini adalah menentukan konstanta p, q , r dari persamaan (7) dengan menggunakan metoda kuadrat terkecil (*least square*). Berdasarkan persamaan (22), maka persamaan (7) dapat ditulis menjadi:

$$\sum M = \Delta r + p\sum I_0 + q\sum \log H$$

$$\sum MI_0 = r\sum I_0 + p\sum I_0^2 + q\sum I_0 \log H$$

$$\sum M \log H = r\sum \log H + p\sum I_0 \log H + q\sum \log H^2$$

Kemudian bila m = M - [M], $i_0 = I_0 - [I_0]$, dan h = H – [H] yang merupakan deviasi terhadap nilai rata-rata, sehingga ketiga persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$\sum mi_0 = r\sum mi_0 + p\sum i_0^2 + q\sum i_0 \log h$$

$$\sum m \log h = r\sum \log h + p\sum i_0 \log h + q\sum \log h^2$$

dengan menggunakan bantuan persamaan (24), maka diperoleh

$$\sum m^2 = \sum M^2 - \Delta[M]^2$$

$$\sum i_0^2 = \sum i_0^2 - \Delta[i_0]^2$$

$$\sum (\log h)^2 = \sum (\log H)^2 - \Delta[\log H]^2$$

$$\sum (mi_0) = \sum MI_0 - \Delta[M][I_0]$$

$$\sum (m \log h) = \sum (M \log H) - \Delta[M][\log H]$$

$$\sum (i_0 \log h) = \sum (I_0 \log H) - \Delta[I_0][\log H]$$

dengan metoda eliminasi, maka akan diperoleh harga p, q dan r.

Setelah harga konstanta p, q, dan r didapatkan, harga tersebut disubtitusikan ke persamaan (7) maka diperoleh formula untuk menghitung magnitudo sumber gempabumi khusus untuk Sumatera Barat dan pesisir pantai baratnya.

Setelah harga konstan p, q, dan r diperoleh, pekerjaan berikutnya adalah menentukan harga konstanta a, b, c dan d dari persamaan (6). Harga konstanta ini juga diperoleh dengan menggunakan metoda kuadrat terkecil (*least square)*. Dengan menggunakan penalaran yang sama dengan memperoleh konstanta a,b dan c pada persamaan (6) di atas, diperolehlah sistem persamaan untuk menentukan persamaan percepatan tanah maksimum sebagai berikut:

$$\log \alpha_{ac} = aI + bM - c \log \Delta + d$$

$$\sum I \log \alpha_{ac} = a\sum I^2 + b\sum MI - c\sum I \log \Delta + d\sum I$$

$$\sum M \log \alpha_{ac} = a\sum IM + b\sum M^2 - c\sum M \log \Delta + d\sum M$$

$$\sum \log \alpha_{ac}^{2} = a\sum I \log \alpha_{ac} + b\sum M \log \alpha_{ac} - c\sum \log \Delta \log \alpha_{ac} + d\sum \log \alpha_{ac}$$

$$\sum \log \Delta \log \alpha_{ac} = a\sum I \log \Delta + b\sum M \log \Delta - c\sum \log \Delta^{2} + d\sum \log \Delta$$

dengan menggunakan penjabaran seperti penguraian persamaan (7), maka akan diperoleh minimal 4 persamaan dengan 4 variabel yang belum diketahui besarnya. Dengan menyelesaikan sistem persamaan di atas, maka diperoleh harga konstanta a, b, c dan d. Kemudian harga konstanta yang diperoleh tersebut di subtitusikan ke dalam persamaan (6), sehingga diperoleh formula percepatan tanah maksimum khusus untuk wilayah Sumatera Barat dan pantai baratnya. Berdasarkan formula tersebut dihitung percepatan tanah maksimum di daerah Sumatera Barat dan kepulauan Mentawai yang kemudian dituangkan dalam bentuk peta kontur dua dimensi

Seterusnya, dirumuskan persamaan khusus untuk menghitung magnitudo lokal, berdasarkan persamaan (19) dan (20), setelah konstanta yang dibutuhkan diketahui melalui metoda kuadrat terkecil. Berdasarkan hubungan magnitudo dan intensitas gempa, ditentukan persamaan energi yang dihasilkan untuk gempa di wilayah Sumatera Barat.

Tahap Interpretasi

Setelah pola subduksi diperoleh, dibuat gambaran penyusupan lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia yang berlangsung di pantai barat Sumatera Barat. Kemudian dilakukan interpretasi untuk memprediksi parameter gempa dan periode gempa yang akan datang. Hasil pengolahan data tentang percepatan tanah maksimum, magnitudo lokal dan energi gempa dipetakan agar mudah diinterpretasikan. Untuk memvalidasi formulasi yang diperoleh, maka hasil perhitungan berdasarkan formula yang diperoleh dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan rumus empiris Richter, Donovan dan Kawashumi.

V. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

1. Sudut Subduksi dan Kecepatan Penujaman

Hasil pengeplotan *hiposenter* dengan posisi *episenter* gempa untuk setiap penampang memberikan pola penunjaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia di Pantai Barat Sumatera Barat. Distribusi episenter gempa bumi untuk

daerah Sumatera Barat dan sekitarnya periode 1900-2005 diperlihatkan Gambar 11, pada lampiran 1. Dengan asumsi bahwa kedalaman pusat gempa merupakan permukaan lempeng samudera yang munyusup ke lempeng benua dan berdasarkan analisis grafik proyeksi penujaman seperti Gambar 12, pada Lampiran 2, diperoleh posisi batas pertemuan lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia untuk setiap penampang di pantai Barat Sumatera Barat, seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Posisi batas pertemuan lempeng untuk setiap penampang

Penampang	Posisi batas pertemuan lempeng	
	Lintang (Latitude) θ' (°N)	Bujur (longitude) φ' (°E)
1	-0,25	97,85
2	-0,65	98,25
3	-0,99	98,32
4	-1,30	98,50
5	-1,35	98,85
6	-1,50	98,97
7	-2,35	98,84
8	-2,60	99,00
9	-3,25	99,53

Posisi kutub rotasi lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia terdapat pada (19,7°N, 38,5°E) (Turcote : 1982, LIPI: 2005). Besar sudut *subduksi* lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia dan kecepatan subduksinya untuk tiap-tiap penampang di pantai Barat Sumatera Barat diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Besar sudut *subduksi* lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia untuk setiap penampang di pantai barat Sumatera Barat

No	Posisi Pertemuan Lempeng			Sudut			Kecepatan Subduksi		Keda-laman Subduksi (Km)
	Lintang θ' (°N)	Bujur φ' (°E)	Jurus (°NE)	Busur (Δ°)	Normal (α°)	Subduksi (γ°)	Relatif v_r (cm/thn)	Normal v_n (cm/thn)	
1	-0,04	98,94	266	61,41	70,71	30,70	6,38	5,85	130
2	-0,63	98,88	257	61,79	70,73	30,89	6,36	5,38	135
3	-0,79	98,72	254	62,13	70,75	31,06	6,35	5,18	68
4	-0,8	98,90	250	62,42	70,77	31,21	6,33	4,91	85
5	-0,98	99,28	246	62,76	70,76	31,38	6,32	4,60	119
6	-1,47	99,30	247	62,93	70,77	31,46	6,31	4,67	98
7	-1,13	99,87	246.5	63,15	70,83	31,57	6,30	4,63	117
8	-1,88	99,56	244	63,39	70,84	31,69	6,29	4,44	109
9	-2,12	100,25	251	64,14	70,87	32,07	6,26	4,92	89

Keterangan :

Simbol		
θ		colatitudo kutub rotasi lempeng (Lintang Utara)
φ		longitudo kutub rotasi lempeng (Bujur Timur)
θ'		colatitudo batas pertemuan lempeng (Lintang Utara)
φ'		longitudo batas pertemuan lempeng (Bujur Timur)
β		Arah Jurus (NE) (ditinjau dari Utara ki Timur)
Δ		besar sudut oleh proyeksi titik A (batas pertemuan lempeng)dan titik P (pusat rotasi lempeng Eurasia) terhadap pusat bumi
α		sudut yang dibentuk oleh penunjaman lempeng terhadap garis normal
γ		besar sudut subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia
υ_r		kecepatan relatif penunjaman lempeng (cm/tahun)
υ_n		Kecepatan normal penunjamna lempeng (cm/tahun)

Data hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia adalah $31{,}33^0$ dengan kecepatan subduksi relatif rata-rata sebesar 6, 32 cm/tahun dan kecepatan gerak terhadap garis normalnya adalah 4,93 cm/tahun. Harga ini memberikan informasi bahwa *subduksi* yang terdapat di barat Sumatera Barat adalah tergolong dangkal dan aktif, tentu rawan terhadap gempa tektonik.

2. Magnitudo dan Percepatan Tanah

Setelah dilakukan analisa terhadap data gempa tahun 1900 sampai dengan tahun 2005, dengan menggunakan pendekatan kuadrat terkecil (*least square*) berdasarkan persamaan $M = p\ I_0 + q \log H + r$, dan $\log \alpha = aI + b\,M - c \log\Delta + d$ maka diperoleh harga konstanta seperti pada Tabel 5 berikut:

Tabel 5: Daftar hasil perhitungan konstanta persamaan parameter fisis karakteristik gempa tektonik di sumatera barat dan pesisir pantainya

Harga Konstanta Persamaan $M = p\ I_0 + q \log H + r$			Harga Konstanta Persamaan $\log \alpha_{arc} = aI + b\,M - c \log\Delta + d$			
p	q	r	a	b	c	d
0,415 ± 0,055	- 0,795 ± 0,076	3,334 ± 0,456	0,421 ± 0,034	0,146 ± 0,024	0,746 ± 0,158	- 2,884 ± 0,35

Berdasarkan harga konstanta pada Tabel 5, diperoleh persamaan seperti yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu :

a. Formula untuk menghitung magnitudo lokal dari sumber gempa khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu $M_L = 0.415\ I_0 - 0.795\ \text{Log}\ H + 3.334$, dengan kesalahan estimasi dari formula 4,6%, sedangkan intensitas gempa pada episenter $I_o = I + 3 \log (\Delta/H) + 0.01\ (\Delta - H)$.

b. Formula untuk menghitung energi gempa khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu $\text{Log}\ E = 5.24 + 1.44\ M_L$

c. Formula menghitung percepatan tanah maksimum oleh gempa tektonik khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu

$$\log \alpha_{ac} = 0.421\ I + 0.146\ M_L + 0.746 \log \Delta - 2.844.$$

dengan kesalahan estimasi formula yang diperoleh 2,2%

Berdasarkan persamaan yang telah diperoleh di atas, maka diperoleh peta distribusi percepatan tanah oleh gempa seperti terlihat pada Gambar 13 dan 14 dalam Lampiran 3 dan intensitas gempa untuk Sumatera Barat dan sekitarnya seperti Gambar 15 pada Lampiran 4. Berdasarkan peta distribusi percepatan tanah seperti pada lampiran 3, dibuat tabel yang menyatakan distribusi percepatan tanah untuk setiap grid, seperti pada Tabel 5.

Tabel 6. Nilai percepatan tanah maksimum berdasarkan koordinat bujur dan lintang

No.	Lintang	Bujur	a-Maks	No.	Lintang	Bujur	a-Maks
1	-3,50	98,50	51.67	41	-3,50	100,50	127.66
2	-3,00	98,50	99.77	42	-3,00	100,50	265.11
3	-2,50	98,50	182.06	43	-2,50	100,50	392.86
4	-2,00	98,50	163.29	44	-2,00	100,50	629.81
5	-1,50	98,50	153.27	45	-1,50	100,50	392.86
6	-1,00	98,50	250.26	46	-1,00	100,50	555.13
7	-0,50	98,50	284.10	47	-0,50	100,50	324.26
8	0,00	98,50	276.19	48	0,00	100,50	136.65
9	0,50	98,50	512.07	49	0,50	100,50	278.54
10	1,00	98,50	625.53	50	1,00	100,50	319.43
11	-3,50	99,00	80.38	51	-3,50	101,00	120.63
12	-3,00	99,00	141.63	52	-3,00	101,00	214.35
13	-2,50	99,00	412.15	53	-2,50	101,00	629.81
14	-2,00	99,00	331.89	54	-2,00	101,00	373.10
15	-1,50	99,00	221.16	55	-1,50	101,00	629.81
16	-1,00	99,00	401.97	56	-1,00	101,00	723.09
17	-0,50	99,00	478.23	57	-0,50	101,00	452.39

Sambungan Tabel 6.

No.	Lintang	Bujur	a-Maks	No.	Lintang	Bujur	a-Maks
18	0,00	99,00	363.53	58	0,00	101,00	157.99
19	0,50	99,00	625.53	59	0,50	101,00	169.48
20	1,00	99,00	369.02	60	1,00	101,00	204.90
21	-3,50	99,50	127.66	61	-3,50	101,50	316.87
22	-3,00	99,50	265.11	62	-3,00	101,50	315.86
23	-2,50	99,50	387.54	63	-2,50	101,50	392.86
24	-2,00	99,50	265.11	64	-2,00	101,50	629.81
25	-1,50	99,50	304.88	65	-1,50	101,50	392.86
26	-1,00	99,50	297.28	66	-1,00	101,50	452.39
27	-0,50	99,50	489.44	67	-0,50	101,50	283.96
28	0,00	99,50	276.19	68	0,00	101,50	128.09
29	0,50	99,50	363.53	69	0,50	101,50	155.82
30	1,00	99,50	163.61	70	1,00	101,50	90.38
31	-3,50	100,00	156.03	71	-3,50	102,00	237.71
32	-3,00	100,00	387.54	72	-3,00	102,00	588.63
33	-2,50	100,00	206.58	73	-2,50	102,00	518.44
34	-2,00	100,00	387.54	74	-2,00	102,00	278.54
35	-1,50	100,00	244.49	75	-1,50	102,00	171.20
36	-1,00	100,00	233.93	76	-1,00	102,00	196.24
37	-0,50	100,00	236.24	77	-0,50	102,00	151.97
38	0,00	100,00	363.53	78	0,00	102,00	155.82
39	0,50	100,00	236.24	79	0,50	102,00	113.79
40	1,00	100,00	278.54	80	1,00	102,00	204.90

B. Pembahasan

Berdasarkan hasil pemplotan *hiposenter* gempa dengan posisi *episenter* gempa diperoleh pola penunjaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera barat, seperti Gambar 12 pada Lampiran 1. Penampang 1, 2, 3 dan 4 memiliki pola penunjaman lempeng yang lebih landai dari penampang lainnya. Hal ini terjadi karena lempeng 1, 2 dan 3 terletak antara kepulauan Nias dan kepulauan Mentawai, diperkirakan aktivitas *subduksi* penampang 1, 2, 3 dan 4 dipengaruhi oleh aktivitas *subduksi* di kepulauan Nias, kepulauan Batu dan kepulauan Mentawai (teori domino), sedangkan kecuraman penampang 5,6,7 dan 8 lebih curam dibandaingkan dengan yang. lainnya, bahkan penampang 9 merupakan penampang yang paling curum, hal ini menandakan bahwa kepulauan Mentawai tergolong daerah yang mempunyai resiko tinggi terhadap gempa bumi yang tercermin dari banyaknya gempa yang terjadi di daerah Sumatera Barat memiliki titik pusat gempa di kepulauan Mentawai.

Pola penunjaman lempeng memberikan gambaran besarnya deformasi yang dialami lempeng. Makin curam penunjaman lempeng, maka deformasi (perubahan bentuk) yang dialaminya semakin besar. Jumikis (1979) mengatakan bahwa salah satu faktor penyebab terjadinya deformasi pada batuan (lithosfer) adalah besarnya gaya tekan yang diterima oleh batuan tersebut. Makin besar gaya tekan yang diterima, maka deformasi yang dialami batuanpun semakin besar. Dari kutipan ini dapat disimpulkan bahwa perbedaan pola penunjaman lempeng dipengaruhi oleh besarnya gaya tekan yang diterima lempeng, dengan kata lain penampang yang memiliki pola penunjaman lempeng yang curam mencerminkan bahwa gaya tekan yang dialaminya besar, sebaliknya penampang yang memilki pola penunjaman lempeng yang landai mencerminkan bahwa gaya tekan yang dialaminya kecil.

Perbedaan besar sudut subduksi ini disebabkan oleh adnya perbedaan tekanan dan gaya gravitasi yang dialami lempeng, (Turcotte:1982:249). Makin besar tekanan dan gaya gravitasi yang dimiliki lempeng maka besar sudut subduksi lempeng akan semakin besar. Informasi ini dapat diinterpretasikan bahwa periode ulang gempa pada penampang 1,2,3 dan 4 (Sumaera Barat bagian Utara, seperti pada pulau Siberut, Pasaman dan Payakumbuh, Lima Puluh Kota) lebih cepat dibandingkan dengan penampang 5,6,7,8 dan 9 (Sumatera Barat Bagian Selatan, seperti kepulauan Pagai, Muarolabuh /Solok Selatan, dan Pesisir Selatan). Bentuk segmen yang terdapat pada daerah tersebut di atas adalah seperti terlihat pada Lampiran 6.

Besar sudut subduksi rata-rata lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera Barat adalah $44{,}2^0$. Harga ini memberikan informasi bahwa subduksi yang terdapat di pantai Barat Sumatera Barat tergolong pada subduksi dangkal yang membuktikan bahwa daerah yang diteliti rawan terhadap gempa bumi.

Makin besar sudut subduksi maka kemungkinan terjadinya patahan dangkal pada lempeng akan semakin kecil, hal ini terjadi karena tekanan yang diterima lempeng semakin besar. Kedalaman hiposenter gempa bergantung pada kedalaman terjadinya patahan lempeng, makin dangkal hiposenter gempa maka goncangan (gempa) yang terjadi juga akan semakin kuat, akibatnya resiko yang ditimbulkan juga semakin besar.

Pola penunjaman lempeng analog dengan besar sudut subduksi lempeng. Makin curam pola penunjaman lempeng, maka besar sudut subduksi makin besar.

Sebaliknya makin landai penunjaman lempeng, maka sudut subduksinyapun makin kecil. Kecuramnya penunjaman lempeng samudera ke lempeng benua yang ditunjukan oleh besarnya sudut subduksi lempeng berarti kedalam subduksi lempeng semakin besar. Jika tekanan dan regangan lempeng melampaui batas elastisitas lempeng maka lempeng tersebut akan mengalami deformasi permanen (ductile deformation) dan apabila tekanan dan regangan terhadap lempeng (proses subduksi) tetap berlangsung, pembengkokan lempeng akan melampaui batas elastisitas. Akibatnya lempeng tersebut akan patah.

Tabel 4, juga memperlihatkan bahwa kecepatan relatif penujaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia disekitar pantai barat Sumatera Barat rata-rata 6,32 cm/tahun. Harga ini lebih besar dari harga rara-rata kecepatan relatif penujaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia di pulau Sumatera yang diprediksi Natawijaya (2004) dan Minster dan Jordan (1978) yaitu 6 cm/tahun. Hal inilah yang menyebabkan Sumatera Barat lebih sering digoncang gempa dibandingkan daerah Sumatera lainnya.

Berdasarkan sembilan penampang yang dibuat, ternyata seismitivitas daerah Sumatera Barat bagian Utara (Pasaman dan Seberut Utara) lebih besar dari bagian selatan (Solok dan Pesisir Selatan serta Pulau Spora). Dengan kata lain periode ulang gempa pada Sumaera Barat bagian utara lebih besar dari bagian selatan. Bila ditinjau dari kedalaman gempa, ternyata peluang gempa dangkal sering banyak terjadi pada penampang 3,4,6,dan 9. Hasil ini mengindikasikan bahwa pada daerah Pulau Spora dan Pagai serta pada daerah Pesisir Selatan dan Solok mempunyai peluang dilanda gempa dangkal.

Dari harga konstanta yang diperoleh, diketahui bahwa ketiga paramater yang dijadikan patokan dalam formula Murphy O'Brien yaitu intensitas, magnitudo dan jarak pusat gempabumi sangat berpengaruh terhadap besarnya percepatan tanah pada daerah Sumatera Barat. Dari formula yang diperoleh memberi arti bahwa gempa dengan magnitudo besar atau intensitas tinggi akan menyebabkan percepatan tanah yang tinggi pula. Persamaan energi gempa menunjukkan bahwa apabila energi yang dilepaskan saat patahan berlangsung besar, maka gempa yang dihasilkan bermagnitudo besar. Hubungan ini tidaklah sederhana itu, karena besar

magnitudo gempa pada suatu daerah sangat ditentukan oleh kedalam titik pusat gempa (kedalaman hiposentrum gempa).

Keseluruhan persamaan yang diperoleh ternyata terdapat hubungan yang erat antara energi yang dihasilkan gempa dengan percepatan tanah pada daerah yang dilanda gempa. Koefisien persamaan menunjukkan bahwa struktur geologi daerah sangat menentukan percepatan tanah yang dilalui gempa. Untuk lebih jelasnya dianalisa perhitungan menggunakan formula yang diperoleh.

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan formula percepatan tanah khusus daerah Sumatera Barat berdasarkan grid - grid yang telah ditentukan diperoleh harga percepatan tanah minimum sebesar 51.67 gal dan percepatan tanah maksimum sebesar 723.09 gal.

Berdasarkan data percepatan tanah dan peta percepatan tanah seperti Gambar 13 dan 14 pada Lampiran 3 dan tingkat resiko gempa sebagaimana tertuang dalam (SNI03-1726-2003) ternyata secara umum Sumatera Barat merupakan daerah yang beresiko tinggi terhadap bahaya gempabumi, karena hampir semua daerahnya memiliki percepatan tanah maksimum di atas 300 gal, hal ini sesuai dengan standar yang telah ditetapkan secara nasional. Untuk daerah di Sumatera Barat, yang memiliki harga percepatan tanah maksimum tertinggi adalah Kabupaten Solok yaitu sebesar 723.09 gal sedangkan daerah yang memiliki percepatan tanah maksimum terendah adalah Kota Payakumbuh yaitu sebesar 286.47 gal.

Sedangkan jika berdasarkan harga rata – rata percepatan tanah, daerah yang termasuk dalam zona beresiko tinggi ($\alpha_{ac} > 300$ gal) adalah Kota Pariaman, Kabupaten Padang Pariaman, Kota Padang Panjang, Kabupaten Pasaman Barat, Kabupaten Tanah datar, Kabupaten Dharmasraya, Kota Sawahlunto, Kota Solok, Kota Swl/Sijunjung, Kota Padang, Kabupaten Pesisir Selatan, Kabupaten Solok Selatan, dan Kabupaten Solok. Hal ini disebabkan karena dearah tersebut termasuk daerah jalur sumber gempabumi dan secara historis merupakan daerah yang pernah terjadi gempabumi besar atau dekat dengan lokasi terjadinya gempabumi besar. Daerah yang termasuk dalam zona beresiko menengah sampai tinggi (250 – 300 gal) adalah Kabupaten Pasaman, Kabupaten Kep. Mentawai, dan Kabupaten Agam. Daerah yang termasuk dalam zona beresiko menengah (200 - 250 gal) adalah Kabupaten 50 Kota. Distribusi harga percepatan tanah untuk Kabupaten/Kota

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

seperti terlihat pada Tabel 7. Data ini menunjukan bahwa terdapat hubungan yang kuat antara kecepatan relatif. pergerakan lempeng dengan aktivitas kegempaan. Daerah yang mempunyai kecepatan penunjaman relatif rendah, apabila terjadi gempa, maka daerah tersebut akan mempunyai percepatan tanah yang lebih besar.

Tabel 7. Harga percepatan tanah maksimum, minimum dan rata-rata pada setiap Kabupaten/Kota di Sumatera Barat

NAMA	a-Min	a-Maks	a-Rata-rata
Kabupaten Pesisir Selatan	373,10	628,01	490,57
Kabupaten Solok	343,13	723,09	547,41
Kabupaten Swl/Sijunjung	351,06	694,22	455,03
Kabupaten Tanah Datar	290,07	415,55	337,24
Kabupaten 50 Kota	136,65	349,17	214,20
Kabupaten Agam	220,10	343,59	293,10
Kabupaten Pdg. Pariaman	238,37	397,65	314,04
Kabupaten Pasaman	212,28	362,98	266,94
Kabupaten Kep. Mentawai	168,16	395,55	281,35
Kabupaten Solok Selatan	370,63	629,81	493,10
Kabupaten Darmasraya	256,99	601,55	409,39
Kabupaten Pasaman Barat	238,32	429,74	327,20
Kota Padang	383,82	555,13	479,75
Kota Solok	436,39	462,55	450,84
Kota Sawahlunto	377,81	481,86	422,72
Kota Padang Panjang	324,31	326,70	325,48
Kota Bukittinggi	282,66	302,94	291,01
Kota Payakumbuh	246,96	286,47	267,06
Kota Pariaman	268,02	327,70	300,20

Kemudian kecepatan tanah maksimum setiap kecamatan di Sumatera Barat berdasarkan peta distribusi Gambar 8 dan 9, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 8. Harga percepatan tanah maksimum, minimum dan rata-rata pada setiap kecamatan di Sumatera Barat

KABUPATEN	KECAMATAN	a-Min	a-Max	a-Rata-rata
Pesisir Selatan	Pancung Soal	373.10	617.84	463.08
Pesisir Selatan	Ranah Pesisir	393.29	623.81	494.98
Pesisir Selatan	Lengayang	459.77	624.21	540.26
Pesisir Selatan	Batang Kapas	409.53	566.26	490.17
Pesisir Selatan	IV Jurai	431.36	541.31	491.22
Pesisir Selatan	Bayang	442.41	540.90	501.09
Pesisir Selatan	Koto XI Terusan	432.82	553.64	501.17
Solok	Sangir	376.86	557.11	454.48
Solok	Sungai Pagu	514.83	629.81	578.24
Solok	Pantai Cermin	535.13	587.27	563.88

Sambungan Tabel 8.

KABUPATEN	KECAMATAN	a-Min	a-Max	a-Rata-rata
Solok	Lembah Gumanti	538.85	653.99	586.70
Solok	Payung Sekaki	492.94	723.09	618.05
Solok	Lembang Jaya	506.88	542.18	526.14
Solok	Gunung Talang	480.61	549.29	520.76
Solok	Bukit Sundi	473.94	526.96	499.14
Solok	IX Koto Sei Lasi	439.90	505.92	474.86
Solok	Kubung	414.91	508.50	460.68
Solok	X Koto Singkarak	352.44	426.84	390.08
Solok	X Koto Diatas	345.43	441.47	389.23
Solok	Danau Diatas	532.39	552.66	541.15
Swl/Sijunjung	Koto Baru	270.35	446.83	380.44
Swl/Sijunjung	Pulau Punjung	334.40	591.51	455.12
Swl/Sijunjung	Tanjung Gadang	362.40	708.08	475.77
Swl/Sijunjung	Sijunjung	364.78	634.60	457.31
Swl/Sijunjung	Empat Nagari	448.89	539.02	485.63
Swl/Sijunjung	Kupitan	433.14	481.86	455.17
Swl/Sijunjung	Koto Tujuh	412.91	457.43	434.11
Swl/Sijunjung	Sumpur Kudus	345.38	449.93	405.83
Tanah Datar	Sepuluh Koto	312.44	333.62	321.94
Tanah Datar	Batipuh	320.69	359.68	332.17
Tanah Datar	Pariangan	313.99	325.74	323.68
Tanah Datar	Rambatan	324.57	348.82	332.04
Tanah Datar	Lima Kaum	323.53	335.44	328.30
Tanah Datar	Tanjung Emas	327.64	389.29	352.06
Tanah Datar	Lintau Buo	312.91	396.70	357.60
Tanah Datar	Sungayang	313.87	330.52	322.81
Tanah Datar	Sungai Tarab	312.59	326.21	320.97
Tanah Datar	Salimpaung	294.53	319.39	308.83
Padang Pariaman	Pagai Utara/Selatan	161.78	335.40	281.82
Padang Pariaman	Sipora	269.82	337.78	314.18
Padang Pariaman	Siberut Utara	221.16	395.55	275.75
Padang Pariaman	Batang Anai	346.84	397.65	372.40
Padang Pariaman	Lubuk Alung	335.47	382.84	356.86
Padang Pariaman	Nan Sabaris	314.13	347.23	329.83
Padang Pariaman	11 x Enam Lingkung	318.76	349.55	332.80
Padang Pariaman	VII Koto Sei Sarik	291.76	321.41	310.86
Padang Pariaman	V Koto Dalam	268.02	310.80	289.13
Padang Pariaman	Sungai Limau	238.37	273.48	251.21
Padang Pariaman	Sei Garingging	244.60	287.97	268.30
Padang Pariaman	Pariaman Selatan	266.86	313.92	294.94
Agam	Tanjung Mutiara	251.67	324.19	299.87
Agam	Lubuk Basung	263.70	325.77	300.76
Agam	Tanjung Raya	278.90	297.05	289.03
Agam	Matur	276.24	291.87	285.38

Sambungan Tabel 8.

KABUPATEN	KECAMATAN	a-Min	a-Max	a-Rata-rata
Agam	IV Koto	285.90	313.60	300.61
Agam	Banuhampu Sei Puar	296.00	320.68	313.19
Agam	IV Angkat Candung	287.40	319.59	305.49
Agam	Baso	265.13	303.95	286.22
Agam	Tilatang Kamang	229.55	294.48	262.30
Agam	Palembayan	270.48	340.70	304.75
Agam	Palupuh	225.75	288.89	262.11
Lima Puluh Koto	Suliki Gunung Mas	136.65	253.59	178.09
Lima Puluh Koto	Guguk	143.31	249.56	190.55
Lima Puluh Koto	Payakumbuh	205.68	296.14	253.57
Lima Puluh Koto	Luhak	259.97	346.51	301.99
Lima Puluh Koto	Harau	183.39	266.71	224.95
Lima Puluh Koto	Pangkalan Koto Baru	153.52	205.33	186.16
Lima Puluh Koto	Pangkalan Kota Baru	186.89	203.07	196.74
Lima Puluh Koto	Kapur Sembilan	164.23	269.82	222.45
Pasaman	Sei Beremas	302.32	416.37	360.08
Pasaman	Lembah Melintang	269.68	351.97	317.53
Pasaman	Pasaman	310.10	363.29	332.55
Pasaman	Bonjol	200.02	363.53	311.03
Pasaman	Lubuk Sikaping	242.76	345.24	294.07
Pasaman	Talamau	237.99	338.66	280.92
Pasaman	Panti	239.80	278.34	254.13
Pasaman	Rao Mapat Tunggul	226.13	274.15	251.07
Kota Padang	Kota Padang	386.56	555.13	477.90
Kota Solok	Kota Solok	428.14	464.00	448.84
Kota Padang Panjang	Kota Padang Panjang	324.31	327.11	325.33
Kota Bukittinggi	Kota Bukittinggi	285.11	304.72	292.45
Payakumbuh	Kota Payakumbuh	255.43	288.41	271.35
Danau Singkarak	Danau Singkarak	327.38	391.20	350.38
Kota Sawahlunto	Kota Sawahlunto	375.07	462.02	415.60

Tabel 8, memperlihatkan bahwa pada sebagian besar kabupaten Solok dan kabupaten Pesisir Selatan akan merasakan gocangan gempa yang kuat apabila terjadi gempa. Daerah yang mempunyai kecepatan tanah maksimum terbesar terdapat pada Kecamatan Tanjung Gadang Kabupaten Sawahlunto/Sijunjung dan Kecamatan Payung Sekaki Kabupaten Solok. Berarti bahwa pada kedua daerah tidak layak dibangun perkotaan dan pemungkinan penduduk. Sedangkan daerah dengan percepatan tanah maksimum yang rendah seperti daerah Kabupaten 50 Kota, Kabupaten Agam dan Kota Payakumbuh serta kota Bukittinggi dan Padangpanjang lebih cocok digunakan untuk perkotaan dan pemukiman

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukan bahwa rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia pada kawasan Sumatera Barat dan sekitarnya adalah $31{,}33^0$ dengan kecepatan subduksi relatif rata-rata sebesar 6,32 cm/tahun dan kecepatan normalnya adalah 4,93 cm/tahun. Kecepatan penujaman terbesar terdapat sekitar Pulau Spora dengan kecepatan relatif 6,36 cm/tahun dengan sudut penujaman $30{,}70^0$ dan kedalaman subduksi maksimum adalah 135 km. Kecepatan relatif terkecil terdapat disekitar Palau Siberut dengan kecepatan penujaman 6,26 cm/tahun dengan sudut subduksi $32{,}07^0$ yang terdapat disekitar Pulau Pagai, dengan kedalam sukduksi 89 km.

Setelah dilakukan analisa terhadap data gempa bumi dari tahun 1900 sampai dengan tahun 2005, diperoleh persamaan-persamaan sebagai berikut:

1. Formula untuk menghitung magnitudo lokal dari sumber gempa khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu $M_L = 0.415\ I_0 - 0.795\ \text{Log}\ H + 3.334$, dengan intensitas gempa pada episenter $I_o = I + 3 \log (\Delta / H) + 0.01\ (\Delta - H)$.
2. Formula untuk menghitung energi gempa khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu $\text{Log}\ E = 5.24 + 1.44\ M_L$
3. Formula untuk menghitung percepatan tanah maksimum oleh gempa tektonik khusus untuk Sumatera Barat dan pantai baratnya yaitu
   $\log \alpha_{ac} = 0.421\ I + 0.146\ M_L + 0.746 \log \Delta\ -\ 2.844$.

Berdasarkan persamaan yang telah diperoleh di atas, maka diperoleh peta distribusi percepatan tanah minimum sebesar 51.67 gal dan percepatan tanah maksimum sebesar 723.09 gal. Daerah yang mempunyai percepatan maksimum adalah adalah Kabupaten Solok yaitu sebesar 723.09 gal sedangkan daerah yang memiliki percepatan tanah maksimum terendah adalah Kota Payakumbuh yaitu sebesar 286.47 gal.

B. Saran

Sesuai dengan konstribusi penelitian ini dan berdasarkan hasil analisa data maka disarankan hal-hal sebagai berikut:

1. Sebaiknya hasil penelitian dapat dijadikan sebagai pengembangan mata kuliah Geodinamika dan Seismoligi Gempa Bumi pada Jurusan Fisika atau program Studi Geofisika dan Fisika Bumi.
2. Agar diperoleh akurasi yang lebih baik, formula-formula di atas masih perlu divalidasi dengan menggunakan metoda lain dan menggunakan data yang lebih banyak lagi.
3. Hasil penelitian ini dapat dikembangkan untuk pengaturan tata ruang yang lebih baik di Sumatera Barat.
4. Mengingat begitu berhaya efek dari gempa, maka hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai fondasi dasar untuk menetapkan kebijaksanaan mitigasi gempa bumi pada masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, K, 1985, *Maximum Likelihood Estimate of b Value in Formula log N = a + bM and its Confidence Limits,* Bulletin Earthquake, vol. 43, pp 345-358

Ahmad, Muhammad, 1995, *Penanggulangan Gempa Bumi Sesuai dengan Seismisitasnya,* Makalah pada seminar pada Himpunan Ahli Geofisika Indonesia PIT HAGI XX, Yogyakarta 29 – 30 Agustus 1995

Ahmad, Muhammad dan Erwin Mulyana, 1995, *Study of Lithosphere Subduction Along Java Sumatera Arc,* Makalah pada seminar pada Himpunan Ahli Geofisika Indonesia PIT HAGI XX, Yogyakarta 29 – 30 Agustus 1995

Curray, J,R, G.G Shor Jr, R.W. Raitt and Henry, 1977, *Seismic Refraction and Reflection Studies of Crustal Structure of Eastren Sunda and Westren Sunda Arces,* Jurnal of Geophysics Research, Vol. 82, 2479 - 2489

Diament,M. C. Deplus, D. Dahrin, and M. T. Zen, Jr, H. Harjono, K. Karta, M. Gérard, O. Lassal, and A. Martin , J. Malod, 1992, (Abstrak), *Mentawai fault zone off Sumatra: A new key to the geodynamics of western Indonesi, Geology:* Vol. 20, No. 3, pp. 259–262,

Kearay, Philip & Vine, Frederick J, (2004), *Global Tectonics,* Blackwell Publishing Company. Australia

Le Pichon, X, P. Huchon, 1984, *Sunda Strait and Contrtol Sumatran Fault,* Online Jurnal of Geology Sociaty of America vol. 12, pp. 668 - 672

McCaffray, R, P. Molnor, S.W. Roecher and Y.S. Joyodiwirjo, 1985, *Microearthquake Seismicity and Fault Plane Solusion Related to Arc-Conitnent Collision in the Eastern Sunda-Arc, Indonesia,* Jurnal of Geophysics Research, Vol. 90, pp 4511 - 4528

Mc Cann. W.R. and K.R. Newcomb, 1987, *Seismic History and Seismotectonic of the Sunda Arc,* Jurnal of Geophysics Research, vol 92, 421-439

McCaffray, R, 1991, *Slip Vectors and Stretching of the Sumatran Force Arc,* Jurnal of Geology, Vol. 19, pp. 881 – 884

Natawidjaya, Danny H, 1995, *Gempa Tektonik Daerah Bukit Tinggi-Muarolabuh; Hubungan Segmantasi Sesar Aktif dengan Gempa Bumi tahun 1926 dan 1943,* Prosiding Hasil Penelitian Puslitbang Geoteknologi LIPI, pp 50 – 75

Natawidjaya, Danny H, Harjono, Hery, Suwargadi, Bambang W (2004), *Sumatera Rawan Gempa,* Puslit Geotektonologi-LIPI, Bandung

Posavec, M. D. Taylor, th van euwen and A Spector, 1973, *Tectonic Controls of Volcanism and Complex Movement Alang the Sumatran Fault System,* Geology Sociaty Malaysia, Bulleten, pp 43- 60

Richter, C.F and Gutenberg B. 1952, *Earthquake magnitude, Intensity, Energy and Acceleration,* Bulleten Seismology Sociaty Amarica. Vol. 32, pp 163-191

Skinner, Brian J, Porter Stephen C, (1987), *Physical Geology,* Jhon Wiley & Sons, New York

Subardjo, Buha M. Simanjutak, C. Piccanusa, 1998, *Intensitas dan Percepatan Tanah Maksimum Gempabumi Maluka dan Sekitarnya Periode 1900-1977,* Bulleten Meteorologi dan Geofiiska, hal 1 – 17.

Suwarta, H. Robert Tampubolon, Buha Simanjutak, 2001, *Percepatan Tanah untuk Konstruksi Bangunan Tahan Gempa di Sumatera Bagian Utara,* Bulletin Meteorologi dan Geofisika, hal 30 -36

Tjia, M. O. 1993. *Penuntun Matematika*. Erlangga, Jakarta

Tjokrosapoetro, S, (1993), *Peta Geologi Lembar Pulau Sumatera*, PPPG Bandung

Turcotte, D.L, Gerald, S, 1982, *Geodynamics,* John Wiley Sons, New York

Vanek, J, A. Zatopek, V. Karnik, N.V. Kondorskaya. Y.V. Riznicheko, E.F. Saveresey, N.V. Shabulen, 1962, *Standardization of Magnitude Scales,* Bullten Academic USSR Geophysics Survey , England Transl. no. 108 – 111

Zen, M.T, 1987, *Seismicity of the Sumatra Fault Zones,* 6 th Regional Conggres an Geology, Mineral and Energy Resources of Southaest Asia.

http://www. ms.wikipedia.org

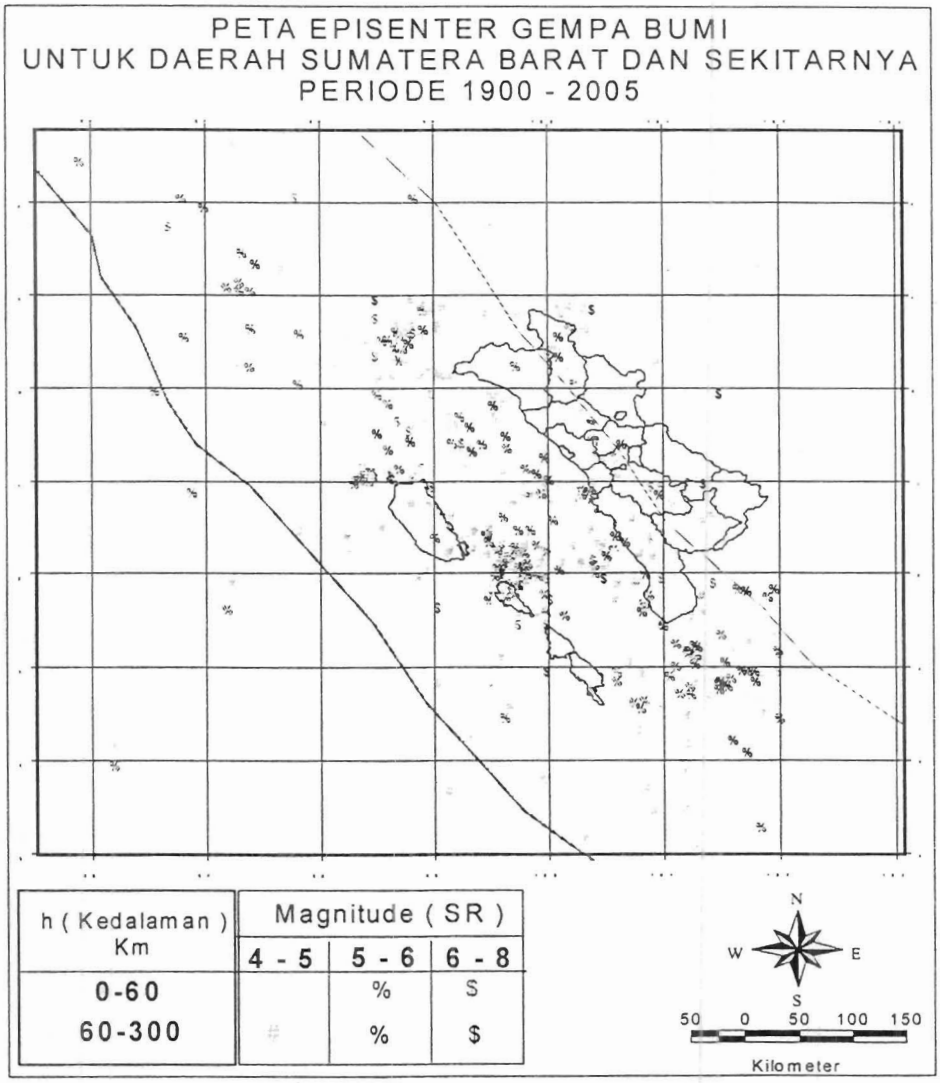
http://www.onr.navy.mil/focus/ocean/motion/waves3.htm

http:// www.oceanografi.lipi.go.id//

http://risiyanto.budi.or.id/blog/2004/12/28/gempa-bumi-tsunami-di-samudera-hindia/trackback/

LAMPIRAN

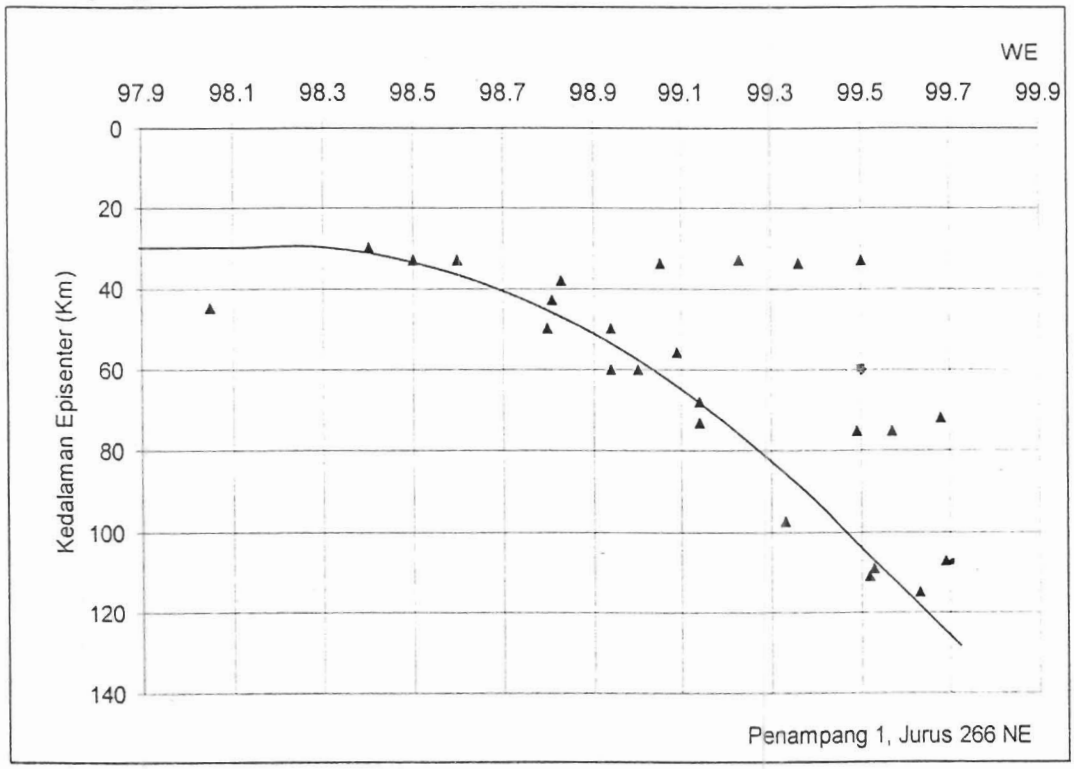
Lampiran 1: Peta episenter gempa bumi untuk daerah Sumatera Barat dan sekitarnya periode 1900 – 2005



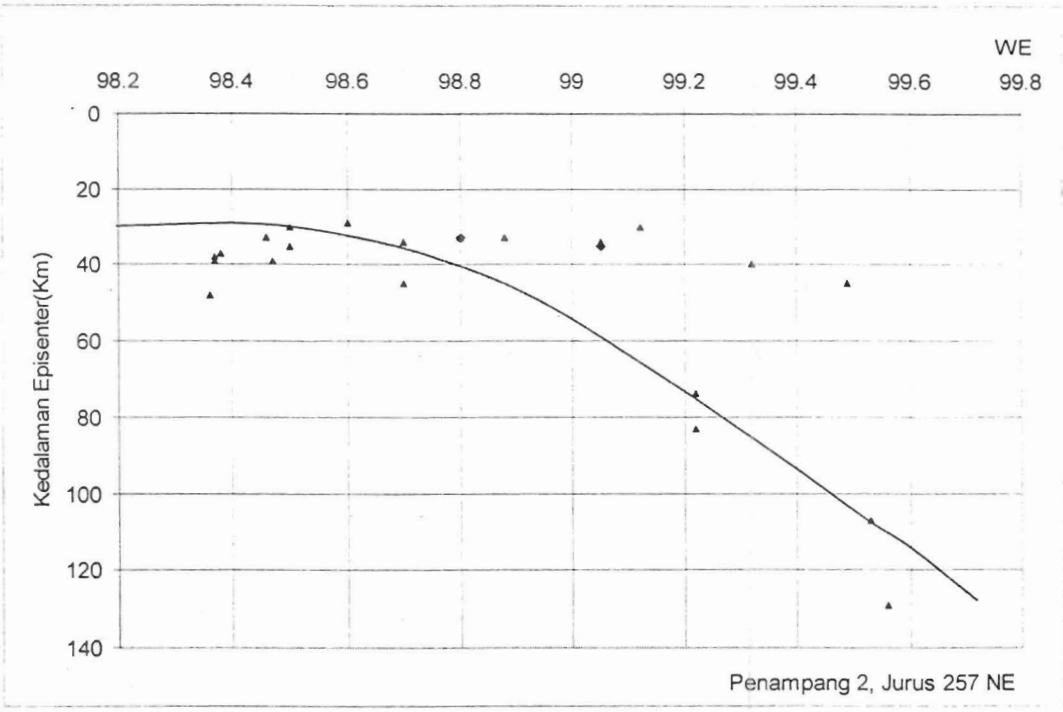
Gambar 11: Peta episenter gempa bumi untuk daerah Sumatera Barat dan sekitarnya periode 1900 - 2005

Lampiran 2 : Pola penujaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia untuk setiap jurus berdasarkan data seismik

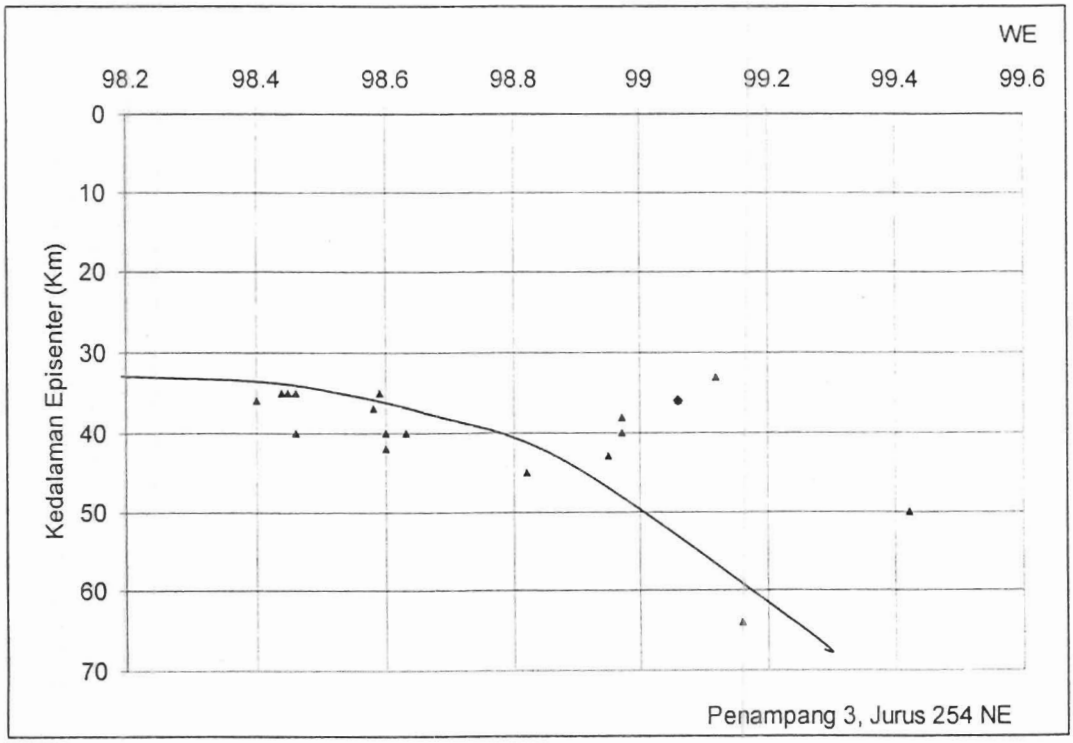
a. Penampang 1, Arah jurus pengamatan 266° NE



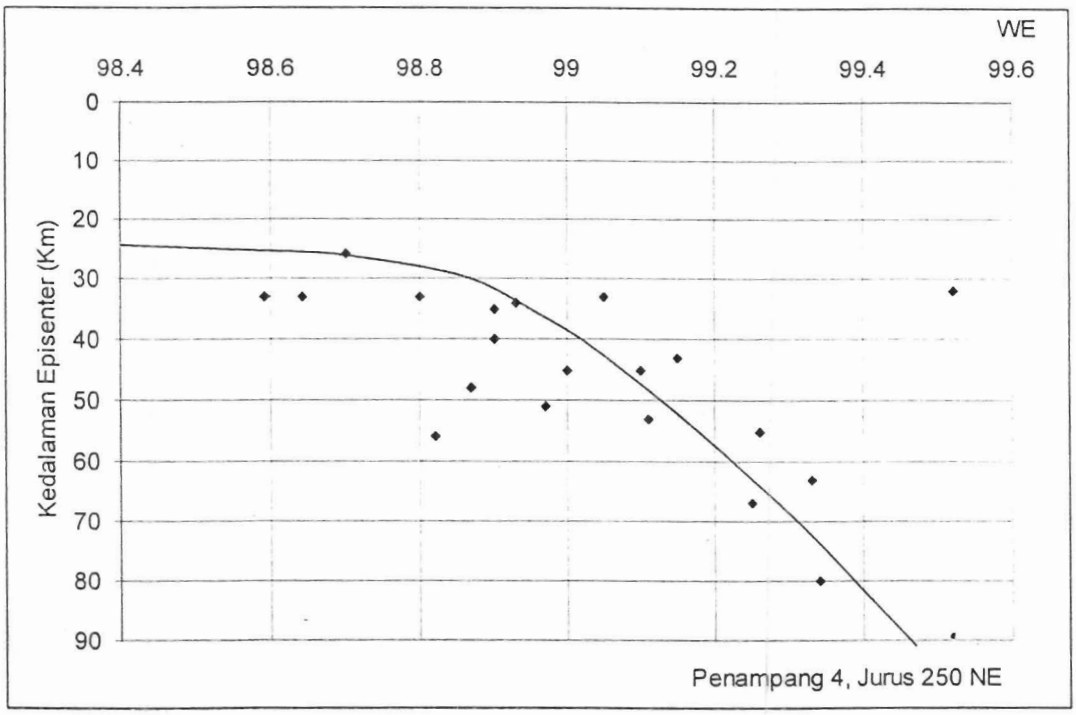
b. Penampang 2, Arah jurus pengamatan 257° NE



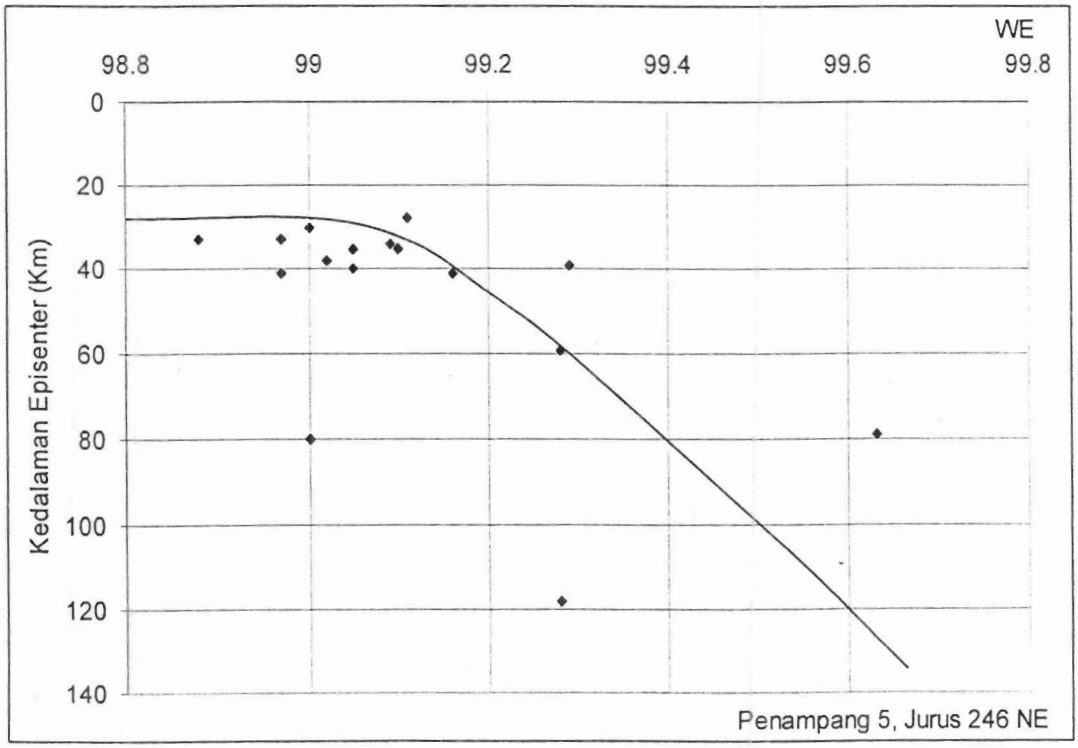
c. Penampang 3, Arah jurus pengamatan 254° NE



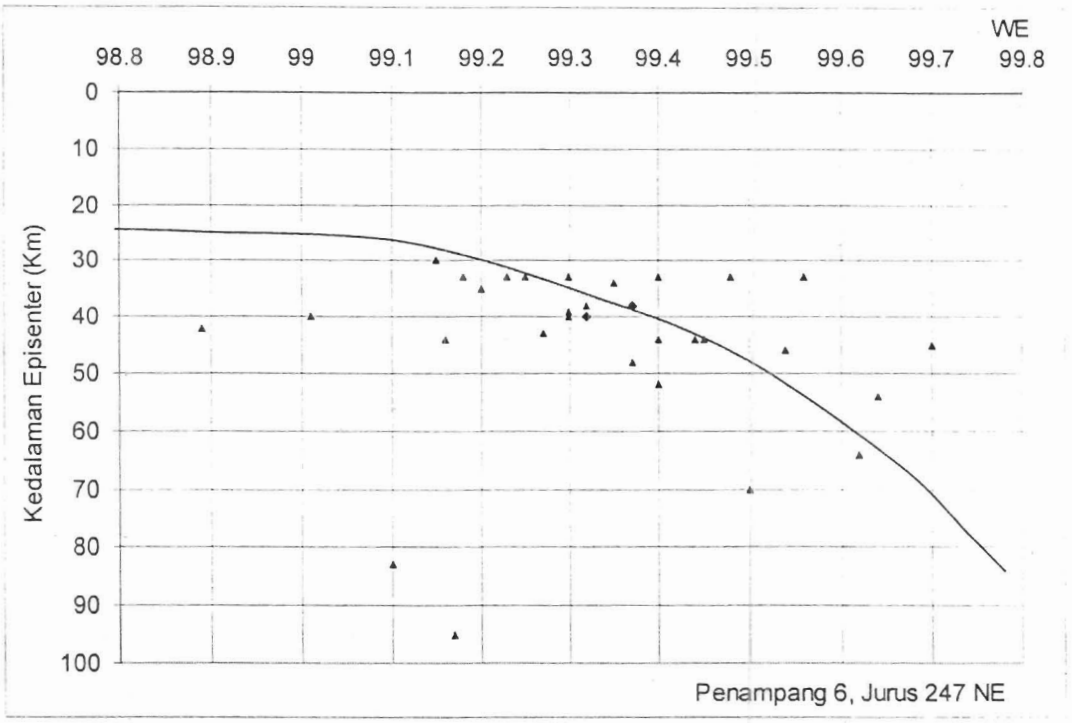
d. Penampang 4, Arah jurus pengamatan 250° NE



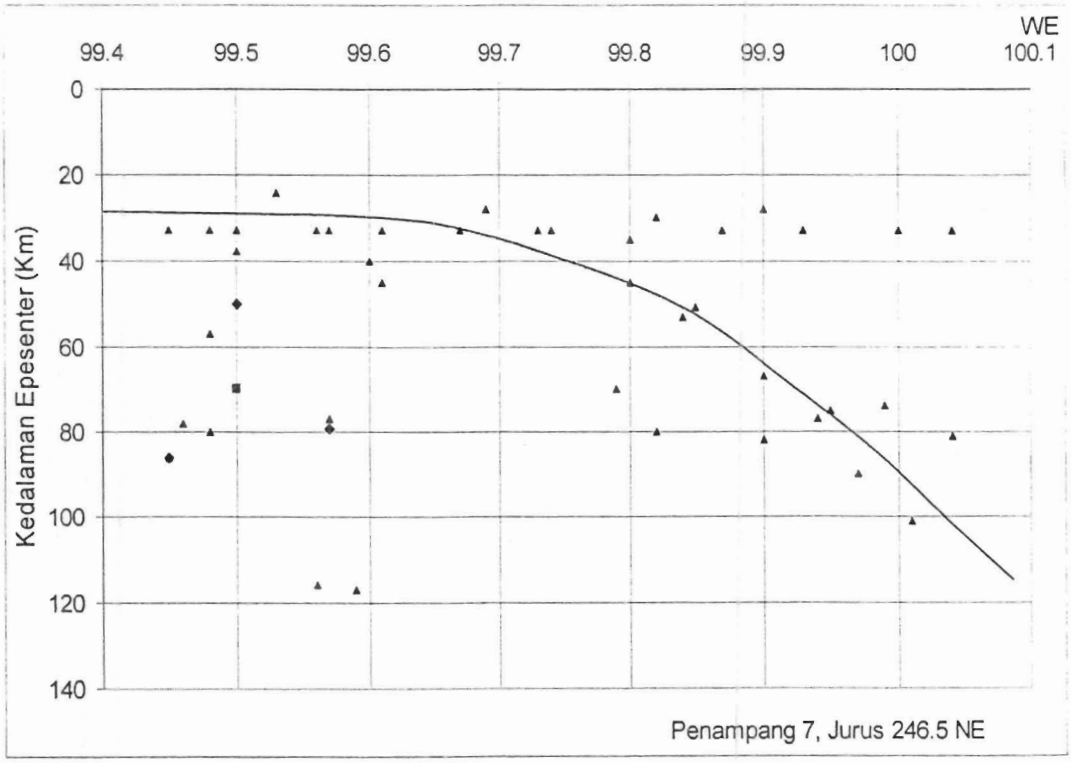
e. Penampang 5, Arah jurus pengamatan 246° NE



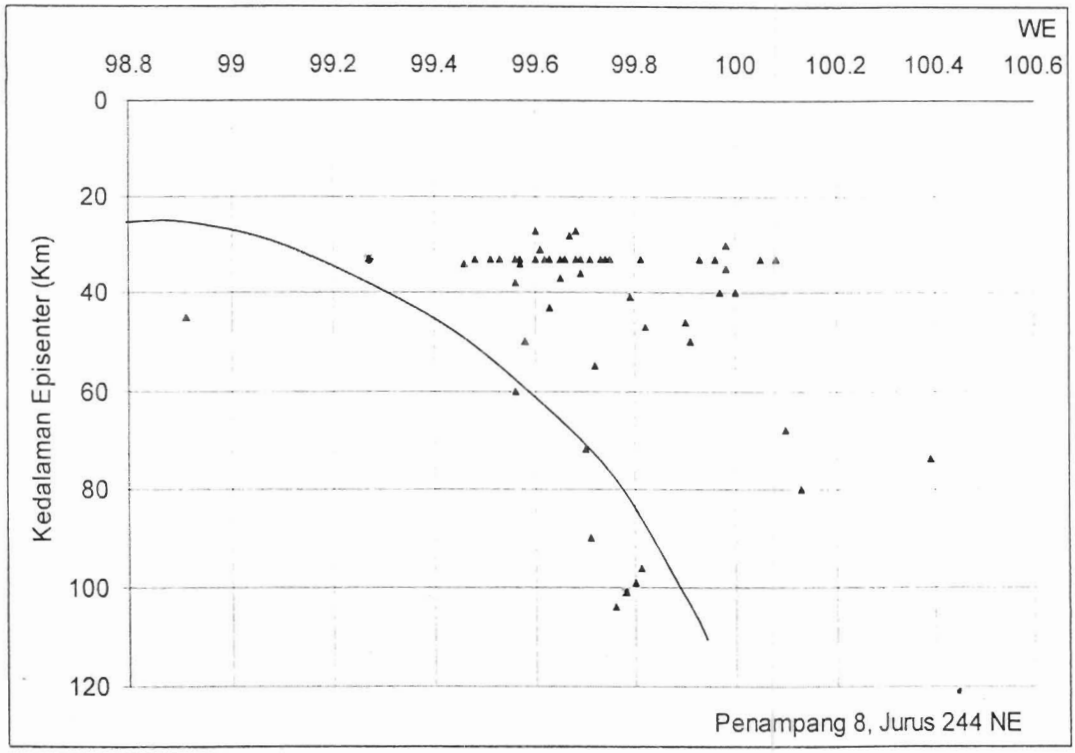
f. Penampang 6, Arah jurus pengamatan 247° NE



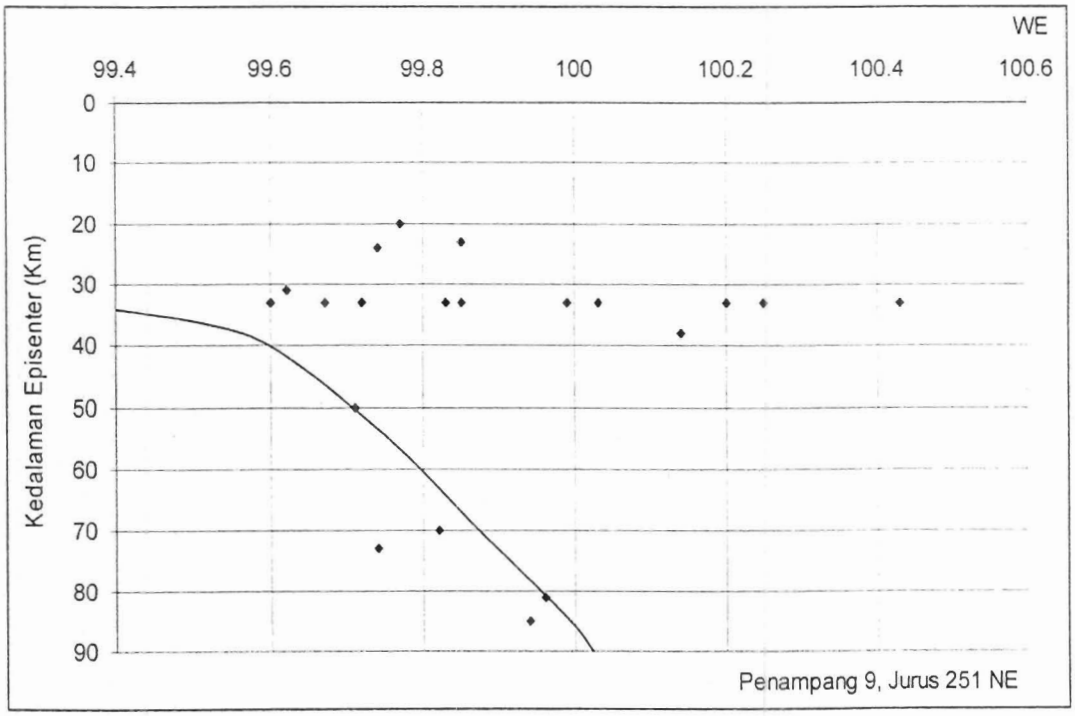
g. Penampang 7, Arah jurus pengamatan 246.5° NE



h. Penampang 8, Arah jurus pengamatan 244° NE

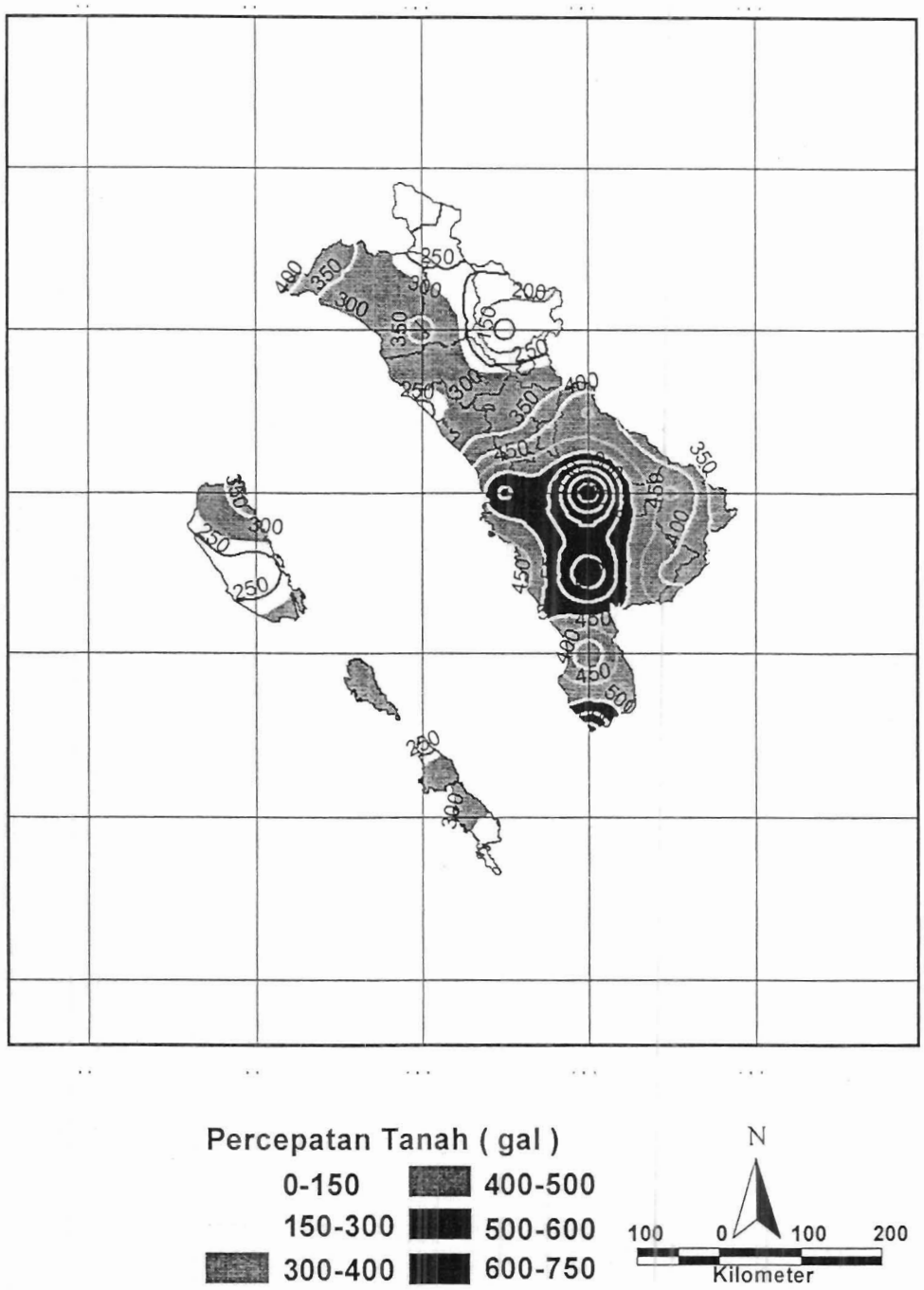


i. Penampang 9, Arah jurus pengamatan 251° NE

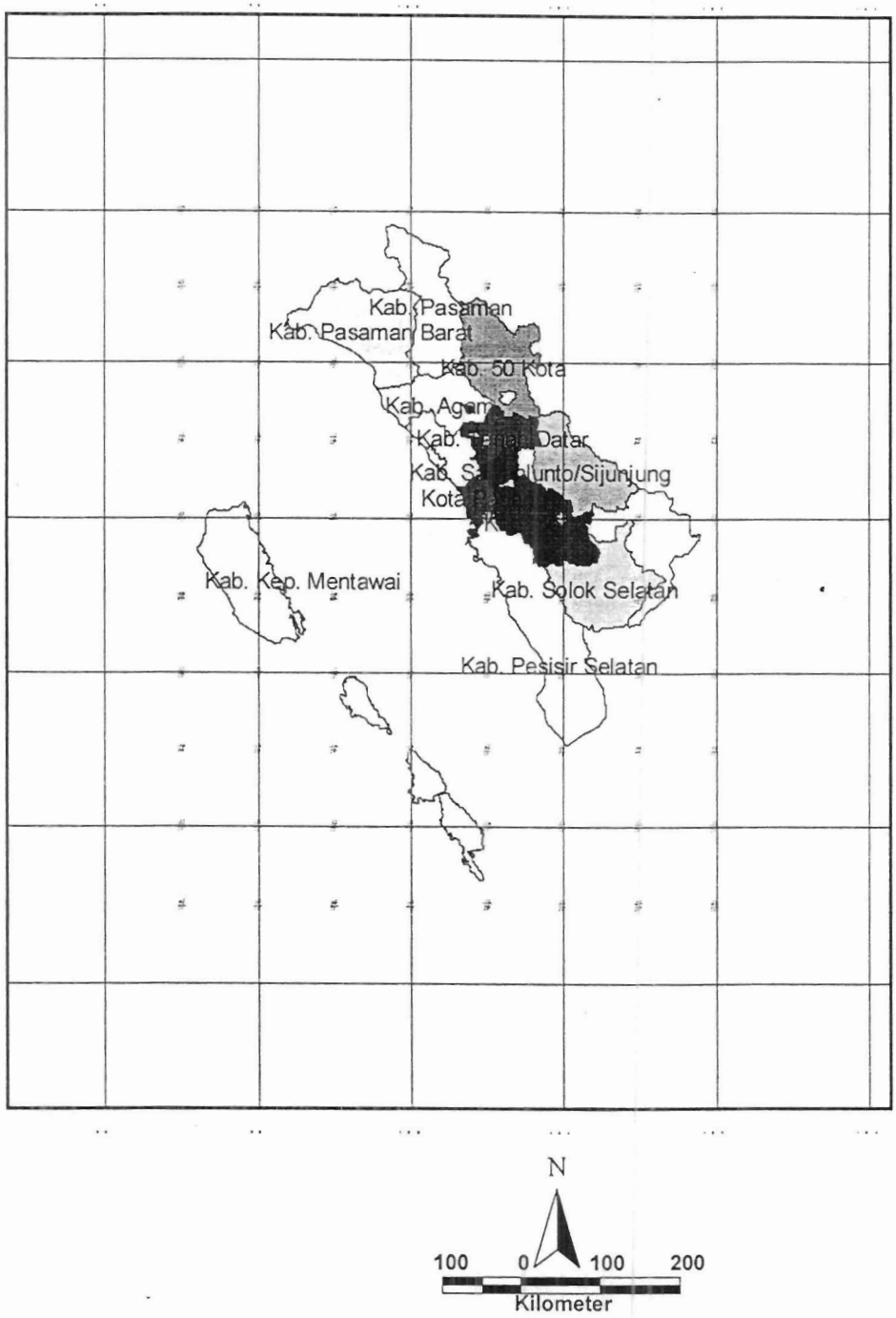


Gambar 12: Pola penujaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia untuk setiap jurus berdasarkan data seismitivitas

Lampiran 3 : Peta distribusi percepatan tanah oleh gempa tektonik di kawasan Sumatera Barat dan pesisir pantainya



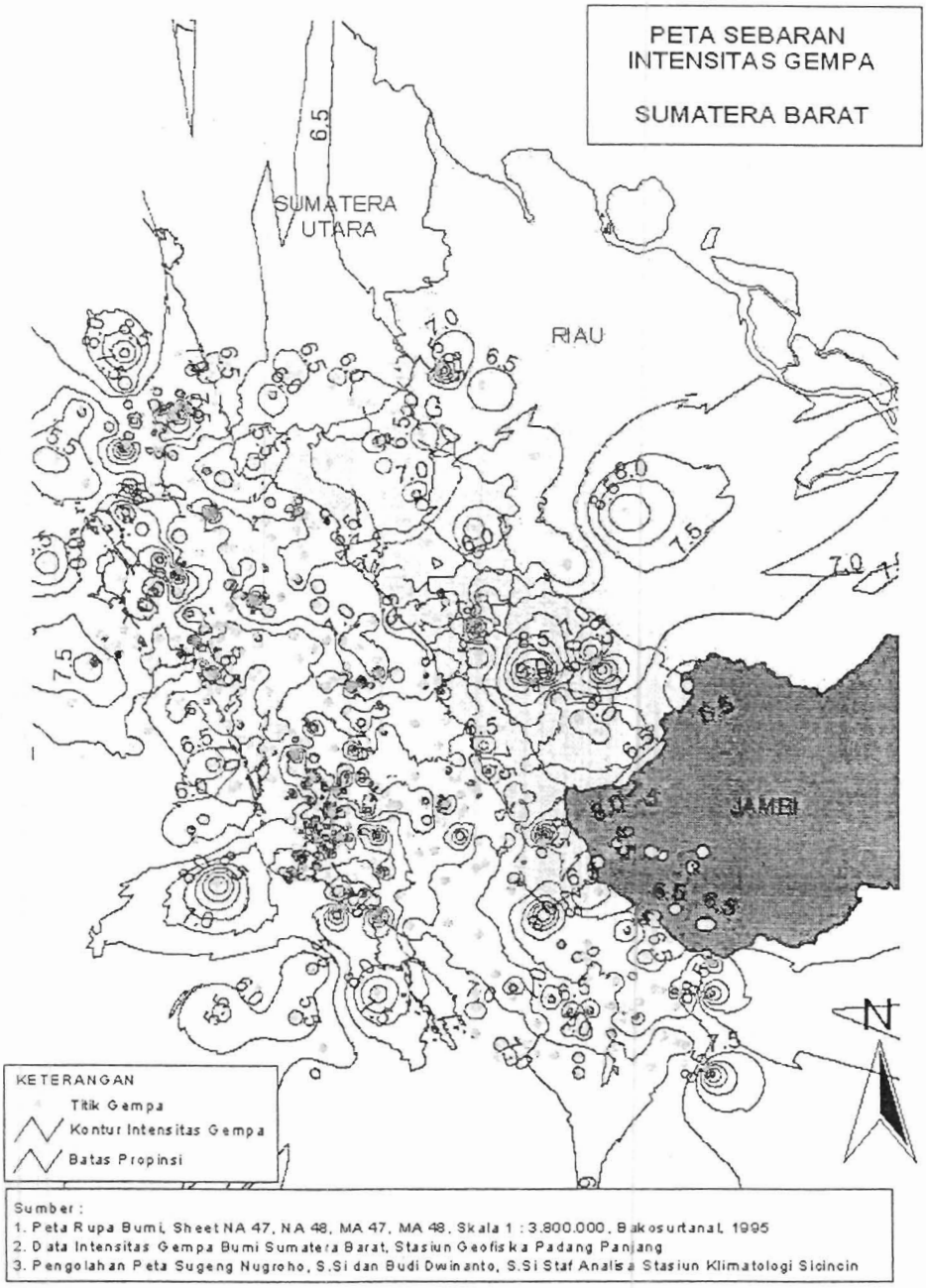
Gambar 13: Peta kontur percepatan tanah maksimum oleh gempa tektonik di Sumaera Barat tahun 1900 - 2005



Gambar 14: Peta kontur percepatan tanah maksimum dengan grid oleh gempa tektonik di Sumaera Barat berdasarkan kabupaten tahun 1900 - 2005

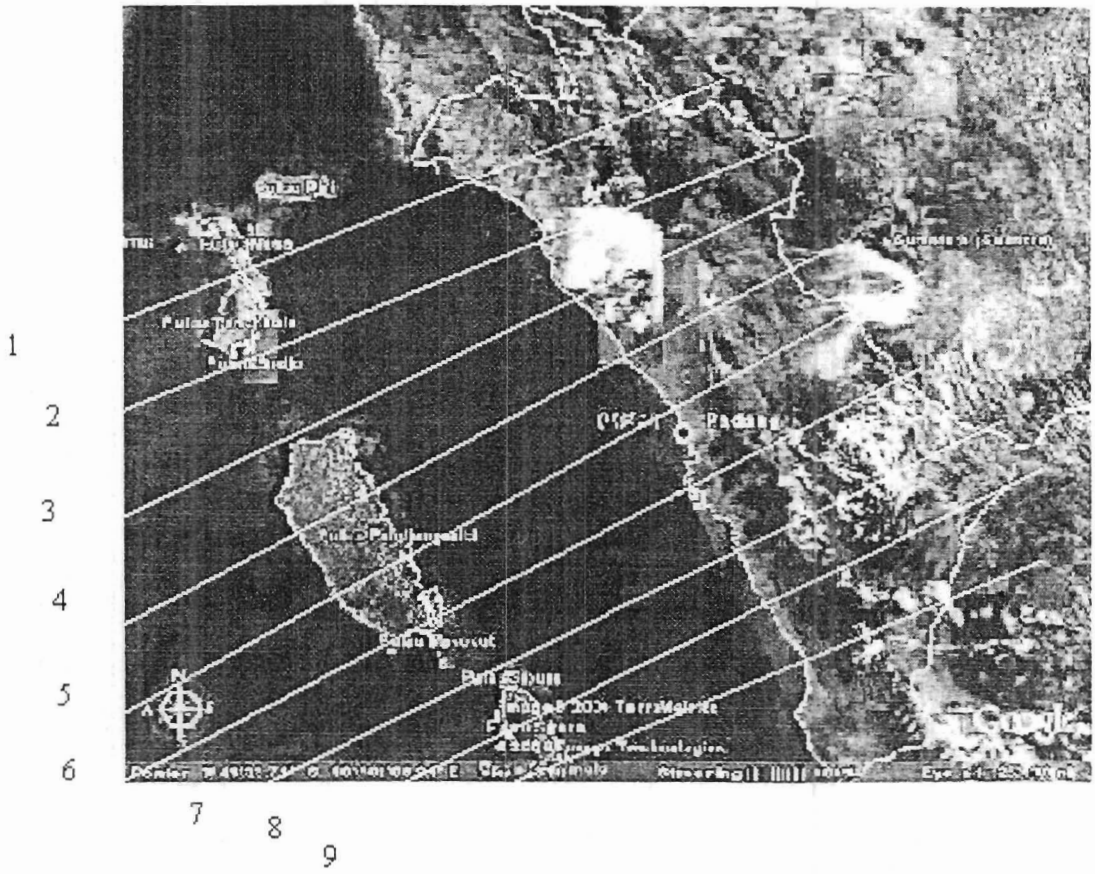
MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

Lampiran 4 : Peta distribusi intensitas gempa tektonik di Sumatera Barat dan sekitarnya



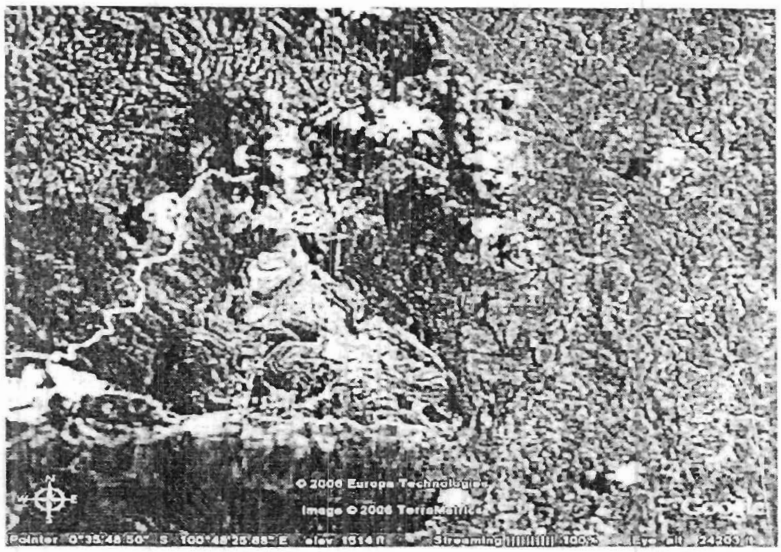
Gambar 15: Peta distribusi intensitas gempa tektonik Sumatera Barat dan sekitarnya berdasarkan data gempa tahun1900 - 2005

Lampiran 5: Segmen garis jurus pengamatan subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia pada Sumatera Barat.

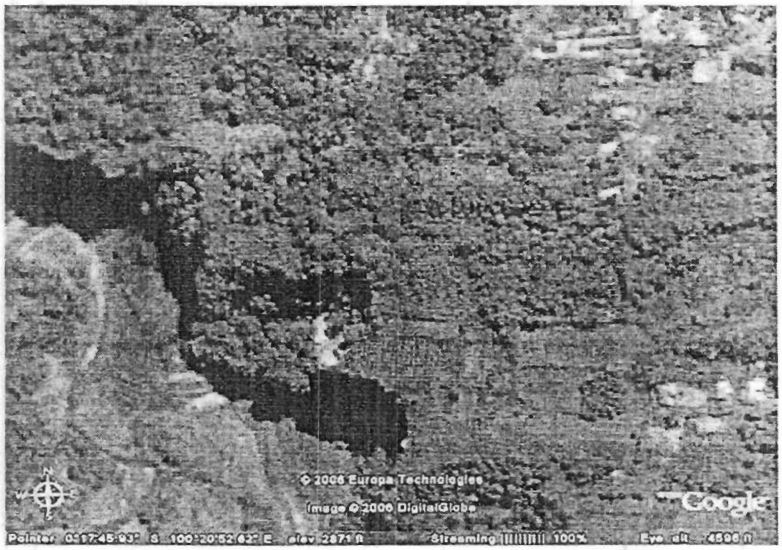


Gambar 16. Segmen garis jurus pengamatan subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia pada Sumatera Barat.

Lampiran 6: Foto udara lokasi segmen sesar aktif di Sumatera Barat (Google Digital Foto) yang diakses 10 Oktober 2006

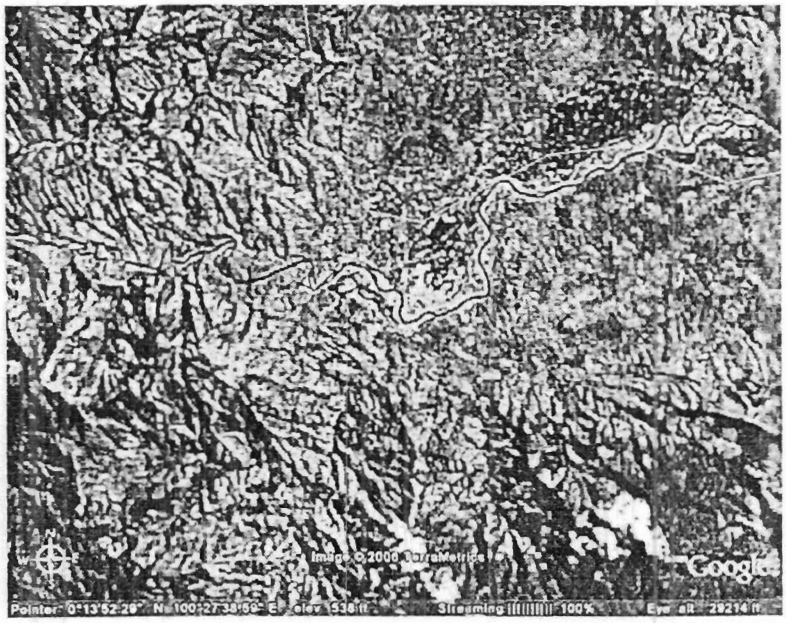


Gambar 17: Foto udara segmen sesar Air Mancur Padangpanjang

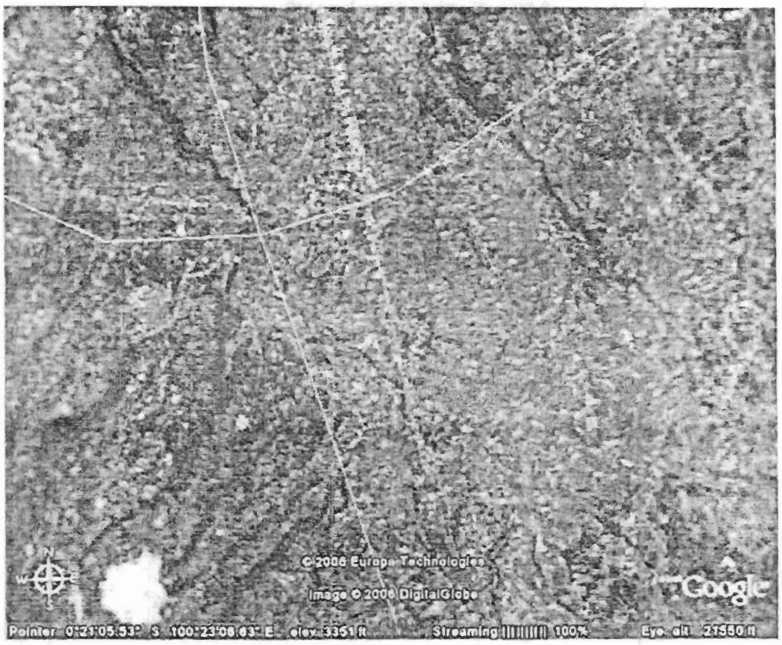


Gambar 18: Foto udara segmen sesar Lubuk Sikaping

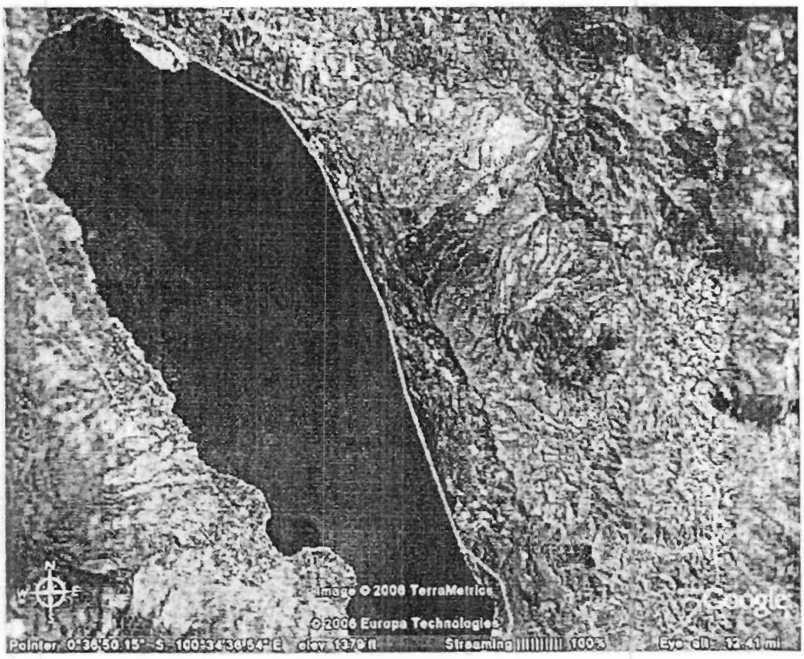
Gambar 19: Foto udara sesar segmen sesar Sianok Bukittinggi



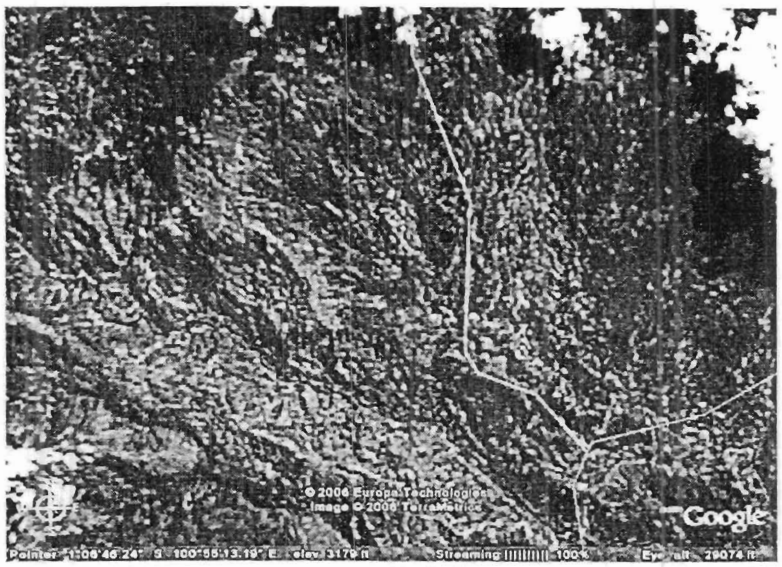
Gambar 20: Foto udara segmen sesar Ngalau Payakumbuh



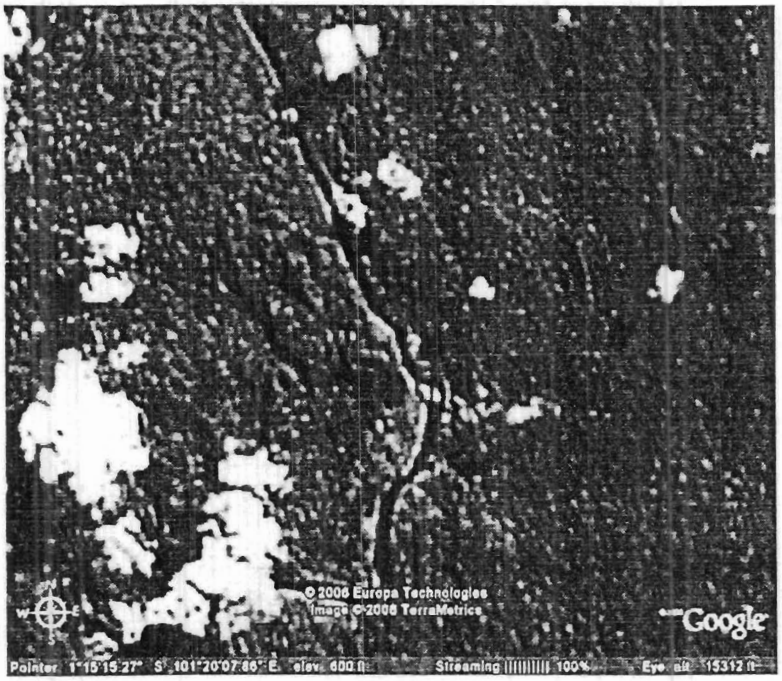
Gambar 21: Foto udara segmen sesar Kotabaru Padangpanjang



Gambar 22: Foto udara segmen sesar Singkarak

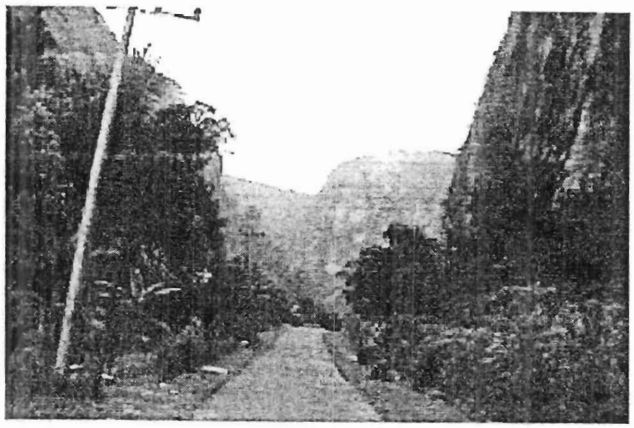


Gambar 23: Foto udara segmen sesar Muarolabuh Solok Selatan



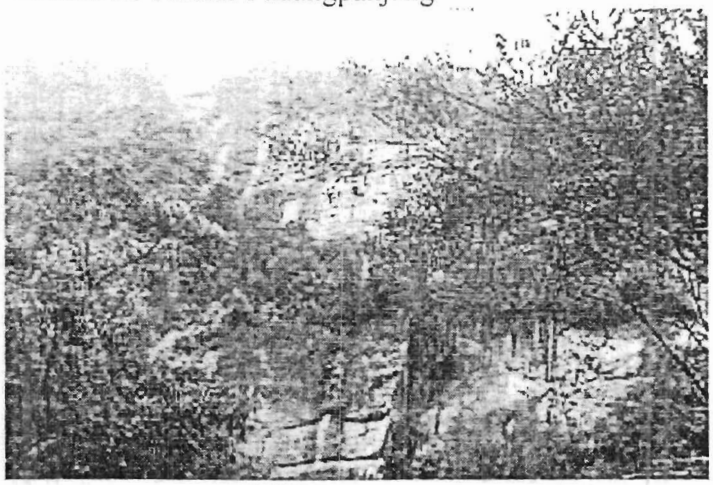
Gambar 24: Foto udara segmen sesar Alahanpanjang Solok

Lampiran 7: Foto darat lokasi segmen sesar aktif di Sumatera Barat

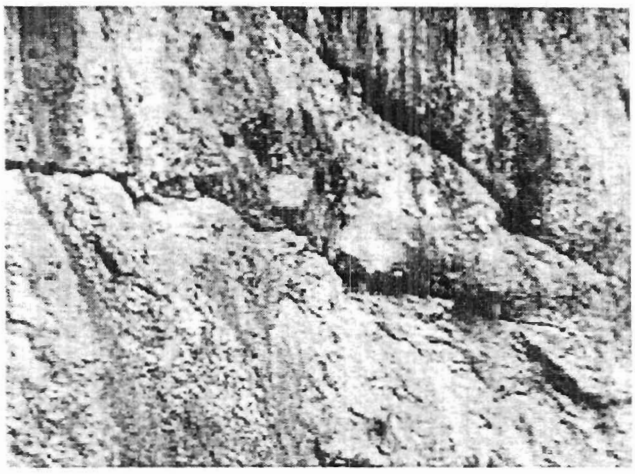


Gambar 25 : Sesar Lubuk Sikaping tanpak dari Barat Laut ke Tenggara

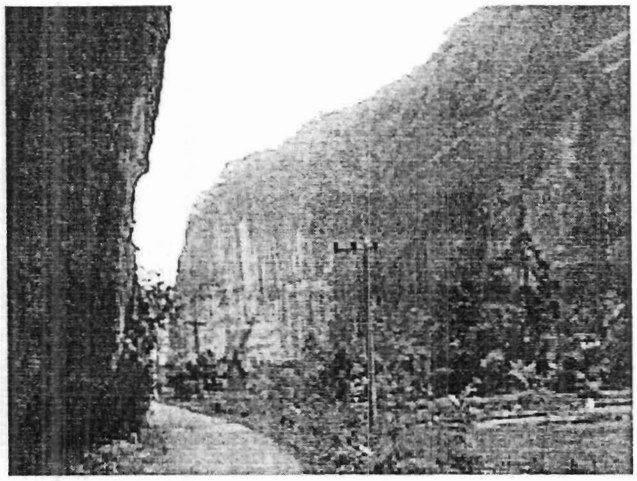
Gambar 26 : Sesar Padangpanjang



Gambar 27 : Ngalau Payakumbuh tanpak dari dasar ngalau

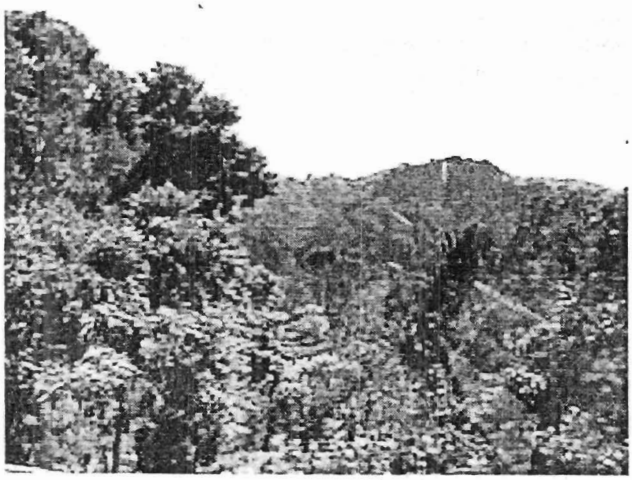


Gambar 28 : Rengkahan pada dinding sesar Muarolabuh



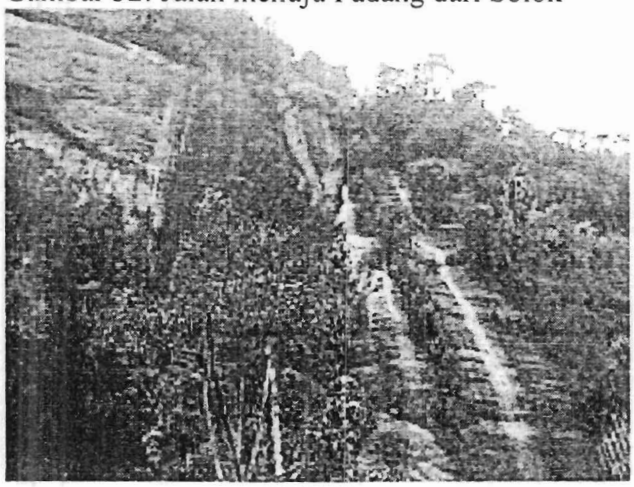
Gambar 29: Ngalau Payakumbuh

Gambar : 30 Malibau Anai tanpak dari dari atas



Gambar 31: Muaro labuh Solok Selatan

Gambar 32: Jalan menuju Padang dari Solok



Gambar 33: Foto kecuram batuan pada sesar Muarolan Sawahlunto

Lampiran 8: Personalia Penelitian

Personalia Penelitian

Ketua Peneliti

Nama	: Drs. Akmam, M.Si
Jabatan	: Dosen/Lektor Kepala
Unit Kerja	: Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang
Alamat Surat	: Jurusan Fisika FMIPA UNP Padang, Jl. Hamka, Air Tawar Padang, (25132)
Telepon	: (0751) 57420/ HP. 081363457593
Faksimile	: (0751) 55628
e-mail	: Akmam_fi@yahoo.co.id

1.3. Tim Peneliti

NO	NAMA DAN GELAR AKADEMIK	BIDANG KEAHLIAN	INSTANSI	ALOKASI WAKTU (JAM/MINGGU)
1.	Drs. Akmam, M.Si	Fisika Bumi	FMIPA UNP	15
2.	Dr. Ir. Badrul Kemal Mustopa	Geofisika	FMIPA Unand	10
3.	Drs. Letmi Dwiridal, M.Si	Geofisika	FMIPA UNP	15

FORMULA PERCEPATAN TANAH GEMPA TEKTONIK UNTUK SUMATERA BARAT

BKS - MIPA
SEMIRATA 06
WILAYAH BARAT

Oleh:

Akmam
Letmi Dwridal
Badrul Mustafa Kemal
Hasan Basri

Disampaikan pada Seminar SEMIRATA BKS PTN
Indonesia Bagian Barat 10 - 11 Juli 2006
Kampus Universitas Andalas Padang
Tahun 2006

Lampiran 9: Artikel Ilmiah yang telah diseminar nasional pada tanggal 10-11 Juli 2006 pada pertemuan BKS PTN Indonesia Bagian Barat di Universitas Andalas Padang

FORMULA PERCEPATAN TANAH GEMPA TEKTONIK UNTUK SUMATERA BARAT

Oleh:
Akmam*, Letmi Dwridal*, Badrul Mustafa Kemal**

ABSTRAK

Penyusupan lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia menyebabkan terbentuknya zona deformasi aktif di kepulauan Mentawai dan pulau Sumatera. Akibatnya daerah Sumatera Barat merupakan zona rawan terhadap gempa tektonik dan vulkanik. Perilaku kegempaan pada suatu daerah dapat dipelajari melalui karakteristik fisis sumber gempabumi antara lain melalui magnitudo, energi gempa dan percepatan tanah.

Untuk itu dilakukan penelitian dasar desriptif yang bertujuan untuk menentukan formula menghitung percepatan tanah maksimum oleh gempa tektonik daerah Sumatera Barat. Data penelitian ini adalah sekunder yaitu catatan gempa di Sumatera Barat tahun 1900 sampai dengan tahun 2005 yang tersedia di BMG Padang Panjang. Data diolah menggunakan metoda kuadrat terkecil. Berdasarkan analisa data diperoleh formula untuk menghitung percepatan tanah daerah Sumatera Barat : $\log \alpha_{arc} = 0.421\ I + 0.146 M_L + 0.746 \log \Delta - 2.844$, dimana magnitude lokal $M_L = 0.415\ I_0 - 0.795 \operatorname{Log} H + 3.334$, dan intensitas gempa pada episenter $I_o = I + 3 \log (\Delta n/H) + 0.01(\Delta - H)$.

Kata Kunci: Formula, karakteristik, percepatan tanah, gempa tektonik

I. Pendahuluan

Tatanan tektonik Sumatera Barat merupakan tatanan yang menarik untuk dikaji, karena penyusupan lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia mengakibatkan Sumatera dan pesisir baratnya mudah mengalami deformasi dan rawan terhadap gempa bumi dan tsunami. Pergerakan lempeng di Indo-Australia sistem sesar Sumatera dan sesar Mentawai, menyebabkan kawasan ini sangat menarik sebagai objek penelitian kegempaan dalam rangka meletakkan dasar pemikiran penanggulangan (mitigasi) bencana gempa kedepan. McCaffrey et. al. (1985) mengestimasi terdapatnya kerak benua sampai kedalaman (30-40) km dan adanya mekanisme pergerakan bidang sesar pada berbagai kedalaman pusat gempa di sepanjang busur Sumatera. Kemudian Posavec et. al . (1977) mengungkapkan bahwa zona sesar Sumatera didominasi oleh pergerakan lateral secara terus menerus lempeng Indo-Australia dan lempeng Sumatera. Curey et. al. (1977) meramalkan bahwa zona Benioff yang terdapat disepanjang busur Sumatera dapat berubah dengan cepat kedalaman dan bentuknya. Hal ini menciri bahwa struktur zona disepanjang busur sumatera sangat kompleks dan dinamis.

Begitu kompleks dan rumitnya tatanan tektonik dan banyaknya gempabumi yang terjadi di Sumatera Barat dan pantai baratnya memunculkan pertanyaan yaitu bagaimana karakteristik fisis sumber gempabumi yang disebabkan oleh aktivitas subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia.

Karakteristik sumber gempa tektonik pada zona penyusupan seperti di Sumatera Barat dan pantai baratnya dapat dipelajari melalui percepatan tanah maksimum oleh gempa.

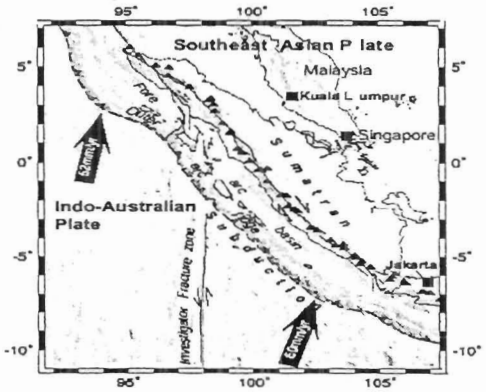
Efek yang ditimbulkan oleh gempa tektonik erat hubungannya dengan struktur litosfer dimana sumber gempa tersebut. Perbedaan struktur litosfer menyebabkan percepatan tanah maksimum yang berbeda pula. Perbedaan ini menyebabkan diperolehnya berbagai formula empiris, seperti formula Murphy dan O'Brein, Richter, Kawashumi, Donovan, Esteva dan lain sebagainya, digunakan untuk menentukan percepatan tanah maksimum berbagai daerah. Subardjo dan Piccanusa (1998) menemukan bahwa kesemua formula di atas tidak memberikan hasil yang sama.

Melihat pada kondisi di atas, muncul permasalahan baru bagaimana bentuk formula yang dapat digunakan untuk menentukan percepatan tanah maksimum daerah Sumatera Barat dan sekitarnya atau berapa besarkah koreksi harga konstanta yang terdapat pada setiap formula-formula yang telah ditemukan para ahli sebelum ini yang cocok untuk menentukan parameter fisis sumber gempabumi di Sumatera Barat dan pesisir pantai baratnya. Formula baru ini perlu ditemukan dalam rangka memudahkan membuat ramalan periode ulang gempa dan tempat dimana gempa berikutnya akan terjadi.

II. KAJIAN PUSTAKA

a. Tektonik dan Kegempaan di Sumatera

Setiap wilayah tektonik memiliki ciri atau indikasi tertentu, baik batuan, mineralisasi, struktur maupun kegempaanya. Kondisi lempeng tektonik untuk pulau Sumatera dan Mentawai seperti diperlihatkan Gambar 1



Gambar 1. Kondisi subduksi lempeng Indo-Ausralia ke lempeng Eurasia

Gambar 1 memperlihatkan bahwa struktur tektonik Sumatera yang sangat kompleks serta melibatkan lempeng Australia, Eurasia, dan masih banyak lagi lempeng-lempeng tektonik kecil lainnya yang menghasilkan pergerakan sesar di sepanjang pantai barat Sumatera bagian tengah dan utara.

Gambar 1 juga memperlihatkan bahwa gempa di pesisir barat Sumatera umumnya disebabkan sesar (patahan) naik (thrust fault) yang juga mungkin bercampur dengan gerakan "Sea floor spreading" (bukaan, rengkahan lantai samudra) di Andaman yang berlanjut menjadi sesar (Natawidjaya: 1995, McCann : 1987) Hal ini diperkuat oleh Diament, et. al, (1992), menyatakan bahwa *the geodynamic evolution of the western*

part of the Sunda arc is controlled by the change from frontal subduction of the Indo-Australian plate along Java to oblique subduction along Sumatra.

b. Percepatan Tanah Maksimum

Percepatan tanah maksimum berkaitan dengan struktur batuan dan intensitas gempa. Percepatan tanah maksimum merupakan nilai terbesar percepatan tanah pada suatu wilayah akibat getaran gempabumi dalam periode tertentu. Percepatan tanah maksimum dapat diukur langsung menggunakan *accelegraf* atau *strongmotion* yang dipasang pada suatu tempat. Namun pemasangan jaringan pengukuran tersebut sampai di Sumatera Barat belum efektif, maka perlu kiranya dibuat suatu pendekatan untuk menghitung percepatan tanah maksimum tersebut.

Permasalahan yang akan dianalisa pada penelitian ini karakteristik hubungan magnitudo, intensitas, jarak dan kedalaman episenter sumber gempabumi. Magnitudo adalah skala kekuatan gempa (jumlah energi yang dipancarkan) pada sumbernya yang dinyatakan dengan skala Richter. Intensitas gempa adalah besarnya amplitudo getaran gempa pada suatu tempat yang berpengaruh terhadap makluk hidup dan benda mati ditandai dengan skala kerusakan dengan skala MMI (*Modified Mercceli Intensity).*

Murphy dan O'Brein dalam Subardjo, et. al. (1998) menuliskan persamaan empiris percepatan tanah maksimum pada suatu tempat dengan

$$\log \alpha_{arc} = aI + b\,M - c \log\Delta + d \qquad (1)$$

dimana α_{arc} adalah percepatan tanah maksimum, I, intensitas gempa pada titik yang akan dianalisa, M, magnitudo gempa dan Δ, jarak episenter (km). Magnitudo dihitung dengan menggunakan hubungan empiris Vanek, et. al (1962) termodifikasi yaitu

$$M = p\, I_0 + q \log H + r \qquad (2)$$

dimana I_0 intensitas gempa pada episenter, H, kedalaman episenter, sedangkan p,q, dan r adalah konstanta akan ditentukan dalam penelitian ini menggunakan metoda kuadrat terkecil. Kemudian intensitas gempa pada sumber gempa diprediksi menggunakan persamaan:

$$I_0 = \frac{(M - q \log H - r)}{p} \qquad (3)$$

Sedangkan Richter (1952) merumuskan percepatan tanah maksimum dengan

$$\log \alpha_{arc} = \frac{I}{3} - 0.5 \qquad (4)$$

dimana $\log I = M_L - LogI_0$, M_L adalah magnitudo lokal dari suatu sumber gempa pada suatu tempat dan intensitas gempa maksimum pada episenter adalah

$$I_0 = P - Q \log \Delta \qquad (5)$$

harga P dan Q adalah konstanta yang akan dihitung mengunakan metoda kuadrat terkecil.

III. Metode Penelitian

Data penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari stasiun Badan Meterologi dan Geofisika Padangpanjang yang terekam dalam bentuk analog. Data yang akan digunakan adalah data gempa tektonik mulai tahun 1900 – 2005 untuk daerah penelitian 88.5^0 BT – 102^0BT dan $B1^0$LU – 3.5^0 LS, dengan magnitudo gempabumi lebih dari 4.0 skala Richter.

Karakteristik fisis sumber gempabumi diestimasi dari bentuk respon bumi terhadap gangguan yang diterimanya. Respon bumi tersebut dapat dilihat dari bentuk persamaan respon, seperti persamaan magnitudo, persamaan percepatan tanah maksimum. Untuk mendapatkan harga konstanta, seperti p,q dan r pada persamaan (2) dan a,b,c dan d dan pada persamaan (1), digunakan metoda kuadrat terkecil yaitu dengan mengkonvolusikan parameter fisis bumi (konstanta yang akan dicari) dengan parameter fisis gempa sebagai berikut:

$$c_t = \sum_{t=0}^{m} f_s b_{t-s} \qquad (6)$$

dimana c_t menyatakan harga parameter hasil perhitungan, b_s menyatakan parameter fisis bumi dan f_s menyatakan parameter gempabumi (magnitudo gempa, percepatan tanah maksimum dan sebagainya). Bila d_t menyatakan harga parameter hasil pengamatan, maka beda harga pengamatan dengan harga perhitungan adalah

$$I = \sum_{t=0}^{m+n} (d_t - c_t)^2 = \sum_{t=0}^{m+n} \left(d_t - \sum_{s=0}^{m} f_s b_{t-s} \right)^2 \qquad (7)$$

Perbedaan harga pengamatan dengan harga perhitungan minimum, apabila harga differensial parsial persamaan (7) terhadap setiap koefisien persamaan parameter gempabumi sama dengan nol, dengan demikian diperoleh

$$\sum_{s=0}^{m} f_s \sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} = \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} \text{ , untuk i = 0,1,2 ...} \qquad (8)$$

dimana

$$\sum_{t=0}^{m+n} b_{t-s} b_{t-i} = \phi_{t-s} \text{ dan } \sum_{t=0}^{m+n} d_t b_{t-i} = g_t \qquad (9)$$

dalam ϕ_t merupakan autokorelasi dari parameter fisis bumi dan g_i merupakan korelasi silang antara parameter fisis bumi dan harga parameter hasil pengamatan.

Untuk menentukan konstanta p, q , r dari persamaan (2) digunakan metoda kuadrat terkecil (*least square).* Berdasarkan persamaan (9), maka persamaan (2) dapat ditulis menjadi:

$$\sum M = \Delta r + p \sum I_0 + q \sum \log H$$

$$\sum M I_0 = r \sum I_0 + p \sum I_0^2 + q \sum I_0 \log H$$

$$\sum M \log H = r \sum \log H + p \sum I_0 \log H + q \sum \log H^2$$

Kemudian bila m = M - [M], $i_0 = I_0 - [I_0]$, dan h = H – [H] yang merupakan deviasi terhadap nilai rata-rata, maka ketiga persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$\sum m i_0 = r \sum m i_0 + p \sum i_0^2 + q \sum i_0 \log h$$

$$\sum m \log h = r \sum \log h + p \sum i_0 \log h + q \sum \log h^2$$

dengan metoda elimimasi, maka akan diperoleh harga p, q dan r.

Setelah harga konstanta p, q, dan r didapatkan, harga tersebut disubsitusikan ke persamaan (2) maka diperolehlah formula untuk menghitung magnitudo sumber gempabumi khusus untuk Sumatera Barat dan pesisir pantai baratnya. Setelah harga konstan p, q, dan r diperoleh, pekerjaan berikutnya adalah menentukan harga konstanta a, b, c dan d dari persamaan (1). Harga konstanta ini juga diperoleh dengan menggunakan metoda kuadrat terkecil (*least square).* Dengan menggunakan penalaran yang sama dengan memperoleh konstanta p,g dan r pada persamaan (2) di atas, diperolehlah sistem persamaan untuk menentukan persamaan percepatan tanah maksimum sebagai berikut:

$$\log \alpha_{arc} = aI + bM - c \log \Delta + d$$

$$\sum I \log \alpha_{arc} = a \sum I^2 + b \sum MI - c \sum I \log \Delta + d \sum I$$

$$\sum M \log \alpha_{arc} = a\sum IM + b\sum M^2 - c\sum M \log \Delta + d\sum M$$

$$\sum \log \alpha_{arc}{}^2 = a\sum I \log \alpha_{arc} + b\sum M \log \alpha_{arc} - c\sum \log \Delta \log \alpha_{arc} + d\sum \log \alpha_{arc}$$

$$\sum \log \Delta \log \alpha_{arc} = a\sum I \log \Delta + b\sum M \log \Delta - c\sum \log \Delta^2 + d\sum \log \Delta$$

dengan menggunakan penjabaran seperti penguraian persamaan (2), maka akan diperoleh 4 persamaan dengan 4 variabel yang belum diketahui besarnya. Dengan menyelesaikan sistem persamaan di atas, maka diperoleh harga konstanta a, b, c dan d. Kemudian harga konstanta yang diperoleh tersebut di subsitusikan ke dalam persamaan (1), sehingga diperoleh formula percepatan tanah maksimum khusus untuk wilayah Sumatera Barat dan pantai baratnya.

IV. Hasil dan Pembahasan

Setelah dilakukan analisa terhadap data gempa bumi dari tahun 1900 sampai dengan tahun 2005, dengan menggunakan pendekatan kuadrat terkecil (*least square*) berdasarkan persamaan $M = p\ I_0 + q \log H + r$, diperoleh harga konstanta $p = 0.415$, harga $q = -0.795$ dan harga $r = 3.334$, dengan demikian diperoleh persamaan magnitude local khusus untuk Sumatera Barat yaitu:

$$M_L = 0.415\ I_0 - 0.795 \text{ Log } H + 3.334$$

dengan intensitas gempa pada episenter $I_o = I + 3 \log (\Delta/H) + 0.01\ (\Delta - H)$.

Kemudian berdasarkan persamaan $\log \alpha_{arc} = aI + b\,M - c \log\Delta + d$, maka diperoleh harga konstanta $a = 0.421$, $b = 0.146$, $c = 0.746$ dan $d = -2.884$, sehingga diperoleh persamaan percepatan tanah khusus untuk Sumatera Barat sebagai berikut:

$$\log \alpha_{arc} = 0.421\,I + 0.146\,M_L + 0.746 \log \Delta - 2.844.$$

Hasil temuan di atas menunjukan bahwa persamaan yang digunakan untuk menghitung percepatan tanah tidak dibuat secara global, tetapi harus dibuat formula lokal. Perbedaan formula ini diakibatkan oleh struktur geologi, jenis batuan untuk setiap daerah adalah berbeda. Formula ini yang diperoleh ini kiranya masih perlu dikoreksi dengan memasukkan sumber data dari berbagai stasion pencatat gempa. Berdasarkan formula yang diperoleh, maka dibuatlah distribusi kecepatan tanah di provinsi Sumatera Barat seperti terlihat pada lampiran.

Peta lampiran memperlihatkan bahwa harga percepatan tanah minimum sebesar 51.67 gal dan percepatan tanah maksimum sebesar 723.09 gal. Berdasarkan data percepatan tanah dan peta percepatan tanah Lampiran pada Gambar 2 dan 3, secara umum Sumatera Barat merupakan daerah yang berisiko tinggi terhadap bahaya gempabumi, karena hampir semua daerahnya memiliki percepatan tanah maksimum di atas 300 gal, hal ini sesuai dengan standar yang telah ditetapkan secara nasional. Untuk daerah di Sumatera Barat, yang memiliki harga percepatan tanah maksimum tertinggi adalah Kabupaten Solok yaitu sebesar 723.09 gal sedangkan daerah yang memiliki percepatan tanah maksimum terendah adalah Kota Payakumbuh yaitu sebesar 286.47 gal.

V. Simpulan dan Saran

Sesuai dengan tujuan penelitian ini maka dapat disimpulkan bahwa formula yang dapat digunakan untuk menghitung percepatan tanah oleh gempa khusus untuk daerah Sumaera Barat adalah: $\log \alpha_{arc} = 0.421\ I + 0.146\ M_L + 0.746 \log \Delta - 2.844$, dimana magnitude lokal $M_L = 0.415\ I_0 - 0.795 \text{ Log } H + 3.334$, dan intensitas gempa pada episenter $I_o = I + 3 \log (\Delta/H) + 0.01\ (\Delta - H)$.

Agar penelitian lebih berguna untuk selanjutnya perlu kiranya membuat pemetaaan distribusi percepatan tanah maksimum untuk daerah Sumatera Barat. Kemudian formula yang didapatkan perlu dilanjutkan koreksi dengan menggunakan *accelegraf* atau *strongmotion*, yang mana pada penelitian ini belum dapat dilakukan karena ketiadaan peralatan.

. DAFTAR PUSTAKA

Ali, K, 1985, *Maximum Likelihood Estimate of b Value in Formula log N = a + bM and its Confidence Limits,* Bulletin Earthquake, vol. 43, pp 345-358

Curray, J,R, G.G Shor Jr, R.W. Raitt and Henry, 1977, *Seismic Refraction and Reflection Studies of Crustal Structure of Eastren Sunda and Westren Sunda Arces,* Jurnal of Geophysics Research, Vol. 82, 2479 - 2489

Diament,M. C. Deplus, D. Dahrin, and M. T. Zen, Jr, H. Harjono, K. Karta, M. Gérard, O. Lassal, and A. Martin , J. Malod, 1992, (Abstrak), *Mentawai fault zone off Sumatra: A new key to the geodynamics of western Indonesi, Geology:* Vol. 20, No. 3, pp. 259–262,

McCaffray, R, P. Molnor, S.W. Roecher and Y.S. Joyodiwirjo, 1985, *Microearthquake Seismicity and Fault Plane Solusion Related to Arc-Conitnent Collision in the Eastern Sunda-Arc, Indonesia,* Jurnal of Geophysics Research, Vol. 90, pp 4511 - 4528

Mc Cann. W.R. and K.R. Newcomb, 1987, *Seismic History and Seismotectonic of the Sunda Arc,* Jurnal of Geophysics Research, vol 92, 421-439

Natawidjaya, Danny H, 1995, *Gempa Tektonik Daerah Bukit Tinggi-Muarolabuh; Hubungan Segmantasi Sesar Aktif dengan Gempa Bumi tahun 1926 dan 1943,* Prosiding Hasil Penelitian Puslitbang Geoteknologi LIPI, pp 50 – 75

Posavec, M. D. Taylor, th van euwen and A Spector, 1973, *Tectonic Controls of Volcanism and Complex Movement Alang the Sumatran Fault System,* Geology Sociaty Malaysia, Bulleten, pp 43- 60

Richter, C.F and Gutenberg B. 1952, *Earthquake magnitude, Intensity, Energy and Acceleration,* Bulleten Seismology Sociaty Amarica. Vol. 32, pp 163-191

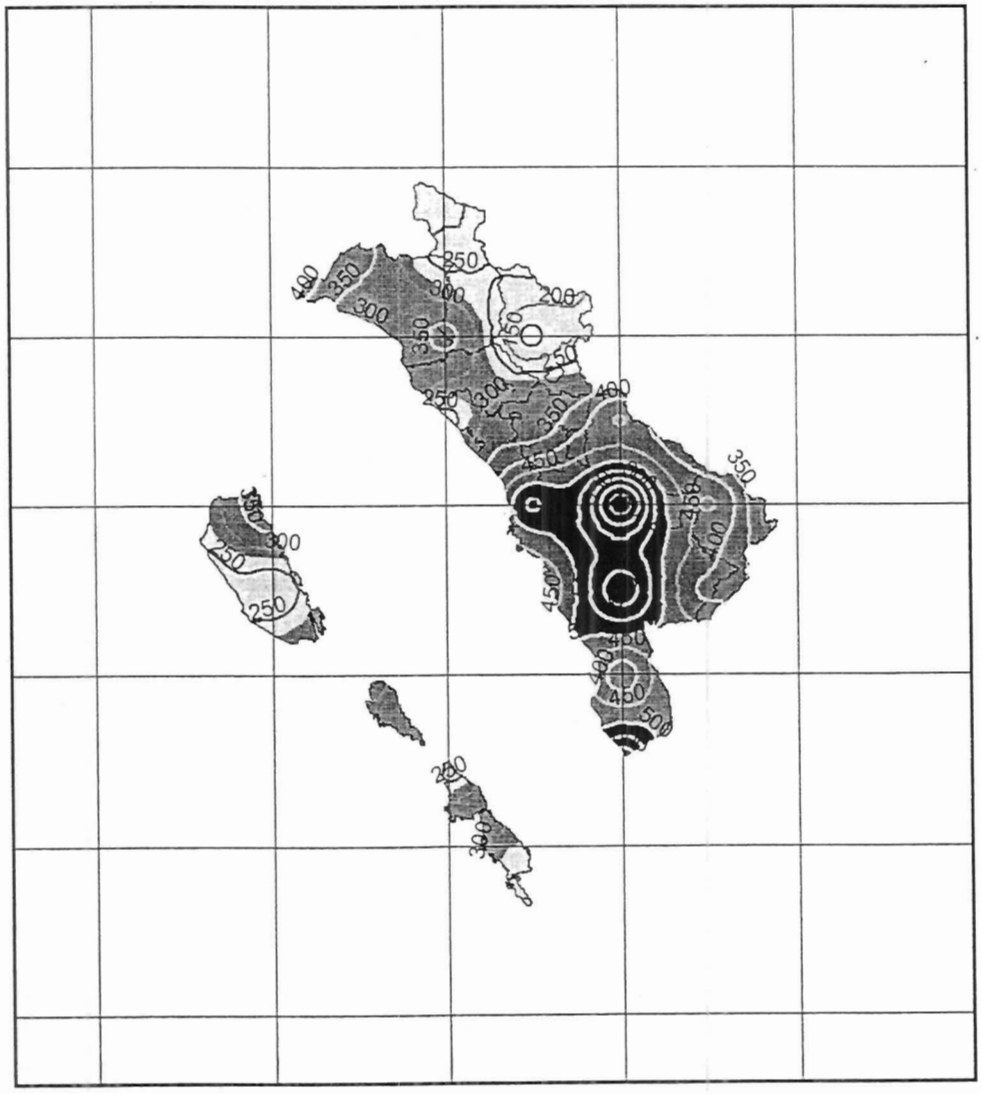
Subardjo, Buha M. Simanjutak, C. Piccanusa, 1998, *Intensitas dan Percepatan Tanah Maksimum Gempabumi Maluka dan Sekitarnya Periode 1900-1977,* Bulleten Meteorologi dan Geofiiska, hal 1 – 17.

Vanek, J, A. Zatopek, V. Karnik, N.V. Kondorskaya. Y.V. Riznicheko, E.F. Saveresey, N.V. Shabulen, 1962, *Standardization of Magnitude Scales,* Bullten Academic USSR Geophysics Survey , England Transl. no. 108 – 111

Zen, M.T, 1987, *Seismicity of the Sumatra Fault Zones,* 6 th Regional Conggres an Geology, Mineral and Energy Resources of Southaest Asia.

MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

Lampiran : Peta Distribusi Percepatan Tanah oleh Gempa Tektonik di Kawasan Sumatera Barat dan Pesisir Pantainya



Percepatan Tanah (gal)

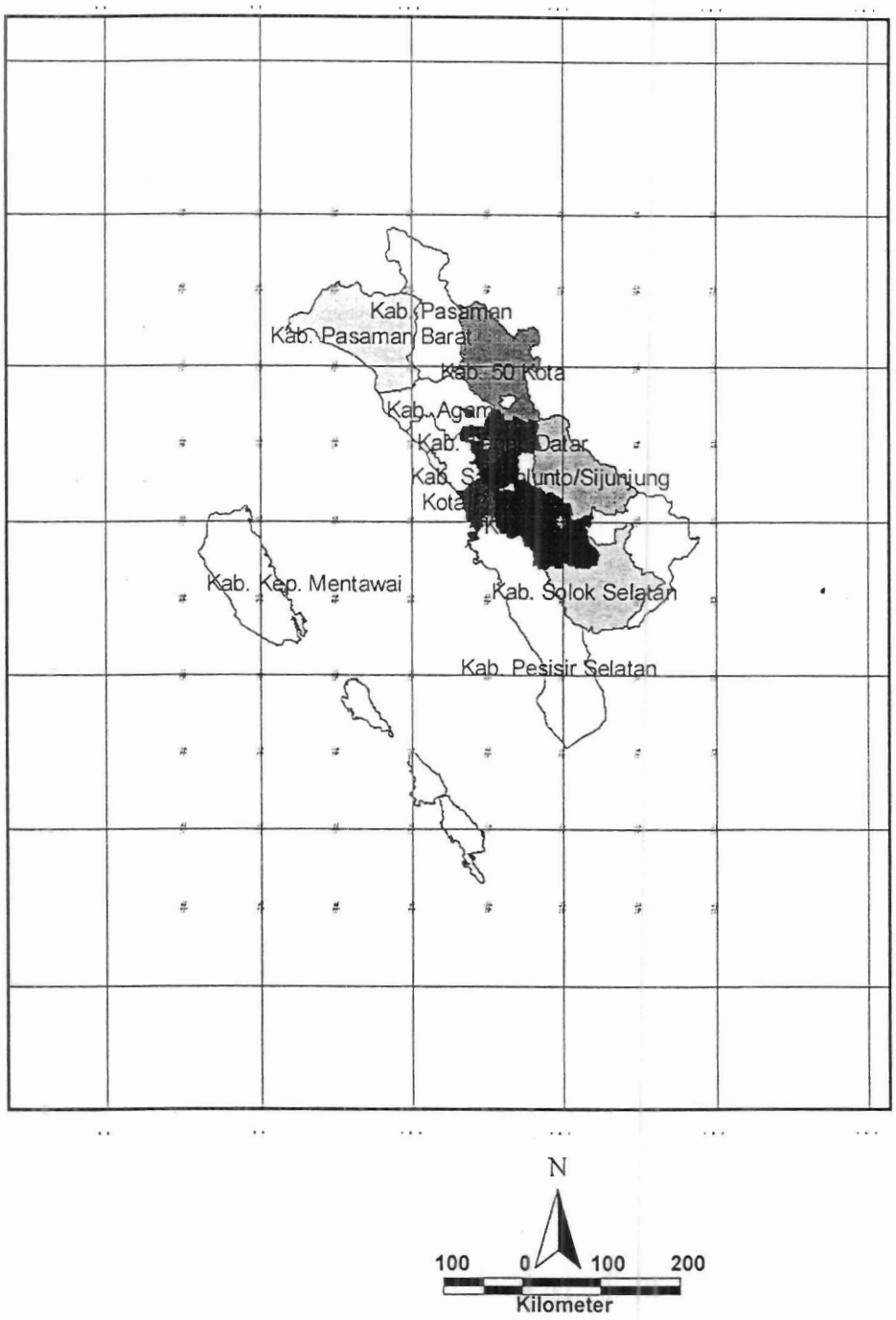
0-150	400-500
150-300	500-600
300-400	600-750

N

100 0 100 200

Kilometer

Gambar 2: Peta Kontur Percepatan Tanah Maksimum oleh Gempa Tektonik di Sumaera Barat Tahun1900 - 2005



Gambar 3: Peta Kontur Percepatan Tanah Maksimum oleh Gempa Tektonik di Sumaera Barat Berdasarkan Kabupaten Tahun1900 - 2005

Lampiran 10 : Draf artikel 2 (Buram artikel 2) dengan judul Subduksi Lempeng Indo-Australia Pada Lempeng Eurasia Di Pantai Barat Sumatera Barat

SUBDUKSI LEMPENG INDO-AUSTRALIA PADA LEMPENG EURASIA DI PANTAI BARAT SUMATERA BARAT

Oleh:
Akmam*, Letmi Dwridal*, Badrul Mustafa Kemal**

ABSTRAK

Subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia berlangsung secara terus menurus dan telah membentuk kepalauan Mentawai dan Sumatera aktif secara tektonik dan vulkanik. Tingkat keaktifan tektonik kawasan ini dapat dipelajari melalui aktifitas subduksi lempeng yang bertinjau berdasarkan kecepatan sukduksi, sudut subduksi dan kedalaman subduksi.

Untuk itu dilakukan penelitian dasar deskriptif yang bertujuan untuk mengetahui pola subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia. Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa catatan gempa di Sumatera Barat tahun 1900 sampai dengan tahun 2005 yang tersedia di BMG Padang Panjang. Kecepatan dan sudut subduksi lempeng dihitung menggunakan formula Le Pichon.

Hasil penelitian menunjukan rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia dikawasan Sumatera Barat dan sekitarnya adalah $31,33^0$ dengan kecepatan suduksi relatif rata-rata sebesar 6,32 cm/tahun dan kecepatan gerak terhadap garis normalnya adalah 4,93 cm/tahun.

Kata Kunci : Subduksi, Lempeng, Indo-Australia, Eurasia

I. PENDAHLUAN

Subduksi merupakan pertemuan (tumbukan) dua lempeng akibat adanya pergerakan lempeng yang saling mendekat (lempeng benua dan lempeng samudera). Kedua lempeng yang bergerak saling menekan, sehingga terjadi pembengkokan pada lempeng samudera (sudut *subduksi*) yang kemudian menyusup ke bawah lempeng benua. *Subduksi* yang terdapat di Sumatera Barat terbentuk akibat pergerakan secara *konvergen* lempeng Indo-Australia dan Eurasia, dimana lempeng Indo-Australia menunjam dan menyusup ke bawah lempeng Eurasia.

Pulau Sumatera merupakan salah satu pulau yang sangat aktif seismisitasnya, akibat eksistensi zona penunjaman *(subduction zone)* lempeng Indo-Australia yang menyusup ke bawah lempeng Eurasia, sehingga membentuk jalur-jalur gempa bumi. *Zona subduksi* ini merupakan daerah zona seismik aktif, dimana gempa bumi tektonik baik dangkal, menengah maupun dalam biasanya terjadi di sepanjang zona ini. *Zona subduksi* ini terbentuk karena dua lempeng bergerak saling menekan dengan kecepatan yang sangat lambat dan lempeng yang mengalami pembengkokan dengan tertentu (sudut *subduksi*). Besar sudut *subduksi* dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang diberikan lempeng di atasnya.

Permasalahan yang muncul sekarang adalah bagaimana pola subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera Barat serta berapa besar sudut *subduksi* yang dihasilkannya. Mengingat begitu pentingnya pola penunjaman lempeng diketahui untuk mendapatkan solusi dari permasalahan perlu dilaksanakan penelitian untuk mengetahui pola penujaman (*subduksi)* lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia di pantai Barat Sumatera Barat.

Melihat kepada pergerakan lempeng di Indo-Australia (lempeng Hindia) dan sistem sesar Sumatera Barat dan sesar Mentawai, menyebabkan kawasan ini sangat menarik sebagai objek penelitian kegempaan dalam rangka meletakkan dasar pemikiran penanggulangan (mitigasi) bencana gempa kedepan. McCaffrey et. al. (1985) mengestimasi terdapatnya kerak benua sampai kedalaman (30-40) km dan adanya mekanisme pergerakan bidang sesar pada berbagai kedalaman pusat gempa di

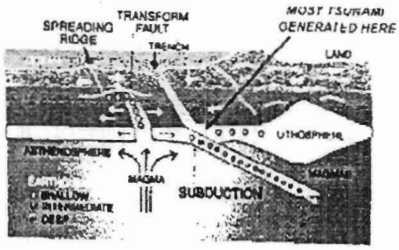
sepanjang busur Sumatera. Kemudian Posavec et. al . (1977) mengungkapkan bahwa zona sesar Sumatera didominasi oleh pergerakan lateral secara terus menerus lempeng Indo-Australia dan lempeng Sumatera. Curey et. al. (1989) meramalkan bahwa zona Benioff yang terdapat disepanjang busar Sumatera dapat berubah dengan cepat kedalamannya dan bentuknya. Hal ini menandakan bahwa struktur zona disepanjang busur sumatera sangat kompleks dan dinamis yang perlu diteliti secara rinci untuk setiap segmennya.

II TINJAUAN PUSTAKA

A. Kondisi Tektonik Sumatera dan Subduksi Lempeng Indo-Australia

Tektonik lempeng adalah suatu teori yang menerangkan proses dinamika bumi, pembentukan jalur pegunungan, jalur gunung api, jalur gempa bumi, dan cekungan endapan di muka samudera yang diakibatkan oleh pergerakan lempeng. Turcotte (1982) menjelaskan bahwa kerak bumi dapat ibarat sebagai sebuah rakit yang sangat kuat dan relatif dingin mengapung di atas astenosfer yang liat dan sangat panas. Hal ini menyebabkan stabilitas litosfer tergantung kepada proses pada astenosfer.

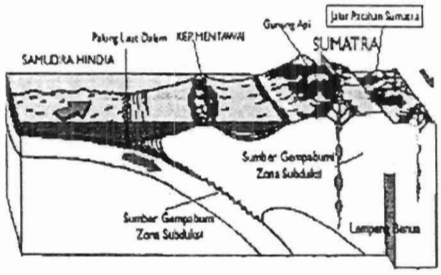
Kerak bumi berbentuk lapisan batuan menutupi seluruh permukaan bumi. Akibat adanya aliran panas (arus konveksi) dalam astenosfer menyebabkan kerak bumi pecah menjadi beberapa bagian lempeng kerak bumi. Lempeng tersebut dapat berupa kerak benua, kerak samudera dan kerak benua-samudera. Sumber panas dalam bumi berasal dari peluruhan reaksi radioaktif spontan yang berlangsung pada lapisan astenosfer dan inti bumi. Panas tersebut menimbulkan arus konveksi yang merupakan sumber kekuatan utama penyebab terjadinya pergerakan lempeng. Pergerakan lempeng tersebut diilustrasikan seperti Gambar 1.



Gambar 1. Zona subduksi antara lempeng samudera dan benua
(Turcote: 1982 : 11)

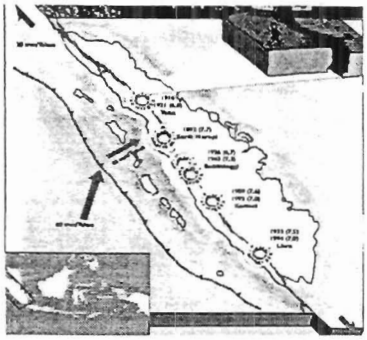
Gambar 1, memperlihatkan bahwa pada zona subduksi terbentùk palung, yang diikuti oleh pemekaran dasar samudera. Pergerakan lempeng saling mendekati ini akan menyebabkan terjadinya tumbukan, dimana lempeng samudera menunjam ke bawah lempeng benua. Pergerakan lempeng kerak bumi yang saling bertumbukan membentuk zona subduksi seperti Gambar 1. Pergerakan tersebut menghasilkan gaya yang bekerja, baik horizontal maupun vertikal dan akan membentuk pergunungan, lipatan, jalur gunungapi, pensesaran, dan jalur gempabumi yang bersifat dinamis dan rawan terhadap deformasi.

Subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia membentuk morpologi pada kepulauan Mentawai, kepulauan Batu dan pulau Sumatera seperti Gambar 2:



Gambar 2: Morpologi Subduksi Lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia (Dani Natawijaya, dkk : 2004)

Gambar 2 memperlihatkan bahwa lempeng Indo-Ausralia bergerak menuju dan menunjam ke lempeng Eurasia di depan pulau Sumatera. Bagian lempeng yang menunjam ke bawah kepulauan Mentawai, Nias dan Batu melekat pada batuan di atasnya, sehingga pergerakan ini memampatkan batuan di atasnya. Pemampatan ini berlangsung secara terus menerus, sehingga apabila mampatan batuan tersebut melampaui elastistas batuan pendukungnya, maka batuan akan patah, maka terjadilah gempa tektonik. Kecepatan pergerakan lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia dekat pulau Sumatera dan Mentawai seperti diperlihatkan Gambar 3`



Gambar 3. Kondisi subduksi lempeng Indo-Ausralia ke lempeng Asia dan Aspek Kegempaanya (Dani Natawijaya, dkk: 2004)

Gambar 3, memperlihatkan bahwa di pesisir barat Sumatera banyak terdapat sesar (patahan) naik (thrust fault) yang juga mungkin bercampur dengan gerakan "Sea floor spreading" (bukaan, rengkahan lantai samudra) di Andaman yang berlanjut menjadi sesar (Natawidjaya: 1995, McCann : 1987) Hal ini diperkuat oleh Diament, et. al, (1992), menyatakan bahwa *the geodynamic evolution of the western part of the Sunda arc is controlled by the change from frontal subduction of the Indo-Australian plate along Java to oblique subduction along Sumatra.* Selanjutnya, Le Pichon (1984), McCann (1987) menjelaskan bahwa gaya-gaya yang timbul sangat tergantung kepada variasi kedalaman zone Bienioff dan kedalaman penetrasi zona penyusupan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa sumber gempabumi di Sumatera umumnya adalah patahnya pertemuan lempeng-lempeng yang biasa disebut dengan zona subduksi aktif di daratan Sumatera dan samudera Hindia (Ahmad dan Mulyana: 1995, Ahmad:1995). Kondisi inilah yang menyebabkan daerah Sumatera rawan terhadap gempa tektonik seperti terlihat pada Gambar 3.

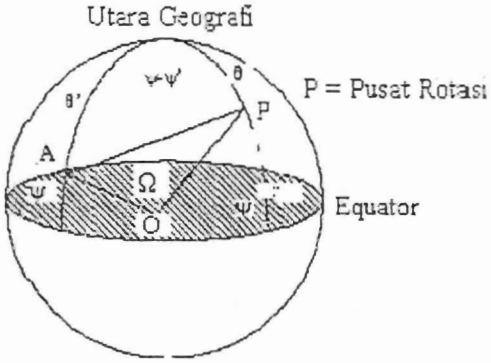
Berdasarkan hasil penelitian Minster dan Jordan (1978) tentang susunan tektonik lempeng dan kenematika lempeng Asia Tenggara memperkirakan bahwa konvergensi pergerakan busur Sunda sepanjang azimuth di sekitar N20E bervariasi antara 7.8 cm/tahun sampai dengan 6 cm/tahun. Hasil ini juga sama dengan Natawijaya (2004).

B. Segitiga Bola Le Pichon

Segitiga bola Le Pichon dikembangkan untuk menentukan besar sudut dan kecepatan subduksi lempeng tektonik pada suatu tempat. Segitiga Le Pichon bertitik dari teori Euler yang menyatakan bahwa *which states that the movement of a portion of*

a sphere a cross its surface as uniquely defined by a single angguler rotation about a pole of rotation. The pole of rotation and its antipole point on the opposite diameter of the sphere are the only twopoints which remain in a fixed position relative to the moving portion (Kearey and Vine : 2004). Kemudian Skinner and Porter (1987) mengungkapkan bahwa pergerakan setiap lempeng litosfer dipermukaan bumi dapat digambarkan sebagai sumbu rotasi pemekaran.

Kecepatan subduksi ekivalen dengan pemekaran samudera, seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Berdasarkan pengertian tersebut dikembangkan metoda perhitungan kecepatan subduksi lempeng sumudera ke lempeng benua dengan menggunakan segitiga bolaLe Pichon dengan bantuan Gambar 4



Gambar 4: Gambar segitiga Le Pichon untuk menentukan sudut penunjaman lempeng samudera ke lempeng benua

Dengan bantuan Gambar 4, dapat ditentukan sudut kemiringan (Turcotte : 1982 : 32)

$$\cos\Omega = \cos\theta\cos\theta^{1} + \sin\theta\cos(\psi - \psi^{1}) \qquad (1)$$

dimana Ω sudut didepan tali busur terbentuk oleh perputaran titik dipermukaan bumi dari A ke P terhadap pusat bumi. Berdasarkan harga dapat dihitung sudut penunjaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia, dimana dalam hal ini θ adalah sudut colatitude, Ψ adalah longititude rotasi bumi, θ' adalah colatitude Ψ' adalah longititude titik pada bidang batas lempeng seperti terlihat pada gambar 3. McCaffrey (1991) merumuskan kecepatan penunjaman lempeng dengan :

$$v_n = \frac{v_P \sin(\alpha - \psi)}{\sin(\alpha - \beta)} \qquad (2)$$

dimana β adalah sudut yang dibentuk oleh arah pergerakan dengan garis normal, V_p kecepatan rata-rata menyusupan lempeng. Persamaan (2) dapat dimodifikasi menjadi

$$v_n = \sin^{-1}\left\{\frac{\sin(\varphi - \varphi')\cos\theta}{\sin\Omega}\right\} \qquad (3)$$

dimana φ besar sudut oleh proyeksi titik A (batas pertemuan lempeng) dan titik P (pusat rotasi lempeng) terhadap pusat bumi dan α sudut yang dibentuk oleh penunjaman lempeng terhadap garis normal. Kecepatan pergerakan relatif lempeng dihitung dengan persamaan:

$$\upsilon_r = \omega r \sin\Omega \qquad (4)$$

dimana dalam hal ini ω adalah kecepatan sudut, *r* adalah jari-jari bumi 6371 km.

III METODA PENELITIAN

Variabel dalam penelitian ini terbagi atas tiga bagian, yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol. Variabel bebas penelitian ini adalah θ' dan φ', dimana θ' menyatakan *colatitudo* (lintang) pada bidang batas lempeng, sedangkan φ' menyatakan *longitudo* (bujur) pada bidang batas lempeng. Variabel terikatnya adalah Ω yang menyatakan besar sudut *subduksi* lempeng, sedangkan variabel kontrolnya adalah θ dan φ, dimana θ menyatakan *colatitudo* (lintang) dari pusat rotasi lempeng yang timbul akibat gerak relatif dua lempeng yang berdekatan, sedangkan φ menyatakan *longitudo* (bujur) dari pusat rotasi lempeng yang timbul akibat gerak relatif dua lempeng yang berdekatan.

Data penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari stasiun Badan Meterologi dan Geofisika Padangpanjang yang terekam dalam bentuk analog. Data yang akan digunakan adalah data gempa tektonik mulai tahun 1900 – 2005 untuk daerah penelitian 88.5^0 BT – 102^0BT dan 1^0LU – 3.5^0 LS, dengan magnitudo gempabumi lebih dari 4.0 skala Richter. Data diperoleh dalam bentuk tabel yang terdiri dari *episenter*, waktu terjadinya gempa, kedalaman, magnitudo dan posisi (lokasi) terjadinya gempa.

Data dikelompokkan lagi atas beberapa penampang dari Barat Laut-Tenggara, dalam arah Barat Daya-Timur Laut masing-masing dengan lebar 0,5°. Setelah data dikelompokkan, data diplot dalam bentuk grafik hubungan kedalaman pusat gempa dengan *episenter* gempa, kemudian dilakukan analisis grafik. Dari analisis grafik diperoleh posisi batas lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia, dinyatakan dalam bujur dan lintang (θ' dan φ'). Posisi pusat rotasi lempeng (θ dan φ). Posisi pusat rotasi lempeng Indo-Australia dengan Eurasia yaitu 19,7N-38,5 E. (Turcotte:1982 dan LIPI:2005)

Setelah harga θ, θ', φ dan φ' diketahui, besar sudut *subduksi* lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia dapat ditentukan dengan memasukkan variabel-variabel yang ada ke formula segitiga Le Pichon pada persamaan 1. Kemudian untuk mendapat kecepatan subduksi relatif digunakan persamaan 4, dan untuk mendapatkan kecepatan subduksi arah normal digunakan persamaan 3.

IV. Hasil dan Pembahasan

Hasil plotan *hiposenter* terhadap *episenter* gempa untuk setiap penampang memberikan pola penunjaman lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia di Pantai Barat Sumatera Barat seperti terlihat pada lampiran. Posisi pertemuan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia untuk setiap penampang seperti Tabel 1.

Tabel 1. Posisi batas pertemuan lempeng untuk tiap-tiap penampang

Penampang	Posisi batas pertemuan lempeng	
	Lintang (Latitude) θ' (°N)	Bujur (longitude) φ' (°E)
1	-0,25	97,85
2	-0,65	98,25
3	-0,99	98,32
4	-1,30	98,50
5	-1,35	98,85
6	-1,50	98,97
7	-2,35	98,84
8	-2,60	99,00
9	-3,25	99,53

Posisi kutub rotasi lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia terdapat pada (19,7^{0}N, 38,5^{0}E) (Turcote : 1982, LIPI: 2005). Besar sudut *subduksi* lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia dan kecepatan subduksinya untuk tiap-tiap penampang di pantai Barat Sumatera Barat diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Besar sudut *subduksi* lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia untuk tiap-tiap penampang di Pantai Barat Sumatera Barat

No	Posisi Pertemuan Lempeng			Sudut			Kecapatan Subduksi		Keda-laman Subduksi (Km)
	Lintang θ' (°N)	Bujur φ' (°E)	Jurus (°NE)	Busur (Ω^o)	Normal (α^o)	Subduksi (γ^o)	Relatif v_r (cm/thn)	Normal v_n (cm/thn)	
1	-0,04	98,94	266	61,41	70,71	30,70	6,38	5,85	130
2	-0,63	98,88	257	61,79	70,73	30,89	6,36	5,38	135
3	-0,79	98,72	254	62,13	70,75	31,06	6,35	5,18	68
4	-0,8	98,90	250	62,42	70,77	31,21	6,33	4,91	85
5	-0,98	99,28	246	62,76	70,76	31,38	6,32	4,60	119
6	-1,47	99,30	247	62,93	70,77	31,46	6,31	4,67	98
7	-1,13	99,87	246.5	63,15	70,83	31,57	6,30	4,63	117
8	-1,88	99,56	244	63,39	70,84	31,69	6,29	4,44	109
9	-2,12	100,25	251	64,14	70,87	32,07	6,26	4,92	89

Hasil di atas menunjukkan rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia adalah 31,33^0 dengan kecepatan suduksi relatif rata-rata sebesar 6,32 cm/tahun dan kecepatan gerak terhadap garis normalnya adalah 4,93 cm/tahun. Kecepatan penujaman terbesar terdapat sekitar Pulau Spora dengan kecepatan relatif 6,36 cm/tahun dengan sudut penujaman 30,70^0 dan kedalaman subduksi maksimum adalah 135 km. Kecepatan relatif terkecil terdapat disekitar Palau Siberut dengan kecepatan penujaman 6,26 cm/tahun dengan sudut subduksi 32,07^0 yang terdapat disekitar Pulau Pagai, dengan kedalam sukduksi 89 km.

Harga ini memberikan informasi bahwa *subduksi* yang terdapat di barat Sumatera Barat adalah tergolong dangkal, tentu rawan terhadap gempa tektonik. Pola penunjaman lempeng memberikan gambaran besarnya deformasi yang dialami lempeng. Makin curam penunjaman lempeng, maka deformasi (perubahan bentuk) yang dialaminya semakin besar. Jumikis (1979) mengatakan bahwa salah satu faktor penyebab terjadinya deformasi pada batuan (lithosfer) adalah besarnya gaya tekan

yang diterima oleh batuan tersebut. Makin besar gaya tekan yang diterima, maka deformasi yang dialami batuanpun semakin besar. Hal ini berarti bahwa perbedaan pola penunjaman lempeng dipengaruhi oleh besarnya gaya tekan yang diterima lempeng, dengan kata lain penampang yang memiliki pola penunjaman lempeng yang curam mencerminkan bahwa gaya tekan yang dialaminya besar, sebaliknya penampang yang memilki pola penunjaman lempeng yang landai mencerminkan bahwa gaya tekan yang dialaminya kecil

Pola penunjaman lempeng analog dengan besar sudut subduksi lempeng. Makin curam pola penunjaman lempeng, maka besar sudut subduksi makin besar. Jika *stress* dan *strain* yang dialami lempeng melampaui batas elastisitas maka lempeng tersebut akan mengalami deformasi permanen (ductile deformation) dan apabila proses subduksi tetap berlangsung, pembengkokan lempeng akan melampaui batas elastisitas, akibatnya lempeng tersebut akan patah. Dari hubungan ini dapat dikatakan bahwa pola penunjaman lempeng yang curam dengan sudut subduksi yang besar, berarti kawasan tersebut beresiko tinggi terhadap gempa bumi dengan hiposenter yang dalam. Sedangkan penujaman lempeng bersudut kecil, mengakibatkan terjadinya gempa dangkal dan rawan terhadap bencana.

Hasil perhitungan kecepatan memperlihatkan kecepatan relatif penujaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia disekitar pantai barat Sumatera Barat rata-rata 6,32 cm/tahun. Harga ini lebih besar dari harga rara-rata kecepatan relatif penujaman Indo-Australia ke lempeng Eurasia pada pulau Sumatera yang yang diprediksi Natawijaya (2004) dan Minster dan Jordan (1978) yaitu 60 mm/tahun (6 cm/tahun). Hal inilah yang menyebabkan Sumatera Barat lebih sering digoncang gempa dibandingkan daerah Sumatera lainnya.

V. Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian menunjukan bahwa rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia pada kawasan Sumatera Barat dan sekitarnya adalah $31{,}33^0$ dengan kecepatan suduksi relatif rata-rata sebesar 6,32 cm/tahun dan kecepatan gerak terhadap garis normalnya adalah 4,93 cm/tahun. Kecepatan penujaman terbesar terdapat sekitar Pulau Spora dengan kecepatan relatif 6,36 cm/tahun dengan sudut penujaman $30{,}70^0$ dan kedalaman subduksi maksimum adalah

135 km. Kecepatan relatif terkecil terdapat disekitar Palau Siberut dengan kecepatan penujaman 6,26 cm/tahun dengan sudut subduksi $32,07^0$ yang terdapat disekitar Pulau Pagai, dengan kedalam sukduksi 89 km.

Sesuai dengan konstribusi penelitian ini dan berdasarkan hasil analisa data maka disarankan hal-hal sebagai berikut:

1. Sebaiknya hasil penelitian dapat dijadikan sebagai pengembangan mata kuliah Geodinamika dan Seismoligi Gempa Bumi pada Jurusan Fisika atau program Studi Geofisika dan Fisika Bumi
2. Hasil penelitian ini dapat dikembangkan untuk mengaturan tata ruang yang lebih baik di Sumatera Barat
3. Mengingat begitu berhaya efek dari gempa, maka hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai fundasi dasar untuk menetapkan kebijaksanaan mitigasi gempa bumi pada masa mendatang

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, Muhammad, 1995, *Penanggulangan Gempa Bumi Sesuai dengan Seismisitasnya,* Makalah pada seminar pada Himpunan Ahli Geofisika Indonesia PIT HAGI XX, Yogyakarta 29 – 30 Agustus 1995

Ahmad, Muhammad dan Erwin Mulyana, 1995, *Study of Lithosphere Subduction Along Java Sumatera Arc,* Makalah pada seminar pada Himpunan Ahli Geofisika Indonesia PIT HAGI XX, Yogyakarta 29 – 30 Agustus 1995

Curray, J,R, G.G Shor Jr, R.W. Raitt and Henry, 1977, *Seismic Refraction and Reflection Studies of Crustal Structure of Eastren Sunda and Westren Sunda Arces,* Jurnal of Geophysics Research, Vol. 82, 2479 - 2489

Diament,M. C. Deplus, D. Dahrin, and M. T. Zen, Jr, H. Harjono, K. Karta, M. Gérard, O. Lassal, and A. Martin , J. Malod, 1992, (Abstrak), *Mentawai fault zone off Sumatra: A new key to the geodynamics of western Indonesi, Geology:* Vol. 20, No. 3, pp. 259–262

Kearay, Philip & Vine, Frederick J, (2004), *Global Tectonics,* Blackwell Publishing Company. Australia

Le Pichon, X, P. Huchon, 1984, *Sunda Strait and Contrtol Sumatran Fault,* Online Jurnal of Geology Sociaty of America vol. 12, pp. 668 - 672

McCaffray, R, P. Molnor, S.W. Roecher and Y.S. Joyodiwirjo, 1985, *Microearthquake Seismicity and Fault Plane Solusion Related to Arc-Conitnent Collision in the Eastern Sunda-Arc, Indonesia,* Jurnal of Geophysics Research, Vol. 90, pp 4511 - 4528

Mc Cann. W.R. and K.R. Newcomb, 1987, *Seismic History and Seismotectonic of the Sunda Arc,* Jurnal of Geophysics Research, vol 92, 421-439

McCaffray, R, 1991, *Slip Vectors and Stretching of the Sumatran Force Arc,* Jurnal of Geology, Vol. 19, pp. 881 – 884

Natawidjaya, Danny H, Harjono, Hery, Suwargadi, Bambang W (2004), *Sumatera Rawan Gempa,* Puslit Geotektonologi-LIPI, Bandung

Posavec, M. D. Taylor, th van euwen and A Spector, 1973, *Tectonic Controls of Volcanism and Complex Movement Alang the Sumatran Fault System,* Geology Sociaty Malaysia, Bulleten, pp 43- 60

Skinner, Brian J, Porter Stephen C, (1987), *Physical Geology,* Jhon Wiley & Sons, New York

Turcotte, D.L, Gerald, S, 1982, *Geodynamics,* John Wiley Sons, New York

Zen, M.T, 1987, *Seismicity of the Sumatra Fault Zones,* 6 th Regional Conggres an Geology, Mineral and Energy Resources of Southaest Asia.

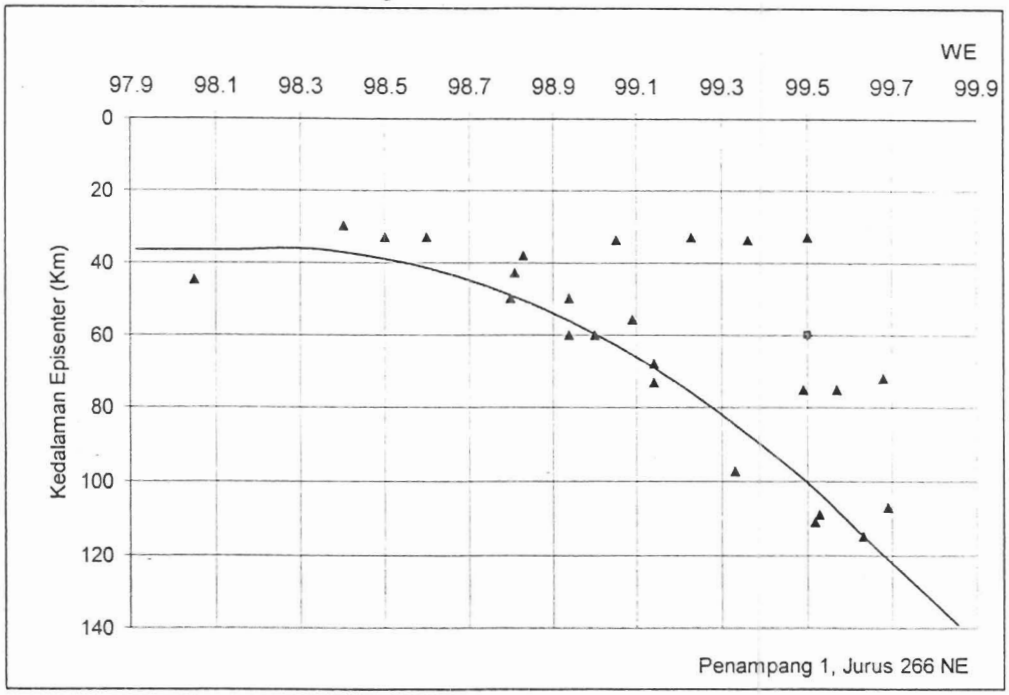
http://www.onr.navy.mil/focus/ocean/motion/waves3.htm

http:// www.oceanografi.lipi.go.id//

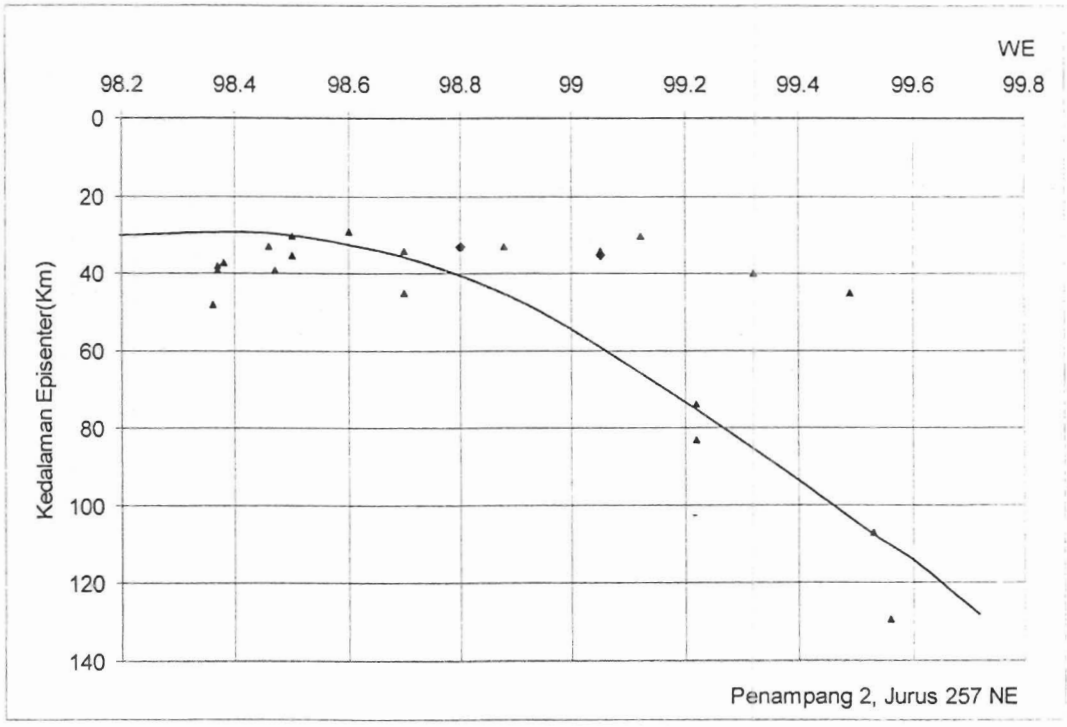
http://risiyanto.budi.or.id/blog/2004/12/28/gempa-bumi-tsunami-di-samudera-hindia/trackback/

Lampiran : Pola Penujaman Lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia untuk Setiap Jurus

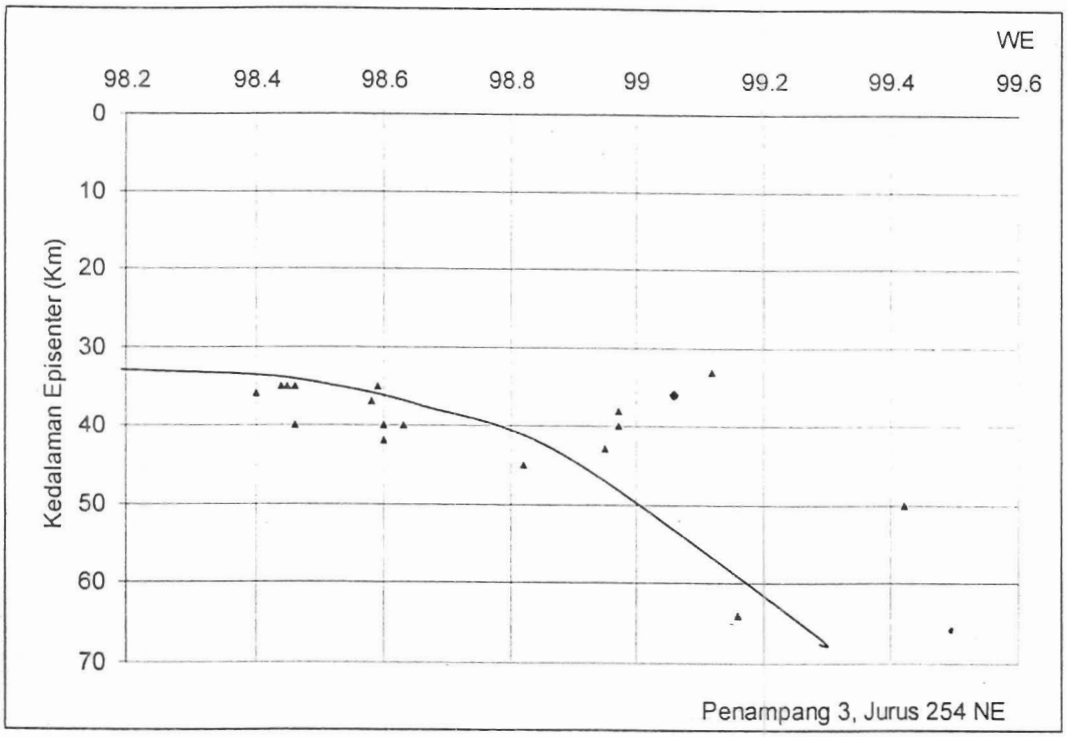
a. Penampang 1, Arah Jurus Pengamatan 266° NE



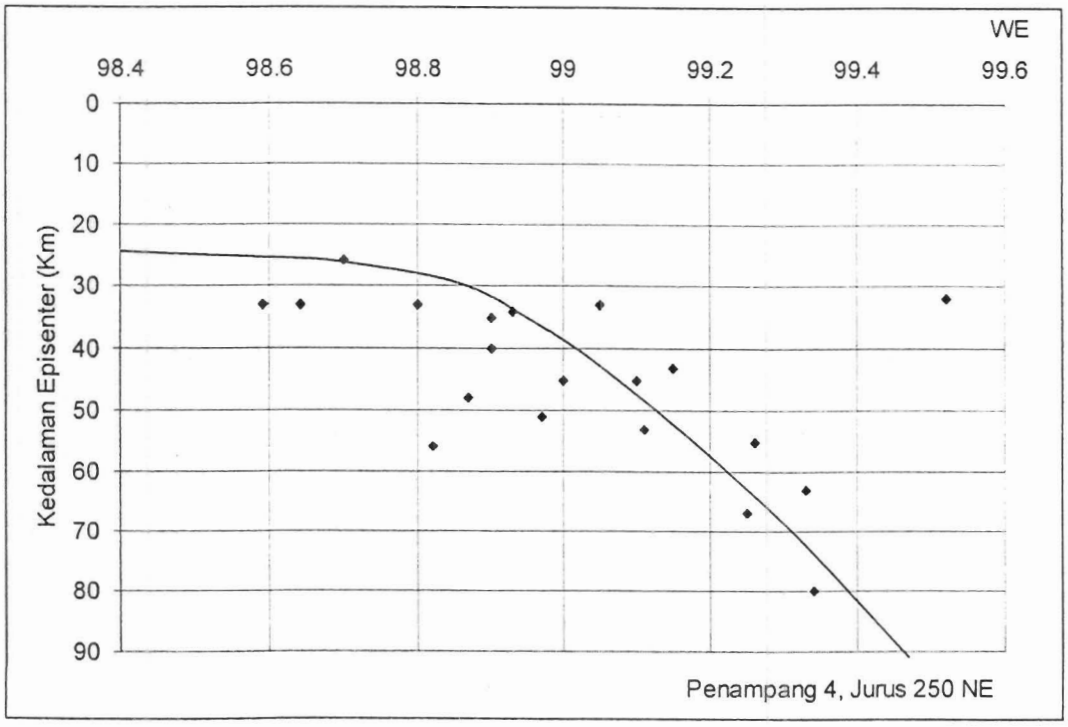
b. Penampang 2, Arah Jurus Pengamatan 257° NE



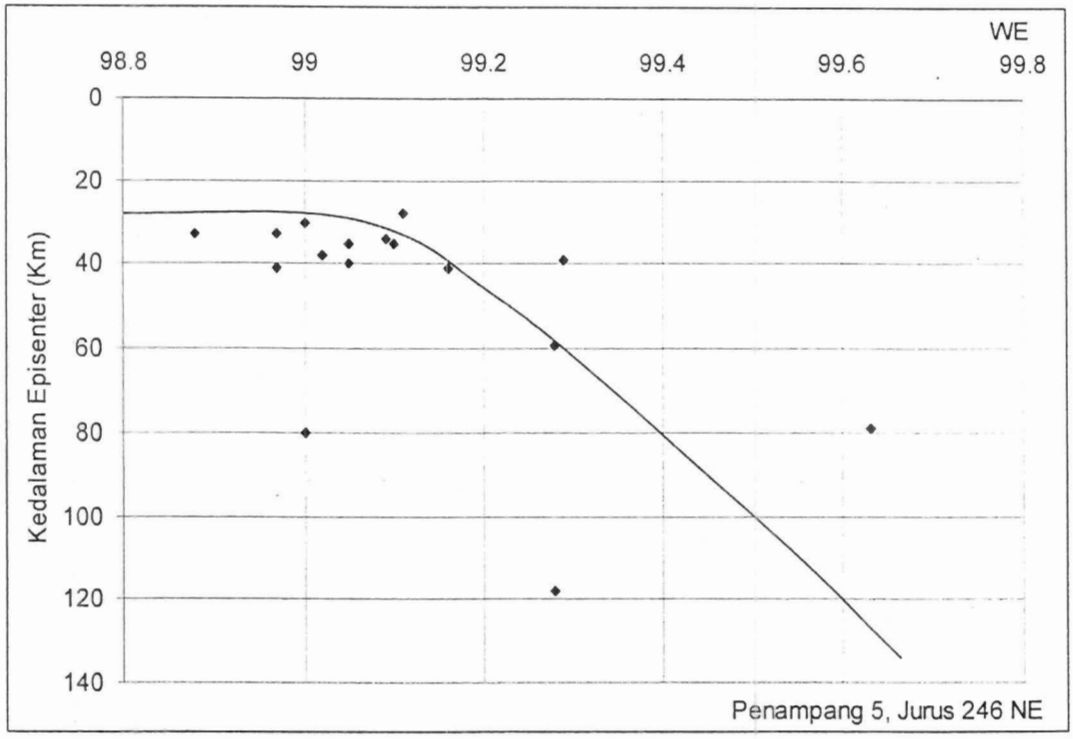
c. Penampang 3, Arah Jurus Pengamatan 254° NE



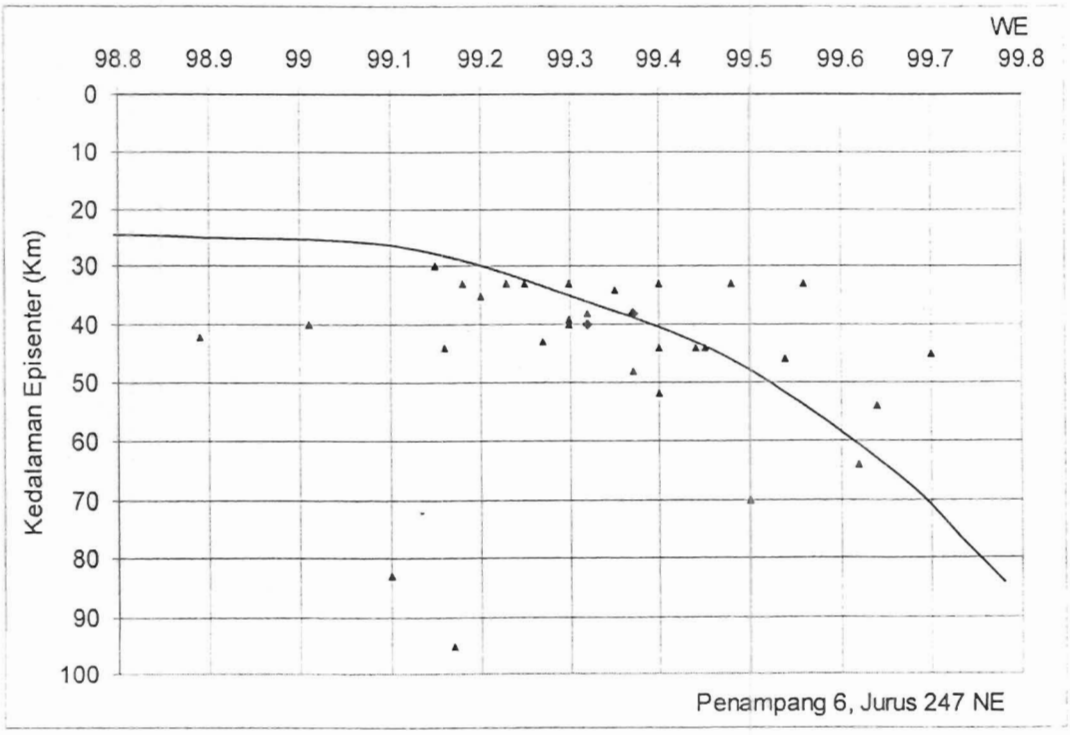
d. Penampang 4, Arah Jurus Pengamatan 250° NE



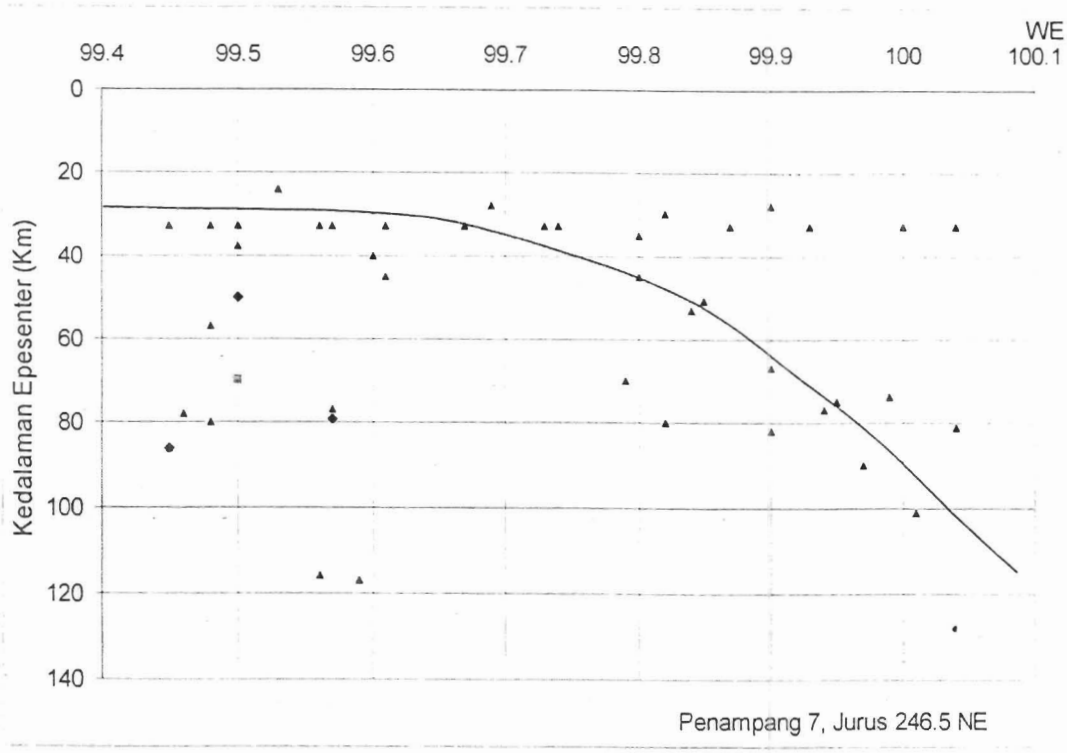
e. Penampang 5, Arah Jurus Pengamatan 246° NE



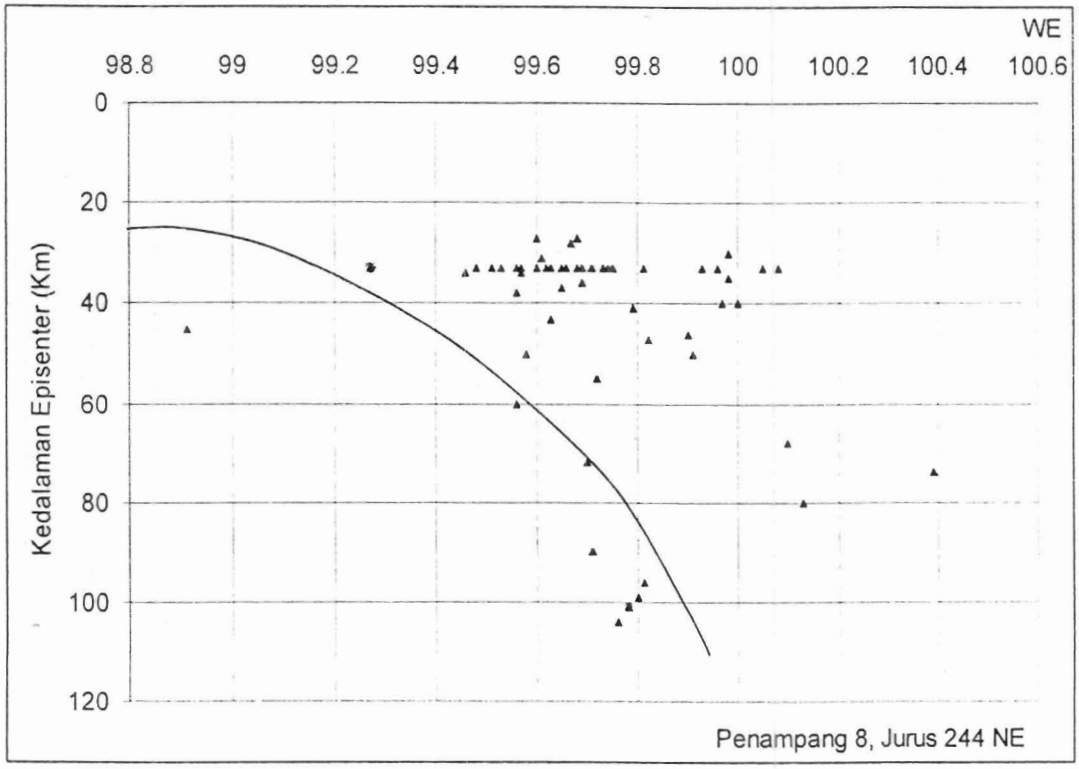
f. Penampang 6, Arah Jurus Pengamatan 247° NE



g. Penampang 7, Arah Jurus Pengamatan 246.5° NE

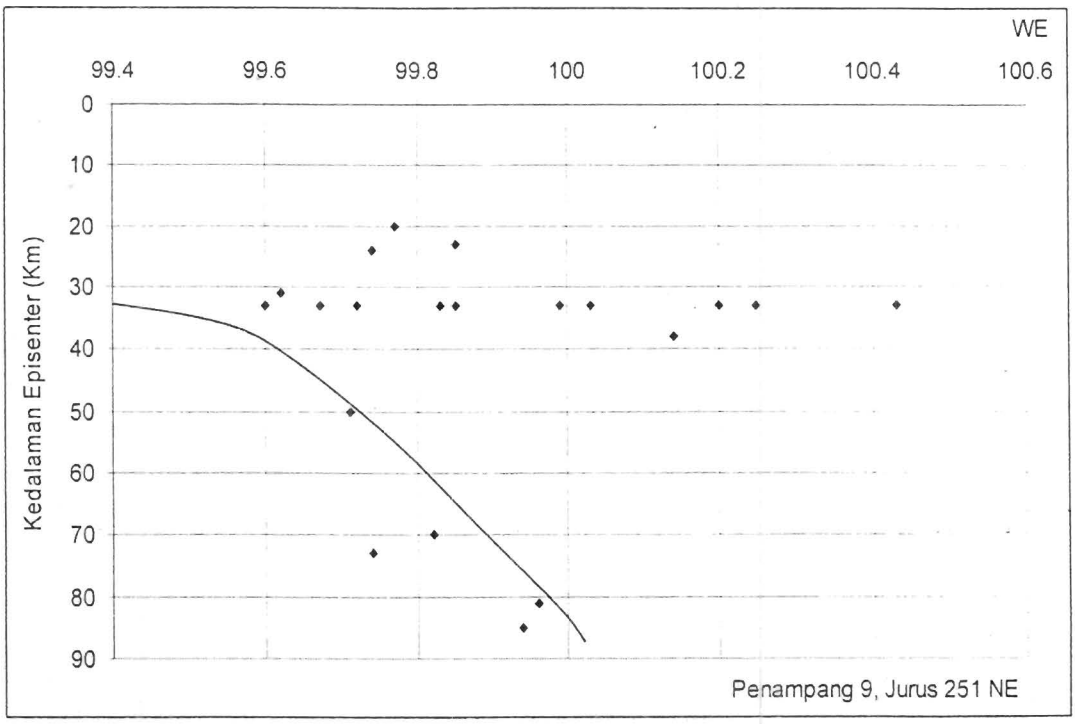


h. Penampang 8, Arah Jurus Pengamatan 244° NE



MILIK PERPUSTAKAAN
UNIV. NEGERI PADANG

i. Penampang 9, Arah Jurus Pengamatan 251° NE



Gambar 7: Penunjaman Lempeng Berdasarkan Data Seismitivitas