



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Mikrozonasi Potensi Bahaya Gempa Bumi Daerah Singaraja Berdasarkan Analisis Studi Mikrotremor

I Hanif ^{a,*}, C Sulaiman ^b, A Zaenudin ^a

^aJurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

^bPusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Jl. Diponegoro No. 57 Bandung, 40122, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima 11/11/2024

Direvisi 13/01/2025

Dipublish 22/05/2025

Kata kunci:

Gempa Bumi

Mikrotremor

Mikrozonasi

Mitigasi Bencana

Singaraja

ABSTRAK

Indonesia berada dalam kerumunan bencana gempa bumi yang menjadi ancaman serius bagi kehidupan masyarakat di dalamnya. Mitigasi bencana gempa bumi perlu dicanangkan sebagai prioritas utama dalam upaya pengurangan resiko bencana di berbagai wilayah. Mikrozonasi dapat menjadi salah satu upaya pengurangan resiko bencana gempa bumi, yang dilakukan berdasarkan identifikasi dan analisis terhadap seluruh potensi bahaya gempa bumi secara komprehensif. Analisis studi Mikrotremor telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik tanah dan potensi bahaya gempa bumi melalui mikrozonasi beberapa parameter yang ada di daerah Singaraja. Bila ditinjau secara geologis, wilayah ini merupakan perlapisan batuan hasil letusan gunung berapi yang terjadi pada masa yang berlainan. Batuan tersebut pada umumnya terdiri dari breksi, lava, dan tufaa kecuali sepanjang pantai utara yang tersusun dari endapan aluvial. Mikrozonasi potensi bahaya gempa bumi daerah Singaraja dapat diklasifikasikan dalam 4 bagian, terbagi dalam zona *weak*, *light*, *medium*, dan *strong*. Klasifikasi ini dilakukan berdasarkan analisis studi mikrotremor diantaranya mikrozonasi kerentanan seismik, mikrozonasi periode dominan dan Vs30, serta mikrozonasi *Peak Ground Acceleration* (PGA) daerah Singaraja. Hasil analisis mikrozonasi potensi bahaya gempa bumi menunjukkan daerah utara pesisir pantai Singaraja cukup berpotensi kuat terhadap skenario terburuk bahaya gempa bumi.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang rawan akan bencana gempa bumi. Pertemuan antara tiga lempeng aktif menyebabkan Indonesia terhimpit oleh pergerakan Lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, serta lempeng Pasifik. Pergerakan tektonik inilah yang menjadi faktor penyebab besarnya aktivitas gempa bumi yang terjadi di negara ini, selain yang disebabkan oleh aktivitas vulkanik.

Secara garis besar Indonesia berada dalam kerumunan bencana gempa bumi yang menjadi

ancaman serius bagi kehidupan masyarakat di dalamnya. Mitigasi bencana gempa bumi perlu dicanangkan sebagai prioritas utama dalam upaya pengurangan resiko bencana gempa bumi di berbagai wilayah. Mikrozonasi dapat menjadi salah satu upaya pengurangan resiko bencana gempa bumi, yang dilakukan berdasarkan identifikasi dan analisis terhadap seluruh potensi bahaya gempa bumi secara komprehensif.

Intensitas kerusakan bencana gempa bumi tidak hanya dipengaruhi oleh magnitudo dan jarak pusat gempa, justru hal yang perlu diperhatikan adalah litologi

* I Hanif

irfanhanif@eng.unila.ac.id

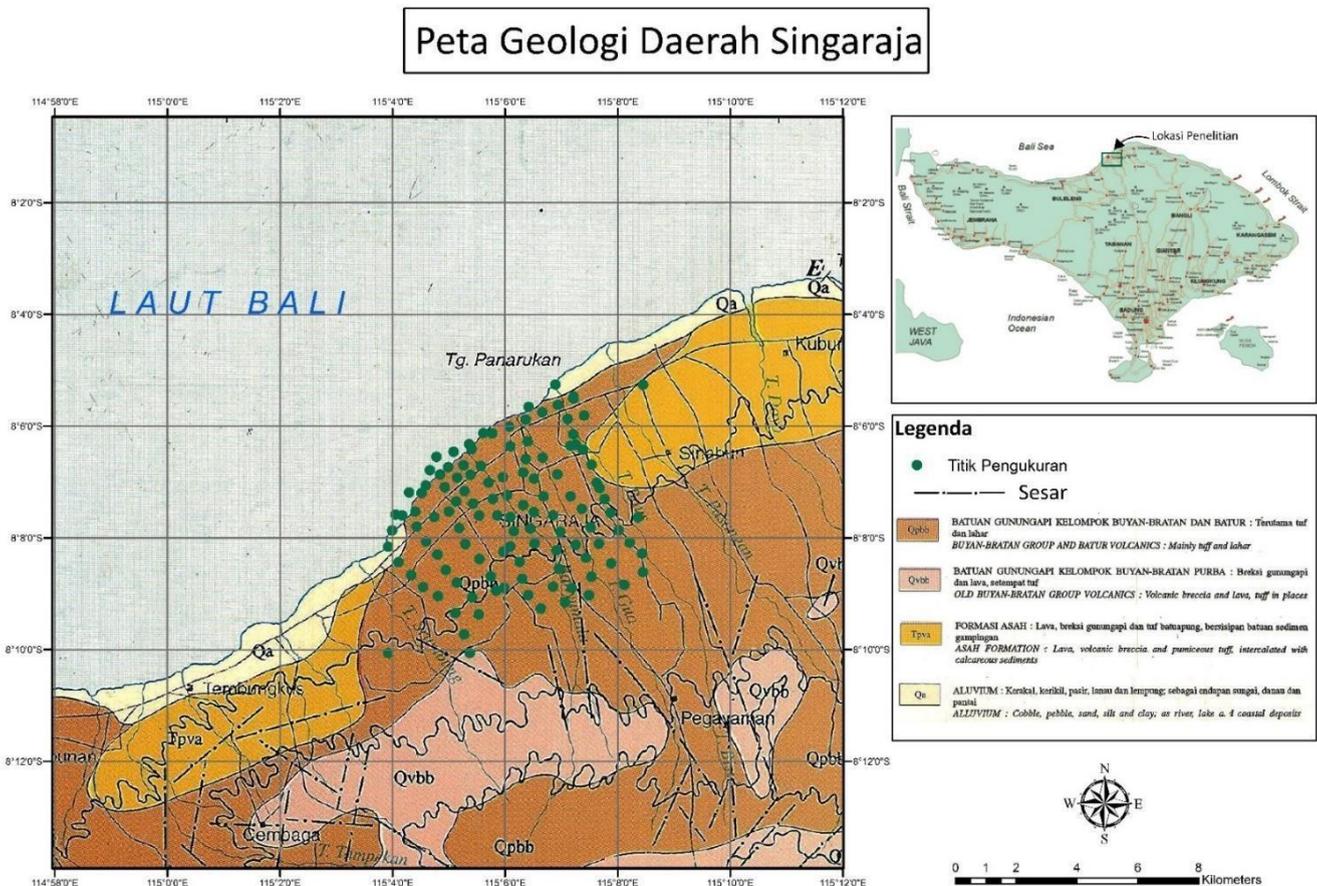
permukaan daerah setempat. Secara sederhana litologi daerah struktur tanah lunak cenderung akan memperkuat gelombang seismik daripada litologi daerah struktur tanah keras. Litologi daerah struktur tanah lunak akan memberikan respon frekuensi yang rendah dan relatif mempunyai kerentanan seismik yang lebih tinggi sehingga akan menimbulkan penguatan lebih besar terhadap resiko bencana gempa bumi dibandingkan dengan litologi daerah struktur tanah keras. Adanya efek resonansi gelombang inilah yang menyebabkan timbulnya amplifikasi getaran gempa bumi di suatu wilayah tertentu.

Dalam upaya pengurangan resiko bencana gempa bumi, yang dilakukan berdasarkan seluruh potensi bahaya secara komprehensif, maka diperlukan identifikasi dan analisis terhadap pengukuran mikrotremor untuk mengetahui mikrozonasi karakteristik litologi struktur tanah serta kerentanan seismik terhadap potensi bahaya gempa bumi di daerah Singaraja, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali.

1.1. Tinjauan Geologi

Berdasarkan litologi penyusun yang mengontrol bentang alamnya, Pulau Bali terdiri atas batuan gunung api (*volcanic rock*), endapan permukaan dan endapan sedimen. Sebagian besar terbentuk dan tersusun oleh batuan vulkanik yang terbentuk dari kegiatan gunung api kuartar, sedangkan batuan sedimen dan campuran sedimen vulkanik terdapat di bagian barat (Negara), utara (Singaraja), dan selatan (Nusa Penida dan Bukit Jimbaran). Umumnya wilayah ini mendekati garis pantai sepanjang Pulau Bali, berada pada ketinggian 0-20 meter di atas permukaan laut dan kemiringan 0-5 derajat. Struktur geologi wilayah Bali dimulai dengan adanya kegiatan di lautan selama kala Miosen Bawah yang menghasilkan batuan lava bantal dan breksi yang disisipi oleh batuan gamping.

Korelasi antara karakteristik batuan daerah Singaraja dengan Peta Geologi Lembar Pulau Bali dapat diklasifikasikan sebagaimana tampilan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta geologi daerah Singaraja (Hadiwidjojo, 1998).

Kegiatan gunung api lebih banyak terjadi di daratan, yang menghasilkan gunung api dari barat ke timur. Seiring dengan terjadinya dua kaldera, yaitu mula-mula kaldera Buyan-Bratan dan kemudian kaldera Batur, Pulau Bali masih mengalami gerakan yang

menyebabkan pengangkatan di bagian utara. Akibatnya, Formasi Palasari terangkat ke permukaan laut dan Pulau Bali pada umumnya mempunyai penampang utara-selatan yang tidak simetris. Bagian selatan lebih landai dari bagian utara. Stratigrafi regional berdasarkan Peta

Geologi Bali, geologi Bali tergolong masih muda. Batuan tertua kemungkinan berumur Miosen Tengah.

Daerah Singaraja yang terletak pada bagian utara Pulau Bali, sebagian besar memiliki karakteristik batuan yang masih dipengaruhi oleh batuan gunung api kelompok Buyan-Bratan dan Batur, terutama tuffa dan lahar. Hal ini dipengaruhi kuat oleh sejarah geologi Pulau Bali yang terbentuk akibat aktivitas vulkanik ribuan tahun silam.

Di sekeliling wilayah utara Pulau Bali diliputi oleh batuan gunung api kelompok Buyan-Bratan purba seperti breksi gunung api dan lava, setempat tuffa. Aktivitas ini mendukung terbentuknya formasi Asah yang tersusun dari lava, breksi gunung api dan tuffa gamping, bersisipan batuan sedimen gampingan. Di bagian utara Pulau Bali tersebar luas pula batuan alluvium seperti kerakal, kerikil, pasir, lanau, dan lempung, sebagai endapan sungai, danau, dan pantai.

Seluruh karakteristik ini memperlihatkan bahwa bagian utara Pulau Bali, khususnya daerah Singaraja didominasi oleh jenis batuan yang terbentuk dari hasil aktivitas gunung api kelompok Buyan-Bratan dan gunung api Batur. Mendominasinya jenis batuan bentukan aktivitas gunung api ini memperkuat akan pengaruh pembentukan geologi permukaan Pulau Bali yang berkaitan erat dengan aktivitas vulkanologi.

1.2. Dasar Teori

Gelombang seismik adalah gelombang-gelombang yang merambat baik di dalam maupun di permukaan bumi yang berasal dari sumber seismik seperti dari sumber gempa, ledakan, erupsi gunung api, longsor, badai dan sebagainya. Gelombang ini nantinya dapat direkam dengan alat penerima di atas permukaan bumi. Hasil rekaman dari alat tersebut dapat disebut seismogram. Seismogram merupakan hasil dari rekaman getaran yang disebabkan oleh penjalaran gelombang seismik dari suatu sumber. Setiap seismogram mengandung informasi yang penting tentang sumber seismik dan medium yang dilewati oleh gelombang. Gelombang yang terekam pada seismogram dapat berupa gelombang badan yaitu gelombang P dan gelombang S, serta gelombang permukaan yaitu gelombang *Love* dan gelombang *Rayleigh* (Afnimar, 2009).

Gelombang Primer atau gelombang kompresi merupakan gelombang badan (*body wave*) yang memiliki kecepatan paling tinggi dari gelombang S. Gelombang ini merupakan gelombang longitudinal partikel yang merambat bolak balik dengan arah rambatnya. Gelombang ini terjadi karena adanya tekanan. Karena memiliki kecepatan tinggi gelombang ini memiliki waktu tiba terlebih dahulu dari pada gelombang S. Gelombang S atau gelombang transversal (*shear wave*) adalah salah satu gelombang badan (*body*

wave) yang memiliki gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambatnya serta waktu tibanya setelah gelombang P. Gelombang ini tidak dapat merambat pada fluida, sehingga pada bagian inti bumi bagian luar tidak dapat terdeteksi sedangkan pada inti bumi bagian dalam mampu dilewati. Gelombang *love* merupakan gelombang transversal, gelombang yang arah rambat partikelnya bergetar melintang terhadap arah pejalanannya. Gelombang *rayleigh* merupakan jenis gelombang permukaan yang arah penjalanannya bergerak tegak lurus terhadap arah rambat dan searah bidang datar (Hidayati, 2010).

Mikrotremor merupakan getaran tanah yang sangat kecil dan terus menerus yang bersumber dari berbagai macam getaran seperti, lalu lintas, angin, aktivitas manusia dan lain-lain. Mikrotremor dapat juga diartikan sebagai getaran harmonik alami tanah yang terjadi secara terus menerus, terjebak di lapisan sedimen permukaan, terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi yang tetap, disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan alam lainnya. Penelitian mikrotremor dapat mengetahui karakteristik lapisan tanah berdasarkan parameter periode dominannya dan faktor penguatan gelombangnya atau amplifikasi (Kanai, 1983).

Metode HVSR merupakan metode membandingkan spektrum komponen horizontal terhadap komponen vertikal dari gelombang mikrotremor. Mikrotremor terdiri dari ragam dasar gelombang *rayleigh*, diduga bahwa periode puncak perbandingan H/V mikrotremor memberikan dasar dari periode gelombang S. Perbandingan H/V pada mikrotremor adalah perbandingan kedua komponen yang secara teoritis menghasilkan suatu nilai. Periode dominan suatu lokasi secara dasar dapat diperkirakan dari periode puncak perbandingan H/V mikrotremor.

Pada tahun 1989, Nakamura mencoba memisahkan efek sumber gelombang dengan efek geologi dengan cara menormalisir spektrum komponen horizontal dengan komponen vertikal pada titik ukur yang sama. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa rekaman pada stasiun yang berada pada batuan keras, nilai maksimum rasio spektrum komponen horizontal terhadap vertikal mendekati nilai 1. Sedangkan pada stasiun yang berada pada batuan lunak, rasio maksimumnya mengalami perbesaran (amplifikasi), yaitu lebih besar dari 1. Berdasarkan kondisi tersebut maka, Nakamura merumuskan sebuah fungsi transfer HVSR (*horizontal to vertical spectrum ratio*) mikrotremor dimana efek penguatan gelombang pada komponen horizontal dapat dinyatakan oleh persamaan 1 berikut:

$$S_E(w) = H_S(w)/H_B(w) \quad (1)$$

$H_S(w)$ merupakan spektrum mikrotremor komponen horizontal di permukaan dan $H_B(w)$ merupakan

spektrum mikrotremor komponen horizontal di batuan dasar.

Penguatan gelombang pada komponen vertikal dapat dinyatakan sebagai rasio spektrum komponen vertikal di permukaan dan di batuan dasar (persamaan 2), yaitu,

$$A_S(w) = V_S(w)/V_B(w) \quad (2)$$

$V_S(w)$ merupakan spektrum mikrotremor komponen vertikal di permukaan dan $V_B(w)$ merupakan spektrum mikrotremor komponen vertikal di batuan dasar.

Untuk mereduksi efek sumber, maka spektrum penguatan horizontal $S_E(w)$ dilakukan normalisasi terhadap spektrum sumber $A_S(w)$ (persamaan 3) yaitu:

$$S_M(w) = \frac{S_E(w)}{A_S(w)} = \frac{H_S(w)}{V_S(w)} / \left[\frac{H_B(w)}{V_B(w)} \right] \quad (3)$$

Dimana, $S_M(w)$ adalah fungsi transfer untuk lapisan soil. Jika $H_B(w)/V_B(w) = 1$ maka,

$$S_M(w) = H_S(w)/V_S(w) \quad (4)$$

Dalam pengamatan di lapangan ada dua komponen horizontal yang diukur yaitu komponen utara-selatan dan komponen barat-timur, sehingga persamaannya berubah menjadi,

$$S_M(w) = [(H_{SN}(w)^2 + H_{WE}(w)^2)^{1/2}] / V_S \quad (5)$$

$H_{SN}(w)$ adalah spektrum mikrotremor komponen horizontal utara-selatan. $H_{WE}(w)$ adalah spektrum mikrotremor komponen barat-timur (Nakamura, 1989).

V_{S30} merupakan kecepatan dari gelombang S pada ketebalan sedimen 30 meter, yang telah dijadikan patokan standar dalam dunia teknik sipil untuk menentukan tahanan tanah sebagai pondasi bangunan. Parameter ini mengacu pada ketahanan suatu bangunan dengan pondasi yang tertanam sedalam 30 meter di bawah permukaan. Zhao merumuskan hubungan antara frekuensi dominan dengan V_{S30} .

$$T_{Vs30} = \frac{120}{V_{S30}} \quad (6)$$

Denga T_{Vs30} merupakan periode dominan kedalaman 30 meter. Berdasarkan hubungan antara periode dan frekuensi maka akan diperoleh persamaan.

$$V_{S30} = 120 \times f_0 \quad (7)$$

Dengan f_0 sebagai frekuensi dominan. Dari persamaan di atas Peta *site class*/kelas tanah dapat dikorelasikan berdasarkan klasifikasi tanah yang dilakukan oleh NEHRP sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 1 (Zhao dan Xu, 2004).

$$PGA = \frac{472.3 \times 10^{0.2/8M_s}}{(R + 25)^{1.301}} \quad (8)$$

Tabel 1. *Site class* NEHRP (NEHRP, 2000).

Site Class	Soil Profile Name	Average Properties in Top 100 feet (as per 2000 IBC section 1615.1.5) Soil Shear Wave Velocity, V_s	
		Feet/second	Meters/second
A	Hard Rock	$V_s > 5000$	$V_s > 1524$
B	Rock	$2500 < V_s \leq 5000$	$762 < V_s \leq 1524$
C	Very dense soil and soft rock	$1200 < V_s \leq 2500$	$366 < V_s \leq 762$
D	Stiff soil profile	$600 < V_s \leq 1200$	$183 < V_s \leq 366$
E	Soft soil profile	$V_s < 600$	$V_s < 183$

Percepatan getaran tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) adalah nilai terbesar percepatan tanah pada suatu tempat yang diakibatkan oleh getaran gempa bumi dalam periode waktu tertentu. Kondisi geologis tanah yang sangat menentukan besarnya kecilnya nilai PGA adalah tingkat kepadatan tanah di daerah tersebut. Semakin padat tanah maka nilai PGA di daerah tersebut semakin kecil (Subardjo, 2001).

Perhitungan percepatan getaran tanah maksimum (PGA) berdasarkan pendekatan rumus empiris Mc. Guirre R.K:

Dengan M_s sebagai magnitudo gelombang permukaan dan R adalah jarak hiposenter (km) (Douglas, 2004).

Perhitungan percepatan getaran tanah maksimum/*Peak Horizontal Acceleration* (PHA) berdasarkan persamaan Boore et al. 1993:

$$\begin{aligned} \log PHA = & -0.105 + 0.229(M_w - 6) \\ & + 0.0(M_w - 6)^2 + 0.0R \\ & + (-0.778)\log R + 0.162G_B \\ & + 0.251G_C \end{aligned} \quad (9)$$

Untuk memperoleh frekuensi dominan dan puncak spektrum di setiap lokasi yang dipilih, diperoleh nilai indeks kerentanan seismik berdasarkan persamaan:

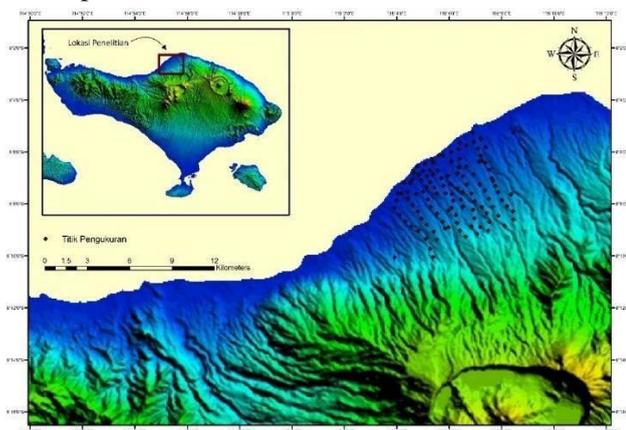
$$K_g = A^2/f_0 \quad (10)$$

Dengan A sebagai puncak spektrum mikrotremor dan f_0 sebagai frekuensi resonansi (Nakamura, 2008).

2. Metodologi

2.1. Alat dan bahan

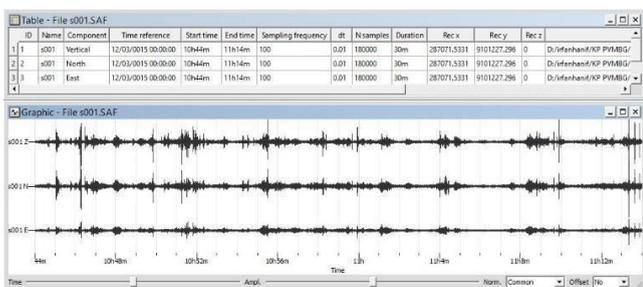
Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data hasil pengukuran seismometer daerah Singaraja, Buleleng, Provinsi Bali pada tanggal 12 Maret-24 Maret 2015. Akuisisi data dilakukan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi terhadap 114 titik pengukuran yang tersebar di seluruh kawasan Singaraja. Terlihat bahwa pengambilan data penelitian diperoleh dari kawasan dataran rendah daerah Singaraja yang berbatasan langsung dengan laut Bali, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Titik pengukuran data penelitian (*The CGIAR-CSI Geoportal*).

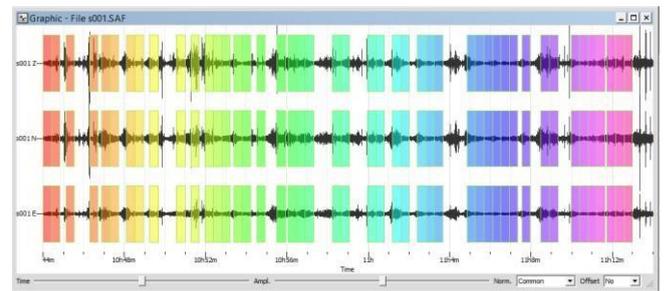
2.2. Prosedur Percobaan

Salah satu data masukan dalam program ini adalah data berformat *.saf* yang merupakan hasil konversi data pengukuran seismometer. Informasi yang akan ditampilkan berupa data stasiun, seperti komponen vertikal, horizontal utara-selatan, dan horizontal timur-barat, serta keterangan waktu saat pengukuran dan grafik hasil pengukuran seperti Gambar 3.



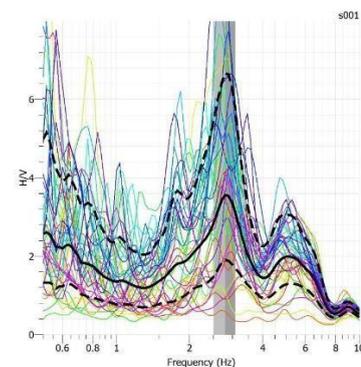
Gambar 3. Data masukan hasil pengukuran seismometer pada *Geopsy*.

Berdasarkan data masukan di atas, langkah berikutnya adalah pengolahan H/V untuk data *single-station* dengan melakukan beberapa konfigurasi terhadap data masukan seperti Gambar 4.



Gambar 4. Pemilihan *number of window*.

Konfigurasi yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan pemilihan *Number of Window* secara auto karena semakin besar jumlah jendela hasil pengolahan H/V akan semakin baik. Konfigurasi data *output* ke alamat *directory* untuk menyimpan hasil pengolahan H/V dengan *Geopsy* seperti Gambar 5.



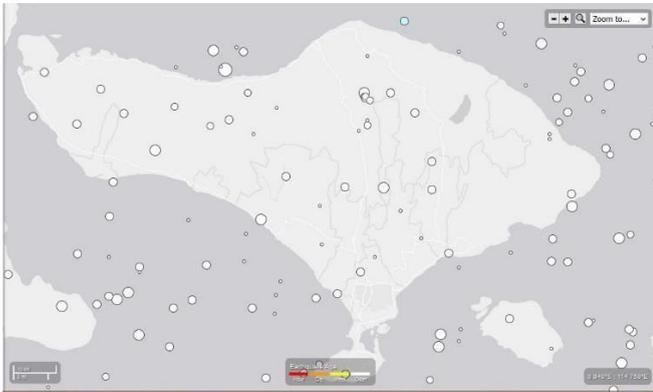
Gambar 5. Hasil pengolahan H/V pada *Geopsy*.

Hasil pengolahan H/V menunjukkan nilai frekuensi dominan (f_0) dan amplitudo maksimum (A_0). Nilai frekuensi dominan yang kecil dan amplitudo maksimum yang besar akan mengakibatkan tingginya nilai kerentanan seismik (K_g) berdasarkan persamaan (10).

Dengan nilai kerentanan seismik yang besar mengindikasikan adanya litologi daerah permukaan yang diisi oleh sedimen lunak. Sebaliknya dengan nilai kerentanan seismik yang rendah mengindikasikan keberadaan litologi daerah permukaan yang lebih keras. Nilai frekuensi yang diperoleh dapat menjadi formula untuk menghasilkan nilai V_{s30} dengan persamaan (7). Nilai V_{s30} digunakan untuk menentukan tahanan tanah dengan mengacu pada klasifikasi tanah berdasarkan NEHRP yang terbagi ke dalam 5 *site class*, diantaranya *hard rock*, *rock*, *very dense soil* and *soft rock*, *stiff soil profile*, dan *soft soil profile*.

Dalam penentuan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) harus diketahui riwayat gempa yang pernah terjadi dekat daerah penelitian. Riwayat gempa yang digunakan dalam penelitian ini yaitu peristiwa gempa dekat daerah Singaraja yang terjadi tanggal 17 Desember 1979 dengan lokasi pusat gempa 8.469° S dan 115.767° E berkekuatan 6.4 SR pada kedalaman 55.4 km

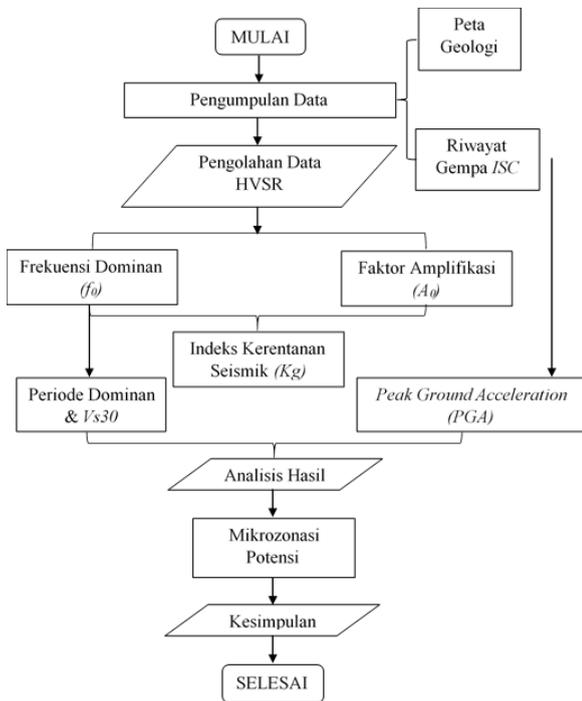
bersumber dari *International Seismological Center* (ISC) sebagaimana diperlihatkan Gambar 6.



Gambar 6. Lokasi pusat gempa 17 Desember 1979.

Perhitungan percepatan getaran tanah maksimum (PGA) dapat ditentukan berdasarkan pendekatan empiris Mc. Guire R.K pada persamaan (8). Selain itu, persamaan lain dalam perhitungan percepatan getaran tanah maksimum/*Peak Horizontal Acceleration* (PHA) berdasarkan persamaan Boore dkk, 1993 dapat dilakukan sesuai persamaan (9). Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) mengindikasikan nilai percepatan tanah tertinggi yang dapat dilalui gelombang seismik. Hal ini berguna untuk mengetahui karakteristik litologi daerah struktur tanah.

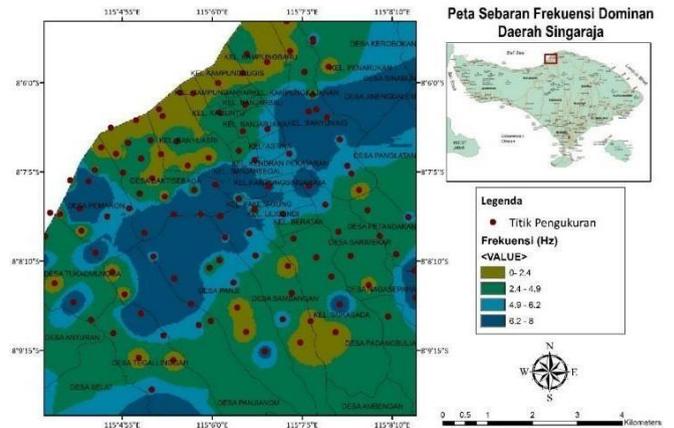
Seluruh tahapan pembuatan peta dalam penelitian ini melalui proses sistematis dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir penelitian.

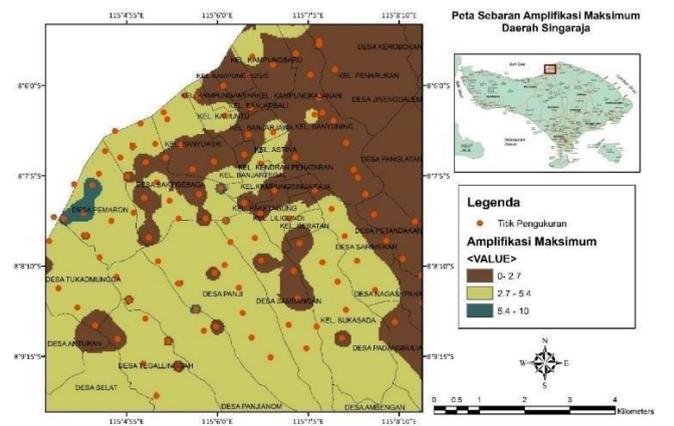
3. Hasil dan pembahasan

Indeks Kerentanan Seismik (*Seismik Vulnerability Indeks*) merupakan nilai intensitas suatu daerah lokal terhadap rambatan gelombang seismik yang digunakan untuk mengetahui karakteristik tanah dan potensi bahaya gempa bumi daerah lokal. Kerentanan seismik dipengaruhi oleh nilai frekuensi dominan seperti ditunjukkan pada Gambar 8 dan amplifikasi maksimum sebagaimana ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 8. Peta sebaran frekuensi dominan daerah Singaraja.

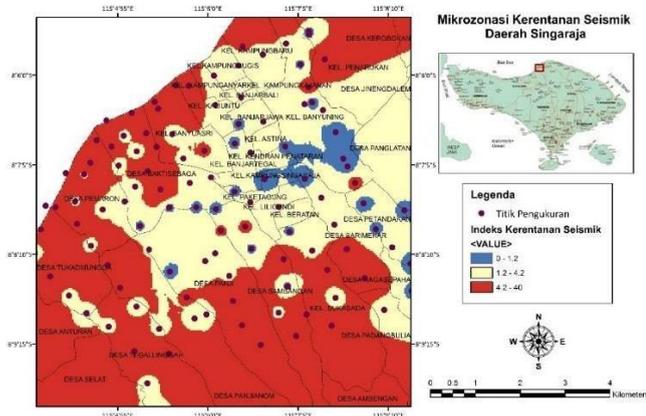
Nilai frekuensi yang rendah cenderung akan menimbulkan indeks kerentanan seismik yang tinggi, jika diikuti oleh nilai amplifikasi maksimum yang tinggi. Sebaliknya, nilai frekuensi yang tinggi lebih cenderung akan meredam nilai indeks kerentanan seismik di suatu wilayah.



Gambar 9. Peta sebaran amplifikasi maksimum daerah Singaraja.

Daerah Singaraja didominasi dengan nilai amplifikasi maksimum yang rendah menengah, hanya sebagian kecil wilayah yang memiliki nilai amplifikasi maksimum tinggi. Namun, hal ini belum tentu membuat daerah Singaraja didominasi oleh nilai kerentanan

seismik yang rendah sebagaimana pada Gambar 10. masih memungkinkan daerah ini didominasi nilai kerentanan seismik yang tinggi.



Gambar 10. Mikrozonasi kerentanan seismik daerah Singaraja.

Terlihat bahwa daerah Singaraja didominasi oleh nilai sebaran kerentanan seismik yang cukup tinggi. Terlebih daerah utara pinggir pantai yang memang didominasi oleh aluvial. Kerentanan seismik rendah hanya mengisi sebagian kecil wilayah ini, selebihnya merupakan daerah dengan kerentanan seismik menengah-tinggi.

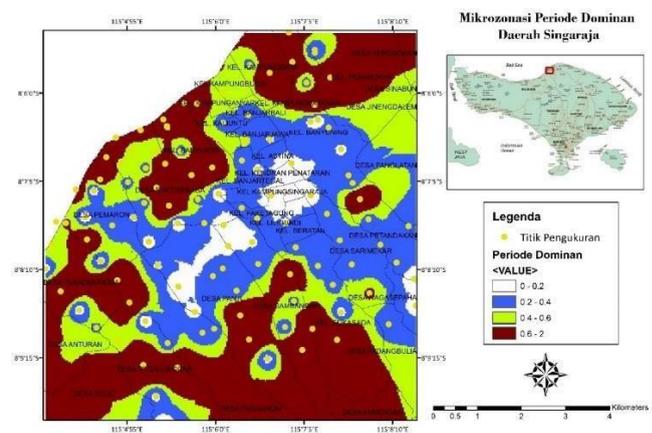
Korelasi Periode Dominan dan kecepatan rata-rata *shear* (V_s30) dapat digunakan untuk mengidentifikasi kelas tanah. Kelas tanah tersebut terbagi dalam 4 bagian sebagaimana yang telah dirumuskan oleh Zhao dan Xu.

Tabel 2. Korelasi periode dominan dan kelas tanah NEHRP (Zhao dan Xu, 2004).

Kelas Tanah	Periode Dominan (s)	Kecepatan Rata-Rata Gelombang Shear (m/s)	Kelas Tanah NEHRP
SC I: (rock/stiff soil)	$T < 0.2$ s	$V_s30 > 600$ m/s	A+B (hard rock+rock)
SC II: (hard soil)	$0.2 \text{ s} \leq T < 0.4$ s	$300 \text{ m/s} < V_s30 \leq 600$ m/s	C (very dense soil and soft rock)
SC III: (medium soil)	$0.4 \text{ s} \leq T < 0.6$ s	$200 \text{ m/s} < V_s30 \leq 300$ m/s	D (stiff soil)
SC IV: (soft soil)	$T \geq 0.6$ s	$V_s30 \leq 200$ m/s	E (soft soil)

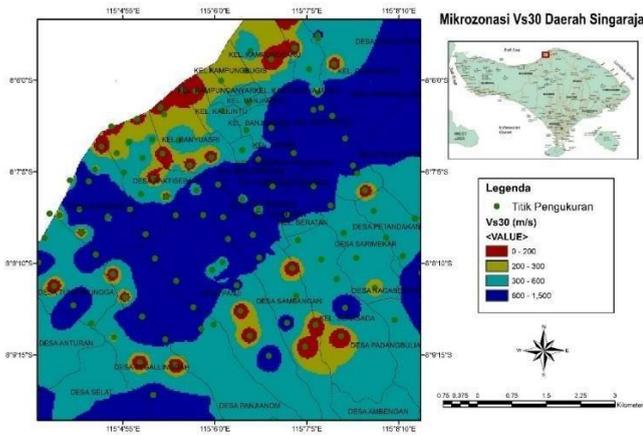
Klasifikasi ini menjadi dasar dalam penelitian untuk menentukan jenis tanah berdasarkan pengolahan data periode dominan dan kecepatan rata-rata *shear* (V_s30) di daerah Singaraja. Sama halnya dengan identifikasi kerentanan seismik, parameter ini digunakan untuk mengetahui karakteristik jenis tanah dan potensi terhadap guncangan gempa bumi. Parameter periode dominan dan V_s30 digunakan sebagai bahan korelasi untuk memperkuat keterkaitan karakteristik jenis tanah berdasarkan parameter-parameter yang ada.

Perhitungan periode dominan pada Gambar 11 berbanding terbalik dengan frekuensi dominan, periode dominan yang tinggi mengindikasikan kelas tanah yang cenderung lunak. Sementara perhitungan V_s30 pada Gambar 12 dipengaruhi oleh frekuensi dan saling berbanding lurus dengan frekuensi dominan. Semakin besar nilai V_s30 maka litologi tanah cenderung lebih keras.



Gambar 11. Mikrozonasi periode dominan daerah Singaraja.

Berdasarkan sebaran periode dominan daerah Singaraja, diketahui bahwa nilai periode tinggi cenderung mendominasi dibandingkan dengan periode rendah. Secara keseluruhan nilai periode dominan daerah Singaraja cukup berkorelasi dengan kerentanan seismik daerah ini. Keberadaan nilai periode dominan yang tinggi diikuti dengan kerentanan seismik yang tinggi, memperkuat ketersediaan litologi yang cenderung lunak di sebagian besar wilayah Singaraja. Asumsi ini akan lebih relevan dengan adanya penentuan mikrozonasi kecepatan rata-rata *shear* pada kedalaman 30 meter (V_s30). Penentuan nilai ini berkaitan erat dengan nilai frekuensi dan menjadi parameter dasar mengidentifikasi karakteristik tanah sebagai acuan pembangunan di daerah Singaraja.

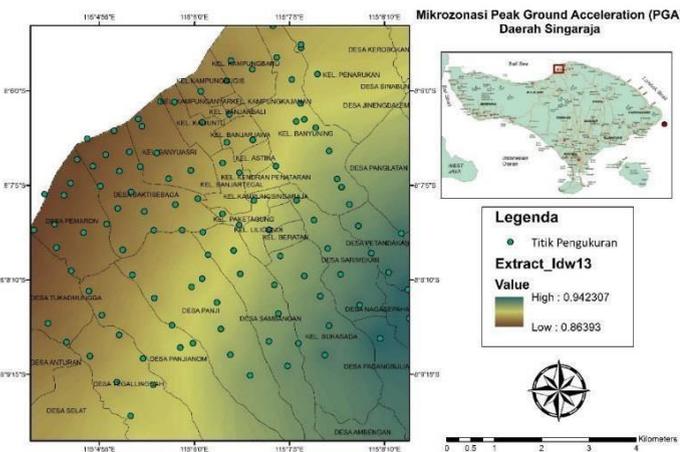


Gambar 12. Mikrozonasi Vs30 daerah Singaraja.

Berdasarkan data mikrozonasi Vs30 daerah Singaraja, diperoleh sebaran nilai yang cenderung menengah-tinggi. Hal ini mengindikasikan karakteristik tanah sebagai acuan pembangunan daerah Singaraja relatif aman.

Sementara itu, korelasi antara periode dominan dan Vs30 daerah Singaraja menunjukkan litologi lunak pada wilayah pesisir pantai utara daerah Singaraja. Di mana secara geologi daerah pesisir pantai utara daerah Singaraja diisi oleh material alluvial, yang lunak dan cukup rentan terhadap potensi gempa bumi.

Peak Ground Acceleration (PGA) merupakan nilai percepatan maksimum gelombang seismik di bawah permukaan. Percepatan yang dimaksud adalah percepatan tertinggi yang dapat dilalui gelombang seismik di bawah permukaan dari beberapa percepatan yang dapat merambat ditampilkan pada Gambar 13.

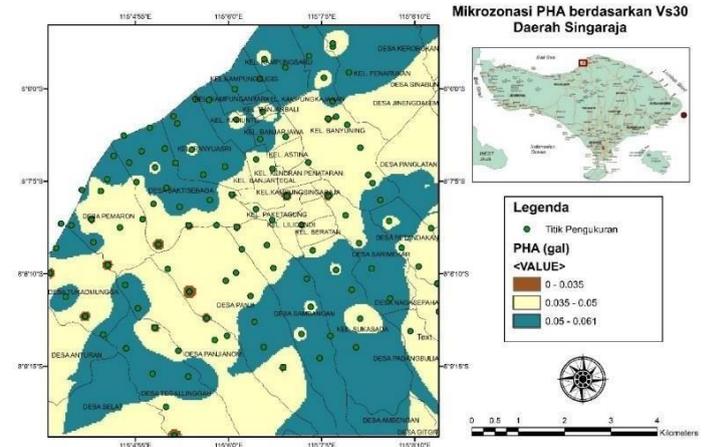


Gambar 13. Mikrozonasi PGA daerah Singaraja.

Penentuan nilai PGA dipengaruhi oleh nilai magnitudo gempa dan jarak hiposenter pusat gempa. PGA dapat ditentukan menggunakan nilai referensi suatu gempa terdekat dengan lokasi perhitungan yang

akan diukur. Dalam penelitian ini digunakan referensi gempa terdekat dengan daerah penelitian.

Nilai PGA daerah Singaraja relatif konstan pada nilai 0.8-0.9 gal secara keseluruhan pada batuan *basement* berdasarkan data *Peak Ground Acceleration* (PGA) menggunakan perhitungan Mc. Guirre seperti terlihat pada Gambar 13. Berbeda halnya dengan data *Peak Horizontal Acceleration* (PHA) berdasarkan persamaan Boore et al. pada Gambar 14 berikut.



Gambar 14. Mikrozonasi PHA daerah Singaraja.

Klasifikasi nilai PGA dapat digunakan untuk menentukan skala potensi bahaya gempa bumi berdasarkan *mercalli scale* (USGS). Hal ini dapat menjadi pertimbangan terhadap mitigasi bencana gempa bumi di suatu wilayah. Mengingat nilai PGA merupakan indikasi potensi skenario terburuk yang dapat ditimbulkan bencana gempa bumi, maka perhitungan nilai PGA ini sangat diperlukan.

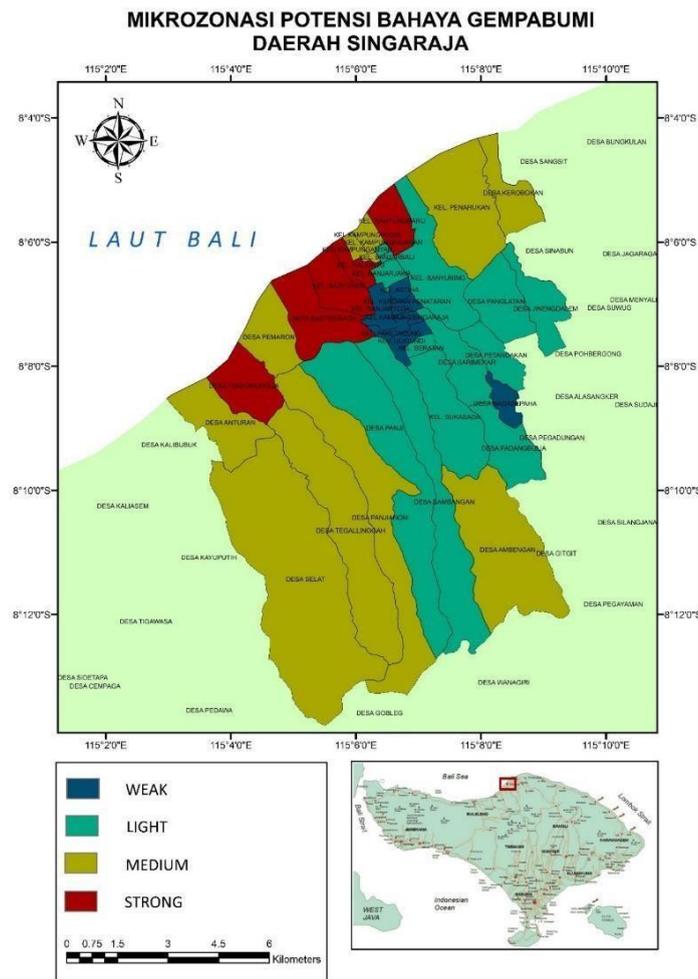
Peak Horizontal Acceleration (PHA) notabennya percepatan ini terjadi pada batuan sedimen kedalaman 30 meter dan dapat menimbulkan potensi bahaya gempa bumi. Data menunjukkan bahwa nilai PGA berkisar antara 0.035-0.061 gal. Hal ini mengindikasikan potensi bahaya berupa getaran yang dirasakan tergolong moderat dan menimbulkan potensi kerusakan pada skala menengah.

Secara historis berdasarkan katalog gempa merusak dari Supartoyo, dkk (2014), gempa yang terjadi di daerah Karangasem pada 17 Desember 1979 silam sangat merusak. Terbukti di daerah Karangasem sendiri menelan banyak korban, dengan adanya 5 orang meninggal, 34 orang luka berat, 250 orang luka ringan, dan beberapa bangunan roboh. Di daerah Abang 17 orang meninggal, 9 orang luka berat, 3000 orang luka ringan, beberapa bangunan roboh. Di daerah Culik 1 orang meninggal, 2 orang luka berat, 4 orang luka ringan, beberapa bangunan retak. Di daerah Bebanden 1 orang meninggal, 2 orang luka berat, 4 orang luka ringan, bangunan rusak dan retak, retakan tanah sepanjang ±5km. Data ini berdasarkan katalog gempa

bumi merusak di Indonesia tahun 1612-2014 oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.

Berdasarkan hasil pengolahan, dapat dilakukan analisis potensi bahaya gempa bumi. Mikrozonasi kerentanan seismik sebagai media indikasi karakteristik tanah serta mikrozonasi periode dominan dan Vs30,

sebagai bahan pertimbangan dalam pembangunan kota Singaraja, dilengkapi dengan mikrozonasi *Peak Ground Acceleration* (PGA) sebagai media indikasi potensi bahaya gempa bumi. Analisis ketiganya dituangkan dalam Gambar 16 dan Tabel 3 berikut.



Gambar 16. Mikrozonasi potensi bahaya gempa bumi daerah Singaraja.

Tabel 3. Klasifikasi potensi bahaya gempa bumi daerah Singaraja.

No	Site Class	K-g	To	Vs30	Desa/Kelurahan
1	Weak	< 1.2	T < 0.2 s	Vs30 > 600 m/s	Nagasepaha, Astina, Banjar Tegal, Kendran Penataran, Liligundi, Paket Agung, Kampung Singaraja
2	Light	< 4.2	0.2 s ≤ T < 0.4 s	300 m/s < Vs30 ≤ 600 m/s	Jinengdalem, Panji, Padangbulia, Panglatan, Petandakan, Sambangan, Sarimekar, Banjar Bali, Banjar Jawa, Banyuning, Beratan, Kampung Kajanan, Sukasada
3	Moderate	≤ 40	0.4 s ≤ T < 0.6 s	200 m/s < Vs30 ≤ 300 m/s	Ambengan, Anturan, Kerobokan, Panjianom, Pemaron, Selat, Tegallinggah, Kampung Anyar, Penarukan, Kampung Bugis
4	Strong	≤ 40	T ≥ 0.6 s	Vs30 ≤ 200 m/s	Kampung Baru, Tukadmungga, Kaliuntu, Banyuasri, Baktisebaga,

Analisis mikrozonasi potensi bahaya gempa bumi daerah Singaraja dapat diklasifikasikan dalam 4 bagian, terbagi dalam zona *weak*, *light*, *medium*, dan *strong*. Klasifikasi ini dilakukan berdasarkan berbagai macam analisis parameter yang ada, diantaranya mikrozonasi kerentanan seismik, mikrozonasi periode dominan dan Vs30, serta mikrozonasi *Peak Ground Acceleration* (PGA) daerah Singaraja. Akumulasi berbagai parameter tersebut menghasilkan 4 bagian potensi bahaya gempa bumi daerah Singaraja dan sekitarnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, maka dapat disimpulkan kerentanan seismik daerah Singaraja didominasi oleh nilai sebaran kerentanan seismik yang cukup tinggi berkisar antara 4.2-40. Terlebih daerah utara pinggir pantai yang memang didominasi oleh aluvial. Kerentanan seismik rendah hanya mengisi sebagian kecil wilayah ini, selebihnya merupakan daerah dengan kerentanan seismik menengah-tinggi. Korelasi antara periode dominan dan Vs30 daerah Singaraja menunjukkan litologi lunak pada wilayah pesisir pantai utara daerah Singaraja. Di mana secara geologi daerah pesisir pantai utara daerah Singaraja diisi oleh material alluvial, yang lunak dan cukup rentan terhadap potensi gempa bumi. *Ground motion* daerah Singaraja berkisar pada nilai 0.035-0.061 g. Hal ini mengindikasikan potensi bahaya yang ditimbulkan dapat mencapai skala V dalam *mercalli scale*. Getaran yang dirasakan tergolong moderat dan menimbulkan potensi kerusakan pada skala menengah. Pertimbangan ini perlu diperhatikan dalam rangka mitigasi bencana dan pembangunan daerah Singaraja. Analisis mikrozonasi potensi bahaya gempa bumi daerah Singaraja dapat diklasifikasikan dalam 4 bagian, terbagi dalam zona *weak*, *light*, *medium*, dan *strong*. Klasifikasi ini dilakukan berdasarkan parameter-parameter yang ada, diantaranya mikrozonasi kerentanan seismik, mikrozonasi periode dominan dan Vs30, serta mikrozonasi *Peak Ground Acceleration* (PGA) daerah Singaraja. Berdasarkan analisis potensi bahaya gempa bumi, daerah utara pesisir pantai Singaraja cukup berpotensi kuat terhadap skenario terburuk bahaya gempa bumi.

Daftar Pustaka

- Afnimar. (2009) *Seismologi*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Douglas, J. (2004) *Ground Motion Estimation Equation 1964-2003*, Department of Civil dan Environmental Engineering Imperial College London South Kensington Campus, United Kingdom.
- Gurler, E.D., Y. Nakamura, J. Saita, T. Sato. (2000) Local Site Effect of Mexico City Based on Microtremor Measurement, *6th International Conference on Seismic Zonation*, California, 12-15 November.
- Hadiwidjojo, P. (1998) *Peta Geologi Lembar Bali Nusatenggara*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Hidayati, S. (2010) *Pengenalan Seismologi Gunung api. Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunung api Baru*, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- Kanai, K. (1983) *Seismology in Engineering*, Tokyo University, Japan.
- Kramer, Steven L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc, USA.
- Nakamura, Y. (2000) *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Application*, Tokyo University, Japan.
- Nakamura, Y. (2008) On the H/V Spectrum. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, 12-17 Oktober.
- Nakamura, Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute*, 30, 25-33.
- Nelson. (2003) *Earthquake and the Earth Interior*, Tulane University, USA.
- Supartoyo, Surono, dan Tofani P, Eka (2014). *Katalog Gempa bumi Merusak di Indonesia Tahun 1612- 2014*, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- Subardjo. (2001) Intensitas Seismik dan Percepatan Tanah untuk Beberapa Kota di Indonesia, *J. BMG*, 2 (3): 37-41.
- Zhao, J.X dan Xu, H. (2004) *Calibration of a Combined Site Parameter of Vs30 and Bedrock depth for Ground Motion Records from Japan*. Southwest Jiatong University, China.