

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

Akmam

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang
Jl. Prof. Dr. Hamka Padang- Sumatera Barat
E-mail: akmam@yahoo.com

ABSTRACT

Indo-Australian plate subduction on the Eurasian Plate took place on an ongoing and has formed active tectonics and volcanism on Mentawai and Sumatra fault. The level of tectonic activity of this region can be learned through activities plate subduction under subduction velocity, angle of subduction and depth of subduction. An objective of fundamental research is to determine the pattern of the Indo-Australian plate subduction on the Eurasian plate. This research uses secondary data records from the earthquake in West Sumatra in 1900 until 2005 which is available on BMG Padang Panjang. The speed and angle plate subduction are calculated using the formula of Le Pichon. The research shows that the average angle subduction of the Indo-Australian plate on the Eurasian plate and the surrounding area of West Sumatra are 31.330 with a speed relative subduction average of 6.32 cm / year and the velocity of the normal line is 4.93 cm / year.

Key words: subduction, plate, indo-australia, eurasia

PENDAHULUAN

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 penunjaman (*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 terda-

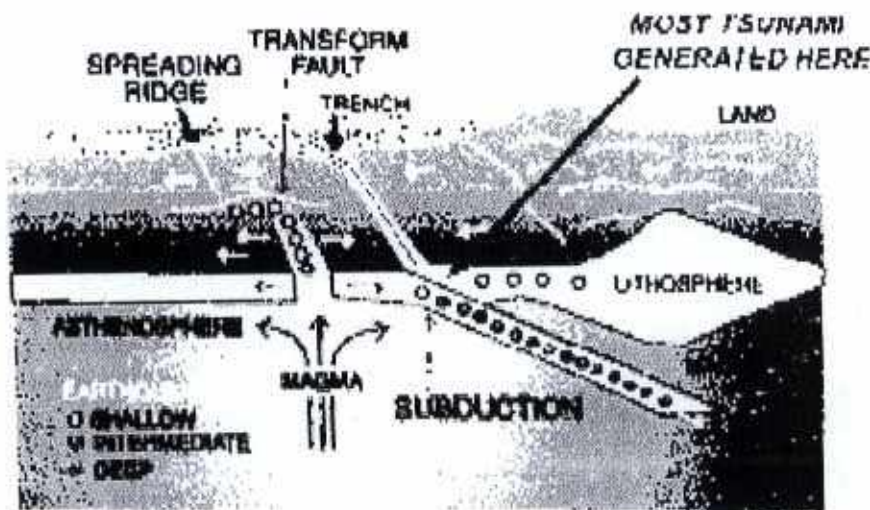
patnya kerak benua sampai kedalaman (30-40) km dan adanya mekanisme pergerakan bidang sesar pada berbagai kedalaman pusat gempa di sepanjang busur Sumatera. Kemudian Posavec et. al. (1977) mengungkapkan bahwa zona sesar Sumatera didominasi oleh pergerakan lateral secara terus menerus lempeng Indo-Australia dan lempeng Sumatera. Curey et. al. (1989) meramalkan bahwa zona Benioff yang terdapat disepanjang busur Sumatera dapat berubah dengan cepat kedalamannya dan bentuknya. Hal ini menandakan bahwa struktur zona disepanjang busur Sumatera sangat kompleks dan dinamis yang perlu diteliti secara rinci untuk setiap segmennya.

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. 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.

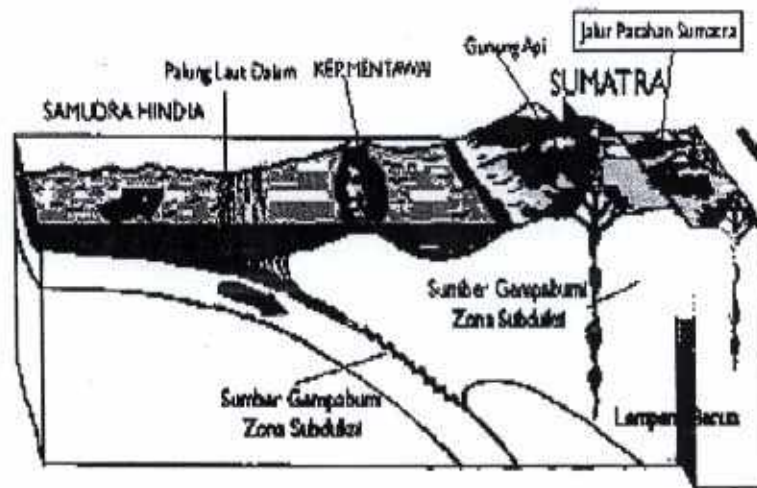


Gambar 1. Zona subduksi antara lempeng samudera dan benua (Turcotte: 1982: 11)

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 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 pegunungan, lipatan, jalur gunungapi, pensesaran, dan jalur gempabumi yang bersifat dinamis dan rawan terhadap deformasi.

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

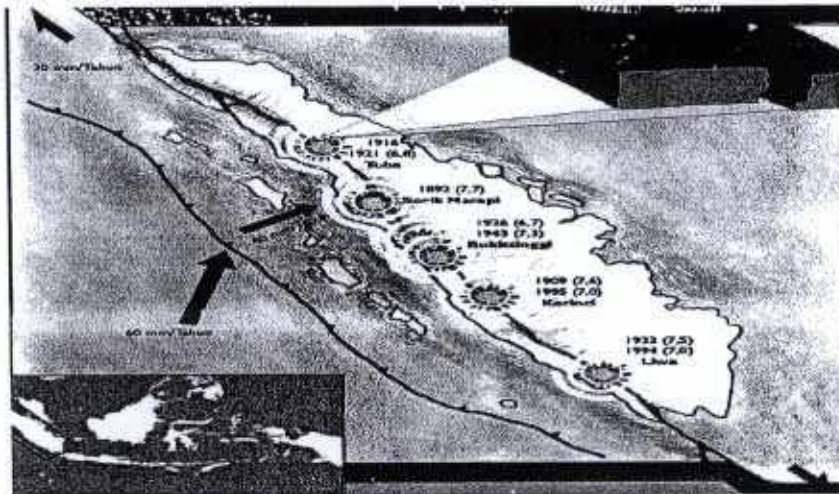


Gambar 2. Morfologi Subduksi Lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia (Dani Natawidjaya, dkk: 2004)

Gambar 2 memperlihatkan bahwa lempeng Indo-Australia 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 elastisitas 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, 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.



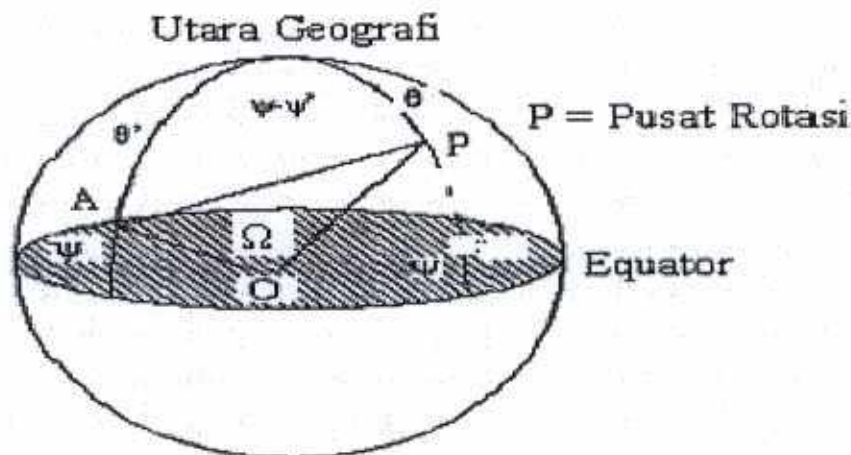
Gambar 3. Kondisi subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Asia dan Aspek Kegempaan (Dani Natawijaya dkk. 2004)

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 across its surface as uniquely defined by a single angular rotation about a pole of rotation. The pole of rotation and its antipole point on the opposite diameter of the sphere are the only two points 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 ekuivalen dengan pemekaran samudra, seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Berdasarkan pengertian tersebut dikembangkan metoda perhitungan kecepatan subduksi lempeng samudra ke lempeng benua dengan menggunakan segitiga bola Le Pichon dengan bantuan Gambar 4.



Gambar 4. Gambar segitiga Le Pichon untuk menentukan sudut penunjaman lempeng samudra ke lempeng benua

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

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

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 longitudo rotasi bumi, θ' adalah colatitude Ψ' adalah longitudo titik pada bidang batas lempeng seperti terlihat pada gambar 3. McCaffrey (1991) merumuskan kecepatan penunjaman lempeng dengan:

$$v_n = \frac{v_p \sin(\alpha - \psi)}{\sin(\alpha - \beta)} \quad (2)$$

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

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

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:

$$v_r = \omega r \sin \Omega \quad (4)$$

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

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 colatitude (lintang) pada bidang batas lempeng, sedangkan φ' menyatakan longitudo (bujur) pada bidang batas lempeng. Variabel terikatnya adalah Ω yang menya-

takan besar sudut subduksi lempeng, sedangkan variabel kontrolnya adalah θ dan φ , dimana θ menyatakan colatitude (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 Meteorologi 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° BT – 102° BT dan 1° LU – 3.5° 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 atas beberapa penampang dari Barat Laut-Tenggara, dalam arah Barat Daya-Timur Laut masing-masing dengan lebar 0.5° , kemudian 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 19.7° N- 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.

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' ($^{\circ}$ N)	Bujur (longitude) ϕ' ($^{\circ}$ 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 ($19,7^{\circ}$ N, $38,5^{\circ}$ 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		Kedalaman Subduksi (Km)
	Lintang θ' ($^{\circ}$ N)	Bujur ϕ' ($^{\circ}$ E)	Jurus ($^{\circ}$ NE)	Busur ($^{\circ}$)	Normal ($^{\circ}$)	Subduksi ($^{\circ}$)	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
2	-0,63	98,88	257	61,79	70,73	30,89	6,36	5,38
3	-0,79	98,72	254	62,13	70,75	31,06	6,35	5,18
4	-0,8	98,90	250	62,42	70,77	31,21	6,33	4,91
5	-0,98	99,28	246	62,76	70,76	31,38	6,32	4,60
6	-1,47	99,30	247	62,93	70,77	31,46	6,31	4,67
7	-1,13	99,87	246,5	63,15	70,83	31,57	6,30	4,63
8	-1,88	99,56	244	63,39	70,84	31,69	6,29	4,44
9	-2,12	100,25	251	64,14	70,87	32,07	6,26	4,92

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

terdapat disekitar Pulau Pagai, dengan kedalaman subduksi 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 memiliki 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. Pola penunjaman lempeng curam dengan sudut subduksi besar menghasilkan gempa bumi dengan hiposenter yang dalam resiko bencana kecil, sedangkan penunjaman lempeng bersudut kecil, mengakibatkan terjadinya gempa dangkal dan rawan terhadap bencana.

Hasil perhitungan kecepatan memperlihatkan kecepatan relatif penunjaman lempeng Indo-Australia pada lempeng Eurasia disekitar pantai barat Sumatera Barat rata-rata 6,32 cm/tahun. Harga ini lebih besar dari harga rata-rata kecepatan relatif penunjaman Indo-Australia ke lempeng Eurasia pada pulau Sumatera 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.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata sudut subduksi lempeng Indo-Australia ke lempeng Eurasia pada kawasan Sumatera Barat dan sekitarnya adalah $31,33^{\circ}$ dengan kecepatan subduksi relatif rata-rata sebesar 6,32 cm/tahun dan kecepatan gerak terhadap garis normalnya adalah 4,93 cm/tahun. Kecepatan penunjaman terbesar ter-

dapat sekitar Pulau Spora dengan kecepatan relatif 6,36 cm/tahun dengan sudut penunjaman $30,70^{\circ}$ dan kedalaman subduksi maksimum adalah 135 km. Kecepatan relatif terkecil terdapat disekitar Palau Siberut dengan kecepatan penunjaman 6,26 cm/tahun dengan sudut subduksi $32,07^{\circ}$ yang terdapat disekitar Pulau Pagai, dengan kedalaman subduksi 89 km.

Sesuai dengan kontribusi 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 Seismologi Gempa Bumi pada Jurusan Fisika atau program Studi Geofisika dan Fisika Bumi
2. Hasil penelitian ini dapat dikembangkan untuk mengatur tata ruang yang lebih baik di Sumatera Barat
3. Mengingat begitu berbahaya efek dari gempa, maka hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai fundasi dasar untuk menetapkan kebijaksanaan mitigasi gempa bumi pada masa mendatang

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Ahmad M. 1995. *Penanggulangan Gempa Bumi Sesuai dengan Seismisitasnya*, Makalah pada seminar pada Himpunan Ahli Geofisika Indonesia PIT HAGI XX, Yogyakarta 29 – 30 Agustus 1995.
- Ahmad M dan Erwin M. 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.
- Curry JR, Shor Jr GG, Raitt RR and Henry. 1977. Seismic Refraction and Reflection Studies of Crustal Structure of Eastern Sunda and Western Sunda Arcs. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, 2479 – 2489.
- Diamant MC, Deplus D, Dahrin and Zen Jr MT, Harjono H, Karta K, Gérard M, Lassal O and Martin A, Malod J. 1992. Mentawai fault zone off Sumatra: A new key to the geodynamics of western Indonesia (Abstrak). *Geology*, Vol. 20, No. 3, pp. 259–262.

- Kearay P and Frederick VJ. 2004. *Global Tectonics*, Blackwell Publishing Company, Australia.
- Le Pichon and Huchon XP. 1984. *Sunda Strait and Control Sumatran Fault*, *Online Jurnal of Geology Society of America* Vol. 12, pp. 668 – 672.
- McCaffray RP, Molnar SW, Roecher and Joyodiwirjo YS. 1985. Microearthquake Seismicity and Fault Plane Solution Related to Arc-Continent Collision in the Eastern Sunda-Arc, Indonesia. *Jurnal of Geophysics Research*. Vol. 90, pp 4511 – 4528.
- Mc Cann WR and Newcomb KR. 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 DH, Hery H, Bambang SW. 2004. *Sumatera Rawan Gempa*, Puslit Geoteknologi-LIPI, Bandung.
- Posavec MD, Taylor, Van Eurwen TH and Spector A. 1973. Tectonic Controls of Volcanism and Complex Movement Along the Sumatran Fault System. *Geology Society Malaysia*, Bulletin, pp 43- 60.
- Skinner BJ, Stephen PC. 1987. *Physical Geology*, John Wiley & Sons, New York.
- Turcotte DL and Gerald S. 1982. *Geodynamics*. John Wiley Sons, New York.
- Zen MT. 1987. *Seismicity of the Sumatra Fault Zones*, 6 th Regional Congress on Geology. Mineral and Energy Resources of Southeast Asia.