

ANALISIS BAHAYA GEMPA BUMI LENGAN UTARA SULAWESI

Santoso dan A. Soehaimi

Pusat Survei Geologi
 Jl. Diponegoro No. 57, Bandung 40122

Sari

Aktifitas penyusupan Lempeng Tektonik Mikro Laut Sulawesi (*Megathrust dan Benioff*) hingga kedalaman mencapai 100 km di bawah Lengan Utara Sulawesi, berpengaruh sangat signifikan dalam radius 150 Km di semenanjung ini. Analisis deterministik bahaya guncangan gempa bumi bersumber dari tunjaman *Megathrust* dengan menggunakan model fungsi atenuasi Young drr (1997) terhadap Kota Manado menghasilkan 0.22 g, setara dengan intensitas VIII MMI. Mikrozonasi bahaya gempa bumi di kota kota besar di wilayah ini diharapkan dapat menjadi dasar mitigasi resiko gempa bumi yang mungkin terjadi di masa yang akan datang.

Kata kunci: Bahaya gempa bumi, Fungsi atenuasi, Maximum Credible Earthquake (MCE) dan Intensitas maksimum.

Abstract

The Megathrust and Benioff subduction seismic sources of the Sulawesi Sea Micro Plate subducted at 100 km beneath of North Sulawesi's Arm have significant effect in radius of 150 km in this peninsula. The Deterministic Seismic Hazard Analysis-DSHA from megathrust seismic source zone using attenuation function model of Young et al (1997) to the Manado City result in 0.22 g, equal to VIII MMI. Microzonation efforts in this region are conducted in order to mitigate future seismic hazards.

Keyword: Seismic hazard, attenuation function, Maximum Credible Earthquake (MCE) and Maximum intensity

Pendahuluan

Latarbelakang

Lengan Utara Sulawesi terletak di kawasan tektonik yang sangat aktif dan kompleks dengan aktivitas gempa bumi tinggi. Hal ini disebabkan kedudukan Lengan Utara Sulawesi dikontrol oleh aktifitas tunjaman Lempeng Laut Sulawesi di sebelah utara semenanjung Minahasa dan Lempeng Pasifik di sebelah timurnya. Selain itu di daratan Lengan Utara Sulawesi ini dijumpai adanya Patahan Aktif Gorontalo. Elemen elemen tektonik ini berperan sebagai lajur sumber gempa bumi tektonik yang sangat menentukan tingkat kerawanan wilayah ini terhadap bahaya gempa bumi. Beberapa gempa bumi merusak pernah terjadi di sepanjang lajur sumber gempa bumi tersebut seperti gempa bumi Gorontalo (1941,1990,1991 dan 2009), gempa bumi Manado (1980, 1988), gempa bumi Toli Toli (1983,1996). Konsekwensinya kota-kota besar yang berlokasi di Lengan Utara Sulawesi ini seperti Manado dan Gorontalo serta kota kota kecil lainnya dapat dinyatakan sebagai wilayah yang mempunyai tingkat bahaya gempa bumi cukup tinggi.

Makalah ini akan membahas sumber gempa bumi yang berpengaruh pada kota besar di Lengan Utara Sulawesi, yaitu sumber gempa bumi pada zona tunjaman, sedangkan zona sumber gempa bumi pada kerak bumi dangkal akibat patahan (*shallow crustal*) dan lainnya tidak dianalisis. Zona sumber gempa bumi tunjaman di sini adalah zona tunjaman yang diakibatkan oleh pergerakan Lempeng Laut Sulawesi yang menyusup di bawah Busur Lengan Utara Sulawesi. Analisis bahaya gempa bumi di lakukan dengan pendekatan deterministik DSHA (*Deterministic Seismic Hazard Analysis*).

Bencana gempa bumi (*earthquake-hazard*) telah dipopulerkan oleh Kaneko drr (1996). Dalam perkembangannya bencana gempa bumi ini telah digunakan dalam beberapa analisis kebencanaan, sehingga berlaku untuk "*multiple-hazards analysis*". Untuk mengurangi risiko bencana di suatu wilayah, sangat perlu dikaji faktor-faktor bahaya dan kerentanannya. Kajian bahaya merupakan faktor dominan di dalam melakukan analisis resiko bencana (*disaster risk analysis*). Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan disajikan hasil kajian bahaya gempa bumi di lengan Utara Sulawesi.

Lokasi Penelitian

Secara administratif Lengan Utara Sulawesi termasuk dalam dua Provinsi, yakni: Provinsi Sulawesi Utara dan Gorontalo. Sementara itu secara geografis terletak pada posisi 119° - 126° BT dan 0° - $2,75^{\circ}$ LU. Wilayah ini diapit oleh laut Sulawesi di sebelah utara dan teluk Tomini di sebelah selatannya. Wilayah ini merupakan daerah perbukitan, setempat terdapat dataran tinggi dan dataran rendah sekitar pantai (Gambar 1).

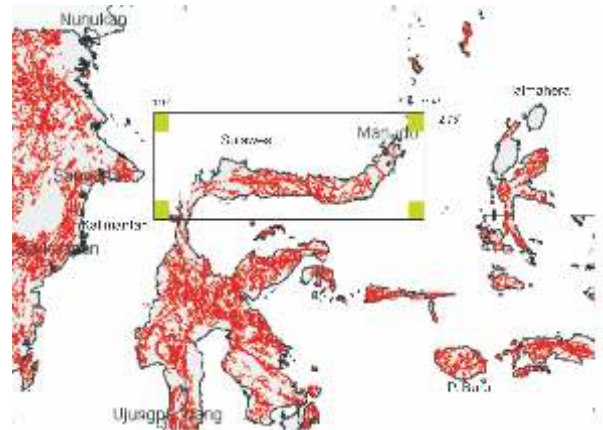
Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar aktivitas gempa bumi di zona sumber gempa bumi yang menimbulkan kejadian gempa bumi kuat dan pengaruhnya terhadap Lengan Utara Sulawesi. Penelitian seperti ini belum banyak dilakukan terhadap suatu potensi yang dicerminkan oleh perilaku suatu struktur geologi aktif yang ada di Lengan Utara Sulawesi. Selain itu diharapkan dapat diketahui pengaruh bahaya gempa bumi yang mengakibatkan terjadinya bahaya ikutan gempa bumi seperti guncangan, penyesaran, tsunami yang membawa dampak kerusakan terhadap bangunan yang ada di wilayah ini. Kerusakan bangunan dan infrastruktur tentu akan menimbulkan korban jiwa serta harta benda.

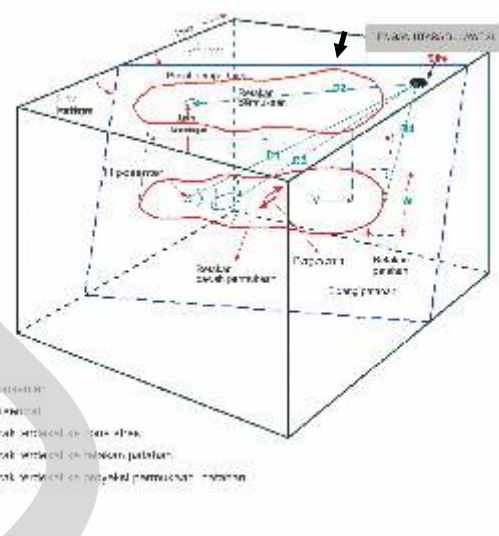
Suatu prediksi besaran gempa bumi yang mungkin terjadi sangat penting dilakukan dan diperlukan untuk analisis potensi gempa bumi di lokasi yang dihitung. Mengingat sangat banyaknya faktor ketidakpastian dalam analisis resiko gempa bumi, suatu ketelitian dalam penentuan ini sangat dibutuhkan. Besaran kekuatan gempa bumi adalah merupakan pencerminan besarnya energi yang dilepaskan pada waktu terjadinya gempa bumi, oleh karena itu diharapkan dapat didekati akurasinya.

Metodologi

Penelitian ini menggunakan metoda *Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)* dalam penentuan karakteristik gempa bumi dominan. Analisis DSHA terdiri dari beberapa tahapan yakni identifikasi tektonik, sumber gempa bumi, membuat model gempa bumi dengan latar belakang tatanan tektonik wilayah serta menghitung percepatan gempa bumi dengan fungsi atenuasi yang tepat untuk lingkungan tektonik wilayah tersebut.



Gambar 1. Letak geografis daerah penelitian.



Gambar 2. Diagram Lengan Utara Sulawesi dan perhitungan perbedaan jarak yang dipakai dalam estimasi MCE dan *ground-motion* (Boore, D.M and W.B.Joyner, 1997; modifikasi dari Shakal and Bernreuter, 1981).

Perhitungan *Maximum Credible Earthquake (MCE)* melalui pendekatan *closed distance* (Gambar 2). Fungsi atenuasi yang dipakai dalam perhitungan adalah fungsi atenuasi yang diusulkan oleh Boer *et al*, 1997 dimana dibedakan dua tipe gempa bumi subduksi yaitu :

a. Gempa bumi *Megathrust/Inter-plate/interface*

Gempa bumi dengan sudut penunjaman landai yang terjadi pada batas antara lempeng subduksi dan lempeng di atasnya.

b. Gempa bumi *Benioff/Intra-plate/intraslab*

Gempa bumi *intraslab* ini terjadi pada lempeng subduksi dengan sudut tajam; terjadi sesar turun akibat tegangan tarik ke bawah pada lempeng tersebut.

Fungsi atenuasi Youngs, dr. (1997) untuk batuan adalah sebagai berikut :

$$\ln(Y) = 0.2418 + 1.414M_w - 2.552 \ln[r_{rup} + 1.7818 \times e^{0.554M_w}] + 0.00607 H + 0.3846 Z_t$$

$$S_{in,v} = C_4 + C_5 M$$

Dimana:

- Y = *spectral acceleration* (g)
 M = *moment magnitude* (M_w)
 r_{rup} = jarak terdekat ke *rupture* (km)
 H = kedalaman (km)
 Z_t = tipe sumber gempa bumi (0 untuk *interface* dan 1 untuk *intraslab*)
 S = standar deviasi

Tektonik

Tataan tektonik sekitar wilayah Lengan Utara Sulawesi sangat didominasi oleh kegiatan lempeng Australia yang menumpang diatas lempeng Pasifik di sepanjang parit Papua Nugini, di utara Irian Jaya dan Papua Nugini. Beberapa peneliti (Fitch, 1970 dan Hamilton, 1979) memperkirakan adanya zona penunjaman di sepanjang parit dan menyusup di bawah Irian Jaya. Seno & Kaplan (1988), berpendapat bahwa zona tunjaman tersebut tidak aktif dan pergerakan lempengnya diakomodasi oleh pergerakan sepanjang Zona Sesar Sorong di bagian utara Irian Jaya dan di sepanjang Tarera-Aidoena di bagian selatan. Kearah barat ditemui tataan tektonik Maluku terdiri dari Lempeng Mikro Maluku, Lempeng Mikro Filipina, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik meliputi daerah Mindanau Selatan, Sulawesi bagian utara, Halmahera dan busur-busur Kepulauan Sangihe serta Taulud dengan palung-palungnya. Parit Maluku bersambung dengan Palung Filipina mengapit Pulau Halmahera, palung Sangihe memanjang dari Sulawesi Utara sampai Mindanau Selatan dengan Palung Kotabato di bagian baratdaya, dua buah busur gunungapi dipisahkan oleh Laut Maluku sepanjang 250 km, Busur Gunungapi Sangihe di bagian barat dan Busur Gunungapi Halmahera di sebelah timur. Pematang Taulud-Mayu, yang beberapa bagiannya muncul kepermukaan laut sebagai kepulauan Taulud-Mayu dan Tidore.

Kepulauan Sangihe merupakan busur gunungapi aktif yang memanjang sampai ke ujung Semenanjung Minahasa atau Lengan Utara Sulawesi dan juga dapat dijumpai jajaran gunungapi yang tidak aktif

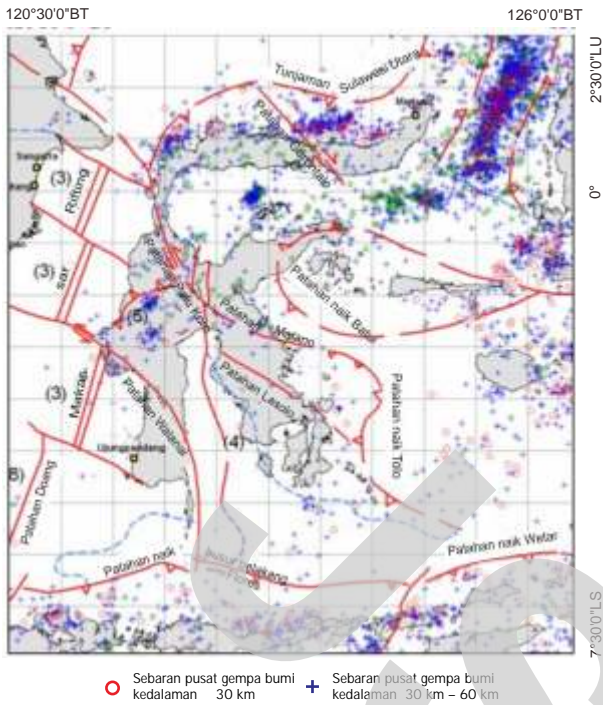
(Silver dan Moore, 1977). Hamilton (1979) dan Katili (1975) menginterpretasikan Parit Sulawesi dan Lengan Utara Sulawesi sebagai daerah subduksi pertemuan antara Cekungan Sulawesi dan Lengan Utara Sulawesi. Katili menyebutkan bahwa hanya bagian barat saja yang aktif, tetapi Hamilton memperlihatkan bagian timur juga aktif.

Oleh karena itu, berdasarkan kajian tektonik di atas maka Lengan Utara Sulawesi adalah salah satu wilayah di Indonesia dengan aktivitas gempa bumi yang cukup tinggi, dan juga merupakan wilayah yang terletak di kawasan tektonik yang sangat aktif dan kompleks.

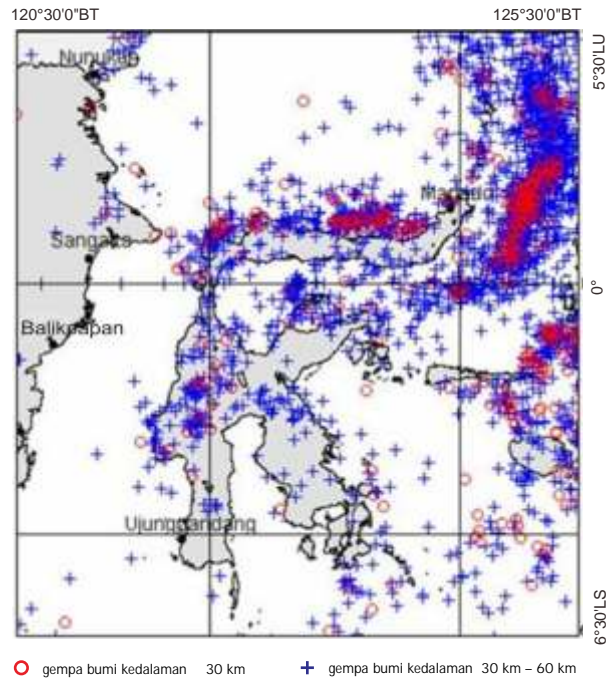
Kegempaan

Sebaran episentrum gempa bumi dangkal dan pola tektonik Sulawesi secara utuh yang menunjukkan keterkaitan gempa bumi dengan struktur seismogeniknya, seperti terlihat dalam Gambar 3. Sebaran pusat pusat gempa bumi yang dicerminkan oleh lingkaran-lingkaran berwarna merah cerminan dari pusat gempa bumi kedalaman (h) 30 km dan sebaran silang kecil biru cerminan dari sebaran gempa bumi dengan kedalaman (h) 30 km h 60 km, gempa bumi dangkal pada kedalaman (h) 30 km terjadi di sepanjang pantai pesisir utara Lengan Utara Sulawesi, terutama di utara pantai Gorontalo (Gambar 4). Sebaran pusat gempa bumi yang dicerminkan oleh sebaran lingkaran-lingkaran kecil merah cerminan dari distribusi gempa bumi dengan kedalaman 60 km h 100 km (Gambar 5). Gempa bumi dengan kedalaman tersebut menyebar secara merata di wilayah Lengan Utara Sulawesi terutama di bagian barat daerah penelitian mulai dari daerah Toli-Toli sampai ke daerah Gorontalo. Dari kedua gambar tersebut selanjutnya terlihat konsentrasi aktivitas kegempaan berlanjut dari kedalaman 30 km sampai kedalaman 100 km terkonsentrasi di daerah Una-Una.

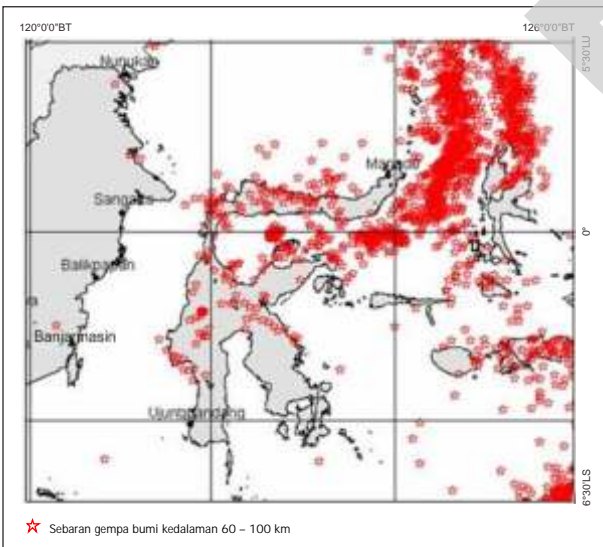
Crouse (1982) menyatakan bahwa gempa bumi yang terjadi pada zona subduksi umumnya dipisahkan atas dua kelompok, yaitu gempa bumi *megathrust* dan gempa bumi *benioff* (Gambar 6).



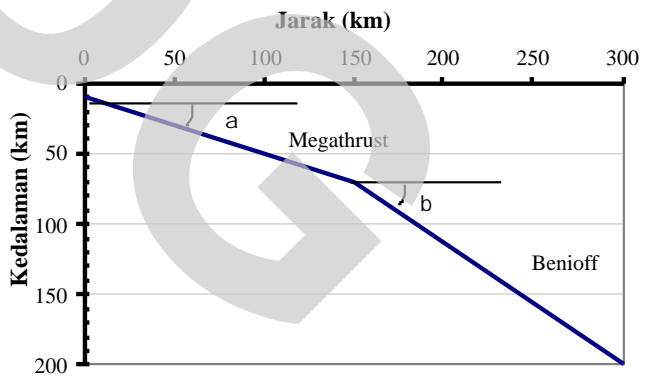
Gambar 3. Peta sebaran pusat gempa bumi dangkal dan pola tektonik Sulawesi sebagai zona seismogenetik (Pusat Survei Geologi, 2006)



Gambar 4. Peta sebaran pusat gempa bumi dangkal daerah Sulawesi dan sekitarnya (Pusat Survei Geologi, 2006)



Gambar 5. Peta sebaran pusat gempa bumi daerah Sulawesi dan sekitarnya (Pusat Survei Geologi, 2006).



Gambar 6. Zona *Megathrust* dan *Benioff* pada daerah mekanisme gempa bumi tunjaman (Crouse, 1982).

Gempa bumi kerak dangkal pada patahan yang terdefinisi dengan jelas seperti patahan Palu-Koro dan patahan Gorontalo diklasifikasikan sebagai zona sumber gempa bumi patahan mendatar (*Transform Zones*). Sedangkan semua gempa bumi kerak dangkal dengan mekanisme yang tidak disebabkan oleh proses tunjaman didefinisikan sebagai gempa bumi *Diffuse Seismicity Zones*. Umumnya untuk gempa bumi dengan mekanisme patahan naik ditemukan di daerah busur belakang dari zona tumbukan. Gempa bumi kerak dangkal dipisahkan atas dua kelompok yaitu gempa bumi patahan dan gempa bumi zona *background* (Shakal, 1997).

Identifikasi sumber gempa bumi dilakukan berdasarkan data geologi, seismologi dan geofisika. Identifikasi tersebut meliputi semua sumber gempa bumi merusak yang didefinisikan sebagai sumber gempa bumi yang mempunyai potensi untuk menyebabkan terjadinya guncangan tanah kuat yang dapat menyebabkan terjadinya kerusakan. Sumber gempa bumi yang akan dikaji secara rinci dalam penelitian ini akan dikonsentrasikan terhadap zona sumber gempa bumi penunjaman Lempeng Utara Sulawesi (berjarak sekitar 150 km dari lokasi tunjaman).

Sebaran pusat gempa bumi secara mendatar dapat dikenal berasosiasi dengan seismogenetiknya yakni gempa bumi pada kerak bumi bagian atas (< 100 Km) sebagai akibat patahan aktif, seperti terlihat dalam Gambar 8 dan 9. Penampang tegak kedalaman gempa bumi (Gambar 7), khususnya memperlihatkan sistem penunjaman Lengan Utara Sulawesi terdapat dua jenis penunjaman yakni Penunjaman *Megathrust/Inter-Plate* dan *Benioff Intra-Plate Zone*:

- ◆ Penunjaman *Megathrust* Lengan Utara Sulawesi menyusup sampai kedalaman 30 km – 40 km, dengan sudut kemiringan S sekitar 14° seperti terlihat dalam gambar 7, selanjutnya dapat ditentukan jarak terdekat (*close distance*) Kota Manado ke *rupture area* sekitar 45 km sedangkan ke kota Gorontalo sekitar 30 Km.
- ◆ Penunjaman *Benioff* Lengan Utara Sulawesi menyusup sampai kedalaman 170 km – 180 km, dengan sudut kemiringan b sekitar 45° seperti terlihat dalam gambar 7. Maka jarak terdekat (*close distance*) Kota Manado ke *rupture area* sekitar 100 km.

Analisis terhadap data tersebut di atas memperlihatkan bahwa gempa bumi yang terjadi di dalam daerah tunjaman *Megathrust* akan sangat mempengaruhi Kota Manado dan Gorontalo.

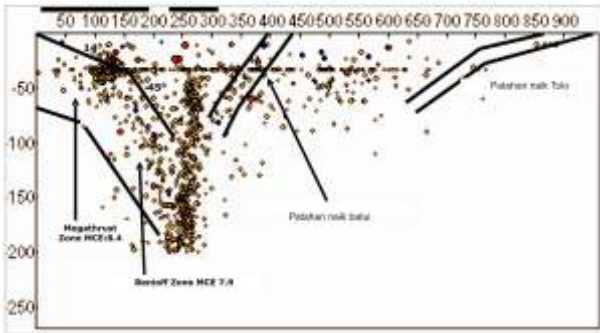
Perhitungan deterministik dengan menggunakan rumus fungsi atenuasi Youngs., dr. (1997) dapat ditentukan nilai percepatan puncak batuan dasar di kota Manado sebesar 0.22 g sedangkan untuk kota Gorontalo 0,30 g (gravitasi bumi 980 cm/det^2).

Tabel 1. Magnitude maksimum dan *slip rate* untuk sumber gempa bumi penunjaman yang mempengaruhi Kota-kota di Lengan Utara Sulawesi.

No	Zona Sumber Gempa Bumi	<i>Slip Rate</i> (mm/yr)	M_{Max}
1	• <i>Megathrust</i> Lengan Utara Sulawesi	27	8.0
	• <i>Benioff</i> Lengan Utara Sulawesi	27	7.4

Diskusi

Benturan di Parit Sulawesi antara Lempeng Cekungan Sulawesi dengan Lengan Utara Sulawesi, mengakibatkan terjadinya sejumlah/beberapa gempa bumi dangkal di sepanjang pantai utara Lengan Utara Sulawesi dan gempa bumi kedalaman menengah tersebar di utara Lengan Utara Sulawesi dan Teluk Tomini. Oleh karena itu dapat diduga bahwa gempa bumi dangkal tersebut akan memiliki dampak bahaya gempa bumi yang cukup signifikan terhadap Kota Manado. Diketuainya rata-rata pergerakan penunjaman di parit Sulawesi, maka dapat ditentukan resiko percepatan maksimum pada batuan 0.22 g (gravitasi bumi 980 cm/det^2). Data dasar ini diharapkan dapat dipakai sebagai masukan untuk perencanaan kota yang aman terhadap bahaya guncangan gempa bumi. Selain itu faktor geologi setempat yang mendasari kota besar perlu mendapat perhatian, mengingat setiap faktor batuan mempunyai indeks kerentanannya masing masing dan dapat diperhitungkan secara matematis. Demikian pula halnya dengan koefien lajur yang mencerminkan latar belakang sejarah gempa bumi masa lalu yang diexpressikan oleh intensitas maksimum dan memiliki indeks tersendiri.



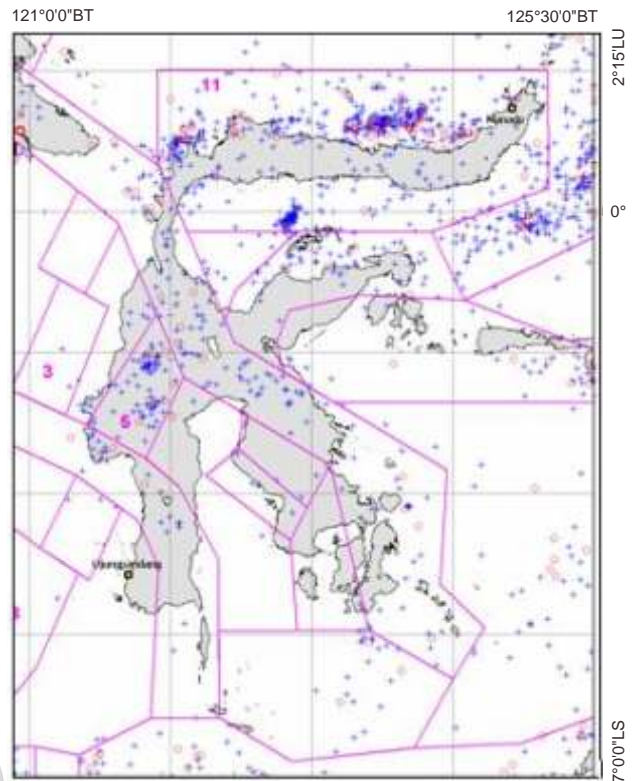
Gambar 7. Penampang kedalaman gempa bumi Lengan Utara Sulawesi.

Kesimpulan

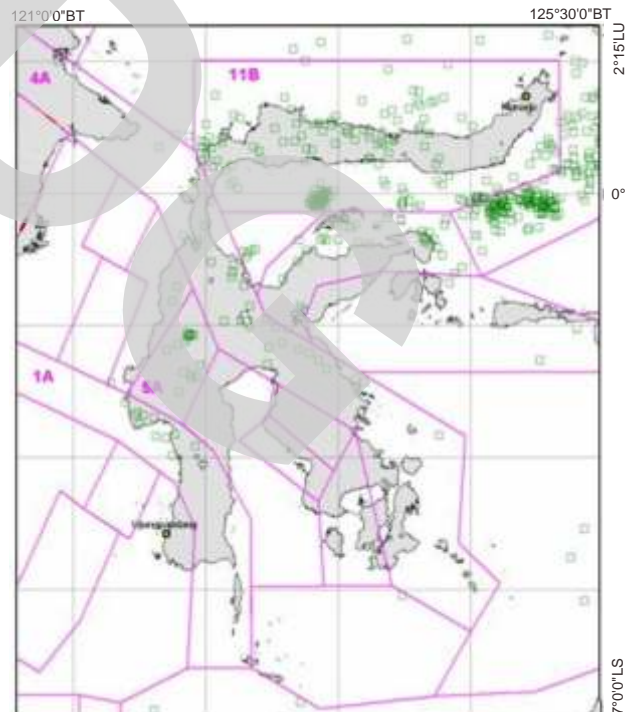
Sumber gempa bumi yang paling berpengaruh di wilayah ini berasal dari *megathrust*, yakni pada lajur tumbukan Lempeng Sulawesi dengan Lengan Utara Sulawesi dengan kecepatan pergeseran rata-rata per tahun (slip rate) adalah 27 mm dan maksimum kekuatan (M_{Max}) 8. Diketahuinya nilai percepatan maksimum gempa bumi secara kuantitatif 0,22 g atau setara dengan intensitas VIII MMI dapat dijadikan dasar suatu peringatan dini bahwa daerah ini merupakan daerah yang rentan akan bahaya gempa bumi. Mikrozonasi bahaya gempa bumi diharapkan dapat dijadikan dasar perencanaan kota dalam upaya mitigasi resiko bahaya gempa bumi. Sosialisasi bahaya gempa bumi dianjurkan di wilayah ini sebagai langkah awal peringatan dini akan bahaya gempa bumi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Engkon K. Kertapati atas saran dan masukannya dalam penulisan makalah ini. Selain itu ucapan terimakasih diberikan kepada Nengsri Mulyati yang telah menyusun format makalah ini sesuai dengan aturan berlaku.



Gambar 8. Zona sumber gempa bumi daerah Sulawesi untuk kedalaman 0 – 60 km; Sumber gempa bumi dihitung yakni *Megathrust* (No.11).



Gambar 9. Zona sumber gempa bumi daerah Sulawesi untuk kedalaman 60 -100km, Sumber gempa bumi dihitung yakni *Benioff* (11B).

Acuan

- Crouse, C.B., P.E.Associate, 1982. Seismic Hazard Evaluation offshore NorthWest, Java, Indonesia, Report Maxus/ARII
- Fitch, T., 1970. Earthquake mechanisms and island arc tectonics in the Indonesia-Phillippine region, *Bull.Seismol.Soc.Am.* 60:565-591.
- Hamilton, W, 1979. *Tectonic of the Indonesia Region*, Geological Survey Professional Paper 1078.
- Katili, J.A., 1975, Volcanism and plate tectonics in the Indonesian islands arcs, *Tectonophysics*, 26: 165-188.
- Kaneko, F, S.Segawa, Y.Komaru, 1996. *Earthquake Damage Assessment Methodology in Japan*, The Government of Japan, International Institute of Earthquake Engineering, Building Research Institute, Ministry of Construction-Japan International Cooperation Agency-JICA.
- Pusat Survei Geologi, 2006. Peta sebaran gempa bumi Indonesia, tidak terbit.
- Shakal, A.F., Bernreuter, 1981. Emperical analyses of near source ground motion, U.S. Nuclear Regulation Commission Report, NUREG/CR-209.
- Shakal, A.F., (1997). California Strong Motion instrumentation Program, *In: Proc., Vision 2005; An Action Plan for Strong Motion Programs to Mitigate Eartquake Losses in Urbanized Areas*, J.C. Steep.Ed.National Sciences Foundtion. Monterey, Calif.
- Seno, T and D.E. Kaplan, 1988. Seismotectonics of Western New Guinea, *Jour. Phys. Earth.* 36 : 107-124.
- Silver.E.A., and Moore, 1977. Back-arc thruster in the Eastern Sunda Arc, Indonesia, *Journal of Geophys Research*, 88 (B 99):7429-7448
- Silver. E.A., R. McCaffrey, and R.B. Smith, 1979. Collision, Rotation, and the initiation of subduction in the Evolution of Sulawesi, Indonesia, *Jour. Of Geophys. Research*, 88 (B11): 9407-9418.
- Youngs, R. R., Chiou, S. J., Silva, W. J., Humphrey, J. R., (1997). "Strong Ground Motion Attenuation Relationship for Subduction Zone Earthquake", *Bulletin of Seismological Society of America* 68 (1)