

Diterima : 18 Mei 2023 | Selesai Direvisi : 08 Juni 2023 | Disetujui : 09 Juni 2023 | Dipublikasikan : Juli 2023

DOI : <http://dx.doi.org/10.24853/jk.14.2.93-108>

Copyright © 2023 Jurnal Konstruksia

This is an open access article under the CC BY-NC licence (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Time History Sintetik di Wilayah Bogor Ditinjau dari Deagregasi Hazard

Pranowo Rahayu¹, dan Widodo Pawirodikromo¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia (UII), Jl. Kaliurang, Sleman, Yogyakarta 55584

Email korespondensi: omprans@yahoo.com

ABSTRAK

Indonesia dikenal selain sebagai negeri yang dikeliling cincin gunung api, juga wilayah yang paling kerap diguncang gempa. Salah satu, yang terdahsyat dizaman modern ini, adalah gempa yang menyebabkan tsunami Aceh 2004 yang memiliki kekuatan 9,1 – 9,3 Mw juga termasuk gempa besar di dunia. Salah satu gempa besar lain adalah gempa Cianjur 2022 yang berkekuatan 5,6 Mw. Salah satu cara yang dilakukan untuk mengurangi risiko gempa adalah mendesain bangunan dengan konsep tahan gempa. Dalam perencanaan bangunan dengan konsep tahan gempa terutama gedung tinggi dibutuhkan data *time history* dalam merencanakan beban gempa. ketersediaan data *time history* di Indonesia saat ini masih menjadi kendala. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk menganalisis Bangunan Tinggi di Wilayah Bogor yang dapat dijadikan referensi dalam mendesain beban gempa untuk perencanaan gedung. Penentuan UHS (*Uniform Hazard Spectrum*) dilakukan dengan metode probabilistik, kemudian dilanjutkan dengan melakukan *spectral matching* untuk mendapatkan ground motion sintetik, lalu tahap berikutnya menggunakan *Deep soil* untuk mengetahui *Shear Stress Ratio* dan *Tripartite Graph*. Hasil dari penelitian ini diperoleh risiko gempa yang direpresentasikan dalam bentuk nilai percepatan untuk Wilayah Bogor pada UHS memiliki nilai percepatan $T = 0$ detik adalah 0.3537 g, $T = 0.2$ detik adalah 0.8689 g, dan $T = 1$ detik adalah 0.2802 g. Sumber gempa Sesar Cimandiri mendominasi sebesar 23,775% yang diprediksi memiliki kontribusi terbesar terhadap risiko gempa. Hasil *Spectral Matching* dengan *Big Bear 01 1992 Wrightwood - Swarthout* yang mempunyai magnitude 6.46 dengan mekanisme strike slip dan jarak 70.94 km yang kurang lebih sama dengan *Deagregasi Hazard* yang dimaksud. Hasil respons spektra memperlihatkan bahwa hasil dari matching begitu tinggi dan turun bertemu dengan respons spektra yang ada pada layer 1, 2, dan 3 di detik ke sekitar 0.74.

Kata Kunci: Gempa Bogor, Metode Probabilitas (PSHA), UHS (*Uniform Hazard Spectrum*), *Spectral Matching*, *Tripartite Graph*.

ABSTRACT

*Indonesia is known apart from being a country surrounded by a ring of volcanoes, it is also the region that is most frequently shaken by earthquakes. One of the most powerful in modern times is the earthquake that caused the 2004 Aceh tsunami which had a strength of 9.1 – 9.3 Mw which is also one of the largest earthquakes in the world. Another major earthquake is the 2022 Cianjur earthquake with a magnitude of 5.6 MW. One way to reduce the risk of earthquakes is to design buildings with an earthquake-resistant concept. In planning buildings with an earthquake resistant concept, especially tall buildings, time history data is needed in planning earthquake loads. The availability of time history data in Indonesia is still an obstacle. The purpose of this research is to analyze tall buildings in the Bogor area which can be used as a reference in designing earthquake loads for building planning. Determination of the UHS (*Uniform Hazard Spectrum*) was carried out using a probabilistic method, followed by spectral matching to obtain synthetic ground motion, then the next step was using Deep soil to*

determine the Shear Stress Ratio and Tripartite Graph. The results of this study obtained that earthquake risk is represented in the form of an acceleration value for the Bogor Region at UHS having an acceleration value of $T = 0$ seconds is 0.3537 g, $T = 0.2$ seconds is 0.8689 g, and $T = 1$ second is 0.2802 g. The source of the earthquake is the Cimandiri Fault which dominates by 23.775% which is predicted to have the largest contribution to earthquake risk. Spectral Matching results with Big Bear 01 1992 Wrightwood - Swarthout which has a magnitude of 6.46 with a strike slip mechanism and a distance of 70.94 km which is more or less the same as the Deaggregation Hazard in question. The results of the spectral response show that the results of the matching are so high and fall to meet the spectral responses in layers 1, 2 and 3 in seconds to around 0.74.

Keywords: PSHA (Probability Seismic Hazard Analysis), UHS (Uniform Hazard Spectrum), Spectral Matching, Tripartite Graph.

1. PENDAHULUAN

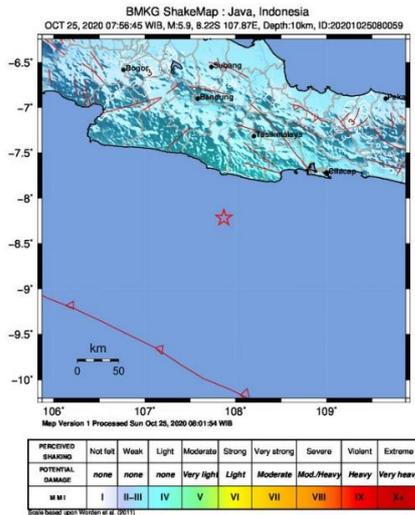
Indonesia lebih dikenal sebagai negeri yang dikelilingi cincin gunung api, oleh sebab itu wilayah yang paling kerap diguncang gempa. Gempa yang mempunyai kekuatan 9,1 - 9,3 Mw sehingga menyebabkan tsunami Aceh 2004 juga termasuk gempa besar dunia adalah salah satu yang terdahsyat di zaman modern ini. Salah satu gempa besar lain adalah gempa Yogyakarta 2006 dengan besaran 6,3 Mw, Dan juga gempa Pangandaran yang kerap kali terjadi, namun dalam contoh ini adalah gempa Pangandaran 2020 yang berkekuatan 5.9 Mw dan mengakibatkan 43 rumah rusak.

Gempa bumi merupakan pelepasan energi tiba-tiba di dalam kerak Bumi, dalam hal ini adalah selubung Bumi bagian atas yang biasanya diakibatkan oleh pergerakan sepanjang bidang sesar atau oleh adanya pergerakan magma pada aktivitas vulkanik. Di Indonesia sendiri, gempa bumi besar umumnya terjadi akibat proses subduksi lempeng yang menimbulkan sesar. Pelepasan energi pada sesar dari lempeng yang dapat ditimbulkan oleh gelombang gempa yang merambat di permukaan Bumi. Jika energi yang dilepaskannya besar dan fokusnya dangkal, getaran ini menimbulkan kerusakan besar pula di permukaan Bumi. Besaran gempa bumi (*magnitude*) ditentukan dari besarnya energi yang dihasilkan akibat proses pergerakan di kerak Bumi. Sedangkan intensitas gempa bumi ditentukan dari kedalaman fokus

gempa bumi, jarak terhadap episentrum dan sifat batuan yang dilaluinya.

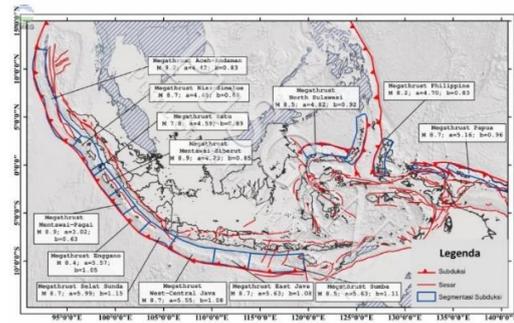
Memang dari awal prekursor atau kejadian gempa dan tsunami dapat dikatakan hampir tidak ada. Tanda-tanda pada kearifan lokal masih sulit untuk dirumuskan atau digeneralisasi. Ancaman gempa merupakan risiko hidup di jalur gempa, yakni di sekitar pertemuan lempeng-lempeng tektonik, yang faktor bahayanya atau dapat disebut kapan persisnya dan seberapa besar terjadi, serta di mana saja yang akan terlanda gempa sangat sulit untuk diketahui. Tapi, sebenarnya cukup banyak upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi risikonya.

Mitigasi atau upaya untuk mengurangi bencana akibat gempa sangat diperlukan pengetahuan tentang sumber bencana gempa. Daripada itu, riset mengenai gempa mutlak perlu terus ditingkatkan guna mempertajam perkiraan tentang kejadian gempa di masa yang akan datang. Manfaat lainnya adalah sebagai bahan untuk merumuskan langkah yang diperlukan mulai dari rencana mitigasi, analisis risiko, sampai dengan mikrozonasi gempa. Yang terakhir ini berguna antara lain untuk penataan ruang dan persyaratan pembangunan konstruksi di zona gempa.



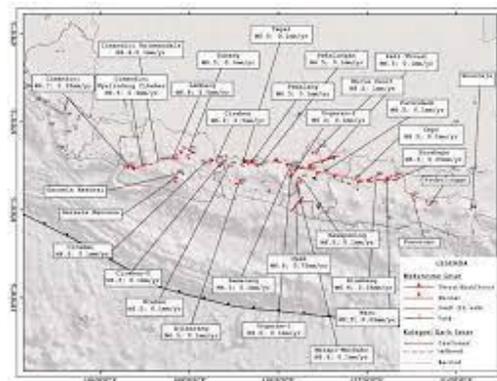
Gambar 1. Peta Risiko Bencana Gempa Bumi per 25 Oktober 2020

Indonesia merupakan wilayah rawan bencana dikarenakan diapit oleh 3 lempeng besar dunia yang bergerak saling mendekati satu sama lain yaitu lempeng Pasifik, Indo-Australia, dan Eurasia. Beberapa kali gempa dengan kekuatan yang cukup besar pernah terjadi di Indonesia dan menyebabkan banyak korban jiwa. Dari Gambar 1. dapat dilihat bahwa Pangandaran dikenal dengan wilayah yang memiliki indeks risiko gempa yang tinggi. Indeks risiko pada suatu daerah di Pangandaran tidak semuanya merata. Di tempat penelitian sendiri memiliki tingkat risiko yang tinggi terhadap bencana gempa karena letaknya yang relatif dekat dengan sumber gempa dan tingkat kepadatan penduduk yang cukup tinggi. Daerah penelitian rawan terhadap gempa yang berasal dari zona subduksi lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia di sebelah selatan Pulau Jawa. Kecepatan penyusupan lempeng tektonik di selatan Pulau Jawa sekitar $0,6 \pm 0,7$ cm/ tahun.



Gambar 2. Sketsa Tektonik Indonesia [16]

Gambar 2 menunjukkan penyusupan antara lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia di sepanjang barat Sumatra dan selatan Pulau Jawa. Daerah penelitian ini juga rawan terhadap bencana gempa yang diakibatkan aktivitas sesar (*shallow crustal*) (Gambar 3).



Gambar 3. Shallow Crustal di Pulau Jawa [16]

Sesar Cimandiri merupakan sesar terdekat dengan daerah Bogor dengan jarak ± 75 km. Laju pergerakan (*slip rate*) sekitar 0,75 mm/tahun dengan kekuatan maksimum yang mungkin ditimbulkan sebesar 6,6 [16]. Gempa Pangandaran 2020 yang mengakibatkan 43 rumah rusak.

Ada beberapa faktor yang dapat menjadi penyebab banyaknya korban berjatuh, penyebab salah satu adalah tertimbun atau tertimpa material suatu bangunan. Salah satu upaya yang diperlukan untuk mengurangi risiko dalam bencana yang diakibatkan oleh gempa adalah mendesain bangunan dengan konsep tahan gempa. Bangunan yang roboh diakibatkan

pelaksanaan pembangunan tidak mengaplikasikan konsep bangunan tahan gempa ada banyak sehingga ketika terjadi gempa maka bangunan-bangunan tersebut akan sangat mudah untuk terjadi rusak berat. Aspek-aspek kegempaan terhadap pembangunan infrastruktur seperti gedung bertingkat dan lainnya terus dijaga.

Diperencanaan bangunan tahan gempa diperlukan beban gempa rencana. Berdasarkan permasalahan ini, maka perlu dilakukan usulan deagregasi hazard untuk wilayah Bogor terutama yang wilayahnya berdekatan dengan sumber gempa. Bila telah dibuatkan Triperta Graph maka akan diberikan kemudahan kepada pihak praktisi dalam mendesain gedung terutama Gedung yang tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Probabilistic seismic hazard analysis

Metode PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) merupakan metode yang digunakan dalam penentuan tingkat ancaman gempa. Serta kejadian gempa bumi yang tidak dapat ditentukan dengan pasti baik itu lokasi kejadian, waktu kejadian dan besaran energi.

Metode PSHA merupakan perpaduan pada aspek seismisitas yang memperhitungkan serta menggabungkan ketidakpastian dari lokasi, skala kejadian gempa dan frekuensi kejadian yang untuk mendapatkan gambaran yang menyeluruh mengenai tingkat *hazard* lokasi yang ditinjau dengan metode penentuan gempa bumi berdasarkan data kejadian gempa dan informasi geologi pada zona patahan yang ada [6]. Analisis tingkat kerawanan seismik sangat diperlukan dalam melakukan perkiraan *ground motion* untuk potensi gempa bumi yang paling mungkin terjadi secara global disuatu daerah. Masukan dasar pada analisis berupa data seismisitas, tektonik, informasi kondisi geologi disuatu wilayah dengan memperhatikan karakteristik atenuasi parameter pergerakan.

Metode probabilistik adalah metode penentuan gempa bumi yang memadukan aspek seismisitas berdasarkan data kejadian gempa dan informasi geologi pada zona patahan tertentu. Metode deterministik adalah penilaian bahaya gempa bumi dengan menggunakan skenario gempa bumi pada lokasi dan magnitudo tertentu. Kedua metode ini dipergunakan untuk memperkirakan *ground motion* dari persamaan hubungan atenuasi secara empiris, yang dinyatakan dengan magnitudo gempabumi, jarak ke tempat tertentu, kondisi tempat yang berkaitan dengan kondisi tanah dan geologi.

Metode probabilistik (PSHA) memberikan pertimbangan magnitudo gempabumi yang berbeda dengan distribusi ruang yang tepat sekitar tempat yang dipilih dan tidak hanya sebuah gempa bumi tunggal. PSHA memperhitungkan efek-efek seismisitas total yang diharapkan atas periode ukur yang ditetapkan, sifat acak kejadian gempa bumi, dan atenuasi gelombang seismik dengan jarak. Analisis bahaya gempa (*seismic hazard analysis*) bertujuan untuk memperoleh estimasi kuantitatif dari guncangan tanah (*ground-shaking*) pada suatu wilayah tertentu. Metode PSHA dikembangkan oleh Cornell (1968), kemudian Kramer (1996) melakukan analisis *seismic hazard* dengan menggunakan teori probabilitas total. Dalam beberapa penelitian tersebut hanya ketidakpastian dari parameter saja yang diukur.

$$P(Y > \dot{y}) =$$

$$\iint P(Y > \dot{y} | m, r) f_M(r) f_R(r) dr dm \quad (1)$$

dengan f_M = fungsi probabilitas dari magnitudo, f_R = fungsi probabilitas dari jarak ke sumber, $P[Y > \dot{y}; m, r]$ = probabilitas berkondisi dari karakteristik gempa Y yang lebih besar dari karakteristik gempa \dot{y} di suatu lokasi dengan kekuatan gempa M dan jarak sumber R [8].

Dengan metode PSHA merupakan yang suatu metode yang digunakan dalam analisis bahaya kegempaan berdasarkan fungsi distribusi probabilitas yang

memperhitungkan dan menggabungkan ketidakpastian dari skala kejadian gempa, lokasi dan frekuensi kejadiannya, untuk mendapatkan gambaran yang menyeluruh mengenai tingkat *hazard* suatu lokasi yang ditinjau. Hasil perhitungannya ditampilkan dalam bentuk kurva bahaya kegempaan ini yang kemudian digunakan untuk menghitung probabilitas suatu parameter getaran terjadi selama periode waktu tertentu.

Fungsi atenuasi

Didalam penilaian bahaya kegempaan ditampilkan dalam dua bentuk yaitu secara deterministik atau dengan mengambil skenario nilai gempa tertentu dan secara probabilistik atau yang mengambil semua gempa dengan kemungkinan keberulangan secara khusus.

Kedua pendekatan ini memerlukan model atenuasi gerakan tanah dalam penggunaannya. Fungsi atenuasi merupakan persamaan matematika sederhana yang menghubungkan antara parameter kegempaan di lokasi pusat gempa (Magnitude M dan jarak R) dengan parameter pergerakan tanah (spektra percepatan) di lokasi yang ditinjau. Fungsi atenuasi cenderung spesifik untuk setiap wilayah dan untuk suatu tipe patahan, misalnya atenuasi untuk *strike-slip* berbeda dengan untuk *reverse* atau *thrust fault* [19].

Salah satu data yang digunakan untuk menurunkan fungsi atenuasi adalah data *time history* yang didapatkan dari hasil pencatatan alat *accelerograph* saat kejadian. Penurunan semua model atenuasi didasarkan pada analisis statistik dan gerakan tanah terekam. Model atenuasi yang telah didapat dari penurunan ini dapat di *update* ketika data rekaman gerakan tanah terbaru telah tersedia. Bentuk *updating* beberapa fungsi atenuasi yang ada telah dapat dilihat dengan munculnya model atenuasi yang baru misalnya tahun 2006/2007 dalam

kelompok *Next Generation Attenuation* (NGA).

Meski saat ini banyak persamaan atenuasi yang dihasilkan, namun Indonesia sampai dengan saat ini belum memiliki data *ground motion* yang cukup untuk pembuatan fungsi atenuasi. Oleh karena itulah, pemakaian fungsi atenuasi dapat diturunkan dari negara lain dan juga tidak dapat dihindarkan. Pemilihan fungsi atenuasi berdasarkan pada kesamaan kondisi tektonik dan geologi dari wilayah dimana rumus atenuasi itu dibuat. Dalam dua dekade terakhir banyak persamaan atenuasi yang dihasilkan, namun hingga saat ini belum ada persamaan atenuasi yang dibuat berdasarkan data gempa yang terjadi di Indonesia sehingga persamaan atenuasi yang digunakan di Indonesia masih mengacu pada data gempa yang terjadi di negara lain. Persamaan atenuasi yang digunakan harus sesuai dengan mekanisme sumber gempa yang ditinjau. Dalam hal ini fungsi atenuasi yang dipilih adalah fungsi atenuasi [2] dan [21] pada sumber gempa subduksi, serta fungsi atenuasi [5] dan [17] pada sumber gempa *shallow crustal*.

Spektra *hazard* seragam (*Uniform Hazard Spectrum*)

Penelitian ini menggunakan program SR-Model [9]. Dalam program ini dapat menganalisis tingkat risiko gempa dengan model 3D dengan mempertimbangkan ketidakpastian penggunaan beberapa parameter input atau metode probabilistik. Ketidakpastian (*uncertainty*) ini terbagi menjadi 2 jenis yaitu *aleatory uncertainty* dan *epistemic uncertainty*. Ketidakpastian epistemic dapat diatasi dengan menerapkan model *logic tree* dalam analisis metode PSHA (Widodo, 2018).

Bila nilai SA di setiap periode T telah diperoleh maka hasilnya akan tersaji dalam bentuk UHS, setiap nilai *Spectral Acceleration* (SA) dalam grafik UHS yang merupakan kontribusi dari kemungkinan

jenis sumber, jarak gempa dan magnitudo (Widodo, 2020).

Deagregasi hazard

Perhitungan PSHA mempunyai dasar yaitu menghitung ancaman gempa berdasarkan pada kumpulan hasil dari semua kejadian gempa dan gerakan tanah yang mungkin dapat terjadi dimasa yang akan datang. Sedangkan analisis dengan kemungkinan magnitudo dan jarak dari *site* ke sumber gempa yang mana akan memberikan *hazard* terbesar pada *site* tidak terlihat jelas dalam PSHA. Tingkat ancaman gempa yang direpresentasikan dalam nilai percepatan dapat ditentukan dengan analisis metode PSHA. Memberi informasi tentang magnitudo (M) dan jarak (R) yang memiliki pengaruh dominan terhadap lokasi tinjauan belum dapat ditentukan dalam desain gempa, dalam kondisi seperti ini dirasa PSHA menjadi kurang lengkap [10].

PSHA memiliki keuntungan dari berbagai asumsi tentang sumber gempa potensial dan keberulangan gempa diintegrasikan menjadi satu dengan tiap-tiap asumsi memiliki kesempatan relatif untuk berpartisipasi dalam analisis. Diperlukan juga untuk selalu dapat menyediakan gempa desain untuk tujuan membuat keputusan dalam memilih *time history* yang tepat untuk analisis yang didasarkan pada *spectra hazard* seragam di sisi lain, kemudian menghitung parameter yang berupa durasi gerak dan lain-lain [9].

Kelemahan dari metode ini adalah ketidakmampuan membuat gerakan tanah untuk analisis gempa lanjutan seperti stabilitas lereng, interaksi tanah bangunan, dan likuifaksi yang dapat menggambarkan satu kejadian gempa. Oleh sebab itu, gempa tidak akan terjadi dalam satu kejadian gempa atau dengan sebuah magnitudo dan jarak tertentu dengan satu respon spektra. Respon spektra yang dihasilkan dari PSHA yang menunjukkan bahwa struktur pada suatu lokasi akan menerima berbagai gempa dari berbagai sumber dengan berbagai

magnitudo dan jarak secara simultan menghasilkan Respon spektra dan hal ini tidak mungkin terjadi dikenyataan.

Efek jenis tanah terhadap PGA (*Peak Ground Acceleration*)

Para Peneliti memperhatikan bahwa kondisi atau jenis tanah telah dipengaruhi oleh percepatan tanah akibat gempa, tapi juga dari jenis tanah maka jarak situs atau *site* terhadap sumber gempa juga bisa berpengaruh baik terhadap kandungan frekuensi, respons tanah, disipasi energi dan durasi efektif gempa.

Lingkup bahasan *site effect*

Lingkup pengertian *site effect* dapat berbeda-beda oleh beberapa ahli, namun demikian *site effect* secara umum dapat meliputi respons tanah setempat atau *local ground response*, efek basin atau *basin effect* dan efek kondisi topografi atau *surface topographical effect* (Stewart, dkk., 2004). Respons tanah setempat umumnya mengambil asumsi dengan tebal lapisan tanah yang ditinjau umumnya dangkal sekitar 200 meter yang berupa lapis teratas dekat dengan permukaan dan gelombang bodi (*body waves*) yang dianggap merambat secara vertikal. Analisis terhadap rambatan gelombang bodi ke permukaan tanah akan menuju pada kemungkinan adanya amplifikasi maupun deamplifikasi.

Amplifikasi

Karena amplifikasi ada pengaruhnya terhadap kondisi tanah setempat (*site effects*), maka amplifikasi dapat diperoleh dengan 2 cara, yang pertama adalah berdasarkan data rekaman respons tanah akibat gempa dari tempat-tempat yang berbeda disesuaikan dengan kejadian gempa yang sama. Umumnya yang akan dibandingkan adalah rekaman respons tanah yang alat perekamannya diatas tanah lunak terhadap keras berbatuan (*rock*). Dengan demikian respons tanahnya diberbeda lokasi di tanah

tersebut dapat disebut dengan kondisi sama atau serupa. Apabila percepatan tanah di tanah endapan atau tanah lunak lebih besar dibanding dengan percepatan tanah di tanah keras, maka hal itu berarti telah terjadi amplifikasi atau pembesaran.

Yang kedua adalah berdasarkan pada analisis numerik rembatan gelombang geser pada tanah dasar atau dapat disebut *base rock* sampai di permukaan tanah. Analisis ini dapat dipakai analisis 2 dimensi dan 3 dimensi. Metode yang dipakai dapat berupa metode diskrit maupun metode kontinu. Dimetode diskrit, lapis- lapis tanah dimodelkan sebagai suatu massa yang menggumpal, sehingga banyak massa akan bergantung dari jumlah lapisan tanah yang ada.

Model respons tanah non linier inelastik

Ada suatu hal yang paling banyak mendapat bahasan pada model diskrit yaitu kekakuan lapisan tanah. Sebagaimana diketahui bahwa perilaku umum tanah bersifat non linier. Di intensitas beban yang relatif kecil respons tanah dapat dianggap linier. Maka dari itu model respons tanah dapat dikategorikan menjadi model linier atau ekuivalen linier dan model non linier.

Didalam model Respons non linier, perilaku tanah masih bisa dijabarkan menjadi tanah yang non linier elastik ataupun non linier inelastik. Respons non linier elastik, kekakuan lapisan tanah berubah-ubah menurut waktu tetapi pada saat beban berbalik, respons tanah masih kembali mengikuti jalur semula atau dapat disebut sebagai sifat elastik. Pada lapisan respons non linier inelastik, kekakuan lapisan tanah akan berubah-ubah menurut waktu dan saat beban berbalik, respons tidak lagi kembali mengikuti jalur semula tetapi membuat jalur baru. Di beban bolak balik maka jalur respons yaitu hubungan antara tegangan geser dan regangan geser tanah yang akan membentuk garis lengkung/non linier tertutup yang dapat disebut dengan *hysteretic loops*.

Dari ketentuan perkembangan intensitas dan arah beban dinamik maka respons tanah dapat membentuk beberapa banyak *hysteretic loops*. Intensitas beban dinamik yang lebih besar cenderung dapat dibuat *hysteretic loops* lebih besar dari luasan *hysteretic* yang juga lebih besar. *Dihysteretic* yang lebih besar dikarenakan percepatan tanah akibat gempa yang besar akan berakibat di turunnya nilai modulus geser. Namun demikian luasan *hysteretic* menjadi lebih besar, padahal luasan *hysteretic* ini menunjukkan redaman material atau damping massa tanah. Oleh karena dapat disimpulkan bahwa beban percepatan tanah akibat gempa semakin besar, regangan geser dan tegangan geser tanah juga akan semakin kecil dan redaman material massa tanah akan semakin besar [12].

Modulus geser dan redaman (*shear modulus and damping curve*)

Dalam gambaran ini merupakan *Histerestic Loops* yang hanya untuk 1 siklus pembebanan. Siklus-siklus pembebanan tersebut akan berulang-ulang sesuai dengan taraf pembebanan dinamik yang ada. Sebagaimana yang terjadi sebelumnya, bila terjadi gempa yang dapat menimbulkan gelombang geser, maka suatu elemen tanah akan dibebani beban siklik dan bentuk elemen pada awal bentuk persegi kemudian akan mengalami perubahan bentuk.

Kecepatan gelombang geser, Vs

Amplifikasi lapisan tanah dinyatakan pada hubungannya dengan kecepatan gelombang geser (V_s). Agar estimasi amplifikasi lapisan tanah dapat ditentukan, perlu untuk diketahui terlebih dahulu nilai kecepatan gelombang geser pada lapisan tanah yang ditinjau. Didalam lingkup ini klasifikasi situs tanah dapat didasarkan pada kekuatan getaran gempa bumi akibat efek lokal didasarkan pada data V_s30 yang diunduh dari USGS, kecepatan gelombang geser (V_s) merupakan parameter untuk

mengevaluasi sifat yang terdapat pada dinamika tanah. Nilai kecepatan rata-rata gelombang geser dari permukaan hingga kedalaman 30 m atau dapat disebut Vs30 dapat digunakan sebagai parameter untuk menganalisa kondisi geologi dan juga tingkat kerawanan akibat gempa bumi. Menurut SNI 1726 – 2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung terdapat 5 kelas situs yaitu kelas situs A hingga E dengan struktur batuan keras hingga tanah lunak.

Triparti respons spektrum

Triparti Respons Spektrum merupakan spektrum dua dimensi yang dapat menghubungkan variabel bebas berupa periode getar struktur T dengan variabel terikat simpangan, kecepatan dan percepatan maksimum. Dari ketiga spektrum tersebut sebetulnya saling berhubungan satu sama yang lainnya. Ketiganya mempunyai fungsi yang sangat strategis. Spektrum simpangan berasosiasi dengan simpangan maksimum suatu struktur. Spektrum kecepatan akan berhubungan dengan energi kinetik ($1/2.m.v^2$) yang terkandung dalam struktur saat terjadi gempa. Selain yang itu, spektrum percepatan akan berhubungan dengan gaya geser maksimum yang bekerja pada dasar struktur.

Penggambaran respon spektra bisa dalam bentuk triparti spektrum yaitu reaksi maksimum percepatan, kecepatan dan perpindahan dalam satu grafik dapat digambarkan. Kelebihan Triparti spectrum meliputi maksimum respon dari percepatan, kecepatan dan perpindahan yang bisa diketahui pada keseluruhan rentang periode yang diinginkan. Pada desain praktis pemodelan respon spektra desain dengan bentuk respon spektra yang telah dinormalisasi dengan nilai percepatan maksimum di batuan dasar. Penyerderhanaan respon spektra desain bisa dilakukan dengan mengambil selubung dari respon spektra. Rata-rata kumpulan respon spektra ataupun nilai

rata-rata diambil dan ditambahkan dari 1 kali standar deviasi dari kumpulan respon spektra.

3. METODE

Dalam penentuan nilai-nilai parameter seismik dibutuhkan data catatan kejadian gempa. Dari data kejadian gempa yang dikumpulkan dalam penelitian ini diperoleh dari USGS (*United States of Geological Surveys*) dengan rentang waktu pengambilan dari tahun 1963 sampai dengan September 2022. Data yang diperoleh dari USGS memiliki skala magnitude bervariasi. Dari *magnitude surface, magnitude body*, atau magnitude lokal Oleh karena itu, digunakan analisis yang mengkonversi menjadi satu skala magnitude yaitu magnitude momen (Mw) dikarenakan lebih konsisten menggunakan persamaan empirik [1].

Pengumpulan dan pengolahan data gempa

Setelah dikonversikan jadi magnitude momen (Mw), masih ada pengolahan data gempa lebih lanjut yaitu memisahkan dapat gempa utama dan susulan pada menggunakan bantuan program ZMAP (Wiemer, 2001). Memasukkan data gempa susulan pada analisis PSHA akan menyebabkan peningkatan nilai seismik hazard [10].

Pemodelan sumber gempa

Ada 2 jenis sumber gempa yang akan dimodelkan dalam penelitian kali ini adalah sumber gempa subduksi dan sumber gempa *fault/patahan*. Model sumber gempa dibutuhkan untuk mendapatkan hubungan antara data kejadian gempa dan model hitungan yang akan digunakan dalam analisis PSHA untuk menentukan tingkat risiko gempa [19].

Model untuk sumber gempa memberikan gambaran frekuensi kejadian gempa, distribusi kejadian gempa dan pergeseran

relatif sumber gempa (slip-rate) di suatu sumber gempa (Irsyam et al., 2010).

Penentuan parameter sumber gempa

Parameter sumber gempa adalah representasi dari karakteristik sumber gempa yang didapat dari analisis data frekuensi kejadian gempa (Sunardi, 2013). Parameter-parameter sumber gempa yang diperlukan dalam analisis PSHA meliputi magnitude maksimum, *slip rate*, nilai *a* dan nilai *b*, dan *rate*.

Penentuan uniform hazard spectrum

Penentuan UHS (*Uniform Hazard Spectrum*) yang berupa nilai percepatan pada penelitian menggunakan bantuan program SR-Model (Makrup, 2009). Fungsi dari program ini adalah menganalisis tingkat risiko gempa model 3D dengan metode probabilistik serta mempertimbangkan ketidakpastian penggunaan dengan beberapa parameter input. Ketidakpastian (*uncertainty*) dapat dibagi 2 jenis yaitu *aleatory uncertainty* dan *epistemic uncertainty*. Pada analisis menggunakan metode PSHA, ketidakpastian epistemic dapat diatasi dengan menerapkan *modellogic tree* [13].

Analisis deagregasi hazard

Hasil dalam analisis PSHA adalah mendapatkan tingkat ancaman gempa pada titik tertentu yang direpresentasikan dalam bentuk nilai percepatan, untuk mengetahui kontribusi sumber gempa terbesar dari suatu titik ke lokasi sumber gempa dan begitu juga untuk magnitude dan jarak dominan belum diketahui. Sedangkan untuk menyediakan gempa desain dalam bentuk *time history* diperlukan data salah satu diantaranya adalah magnitude dan jarak dominan. Oleh karena itu diperlakukan analisis deagregasi hazard untuk mengetahui jarak dan magnitude dominan. Dalam penelitian ini, analisis deagregasi dilakukan dengan menggunakan bantuan program SR-Model.

Spektrum respons

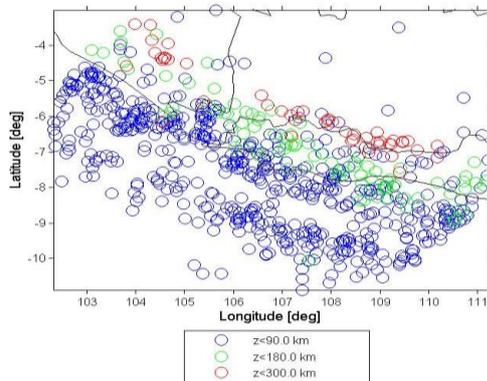
Suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk kurva antara periode struktur *T* atau dapat disebut dengan Respon Spektrum, yang dengan beberapa respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Beberapa respon maksimum tersebut dapat berupa simpangan maksimum atau dapat disebut *spectral displacement*, *SD*, kecepatan maksimum atau dapat disebut *spectral velocity*, *SV* dan percepatan maksimum atau dapat juga disebut *spectral acceleration*, *SA*, suatu massa struktur dengan derajat kebebasan tunggal/SDOF (*Single Degree of Freedom*). Terdapat dua macam respons spektrum yaitu respons spektrum elastik dan respons spektrum inelastik. Spektrum elastik merupakan suatu spektrum respons spektrum yang didasarkan atas respon elastik suatu struktur dengan SDOF, berdasarkan rasio redaman dan beban gempa tertentu. Sedangkan spektrum inelastik (desain respons spektrum) merupakan spektrum diturunkan dari spektrum elastik dengan tingkat daktilitas tertentu.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan dan pengolahan data gempa

Batas administrasi pengambilan data gempa berada pada longitude 102.039° – 111.146° dan latitude 3.56° – 10.47°. Berdasarkan data dari USGS diperoleh data kejadian yang tercatat dari tahun 1963 – 2022 dengan magnitude \leq (lebih dari atau sama dengan 5) dan kedalaman < 300 km sebanyak kejadian gempa di daerah penelitian. Setelah pengumpulan data selesai, dilanjutkan dengan pengolahan data gempa yang diawali dengan mengkonversi menjadi satu skala magnitude yaitu magnitude momen (*M_w*). Setelah proses konversi selesai dilanjutkan dengan memisahkan data gempa utama dan ikutan. Dari hasil analisis menggunakan program ZMAP diperoleh hasil dari proses *declustering* berupa gempa-gempa utama atau gempa

yang independen (*mainshock*) yang berjumlah 475 kejadian (*event*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Data Gempa Utama Tahun 1963-2022

Pemodelan sumber gempa

Penentuan model sumber gempa dapat dilakukan dengan melakukan interpretasi terhadap kondisi seismoteknik, geologi, dan geofisika berdasarkan data kejadian gempa dan penelitian terdahulu [19].

Tabel 1. Parameter Sumber Gempa Subduksi untuk Bangunan Gedung di Bogor Green Forest [16]

<i>N</i>	<i>Pemodelan</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	α	β	<i>Rate</i> (<i>v</i>)	<i>Mmax</i>
1	Megathrust South Sumatera	6.03	1.13	13.887	2.602	2.399	9
2	Megathrust Jawa 1	6.11	1.16	14.071	2.671	2.042	8.9
3	Megathrust Jawa 2	6.25	1.22	14.393	2.810	1.413	8.9
4	Megathrust Jawa 3	6.21	1.13	14.302	2.602	3.631	8.9
5	Benioff South Sumatera	5.92	1.12	13.634	2.579	2.089	8.9
6	Benioff Jawa 1	6.12	1.15	14.094	2.648	2.344	8.8
7	Benioff Jawa 2	6.13	1.21	14.117	2.787	1.202	8.9
8	Benioff Jawa 3	6.11	1.28	14.071	2.948	0.513	8.8

Sumber-sumber gempa yang dimodelkan pada penelitian terdiri dari sumber gempa subduksi dan patahan. Adapun sumber-sumber gempa yang memiliki kontribusi risiko terhadap bencana gempa bumi.

Penentuan parameter sumber gempa

Parameter-parameter sumber gempa diperlukan parameter input dalam analisis PSHA. Penentuan nilai-nilai parameter PSHA dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bantuan program ZMAP dan juga berdasarkan penelitian terdahulu. Hasil analisis disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Data dan *Fault* untuk Bangunan Gedung di Bogor Green Forest [16]

<i>No</i>	<i>Segmen</i>	<i>Slip Rate</i>	<i>Di</i>	<i>T</i>	<i>Botom</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>Rate</i> (<i>v</i>)
1	Enggano	5	4.5	3	20	1	4.5	0.33
			5				27	6
			W					
2	Kumering North	1.2	4.9	3	20	1	4.9	0.80
		5	06				9	7
3	Kumering South	1.2	4.8	3	20	1	4.8	0.68
		5	34				9	4
4	Semangko Barat A	8	4.6	3	20	1	4.6	0.49
			95				1	6
5	Semangko Barat B	8	4.6	3	20	1	4.6	0.47
			77				1	5
6	Semangko Timur A	5	4.3	3	20	1	4.3	0.21
			29					3
7	Semangko Timur B	3	4.1	3	20	1	4.1	0.15
			79				1	1

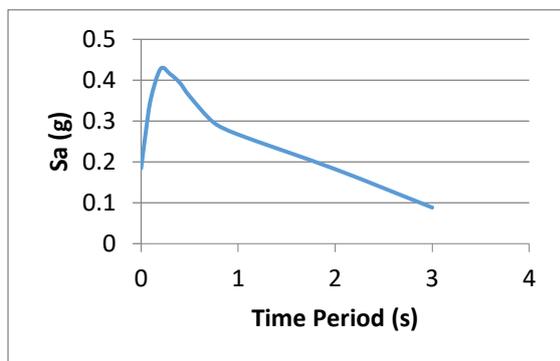
<i>N o</i>	<i>Segmen</i>	<i>Slip Rate</i>	<i>Di p</i>	<i>T o p</i>	<i>Bot tom</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>Ra te (v)</i>
8	Sema ngko Grabe n	3	9 0	3	20	1	4.1 07 1	0. 12 8
9	Ujung Kulon A	1 0	9 0	3	20	1	4.7 74	0. 59 4
1 0	Ujung Kulon B	1 0	9 0	3	20	1	4.8 28	0. 67 3
1 1	Ciman diri	0. 5 5	4 5 S	3	18	1	3.4 06	0. 08 1
1 2	Nyalin dung-Cibeb er	0. 4	4 5 S	3	18	1	3.2 32	0. 05 4
1 3	Rajam andal a	0. 1	9 0	3	18	1	2.6 48	0. 01 4
1 4	Lemb ang	2	9 0	3	18	1	3.9 85	0. 30 6
1 5	Suban g	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
1 6	Cirem ai	0. 1	9 0	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
1 7	Cireb on-1	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
1 8	Cireb on-2	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
1 9	Ajibar ang	0. 1	9 0	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 0	Pemal ang	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 1	Brebe s	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3

<i>N o</i>	<i>Segmen</i>	<i>Slip Rate</i>	<i>Di p</i>	<i>T o p</i>	<i>Bot tom</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>Ra te (v)</i>
2 2	Tegal	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 3	Pekal ongan	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 4	Weler i	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 5	Semar ang	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 6	Muria	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 7	Ungar an-1	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 8	Ungar an-2	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
2 9	Rawa penin g	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
3 0	Dema k	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
3 1	Purw odadi	0. 1	4 5 S	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
3 2	Pati Trust	0. 1	9 0	3	18	1	2.6 30	0. 01 3
3 3	Opak	0. 7 5	6 0 E	3	18	1	3.5 23	0. 10 5
3 4	Merap i Merba bu	0. 1	9 0	3	18	1	2.6 30	0. 01 3

Penentuan UHS (*Uniform Hazard Spectrum*)

Setelah karakteristik masing-masing sumber gempa diketahui, data yang sudah jadi dapat diinput ke dalam program SRModel untuk menentukan UHS dari Bogor Green Forest.

Tingkat bahaya gempa suatu wilayah direpresentasikan dalam bentuk nilai percepatan. Penentuan nilai percepatan pada penelitian ini menggunakan metode probabilitik atau dapat disebut PSHA dengan menggunakan bantuan SRModel. Outpun analisis percepatan pada bukan berupa nilai distribusi percepatan melainkan UHS dititik tertentu yang nantinya akan digunakan dalam pembuatan *ground motion syntetic*. Titik lokasi yang digunakan dalam menentukan UHS berada pada koordinat Longitude 106.8060° dan Latitude -6.6493° . Hasil dari UHS dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun adalah sebagai berikut.

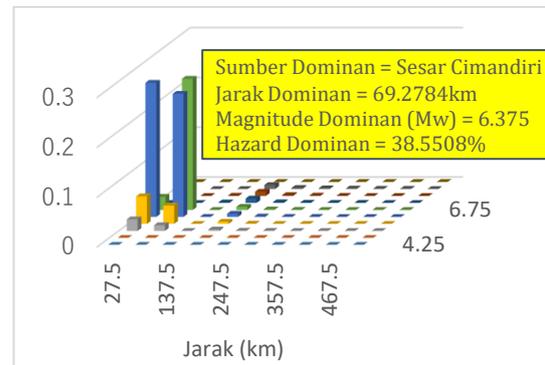


Gambar 5. UHS Daerah Penelitian

Deagregasi hazard

Hasil analisis deagregasi dijadikan sebagai penentu dalam pemilihan kesesuaian ground motion pada lokasi tinjauan. Magnitude dominan dan jarak dominan yang telah teridentifikasi akan dimanfaatkan dalam pemilihan rekaman-rekaman gempa. Analisis ini dilakukan untuk memperoleh *controlling earthquake* atau gempa yang memberikan kontribusi terbesar terhadap *hazard* gempa pada suatu daerah. Informasi yang disajikan

berupa sumber gempa dominan, magnitudo dominan dan jarak dominan.



Gambar 6. Deagregasi Hazard Daerah Penelitian

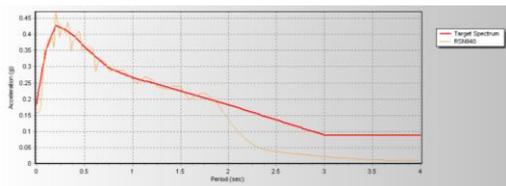
Di Gambar 6 merupakan hasil deagregasi hazard Bangunan Gedung di Bogor Green Forest pada periode $T = 0$ detik probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dan menunjukkan hasil bahwa sumber gempa pada daerah penelitian yang memiliki pengaruh terbesar terhadap risiko gempa berupa sumber gempa patahan atau patahan/sesar Cimandiri dengan kontribusi pengaruhnya sebesar 38,55%. Kontribusi terbesar sumber gempa ada di sumber gempa shallow crustal atau patahan dikarenakan memiliki jarak sumber gempa yang lebih dekat [14]. Sesar Cimandiri merupakan salah satu sesar yang terletak di Jawa yang berada dekat dengan Kabupaten Bogor. Nilai laju geser Sesar Cimandiri berkisar 0,55 mm/tahun [16]. Selain mengetahui sumber gempa dominan, juga diketahui dominasi magnitudo dan jarak dari sumber gempa ke lokasi penelitian.

Pada Gambar 6 dilihat bahwa nilai magnitudo dominan untuk Bogor Green Forest yang berada pada besaran 6.375 Mw dan jarak dominan 69.2784 km. Hasil dari analisis ini berupa Magnitude dominan, jarak dominan dan jenis sumber gempa dominan yang dijadikan acuan dalam pemilihan rekaman kejadian gempa atau dapat disebut juga *time history*.

Spectral matching

Deagregasi *hazard* gempa pada Bogor Green Forest menghasilkan rata-rata magnitude (M) dan jarak (R) yang paling dominan. Hasil deagregasi selanjutnya berupa yang disimulasikan dengan *ground motion* gempa pada batuan dasar memiliki karakteristik yang mendekati hasil deagregasi untuk masing-masing daerah.

Hasil analisis deagregasi untuk Bogor Green Forest di T=0 atau bisa disebut dengan *Peak Ground Acceleration*, data aktual gempa Big Bear Wrightwood, 1992 yang memiliki magnitude 6.46 dan jarak 70.94 km direkomendasikan untuk diskalakan (analisis *spectral matching*) guna merepresentasikan sumber gempa subduksi (*megathrust* dan *benioff*) dan sumber gempa *shallow crustal*.

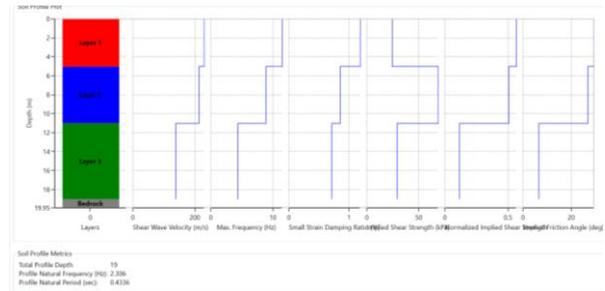


Gambar 7. Hasil Matching antara Big Bear01 1992 Wrightwood - Swarthout 6.46 strike slip 70.94 km dengan Spektra Target (UHS) di Daerah Penelitian

Pada Gambar 7 terlihat bahwa respons spektrum Big Bear Wrightwood, 1992 dimatchingkan dengan UHS hasil dari SRModel dengan Fungsi Atenuasi yang ada didalamnya.

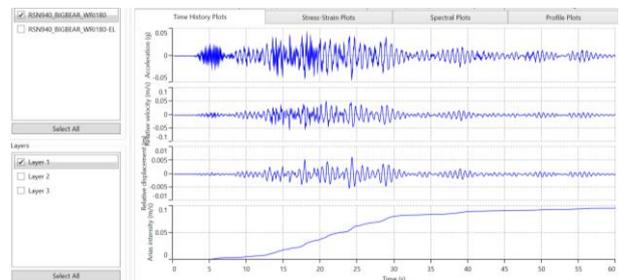
Pergerakan tanah dengan menggunakan deep soil

Pada lokasi penelitian dengan menggunakan persamaan dari Darendeli, 2001, menghasilkan OCR = 1 jadi K_0 dari semua lapisan tanah adalah sama yaitu 0.98253968. Hasil definisi profil dari tanah adalah pada Gambar 8.



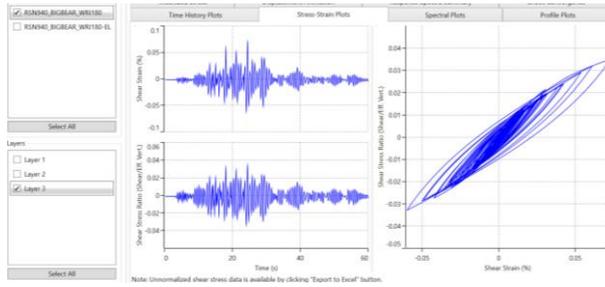
Gambar 8. Shear Wave Velocity, Frekuensi Maksimal, Damping Ratio Tegangan Rendah di Lokasi Penelitian.

Dari gambar tersebut disebutkan bahwa total kedalaman adalah 19 m, profil frekuensi alami adalah 2.306 Hz, dan profil periode alami adalah 0.4336 detik. Langkah selanjutnya memasukkan seleksi motion yang berupa Big Bear01 1992 Wrightwood - Swarthout yang mempunyai magnitude 6.46 dengan mekanisme strike slip dan jarak 70.94 km yang kurang lebih sama dengan *Deagregasi Hazard* yang dimaksud. Kemudian langkah default sesuai dengan yang ada pada *Deepsoil*. Hasil dari *Time History Plots* adalah pada gambar 9.



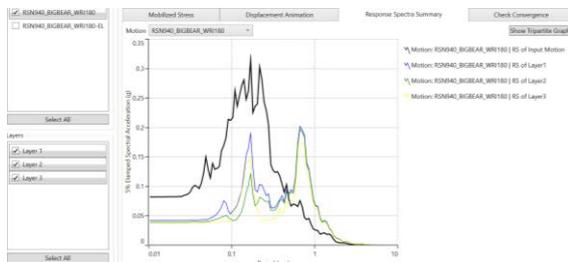
Gambar 9. Time History Plots pada layer 1 dari Lokasi Penelitian

Dari gambar tersebut terlihat bahwa percepatan dan kecepatan relatif bisa dengan percepatan maksimal kurang lebih 0.5 g dan kurang lebih 0.5 m/s. sedangkan untuk simpangan relatif adalah lebih dari 0.5 m dan Intensitas Arias mulai membesar di 5 detik dan mulai stabil di kisaran 40 detik untuk Layer 1.



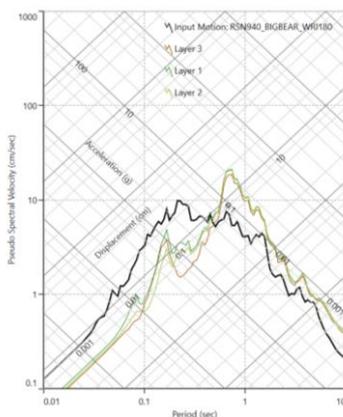
Gambar 10. Pengeplotan Tegangan Geser

Pada gambar 10 terlihat bahwa pengeplotan tegangan geser yang paling besar terjadi pada layer 3 atau paling dalam.



Gambar 11. Hasil dari Respons Spektra

Gambar 11 yang merupakan hasil respons spektra memperlihatkan bahwa hasil dari gempa yang untuk matching begitu tinggi dan turun bertemu dengan respons spektra yang ada pada layer 1, 2, dan 3 di detik ke sekitar 0.74.



Gambar 12. Hasil dari Tripartite Graph

Hasil dari semuanya adalah Tripartite Respons Spektrum yang diciptakan oleh Chopra, 1995 tersaji pada gambar 12.

5. KESIMPULAN

Hasil penelitian dapat diperoleh bahwa bentuk nilai percepatan merespresentasikan risiko gempa untuk Bangunan Gedung di Bogor Green Forest yang *Uniform Hazard Spectrum* memiliki nilai percepatan $T = 0$ detik adalah 0.1845, $T = 0.2$ detik adalah 0.4276, dan $T = 1$ detik adalah 0.2671. Diprediksi memiliki kontribusi terbesar terhadap risiko gempa adalah sumber gempa Sesar Cimandiri yang mendominasi sebesar 38,5508%. Hasil Spectral Matching dimasukkan seleksi motion yang berupa Big Bear01 1992 Wrightwood - Swarthout yang mempunyai magnitude 6.46 dengan mekanisme strike slip dan jarak 70.94 km yang kurang lebih sama dengan *Deagregasi Hazard* yang dimaksud. Hasil respons spektra memperlihatkan bahwa hasil dari gempa yang untuk matching begitu tinggi dan turun bertemu dengan respons spektra yang ada pada layer 1, 2, dan 3 di detik ke sekitar 0.74. dan Hasil dari Tripartite Graph yaitu Akselerasi, Kecepatan dan Simpangan ada di hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Asrurifak M., Irsyam M., Budiono B., Triyoso W., dan Hendriyawan., (2010). Development of Spectral Hazard Map for Indonesia with a Return Period of 2500 Years using Probabilistic Method. *Civil Engineering Dimension*, Vol, 12 No. 1, 52-62. <https://doi.org/10.9744/ced.12.1.52-62>.
- [2] Atkinson, G.M. dan D.M. Boore, (2003). Empirical Ground Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Region, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 4, pp. 1703-1729.

- [3] Badan Nasional Penanggulangan Bencana, (2020). <https://bnpb.go.id/berita/-update-sebanyak-43-rumah-rusak-sedang-akibat-gempa-pangandaran-m5-9>
- [4] Badan Standarisasi Nasional, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI, 1726, (2019), 251 p.
- [5] Boore D. M. dan Atkinson G.M., NGA (Next Generation Attenuation), (2007). Ground Motion Relations for Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters, PEER Report 2007, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Barkeley, May 2007, California, USA.
- [6] Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis, Bull.Seism. Soc. Am., Vol. 58, 1583-1606.
- [7] Gardner, J. K. and Knopoff, L., (1974), Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, 1363-1367.
- [8] Kramer, S.L., (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, Inc.
- [9] Makrup, L. (2009). Pengembangan Peta Deagregasi Hazard untuk Indonesia Melalui Pembuatan Software dengan Pemodelan Sumber Gempa Tiga Dimensi. Institut Teknologi Bandung.
- [10] Makrup, L. (2013). Seismic Hazard untuk Indonesia (Edisi Pert). Graha Ilmu.
- [11] M.Irsyam, S Widyantoro, D.H.Natawijaya, I.Meilano, A.Rudyanto, S.Hidayati, W.Triyoso, N.R Hanifa, D.Djarwadi, L.Faisal, Sunarjito, Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017, Pusat Studi Gempa Nasional Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, 376p, (2017).
- [12] Pawirodikromo, W. (2012). Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan. Daftar Pustaka.
- [13] Pawirodikromo, W. (2018). The estimated pga map of the Mw6.4 2006 yogyakarta Indonesia earthquake, constructed from the modified mercalli intensity imm. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 51 No. 2, 92-104. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.51.2.92-104>
- [14] Pawirodikromo, W., Makrup, L., Teguh, M., & Suryo, B. (2020). Development of synthetic ground motion at a specific site in Yogyakarta town, Indonesia utilizing the PSHA Method. E3S Web of Conferences, No. 156. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015602011>
- [15] PEER. (2013). PEER Ground Motion Database - PEER Center. <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- [16] PuSGeN. (2017). Peta Sumber Daya dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Cetakan Pe). Pustlitbang PUPR.
- [17] Sadigh K., Chang C.Y., Egan J.A., Maksidi F., dan Young R.R., (1997), Attenuation Relationship for shallow Crustal Earthquake Based on California Strong Motion Data, Seismological Research Letters, Vol. 68 Januari/Pebruary 1997, Seismological Society of America.

- [18] Seismosoft. (2009). SeismoMatch (1.0.3.).
<https://seismosoft.com/products/seismomatch/>
- [19] Sunardi, B. (2013). Peta Deagregasi Hazard Gempa Wilayah Jawa dan Rekomendasi Ground Motion di Empat Daerah. Universitas Islam Indonesia.
- [20] USGS. (n.d.). Search Earthquake Catalog. Retrieved September 29, (2022),
from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- [21] Youngs, R.R., Chiou, S.J., Silva, W.J., dan Humphrey, J.R., (1997), Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismol. Res. Lett.* Vol. 68, 58–73.
- [22] Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, Vol. 72 No. 3, 373–382.
<https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>