

KAJIAN PENGARUH GEMPA BUMI MERUSAK DI WILAYAH PROVINSI BENGKULU TERHADAP PLTA MUSI

A. Soehaimi

Pusat Survei Geologi
Jl. Diponegoro No. 57 Bandung 40122

SARI

PLTA Musi terletak di dalam cekungan tarikan (*pull apart basin*) antara sesar Sumatera segmen Ketahun dan sesar Sumatera segmen Musi - Keruh. Geologi bawah permukaan PLTA ini, berdasarkan sifat keteknikan batuan dapat dibagi atas empat lapisan batuan yakni: Lapisan batuan dasar 1 dengan $N = 1000$ dan $V_s = 646$ m/detik; Lapisan batuan dasar 2 dengan $N = 500$, $V_s = 521$ m/detik, dan ketebalan $h = 12 - 16$ m; lapisan batuan lunak 1 dengan $N = 200$, $V_s = 392$ m/detik, dan ketebalan $h = 6 - 14$ m, lapisan batuan lunak 2 dengan $N = 100$, $V_s = 316$ m/detik, dan ketebalan $h = 10 - 26$ m. Periode alami (T_s) antara lapisan batuan dasar 1 dengan lapisan batuan dasar 2 adalah $0,092$ detik $\leq T_s \leq 0,099$ detik, untuk lapisan batuan dasar 2 dengan batuan lunak 1 adalah $0,06$ detik $\leq T_s \leq 0,1$ detik, sedangkan untuk lapisan batuan lunak 1 dengan lapisan batuan lunak 2 adalah $0,12$ detik $\leq T_s \leq 0,26$ detik. Gempa bumi merusak Kepahyang tahun 1979 dan 1997 mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap PLTA Musi dengan nilai percepatan maksimum di permukaan adalah $133,59$ gal atau setara dengan intensitas VII MMI atau VII MSK. Ancaman gempa bumi merusak berkekuatan $M_s = 5$ dapat terjadi di sekitar PLTA Musi dalam selang waktu 10 tahun, berturut-turut gempa bumi berkekuatan $6 M_s$, $7 M_s$ dan $8 M_s$ adalah 40 tahun, 160 tahun dan 630 tahun.

Kata kunci: PLTA Musi, gempa bumi merusak, bencana dan risiko gempa

ABSTRACT

The PLTA Musi is located in a pull apart basin between Ketahun and Musi - Keruh segments of Sumatera fault zone. The geotechnical subsurface of PLTA Musi is divided into four layers involving basement rock layer 1 with $N = 1000$, $V_s = 646$ m/second; basement rock layer 2 with $N = 500$, $V_s = 521$ m/second, and thickness $h = 12 - 16$ m; soft rock layer 1 with $N = 200$ and $V_s = 392$ m/second, thickness $h = 6 - 14$ m, soft rock layer 2 with $N = 100$, $V_s = 316$ m/second, and thickness $h = 10 - 26$ m. The natural period (T_s) between based rock layer 1 and 2 is $0,092$ second $\leq T_s \leq 0,099$ second, for based rock layer 2 and soft rock layer 1 is $0,06$ second $\leq T_s \leq 0,1$ second, and soft rock layer 1 and 2 is $0,12$ second $\leq T_s \leq 0,26$ second. The 1979 and 1997 Kepahyang destructive earthquakes have significant influences to the PLTA Musi with maximum ground acceleration $133,59$ gal and equivalent intensity VII MMI or VII MSK. Destructive earthquakes of magnitude $M_s = 5$ will occur at PLTA Musi at recurrent time of 10 years and earthquake of magnitude $M_s = 6$, $M_s = 7$ and $M_s = 8$ at 40 years, 160 years and 630 years.

Keywords: The Musi PLTA, destructive earthquake, earthquake hazard and risk

LATAR BELAKANG

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Musi terletak pada koordinat $3^{\circ}34'$ LS dan $102^{\circ}30'$ BT yang berada pada aliran S. Musi, Provinsi Bengkulu. Sebelum dan setelah dibangun hingga saat ini telah diguncang gempa bumi paling sedikit lima kali, yakni gempa bumi Bengkulu (1914, 2000, dan 2007) dan gempa bumi Kepahyang (1979 dan 1997). Berdasarkan asal-usul kejadiannya (seismogenetik) kelima gempa bumi yang pernah mengguncang dan mempengaruhi daerah ini, dapat dibedakan gempa bumi yang terjadi sebagai akibat aktifitas tunjaman lempeng tektonik samudra Hindia - Australia yang menyusup di bawah lempeng tektonik benua Asia di sebelah barat provinsi Bengkulu, dan gempa bumi akibat gerak sesar aktif Sumatera segmen Ketahun

dan segmen Musi - Keruh. Kajian pengaruh masing-masing gempa bumi merusak tersebut terhadap wilayah sekitarnya, termasuk PLTA Musi, merupakan suatu terobosan terhadap upaya mitigasi risiko bahaya gempa bumi untuk keselamatan PLTA Musi.

MAKSUD DAN TUJUAN

Maksud kajian ini adalah untuk menentukan pengaruh gempa bumi merusak wilayah Bengkulu terhadap PLTA Musi, sedangkan tujuannya adalah menghitung secara kuantitatif seberapa besar kekuatan, percepatan maksimum dan intensitas gempa bumi yang akan terjadi untuk selang waktu tertentu, dan tingkat risiko yang dialami PLTA Musi.

METODOLOGI

Metodologi yang diterapkan dalam kajian ini yakni mengevaluasi dan menganalisis data sekunder dan primer geologi (bentang alam, batuan, struktur geologi, dan tektonika), data geologi teknik (NSPT), dan data geofisika kegempaan (regional dan lokal).

GEOLOGI DAN KEGEMPAAN REGIONAL PLTA MUSI

PLTA Musi terletak di sebelah barat jalan lintas antara kota Kepahyang dan Curup, di aliran sungai Musi yang mengalir dari arah utara ke selatan. Berdasarkan kondisi geologi regional, PLTA Musi ini berada dalam tiga lingkup geologi bersifat regional yakni bentang alam, batuan, dan struktur geologi. Kondisi geologi regional dalam bahasan ini mengacu pada peta geologi Lembar Bengkulu, Sumatera (Gafoer drr., 1992), sedangkan kegempaan mencakup kegempaan regional wilayah Bengkulu, gempa bumi merusak regional dan seismotektonik regional wilayah Bengkulu yang bersumber data dari NEIC USGS dan Pusat Survei Geologi,

Bentang Alam Regional

Sungai Musi dimana PLTA Musi berada terletak dalam bentang alam alur sungai yang merupakan kontak antara dua bentang alam regional, yakni Kaki Kerucut Gunung Api Kaba (timur) dan Punggungan Bukit Barisan (barat). Ciri khusus yang dimiliki oleh kedua bentang alam ini secara regional memiliki lereng yang miring ke arah barat dan timur. Lereng yang miring ke arah timur merupakan bentang alam yang lebih tua dibandingkan lereng bentang alam yang miring ke arah barat. Hal ini sesuai dengan batuan penyusunnya. Batuan yang berada di sebelah barat sungai Musi berumur lebih tua daripada batuan yang terletak di sebelah timurnya. Sebagai konsekuensi wilayah yang terletak pada lajur sesar Sumatera, PLTA Musi ini juga memiliki bentang alam khusus, yaitu gawir-gawir sesar (sesar naik, sesar geser, dan sesar normal) dengan pola struktur sesar sesuai dengan arah tegasan pembentuk sistem sesar tersebut.

Batuan Regional

Batuan penyusun PLTA Musi dan sekitarnya ini terdiri atas empat satuan batuan yakni satuan lava yang merupakan anggota Formasi Hulusimpang yang tersusun oleh lava, breksi gunung api, dan tuff. Secara keseluruhan, satuan batuan tersebut telah

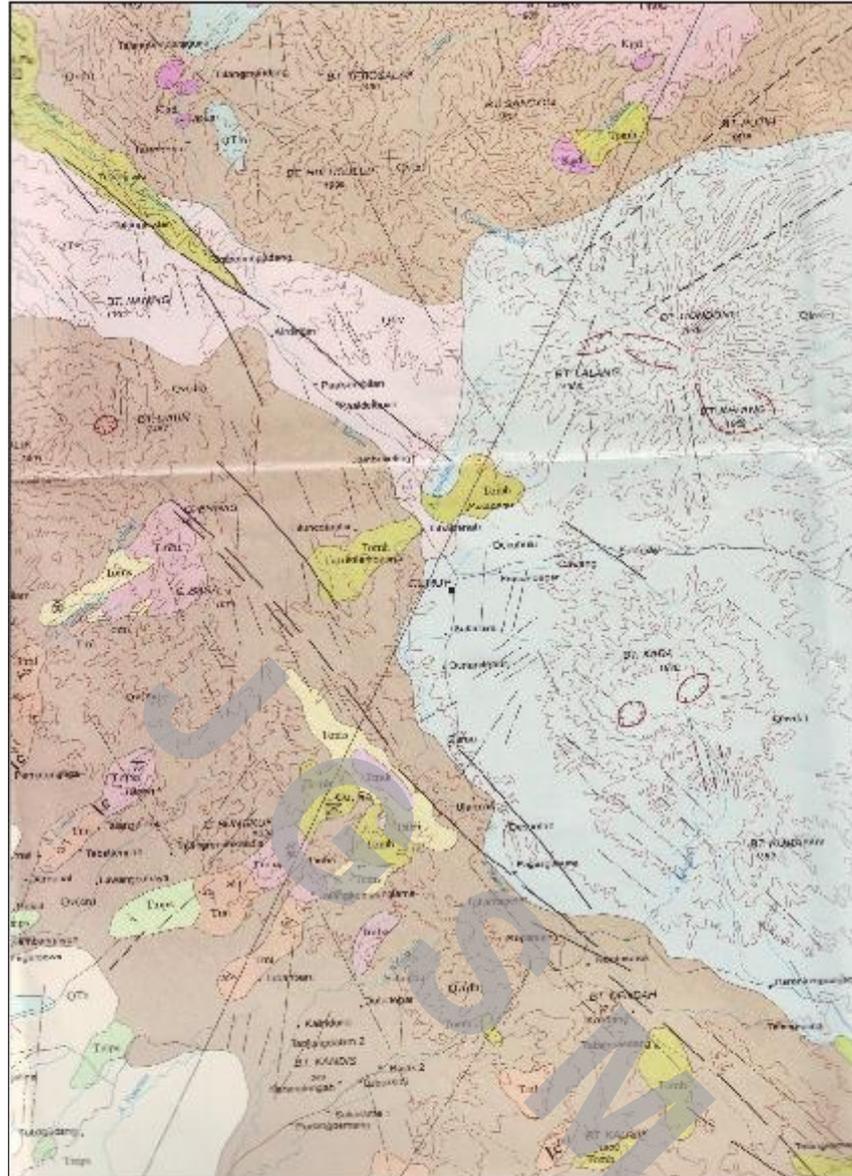
mengalami ubahan. Satuan batupasir yang merupakan bagian dari Formasi Seblat tersusun oleh batupasir, batulempung, batupasir glokonitan, batugamping, serpih, dan batulempung tukaan serta napal. Satuan lava dan satuan batupasir ini berumur Miosen Awal, dan diterobos oleh batuan intrusi diorit Miosen Tengah. Kedua satuan batuan tersebut di atas ditindih secara tidak selaras oleh batuan yang lebih muda, satuan endapan gunung api Kaba yang tersusun oleh breksi, lava, dan tufa, dan batuan termuda terdiri atas endapan sungai Musi muda dan tua (teras) (Gambar 1).

Struktur Geologi Regional

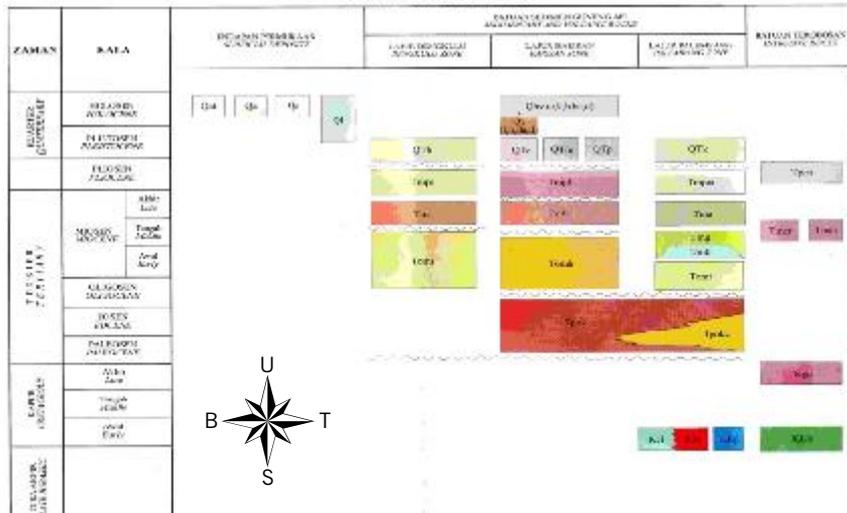
PLTA Musi terletak di antara lajur sesar mendatar menganan Sumatera segmen Ketahun (timurlaut) dan segmen Musi Keruh (baratdaya) yang berarah barat laut - tenggara (Gambar 1). Kedua segmen sesar tersebut membentuk cekungan tarikan (*pull apart basin*). PLTA Musi terletak pada sisi lembah barat daya sistem cekungan tarikan tersebut. Ciri khusus struktur geologi disekitar PLTA ini berupa sesar-sesar mendatar yang berarah barat laut - tenggara, sesar naik dan sesar turun (Gambar 2).

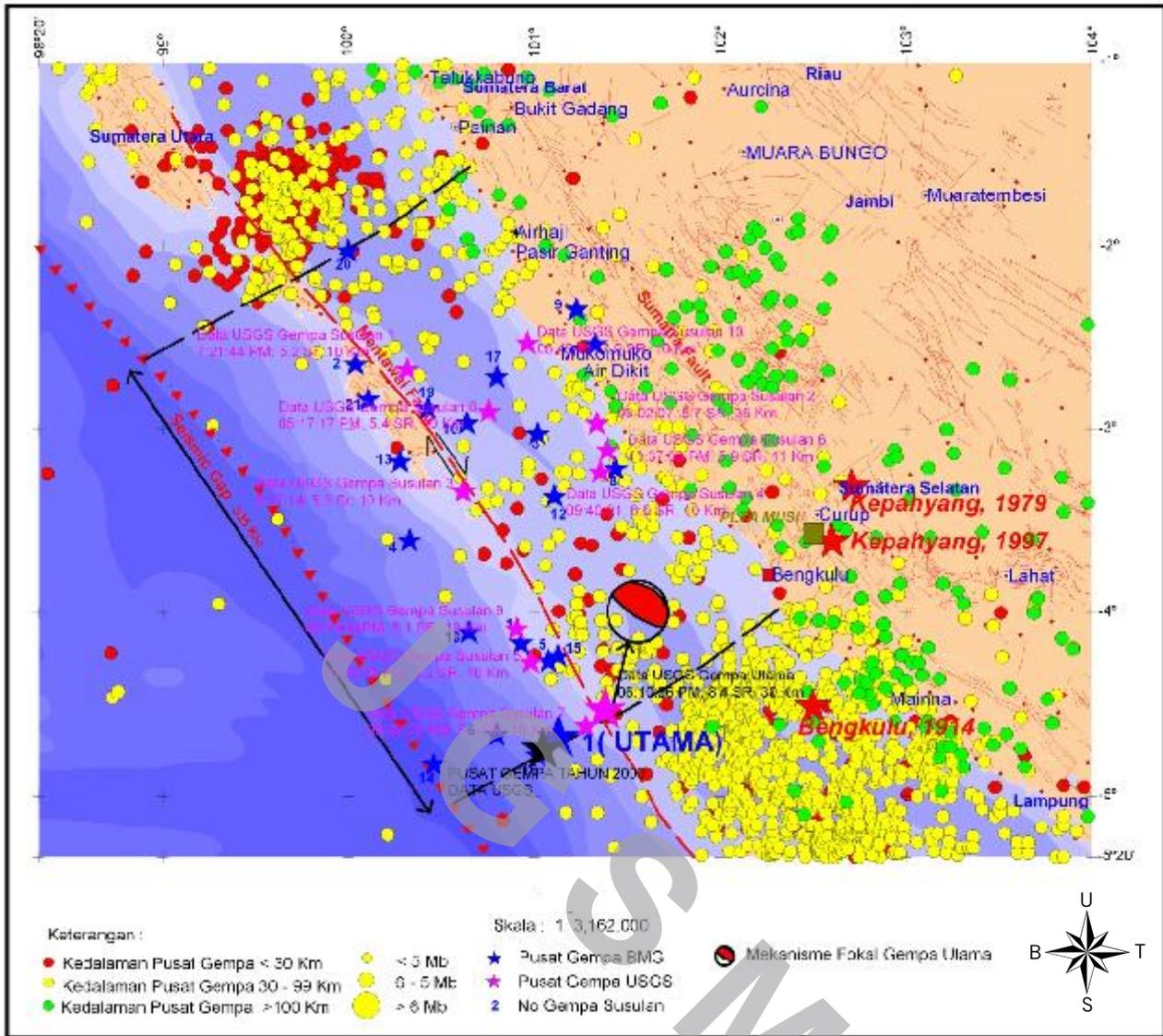
- Kegempaan Regional Wilayah Bengkulu

Wilayah Bengkulu merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki kegempaan sangat aktif. Data gempa bumi berkekuatan > 4 Mb dalam berbagai kedalaman dari NEIC.USGS tahun 1970 - 2007 yang dihimpun dalam peta kegempaan Bengkulu (Gambar 3). Berdasarkan kedalamannya gempa bumi wilayah Bengkulu dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yakni gempa bumi dengan kedalaman < 30 km, 30-99 km dan > 100 km, Sementara berdasarkan kekuatannya dapat dikelompokkan mejadi tiga yaitu < 5 Mb, 5 - 6 Mb dan > 6 Mb. Secara umum, gempa-gempa bumi ini tersebar dalam empat lajur utama, yakni lajur gempa bumi rapat di wilayah utara (tenggara Pulau Siberut), lajur gempa bumi jarang di wilayah tengah (Pulau Sipora - Kep Pagai), lajur rapat gempa bumi di wilayah selatan (Pulau Enggano dan sekitarnya), dan gempa bumi yang berasosiasi dengan sesar Sumatera. Keempat lajur ini merupakan karakteristik kegempaan wilayah Bengkulu dan sekitarnya. Wilayah yang memiliki sebaran gempa bumi jarang dinyatakan sebagai daerah potensi gempa bumi di masa yang akan datang, dan dikenal sebagai wilayah rumpang gempa bumi. PLTA Musi ini terletak dalam wilayah potensi rumpang gempa bumi.



KORRELASI SATUAN PETA
CORRELATION OF MAP UNITS





Gambar 3. Kegempaan regional Bengkulu dan empat lajur sumber gempa bumi.

– **Gempa Bumi Merusak Regional Wilayah Bengkulu**

Gempa bumi merusak adalah gempa bumi yang mempunyai kekuatan cukup besar, dangkal, dan mengakibatkan kerusakan di daerah sekitarnya. Kerusakan tersebut meliputi kerusakan geologi dan kerusakan fisik lingkungan. Berdasarkan catatan sejarah gempa bumi, di wilayah ini paling sedikit telah terjadi sepuluh kali gempa bumi merusak, yakni gempa bumi Bengkulu (1914, 1938, 1991, 2000, 2007), gempa bumi Tes (1952), gempa bumi Kepahyang (1979, 1997), gempa bumi Argamakmur (1997) dan gempa bumi Muko-muko (2004). Gempa-gempa bumi merusak tersebut telah

mengakibatkan kerusakan di wilayah pantai Bengkulu dan daerah daratan dengan intensitas maksimum VIII pada skala MMI (Gambar 4). Tercatat ratusan orang meninggal dan kerugian materi mencapai milyaran rupiah. Peristiwa gempa bumi merusak ini tidak hanya mengakibatkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur, tetapi juga menyebabkan bencana geologi, seperti retakan tanah, longsor, tsunami, sesar gempa bumi, pelulukan, dan lain sebagainya. Bencana geologi ini dapat mengakibatkan kerusakan pada bangunan-bangunan sipil penting, seperti sarana pembangkit listrik, PLTA, dan lainnya terutama di daerah-daerah yang dilalui oleh lajur sesar aktif.

– Seismotektonik Regional Wilayah Bengkulu

Seismotektonik wilayah Bengkulu merupakan bagian dari Satuan Seismotektonik Busur Sangat Aktif Indonesia dengan tipe asimetris (Carter, 1979). Pada satuan ini dapat terjadi gempa bumi berkekuatan 8,5 SR, namun pada umumnya gempa bumi berkekuatan 6-7 SR. Dua lajur seismotektonik utama (asimetri) wilayah ini terdiri atas Lajur Seismotektonik Tunjaman Lempeng Samudra Hindia-Australia, dan Lajur Seismotektonik Sesar Aktif Sumatera. Kedua lajur seismotektonik utama tersebut merupakan lajur sumber gempa bumi wilayah Bengkulu (*seismogenetic source*). PLTA Musi termasuk dalam lajur seismotektonik sesar aktif Sumatera yang terletak di antara segmen sesar Ketahun dan segmen sesar Musi Keruh yang membentuk lajur tarikan dan disebut sebagai lajur tarikan.

GEOLOGI DAN KEGEMPAAN LOKAL PLTA MUSI

Geologi lokal PLTA Musi terdiri atas tiga unsur yaitu bentang alam, batuan dan struktur geologi. Untuk kegempaan lokal akan ditekankan pada kegempaan atau gempa bumi yang berasosiasi dengan lajur sesar aktif di sekitar PLTA.

– Bentang Alam

Bentang alam lokal di sekitar PLTA terdiri atas empat satuan bentang alam, yaitu bentang alam lereng kaki bukit Kaba (timur), bentang alam lembah alur sungai Musi (tengah), bentang alam teras sungai (barat), dan bentang alam gumuk (barat).

Bentang alam lereng kaki bukit Kaba yang terletak di sebelah timur PLTA mempunyai kemiringan cukup terjal (45%). Bentang alam ini dikontrol oleh sesar geser normal yang berada di sebelah timur (kiri) intake dam PLTA. Blok lembah sungai merupakan blok sesar yang relatif turun.

Bentang alam lembah alur sungai Musi tempat *intake* dam berada merupakan lembah sungai yang berbentuk V. Sungai Musi merupakan sungai yang terletak dalam lajur sesar aktif dengan ciri dinamika mengerosi tebing (erosi lateral), mengerosi dasar lembah sungai (erosi tegak), dan mengendapkan material hasil erosi di sisi-sisi sungai. Sebagian endapan ini telah terangkat sebagai endapan teras.

Endapan teras ini menunjukkan bahwa sungai telah mengalami pergeseran (*shifting river*). Endapan sungai yang terbentuk di alur sungai membentuk

endapan alur sungai. Berdasarkan endapan ini, pola sungai menunjukkan sungai bertumpuk (*stacking river*). Bentang alam teras sungai dijumpai di sisi bagian barat yang membentuk dataran bertingkat yang mencirikan adanya perbedaan ketinggian setiap satuan teras. Keberadaan bentang alam teras ini menunjukkan bagian barat alur sungai merupakan blok relatif naik (aktif bergerak secara tegak).

Bentang alam gumuk dijumpai di sebelah barat *intake* dam. Bentang alam ini merupakan gumuk sisa endapan gunung api tererosi yang dicirikan oleh lereng agak landai. Semakin ke arah barat, lereng gumuk ini makin melandai, kadang-kadang di antara gumuk dijumpai dataran erosi.

– Batuan

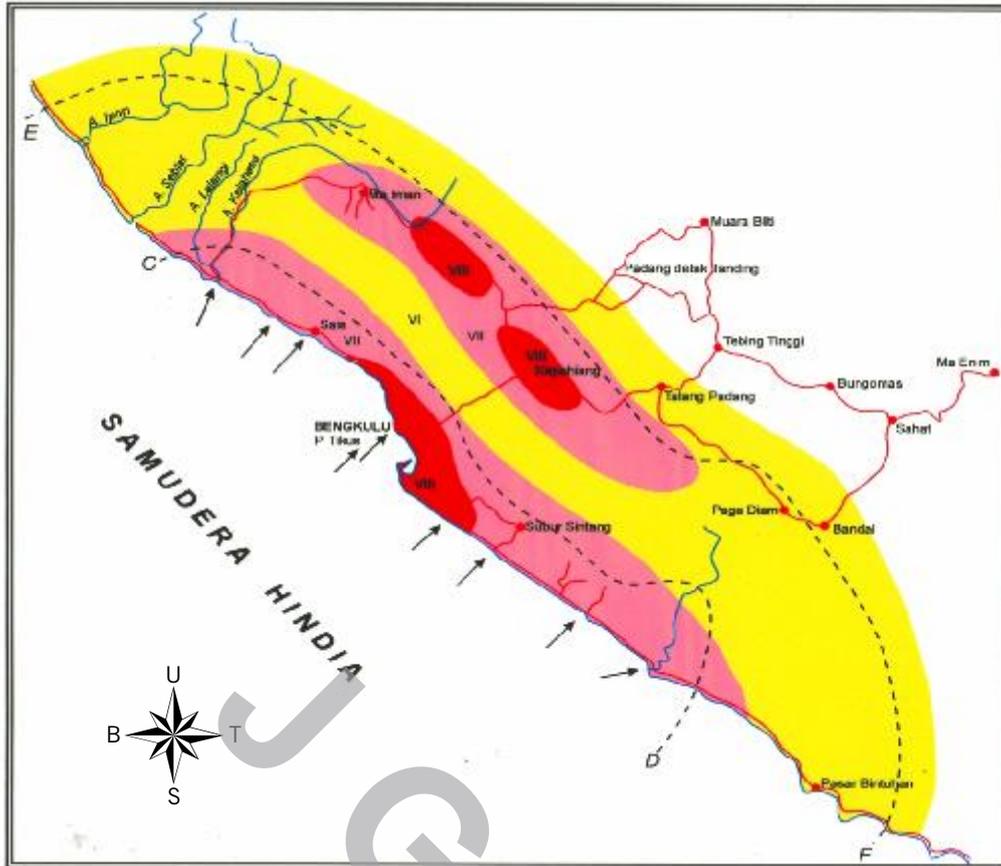
Batuan yang tersingkap di sekitar PLTA Musi ini terdiri atas enam satuan batuan, yakni Satuan Andesit, Satuan Tufa Breksi, Satuan Tufa, Satuan Lapili Tuf, Satuan Lempung Pasiran (teras), dan Satuan Endapan Sungai.

Satuan Andesit yang merupakan batuan dasar di PLTA dapat dijumpai pada ketinggian 520-550 m di atas permukaan laut dengan kedalaman 25 hingga 55 m di bawah permukaan sungai. Satuan ini terdiri atas andesit, dan aglomerat, tuf breksi yang merupakan bagian dari Formasi Hulusimpang bagian bawah. Secara keseluruhan, batuan tersebut mempunyai cepat rambat gelombang seismik P 2600 m/detik.

Satuan Tufa Breksi dijumpai pada ketinggian 520 - 590 m di atas permukaan laut atau pada kedalaman 13 - 30 m di bawah permukaan sungai. Bagian bawah satuan ini terdiri atas tufa breksi dan mengandung batuapung, sedangkan bagian atasnya disebut sebagai Anggota Bawah Formasi Surau. Batuan ini mempunyai cepat rambat gelombang seismik P 1600 m/detik.

Satuan Tufa dijumpai pada ketinggian 562 - 590 m di atas permukaan laut, dengan kedalaman 5 - 13 m di bawah permukaan sungai. Satuan ini terdiri atas tufa berukuran pasir sampai lanau dan batuapung. Batuan ini merupakan bagian dari Anggota Atas Formasi Surau. Secara keseluruhan, batuan ini mempunyai kecepatan rambat gelombang seismik P 900 - 1000 m/detik.

Satuan Lempung Pasiran merupakan endapan teras sungai yang terdiri atas lempung, lanau, pasir, dan kerikil.



Gambar 4. Peta intensitas gempa bumi Bengkulu berdasarkan sejarah kejadian gempa bumi merusak.

Satuan Endapan Sungai merupakan endapan sungai Musi sekarang yang terdiri atas lanau, pasir, kerikil, kerakal, dan bongkah.

– Struktur Geologi

Struktur geologi yang dapat dijumpai di daerah PLTA Musi dan sekitarnya terdiri atas kekar dan sesar. Kekar yang dijumpai sebagai kekar tarikan (*tension joint*), dan kekar gerus (*shear joint*) merupakan produk gaya tektonika. Kedua sistem kekar dapat menunjukkan arah gaya yang bekerja pada batuanannya.

Bidang lemah yang dapat dijumpai di sekitar PLTA, adalah kelurusan alur sungai Musi, pada segmen sungai yang terletak di sebelah selatan *intake* bendungan dengan arah barat laut - tenggara. Ke arah utara kelurusan bidang lemah ini mengikuti kelurusan sungai Lanang yang berarah barat laut tenggara. Ke arah utara (hulu) sungai dan *intake* bendungan, aliran sungai Musi ini berubah arah menjadi relatif utara - selatan. Lajur lemah ini dapat dibandingkan dengan pola struktur sesar yang ada

pada Peta Geologi Lembar Bengkulu (Gafoer, 1992), yang merupakan kelurusan sesar utama sesar Sumatera segment Musi - Keruh. Keberadaan struktur sesar ini diperkuat oleh penampang geologi memotong *intake* bendungan (PLN, 1984) yang memperlihatkan adanya perbedaan posisi ketinggian (dari permukaan laut) dan kedalaman (dari permukaan sungai) batuan dasar (Satuan Andesit) yang mengalasi *intake* bendungan. Perbedaan posisi batuan dasar ini menunjukkan adanya pergeseran dua sesar tegak. Kedua sesar tersebut mengikuti kelurusan alur sungai Musi segmen selatan yang merupakan kelurusan lajur sesar Sumatera.

Ke arah timur 2,5 km *intake* bendungan dijumpai sesar yang mengikuti kelurusan sungai Musi segmen utara. Sesar ini diduga merupakan sesar turun (sesar tarikan) sebagai sesar sekunder sistem Sesar Sumatera. Blok barat sesar ini diduga relatif turun.

Selain sesar ini, dijumpai sesar mendatar turun dengan arah utara - selatan. Sesar ini sejajar dengan jalan utama kampung Surau - Curup. Blok turun adalah blok bagian barat yang sama dengan sesar turun sekunder tersebut di atas.

Sesar Aktif dan Kekuatan Gempa Bumi Maksimum

Sesar aktif adalah sesar yang aktif sejak zaman Kuartar atau dua juta tahun yang lalu sampai Holosen. Sesar aktif biasanya berasosiasi dengan kejadian gempa bumi. PLTA Musi terletak pada lajur sesar Sumatera segmen Musi-Keruh tempat gempa bumi Kepahyang 1979 dan 1997 berpusat. Berdasarkan penampakan peta topografi skala 1: 50.000 (AMS, 1975) terlihat adanya segmen Sungai Musi dan Sungai Lanang yang tergeserkan sekisar 10 sampai 20 m (Gambar 2). Pergeseran juga terlihat pada batuan alas Satuan Andesit di bawah PLTA dengan pergeseran 10 sampai 20 m (Gambar 4). Bila diasumsikan bahwa pergeseran tersebut telah terjadi sejak 1000 tahun yang lalu, berarti terjadi pergeseran minimum sepanjang 10 mm/tahun dan maksimum 20 mm/tahun. Dalam teks penjelasan grup penelitian sesar aktif Jepang (1992) ditentukan bahwa ada hubungan antara pergeseran rata-rata "S (mm/tahun)" dan kekuatan maksimum gempa bumi (Ms) yang terjadi dalam interval waktu "R (tahun)" yang dalam rumus empirisnya adalah:

$$\text{Log } R = 0,6 M - (\text{log } S + 1)$$

Bila kecepatan pergeseran rata-rata per tahun $S = 10$ mm/tahun dan berasosiasi dengan gempa bumi berkekuatan maksimum $M_s = 7$, maka selang waktu kejadian gempa bumi berkekuatan $M_s = 7$ ini terjadi dalam selang waktu 160 tahun, sedangkan untuk gempa bumi dengan kekuatan maksimum $M_s = 8$ interval kejadiannya dalam selang waktu 630 tahun. Namun, bila kecepatan pergeseran rata-rata per tahun atau $S = 20$ mm/tahun dan berasosiasi dengan gempa bumi berkekuatan maksimum $M = 7$, maka selang kejadian gempa bumi $M_s = 7$ ini dalam selang waktu 80 tahun, sedangkan untuk gempa bumi berkekuatan $M_s = 8$, maka selang waktu kejadiannya adalah 316 tahun. Untuk gempa bumi berkekuatan lebih kecil $M_s = 5$ dan $M_s = 6$ dapat terjadi dalam selang waktu berturut-turut 10 tahun dan 40 tahun. Selain itu Matsuda (1975) dengan rumus empirisnya dapat memperkirakan panjang sesar aktif berdasarkan kekuatan gempa bumi yang terjadi, yaitu:

$$\text{Log } L = 0,6 M_s - 2,9$$

Untuk gempa bumi berkekuatan $M_s = 7$, maka panjang sesar yang aktif adalah sepanjang 19 km, sedangkan untuk gempa bumi berkekuatan $M_s = 8$, maka panjang sesar yang aktif adalah 79 km.

Percepatan Gempa Bumi

Tiga hal pogeppaan lokal yang dibahas di PLTA Musi yakni pengaruh gempa bumi regional (tunjaman), pengaruh gempa bumi lokal (sesar aktif), dan maksimum intensitas gempa bumi terhadap PLTA. Seperti di ketahui bahwa di wilayah provinsi Bengkulu sejak sepuluh tahun terakhir sering diguncang gempa bumi kuat dan merusak. Gempa-gempa bumi tersebut adalah gempa bumi Bengkulu yang terjadi pada tahun 1914, 2000, dan 2007, dan merupakan aktivitas tunjaman Lempeng Tektonik Samudra Hindia-Australia. Pusat gempa-gempa bumi Bengkulu ini terletak pada koordinat $4,5^\circ$ LS dan $102,5^\circ$ BT, berkekuatan 7 Ms, berkedalaman 33 km. Gempa bumi Bengkulu tahun 2000 terletak pada koordinat 4.734° LS dan 101.047° BT, berkekuatan 7,9 Ms, berkedalaman 5 km, dengan mekanisme fokal gerak sesar naik. Gempa Bumi Bengkulu tahun 2007 terletak pada koordinat 4.520 LS dan 101.374 BT, berkekuatan 8,6 Ms, berkedalaman 34 km, serta bermekanisme fokal gerak sesar naik. Gempa bumi aktivitas sesar aktif Sumatera tercatat dua kejadian, yakni gempa bumi Kepahyang (1979 dan 1997). Gempa bumi Kepahyang 1979 terletak pada koordinat $3,3^\circ$ LS dan $102,7^\circ$ BT, berkekuatan 5,9 Ms, berkedalaman dangkal, sedangkan gempa bumi Kepahyang 1997 terletak pada kordinat $3,6^\circ$ LS dan $102,6$ BT, berkekuatan 5 Ms. Secara individual, masing-masing gempa bumi ini berpengaruh langsung terhadap PLTA Musi. Pengaruhnya terhadap PLTA dapat ditentukan dengan menghitung besarnya nilai percepatan maksimum di permukaan berdasarkan rumus empiris Fukushima dan Tanaka (1990) sebagai berikut:

$$\text{Log } A = 0,41 M_s - \text{log} (R + 0,032 \times 10^{0,41M_s}) - 0,0034 R + 1,30$$

A adalah percepatan maksimum di permukaan dalam cm/detik^2 , R jarak terpendek antara lokasi terhitung dan pusat gempa bumi (Km), dan M_s adalah kekuatan gempa bumi di permukaan. Gempa bumi Bengkulu tahun 1914, 2000, dan 2007, percepatan maksimum horizontal terhitungnya berturut-turut adalah 52,11; 26,37, dan 69,22 gal atau cm/detik^2 , sedangkan gempa bumi Kepahyang (1979 dan 1997) masing-masing adalah 84,55 cm/detik^2 dan 133,59 cm/detik^2 (Tabel 1).

Tabel 1. Nilai Percepatan Gempa Bumi Merusak Maksimum di PLTA Musi

Daerah	Tahun	Jarak R (Km)	Magnitude M (Me)	Percepatan A (gal)
Bengkulu	1914	103	7	52.11325848
Bengkulu	2000	206	7.9	26.3729465
Bengkulu	2007	162.9	8.6	69.22071131
Kepahyang	1979	37.7	5.9	84.55565016
Kepahyang	1997	11.7	5	133.5978521

Penilaian Risiko Bahaya Gempa Bumi

Penilaian risiko bahaya gempa bumi pada PLTA Musi dan sekitarnya, dilakukan dengan pendekatan korelasi nilai percepatan terhitung di lokasi bendungan dengan nilai intensitas gempa bumi (Gambar 4) yang mungkin terjadi berdasarkan pendekatan rumus empiris. Algermissen (1989) dalam Thenhaus, P.C., *et al* (1993) mendiskusikan beberapa pendekatan untuk memperkirakan kerugian (risiko) dengan menghubungkan atenuasi intensitas atau kerugian berdasarkan sejarah intensitas gempa bumi terhadap lingkungannya (isoseismal intensitas). Algermissen dr. (1989) dalam menstimulasikan sejarah intensitas gempa bumi dalam MMI dan merekonstruksinya dengan menggunakan rumus korelasi secara empiris :

$$MMI = (\log A_h - 0,14)/0,30$$

A_h adalah percepatan maksimum horizontal di permukaan dalam cm/detik^2 (Trifunac dan Brady, 1975 dalam Pusat penelitian dan pengembangan Air, 1996). Dalam kajian ini dapat diperkirakan pengaruh individual masing-masing gempa bumi merusak di wilayah provinsi Bengkulu, baik yang berada di lepas pantai (gempa bumi tunjaman) maupun yang berada di daratan Bengkulu (gempa bumi sesar aktif). Gempa bumi Bengkulu tahun 1914, 2000, dan 2007, percepatan maksimum horizontal terhitungnya berturut-turut adalah 52,11; 26,37, dan 69,22 gal atau cm/detik^2 . Sementara gempa bumi Kepahyang (1979 dan 1997) masing-masing adalah 84,55 cm/detik^2 dan 133,59 cm/detik^2 .

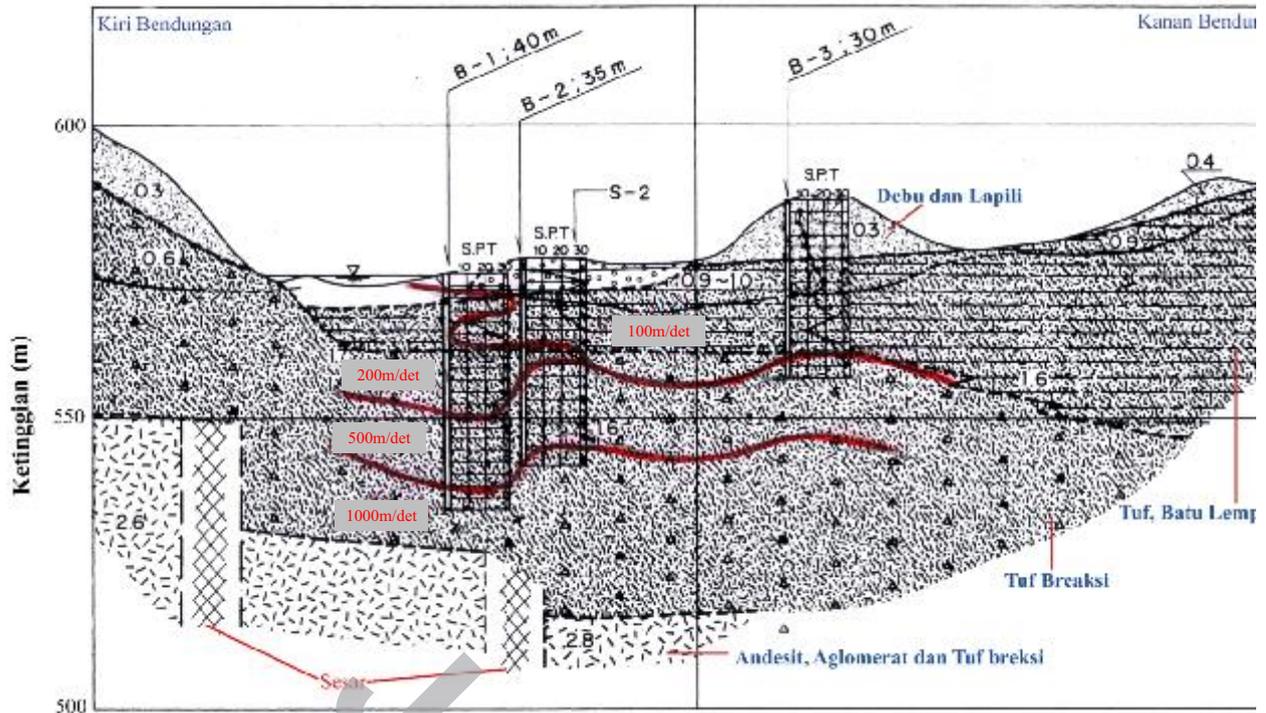
Periode alami batuan dan tanah di sekitar PLTA Musi dapat dihitung berdasarkan data geoteknik hasil penelitian PLN (1984). Data yang dipergunakan adalah data SPT (*Standard Penetration Test*) berupa nilai N, untuk menentukan kecepatan rambat gelombang shear atau gelombang S dengan menggunakan rumus empiris dari Inai dan Yoshimura (1990) :

$$V_s = 76 N^{0,31}$$

V_s adalah kecepatan rambat gelombang S dalam m/detik, N adalah nilai penetrasian (jumlah pukulan) untuk setiap meter. Kajian geologi bawah permukaan di bawah tubuh PLTA yang berdasarkan sifat keteknikan batuan dan tanah (N), batuannya dapat di bagi atas empat lapisan batuan (Gambar 5), yakni: Lapisan batuan dasar 1 dengan $N = 1000$ dan $V_s = 646$ m/detik; Lapisan batuan dasar 2 dengan $N = 500$ dan $V_s = 521$ m/detik, ketebalan $h = 12 - 16$ m; lapisan batuan lunak 1 dengan $N = 200$ dan $V_s = 392$ m/detik, ketebalan $h = 6 - 14$ M. Lapisan batuan lunak 2 dengan $N = 100$ dan $V_s = 316$ m/detik, ketebalan $h = 10 - 26$ M. Periode alami (T_s) dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut $4H_1/V_1 \leq T_s \leq 4H_2/V_2$, sehingga nilai-nilai periode alami lapisan batuan dasar 1 dengan lapisan batuan dasar 2 adalah $0,092 \text{ detik} \leq T_s \leq 0,099 \text{ detik}$, untuk lapisan batuan dasar 2 dengan batuan lunak 1 adalah $0,06 \text{ detik} \leq T_s \leq 0,1 \text{ detik}$, sedangkan untuk lapisan batuan lunak 1 dengan lapisan batuan lunak 2 adalah $0,12 \text{ detik} \leq T_s \leq 0,26 \text{ detik}$.

Dapat dinyatakan bahwa gempa bumi tunjaman memberikan efek pada PLTA Musi dengan nilai intensitas minimum IV MMI dan maksimum V MMI, sedangkan gempa bumi sesar aktif Sumatera memberikan efek dengan nilai intensitas minimum VI MMI dan maksimum VII MMI.

Intensitas VI dalam skala MMI memberikan efek atau dampak dapat merusakkan plaster pada dinding bangunan sipil, sedangkan intensitas VII MMI dengan efek/dampak dapat memecahkan tembok-tembok dan dapat terjadi pergeseran pada fondasi bangunan. Pada Intensitas VII MMI setara VII MSK (1964) terjadi kerusakan bangunan tipe C (bangunan beton bertulang, bangunan kayu yang kuat) pada kerusakan tingkat 1, sedikit kerusakan pada plaster dan jatuh. Bangunan tipe B (bangunan terbuat dari bata, bangunan terdiri atas blok blok besar dan terpisah pisah, dan bangunan setengah tembok) mengalami kerusakan tingkat 2, yaitu retak-retak kecil pada dinding, kerusakan pada cerobong tinggi dan bagian-bagiannya jatuh. Bangunan tipe A (bangunan tersusun oleh batu bata, struktur rumah desa, rumah tanah liat) mengalami kerusakan tingkat 3, yaitu rusak berat (runtuh) pada dinding dinding, dan cerobong-cerobong jatuh, kerusakan pada pipa pipa, dan retak pada dinding dinding batu, mengakibatkan air terguncang dan berpusar, dan lumpur naik kepermukaan.



Gambar 5. Modifikasi penampang geologi bawah permukaan arah barat daya - timur laut PLTA Musi berdasarkan kepadatan dari nilai N, SPT (Dimodifikasi setelah PLN, 1984).

KESIMPULAN

- Berdasarkan kedudukannya terhadap kondisi tektonika sistem sesar Sumatera, PLTA Musi ini terletak dalam lajur cekungan regangan tarikan (*pull apart basin*) antara sesar segmen Ketahun dan segmen Musi - Keruh.
- Dari kelima gempa bumi merusak Bengkulu (1914, 1979, 1997, 2000 dan 2007) ternyata gempa bumi Kepahyang tahun 1979 dan 1997 mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap PLTA Musi dengan nilai percepatan maksimum di permukaan adalah 133,59 gal atau setara dengan intensitas VII MMI atau VII MSK.
- Geologi bawah permukaan di bawah tubuh PLTA berdasarkan sifat keteknikan batuan dan tanah (N), dapat dibagi atas empat lapisan batuan, yakni: Lapisan batuan dasar 1 dengan $N = 1000$ dan $V_s = 646$ m/detik; Lapisan batuan dasar 2 dengan $N = 500$ dan $V_s = 521$ m/detik, ketebalan $h = 12 - 16$ m; lapisan batuan lunak 1 dengan $N = 200$ dan $V_s = 392$ m/detik, ketebalan $h = 6 - 14$ M. Lapisan batuan lunak 2 dengan $N = 100$ dan $V_s = 316$ m/detik, ketebalan $h = 10 - 26$ M.
- Periode alami lapisan batuan dasar 1 dengan lapisan batuan dasar 2 adalah $0,092 \text{ detik} \leq T_s \leq 0,099 \text{ detik}$, untuk lapisan batuan dasar 2 dengan batuan lunak 1 adalah $0,06 \text{ detik} \leq T_s \leq 0,1 \text{ detik}$, sedangkan untuk lapisan batuan lunak 1 dengan lapisan batuan lunak 2 adalah $0,12 \text{ detik} \leq T_s \leq 0,26 \text{ detik}$.
- Ancaman gempa bumi merusak berkekuatan $M_s = 5$ dapat terjadi di daerah sekitar PLTA Musi dalam selang waktu 10 tahun, sedangkan gempa bumi berkekuatan $M_s = 6$, $M_s = 7$ dan $M_s = 8$ adalah 40 tahun, 160 tahun dan 630 tahun.

SARAN

- Pengaruh gempa bumi terhadap suatu daerah atau bangunan yang berada di atasnya, sangat ditentukan oleh respons batuan/tanah serta bangunan tersebut terhadap getaran yang berpropagasi di dalamnya.
- Besar-kecilnya respons sangat bergantung pada karakteristik fisik material penyusun batuan/tanah atau bangunan tersebut, dan dapat diukur dengan seismometer yang dapat mendeteksi parameter fisiknya, seperti frekuensi dominan,

periode dominan, simpangan, serta nilai kerentanannya.

- Prinsip dasar resonansi akan terjadi antara batuan/tanah dengan bangunan di atasnya bila keduanya mempunyai periode alami sama dalam getaran.
- Untuk mengetahui karakter fisik pada kedua media tersebut, perlu dilakukan perhitungan dan pengukuran langsung di lapangan dengan menggunakan seismometer tiga komponen, dengan harapan dapat ditentukan periode alami masing masing (batuan/tanah dan bangunan).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas diterbitkannya makalah kepada Kepala Pusat Survei Geologi dan seluruh anggota Dewan Redaksi atas penelaahan serta saran-sarannya terhadap makalah ini.

ACUAN

- Carter, 1979. Indonesian Earthquake Study ; *Seismic zones for building construction in Indonesia, Vol. 3*
- Fujita K., 1980. *Active Faults in Japan; Sheet Maps and Inventories* by The Research Group for Active Faults; University of Tokyo Press (Japan)
- Fukushima, Y., Tanaka, T., 1990. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.* 80 : 757-783
- Gafoer, S., Amin T.C., and Padede, R., 1992, *Geological Map of Bengkulu Quadrangle, Sumatera, skala 1 ; 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung.
- PLN., 1984. *Feasibility Study on Five Hydro Electric Power Development Projects, Musi Project*.
- Puslitbang Air., 1996, *Pengembangan parameter percepatan daerah gempa kawasan barat Indonesia*. Departemen Pekerjaan Umum, Republik Indonesia.
- Thenhaus, P.C., Effendi, I., Kertapati, E., 1993. Pilot Studies of Seismic Hazard and Risk in North Sulawesi Province, Indonesia, *Journal of Earthquake Spectra* (9) 1
- The Research Group for Active Faults of Japan, University of Tokyo., 1992. *Map of Active Faults in Japan With an Explanatory Text*.

<p>Naskah diterima : 7 April 2008 Revisi terakhir : 4 Oktober 2008</p>
