e-ISSN : 2443-308X
p-ISSN : 2086-7352

Diterima : 15 April 2025 | Selesai Direvisi : 20 Mei 2025 | Disetujui : 13 Juni 2025 | Dipublikasikan : Juli 2025
DOI : https://doi.org/10.24853/jk.16.2.83-96
Copyright © 2025 Jurnal Konstruksia
This is an open access article under the CC BY-NC licence (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Respons Inelastik Struktur Bangunan Gedung Bertingkat 3-Dimensi Akibat Gerakan Tanah Berdasarkan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*

Pranowo[1], Widodo Pawirodikromo[1], Lalu Makrup[1] dan Yunalia Muntafi[1]

[1]Prodi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta, Jl. Kaliurang No 14, Yogyakarta, 55584
Email korespondensi: omprans@yahoo.com

ABSTRAK

Indonesia wilayah yang sangat rentan terjadinya gempa bumi, pada 20 tahun terakhir banyak kejadian gempa yang menyebabkan kerusakan bangunan dan kerugian harta benda juga nyawa. Tercatat paling sedikit korban jiwa sebanyak 295,306 sungguh hal ini sangat memprihatinkan. Untuk mengurangi jumlah korban jiwa akibat runtuhnya bangunan gedung maka para engineer teknik sipil haruslah menguasai tata cara bagaimana mendesain struktur bangunan yang tahan terhadap goncangan gempa bumi. Keterbatasan data rekaman di Indonesia menjadi tantangan tersendiri, sehingga perlu adanya rekayasa gerak tanah buatan dengan metode probabilistik hal ini tentunya sangat membantu sekali untuk mendesain ataupun mengasesment bangunan yang sudah ada dan diharapkan respon-respon inelastik yang terjadi dapat mengukur sejauh mana bangunan dapat tetap berdiri ketika dikenakan beban gempa dengan besaran tertentu. Analisis Probabilistik melibatkan data-data yang terkait kejadian gempa pada masa lampau di wilayah Yogyakarta sehingga setelah melalui proses perhitungan didapati *respons spectra* target. Hasil analisis deagregasi menunjukan besaran gempa yang dominan 5.8 Mw dengan jarak 18.057 km dan didominasi sumber gempa patahan Opak. Hasil analisis menunjukan struktur bangunan mendekati keruntuhan (*Near Collapse*), hal ini ditandai dengan nilai *Storey drift*. Respons *hysteretic loop* menunjukkan lingkaran yang besar berarti redaman struktur berjalan baik sesuai yang diharapkan. Pada indeks kerusakan hal ini pun menunjukan 0.952 kurang dari 1 maka tingkat kerusakan berdasarkan klasifikasi Park dan Ang (1985) masuk kategori *Severe Damage* kerusakan yang parah (beton hancur, tulangan terlihat) ini berarti bangunan tidak dapat diperbaiki atau mendekati keruntuhan senada dengan hasil dari *story drift ratio*

Kata kunci: Gempa Bumi, respons inelastik, *Probabilistic Seismic hazard analysis*, Indeks kerusakan.

ABSTRACT

Indonesia is very susceptible to earthquakes, having experienced numerous seismic events in the past two decades that have resulted in significant structural damage and loss of life and property. The recorded figure of at least 295,306 casualties is exceedingly concerning. To mitigate mortality from building collapses, civil engineers must proficiently understand the methodologies for designing earthquake-resistant structures. The inadequacy of recorded data in Indonesia presents a significant challenge; thus, the implementation of artificial ground motion engineering utilizing probabilistic methods is invaluable for the design and evaluation of existing structures. It is anticipated that the inelastic responses measured will indicate the resilience of the building under specified earthquake loads. Probabilistic study utilizes historical earthquake data from the Yogyakarta region to derive target response spectra via a computational approach. The deaggregation analysis results indicated a predominant earthquake magnitude of 5.8 Mw at a distance of 18,057 km, mostly influenced by the Opak fault earthquake source. The analytical results indicate that the building structure is nearing collapse, as evidenced by the storey drift value. The hysteretic loop response exhibits a substantial circle, indicating that the structure's damping functions as anticipated. The

damage index indicates a value of 0.952, which is below 1. According to the classification by Park and Ang (1985), this falls within the Severe Damage category, signifying that the concrete is destroyed and reinforcement is exposed, thereby rendering the building irreparable or on the verge of collapse. The building is irreparable or on the verge of collapse, as shown by the storey drift ratio data.

Keywords: *Earthquake, Inelastic response, Probabilistic Seismic hazard analysis, damage Index.*

1. PENDAHULUAN

Salah satu negara yang paling rentan terhadap gempa bumi adalah Indonesia. Pada dua puluh tahun terakhir, beberapa gempa bumi telah menyebabkan banyak kerugian, termasuk kematian dan luka-luka. Para teknokrat, khususnya dari bidang teknik sipil, harus belajar dan memahami dengan baik bagaimana mendesain bangunan yang dapat bertahan terhadap gempa bumi.

Tabel 1 menunjukkan kejadian gempa yang dapat mengganggu kehidupan masyarakat selama waktu yang relatif lama, baik saat gempa terjadi maupun setelah gempa. Tingkat kerawaan gempa yang sangat tinggi ini adalah fenomena alam yang tidak dapat dihindari, dan waktunya sulit di prediksi

Selain kerusakan secara tidak langsung pada tanah, yang menyebabkan likuifaksi, kelongsoran lereng, keretakan tanah, deformasi yang berlebihan, dan kerusakan lainnya, struktur secara langsung mengalami kerusakan yang signifikan karena gaya inersia yang dapat diterima dari bangunan atas selama goncangan.

Tabel 1. Kejadian Gempa Signifikan di Indonesia pada Kurun Waktu 20 Tahun Terakhir

No	*Lokasi*	*Tanggal*	*Kekuatan (Mw)*	*Korban Jiwa*
1	Pasaman Barat, Sumatera Barat	25 Februari 2022	6.1	25
2	Majene, Sulawesi Barat	8 Juni 2022	5.9	17
3	Mamuju-Majene, Sulawesi Barat	15 Januari 2021	6.2	105
4	Maluku	26 September 2019	6.5	41
5	Halmahera Selatan, Maluku Utara	14 Juli 2019	7.2	10
6	Kabupaten Pandeglang, Banten	2 Agustus 2019	6.9	5
7	Palu, Sulawesi	28 September 2018	7.4	2.045
8	Lombok, Nusa Tenggara Barat	5 Agustus 2018	7.0	565
9	Kabupaten Pidie	7 Desember 2016	6.5	104

No	*Lokasi*	*Tanggal*	*Kekuatan (Mw)*	*Korban Jiwa*
	Jaya Aceh			
10	Aceh, Sumatera	2 Juli 2013	6.1	39
11	Padang, Sumatera	30 September 2009	7.6	1.117
12	Tasikmalaya, Jawa Barat	2 September 2009	7.3	81
13	Manokwari, Papua Barat	3 Januari 2009	7.3	4
14	Bengkulu, Sumatera	12 September 2007	8.4	25
15	Padang, Sumatera	6 Maret 2007	6.4	68
16	Pangandaran, Jawa Barat	17 Juli 2006	6.9	5
17	Yogyakarta, DIY	27 Mei 2006	6.4	6.234
18	Nias, Sumatera	28 Maret 2005	8.6	1.346
19	Aceh, Sumatera	26 Desember 2004	9.2	283.106
20	Bengkulu, Sumatera	4 Juni 2000	7.3	94

Bahaya goncangan atau vibrasi gempa didasarkan pada hasil penelitian dan riset sains kebumian serta rekayasa bangunan, yang merupakan alat yang sangat efektif untuk mengurangi resiko bencana yang disebabkan oleh goncangan atau vibrasi gempa, yang juga dikenal sebagai mitigasi bencana. Analisis bahaya gempa diperlukan untuk mencegah kerusakan struktur bangunan akibat gempa karena gempa yang dapat merusak akan terjadi, tetapi terjadi di tempat zona sesar aktif (juga dikenal sebagai *fault quaternary* aktif setelah gempa) atau dekat dengan gempa sebelumnya dan goncangan atau vibrasi tanah akan mendekati level sebelumnya. Pada perhitungan bahaya gempa, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) merupakan metode yang cukup efektif untuk mengetahui distribusi potensi goncangan serta dasar yang reliabel untuk memperkirakan risiko pada suatu daerah hunian atau infrastruktur yang ada (Algermissen and Perkins 1982; Frankel dkk. 1996, 2002; Petersen dkk. 1996). Metode PSHA yang dikembangkan oleh Cornell (1968) bertujuan untuk mengkuantifikasikan probabilitas terlampaui suatu level percepatan pada lokasi tertentu dan juga memberikan ruang secara eksplisit untuk memperhitungkan ketidakpastian yang bersifat epistemik dan simpangan dari beberapa komponen input model yang digunakan untuk mengestimasi bahaya kegempaan yang meliputi sumber gempa dan perkiraan goncangan tanah. Metode ini juga memperhitungkan dan menggabungkan ketidakpastian dari magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa dengan bantuan teorema probabilitas total yang didasari pada konsep pendekatan bahwa kejadian gempa merupakan fenomena yang mengikuti sebaran Poisson yang tidak bergantung pada waktu. Ketidakpastian dalam model dan parameter input selanjutnya dapat dikuantifikasi dengan menggunakan *logic tree*.

Analisis struktur untuk kondisi inelastik telah menjadi sangat penting dan telah banyak dikembangkan oleh para peneliti seiring berjalannya waktu. Beberapa teknik telah digunakan dalam desain

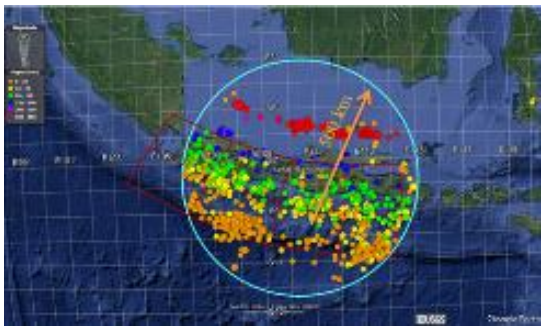
struktur dengan kondisi inelastik. Suatu struktur yang terkena gaya gempa, sangat rentan terhadap deformasi hingga batas inelastisnya. Oleh karena itu, konstruksi di daerah rawan gempa harus didesain dengan mempertimbangkan respon inelastisnya. Tujuan penelitan ini adalah untuk mengeksplorasi data digital rekaman gempa-gempa besar. Tujuannya adalah untuk mengembangkan rekaman gempa buatan (*Artificial Ground Motion Time History*) yang sesuai dengan kondisi lokasi bangunan (karena rekaman gempa besar berupa rekaman sejarah waktu di Indonesia tidak tersedia dan sulit diakses oleh masyarakat umum) dan sebagai input analisis struktur bangunan agar diperoleh respons inelastik ketika dikenakan beban gempa.

2. METODOLOGI

Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA): Dalam pendekatan ini, respon spektra target didasarkan pada PSHA. Dalam metode PSHA, setelah proses perhitungan yang kompleks, *Annual Rate of Accident* (λ) dapat diperoleh dari PSHA, yang kemudian digunakan untuk menghitung *Uniform Hazard Spectrum* (UHS) di batuan dasar, yang berfungsi sebagai spektra target di batuan dasar. Dengan cara yang sama, rekaman gempa yang dipilih berdasarkan parameter tersebut juga dilakukan. Selanjutnya, sejarah tersebut dirambatkan ke permukaan melalui media lapisan tanah, menghasilkan gerak tanah buatan di permukaan tanah, agar diperoleh suatu gerak tanah minimum kondisi inelastik maka dimatchingkan kembali terhadap respons spectra target MCEr. Berikut adalah diagram alir pada penelitian (Gambar 2).

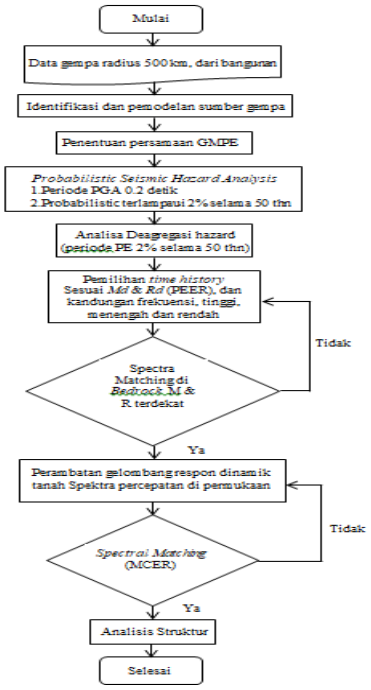
3. DATA KEJADIAN GEMPA

Untuk menganalisis risiko gempa, semua data kejadian gempa historis yang mempengaruhi lokasi tertentu selama waktu pengamatan tertentu diperlukan. Pada penelitian ini, data gempa historis dikumpulkan dari USGS dari tahun 1963 hingga akhir Juli 2024. Data ini terdiri dari wilayah yang terletak dalam radius 500 km dari Bangunan, atau dengan koordinat 102.2843 Bujur Timur hingga 111.104 Bujur Timur dan -2.1418 Lintang Selatan hingga -11.16915 Lintang Selatan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Dari berbagai data gempa, lalu dipilih besaran yang memiliki magnitude minimum (Mw) 4.5 dan kedalaman maksimum 300 km.



Gambar 1. Gempa di Yogyakarta

Sumber: USGS

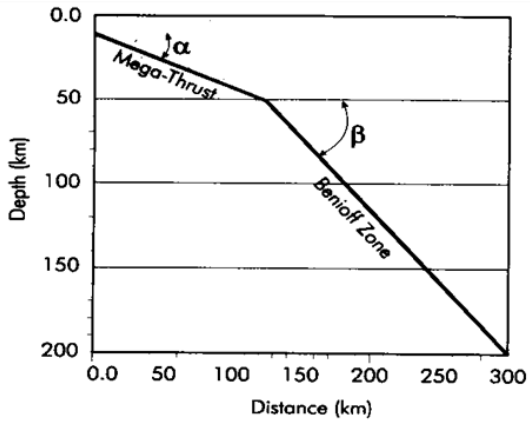


Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

4. PEMODELAN SUMBER GEMPA

Pemodelan sumber gempa diperlukan untuk mengetahui gambaran berkaitan distribusi episenternya pada suatu

sumber gempa berdasarkan kejadian gempa, frekuensi kejadian dan pergeseran lempeng, Irsyam dkk. (2010). Pemodelan sumber gempa ini menggunakan pendukung *software* SR Model menggunakan model tiga dimensi (3D). Sumber gempa dapat dikategorikan sebagai sumber gempa zona subduksi yang berupa sumber gempa *megathrust* dan *Benioff* (Gambar 3). Kemudian sumber gempa zona fault (*shallow crustal*), meliputi sesar-sesar aktif yang ada di sekitar wilayah Yogyakarta (Tabel 4).



Gambar 3. Model Zona Subduksi Terdiri Dari Zona *Benioff* dan *Megathrust*

Sumber: Crouse, (1992).

Tabel 2. Sumber Gempa, *Fault* Untuk Daerah Jawa dan Sekitarnya (8 Subduksi dan 28 *Shallow Crustal*)

No.	*Model Sumber Gempa*	*Zona Sumber Gempa*
1.	Subduksi (Megathrust)	Megathrust Sunda Megathurst Jawa 1 Megathrust Jawa 2 Megathrust Jawa 3
2.	Subduksi (Benioff)	Benioff Sunda Benioff Jawa 1 Benioff Jawa 2 Benioff Jawa 3
3.	Shallow Crustal (Sessar)	Cimandiri Fault Nyalindung-Cibeber Fault Rajamandala Fault Lembang Fault Subang Fault Ciremai Fault Cirebon 1 Fault Cirebon 2 Fault Ajibarang Fault Karang Malang Fault Brebes Fault Tegal Fault Pekalongan Fault Weleri Fault Semarang Fault Muria Fault Ungaran 1 Fault Ungaran 2 fault Rawapening Fault Demak Fault Purwodadi Fault Opak Fault Lasem Fault Pati Thrust Merapi-Merbabu Cepu Waru Blumbang Surabaya

5. PENENTUAN PARAMETER A BERDASARKAN SLIP RATE

Parameter a, α dan rate (υ) pada hukum Gutenberg-Richter dapat juga ditentukan berdasarkan *slip rate* gerakan *fault* (Shah, H.C., Boen, T., 1996).

Prosedur untuk menentukan nilai parameter a adalah sebagai berikut:

1. Pilih magnitude maksimum (M_{max}), dapat dicari menggunakan persamaan Well dan Coppersmith (1994).

$$M_{max} = 5.08 + 1.16 \log L_f \quad (1)$$

Dengan L_f = *rupture length.*

2. Analisis periode ulang magnitude maksimum (T_{max}) yang berhubungan dengan *slip rate*. Bisa dipakai formula Well dan Coopersmith (1994).

$$T_{max} = \left(\frac{1000}{\text{slip rate}}\right) 10^{(-5.46+0.82 M_{max})} \quad (2)$$

3. Tentukan parameter b atau β, setelah itu nilai parameter a atau α, dapat ditentukan menggunakan hukum Gutenberg-Richter:

$$a = -bMmax - \log Tmax \quad (3)$$

$$\alpha = -\beta Mmax - \ln Tmax \quad (4)$$

4. *Rate* (*recurrence rate*) kejadian gempa secara spesifik dihitung dari parameter a atau α dan b atau β yang

sudah diketahui diatas dengan persamaan:

$$\upsilon = 10^{a-bm_0} \quad (5)$$

$$\upsilon = \exp(\alpha - \beta m_o) \quad (6)$$

6. PERSAMAAN ATENUASI (*GROUND MOTION PREDICTION EQUATION*, GMPE)

Analisis *hazard* gempa memerlukan penurunan fungsi atenuasi yang diperoleh dari data percepatan tanah. Semakin banyak data percepatan tanah yang digunakan akan menghasilkan fungsi atenuasi yang baik sebagai inputan analisis. Belum tersedia persamaan GMPE untuk wilayah Indonesia menjadikan penggunaan persamaan GMPE dari negara lain yang memiliki kesamaan kondisi geologi dan riwayat tektoniknya. Pemilihan persamaan GMPE didasarkan pada mekanisme sumber gempa di wilayah tersebut dan berdasarkan ketersediaan persamaan GMPE pada *software* SR Model. Adapun sumber gempa tersebut terbagi atas, (i) sumber gempa subduksi yang menggunakan atenuasi Youngs dkk (997) dan atenuasi Atkinson-Boore (2003), (ii) sumber gempa *fault* (*shallow crustal*) dengan atenuasi Sadigh et all (1997), Kanno et all (2006), Campbell Borzognia (2006), Zhao et all (2006) dan Chiao Young (2006).

Deagregasi

Analisis deagregasi digunakan untuk memperoleh *controlling earthquake* atau sumber gempa yang memberikan kontribusi terbesar terhadap *hazard* gempa pada suatu wilayah, meliputi sumber gempa dominan, *magnitude* dominan, dan jarak dominan. Analisis deagregasi merupakan perhitungan ulang (*back calculation*) dari nilai spektra yang dihasilkan dari PSHA yang dilakukan dengan bantuan *software* SR Model Makrup (2009). Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk melakukan analisis *spectral matching*. Deagregasi *magnitude* untuk semua sumber M_D, terdapat pada persamaan (7). Deagregasi jarak untuk semua sumber R_D, terdapat pada Persamaan (8).

Deagregasi magnitude untuk semua sumber M_D, adalah:

$$M_D = \sum_i \frac{M_D^i \lambda_x{}^{(i,m,r)}(x)}{\lambda_x{}^{(m,r)}(x)} \quad (7)$$

Deagregasi jarak untuk semua sumber $R_{D,}$ adalah:

$$R_D = \sum_i \frac{R_D^i \lambda_x{}^{(i,m,r)}(x)}{\lambda_x{}^{(m,r)}(x)} \quad (8)$$

Artificial ground motion time history

Penentuan *artificial ground motion* gempa didasarkan pada hasil dari analisis deagregasi terhadap magnitude rata-rata (*M*) dan jarak rata-rata (*R*) yang paling dominan, yang memiliki kesamaan karekteristik terhadap wilayah yang ditinjau serta mempertimbangkan keterwakilan kandungan frekuensi tinggi , menengah dan rendah, hal ini begitu penting mengingat kandungan frekuensi pada gerak tanah akan mempengaruhi respons maupun kinerja bangunan nantinya. Dengan bantuan *software SeismoMatch*, maka ditentukan *ground motion* sintetik yang melengkapi data percepatan riwayat waktu di Indonesia. *Ground motion* sintetik dibuat dengan menskalakan input accelerometer yang memiliki karakteristik yang sama dengan hasil deagregasi terhadap target spektra yang telah ditentukan

Analisis respon dinamika tanah

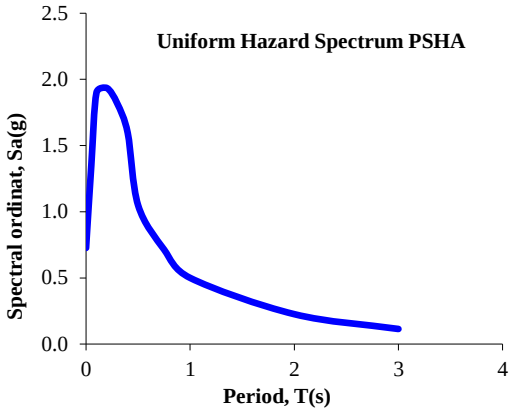
Analisis Respon dinamika tanah adalah proses perambatan gelombang dari batuan dasar ke permukaan dan penentuan parameter dinamik tanah pada wilayah yang ditinjau. Inputan analisis respon dinamik berupa *ground motion* sintetik yang diperoleh dari analisis deagregasi dan *spectral matching*. Analisis respon dinamika tanah ini dilakukan dengan bantuan *software Deepsoil*.

7. HASIL DAN PEMBAHASAN

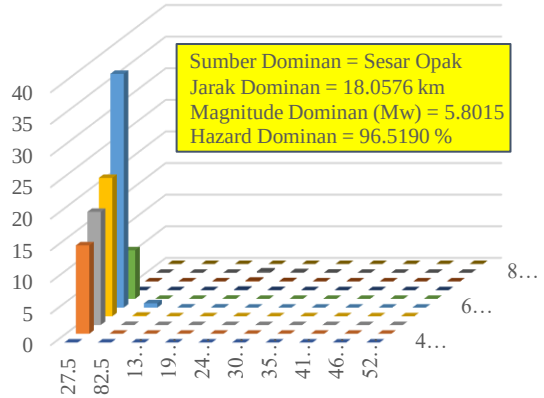
Probabilistic seismic hazard

Analisis hazard gempa yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode probabilistik (PSHA). Analisis terhadap hazard gempa menggunakan bantuan software SRModel yang dikembangkan oleh Makrup (2009). Analisis seismik hazard gempa pada penelitian ini dibatasi pada probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun umur bangunan atau setara dengan kala ulang (*return period*) 2475 tahun. Hasil dari respon spektra hazard seragam (uniform hazard spektrum) yang dapat dilihat pada gambar 5.

Deagregasi Hazard merupakan proses analisis terhadap berbagai macam sumber *hazard* gempa yang mempengaruhi suatu lokasi dengan cara memprediksi besarnya jarak dominan dan magnitude dominan. Oleh karena itu proses ini menggunakan probabilistik yang berarti memperhitungkan semua kemungkinan dari tiap sumber gempa (*earthquake source*) berdasarkan parameter – parameter yang dimilikinya. Perhitungan deagregasi pada penelitian ini dibatasi untuk *hazard* gempa perioda PGA dan 0.2 detik dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun umur bangunan, mengingat dari peraturan-peraturan gempa yang ada saat ini telah menggunakan ketentuan tersebut. Proses deagregasi bertujuan untuk memperkirakan gempa penentu dari suatu daerah yang ditinjau. Hal tersebut dapat menghasilkan rata-rata magnitude (*mean magnitude*) dan rata-rata jarak (*mean distance*), yang akan bermanfaat dalam pemilihan *ground motion* aktual dengan karakteristik yang mendekati kondisi yang diinginkan. Pada perhitungan deagregasi kali ini bertujuan merekomendasikan ground motion yang sesuai untuk bangunan yang akan didirikan. Hasil analisis deagregasi dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 5. Respon *Uniform Hazard* Spektrum

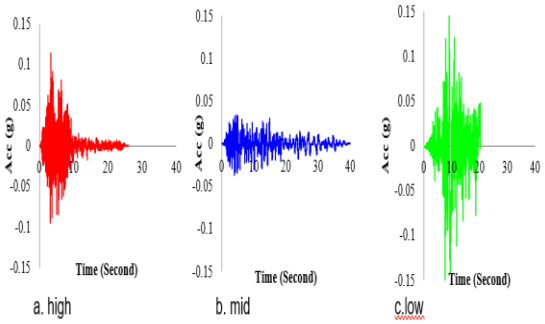


Gambar 6. Hasil Deagregasi *Hazard*

Adapun Time history aktual yang paling dekat pada M dan R yang dominan hasil *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* adalah rekaman *time history*. Karena penggunaan untuk analisis struktur bangunan gedung maka pertimbangan pemilihan time history aktual harus mewakili kandungan frekuensi tinggi, menengah dan rendah, hal ini seperti dinyatakan oleh para peneliti terdahulu. Dari hasil data *Pacific Earthquake Engineering Research* didapati pada rentang M dan R sebagai berikut (Tabel 3).

Tabel 3. Data *Time History* Aktual

No	RSN	Gempa	Mw	R (Km)	Percepatan (g)	Kecepatan (m/s)	A/V Ratio	Frekuensi
1	247	Mammothlake1980	5.94	18.85	0.114	0.05466	2.087911	Tinggi
2	215	Livermore1980	5.8	15.84	0.034	0.03771	0.916444	Menengah
3	316	Westmorland1981	5.9	16.54	0.145	0.327	0.443442	Rendah



Gambar 7. *Ground Motion* Aktual

Dari tabel 3 diatas dipilih tiga *time history actual* yang masing-masing mewakili kandungan frekuensi Tinggi, sedang dan rendah.

Pada perhitungan *spektral matching* antara respon spektra target Gambar 5 dan respon spektra aktual maka akan diperoleh berupa *respon spectra matching* yang dapat dilihat dalam Gambar 10.

Perambatan Gelombang

Gelombang gempa yang berupa *time history* gelombang percepatan tanah gempa artifisial kemudian dirambatkan dari batuan dasar ke permukaan tanah. Site sebagai tempat studi adalah wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta. Dalam merambatkan gelombang gempa dari batuan dasar ke permukaan tanah diperlukan data lapisan tanah hasil bor log pada lokasi tersebut hal ini dapat dilihat pada gambar 8 (Nspt Vs kedalaman) dan gambar 9 (Kecepatan gelombang geser Vs kedalaman).

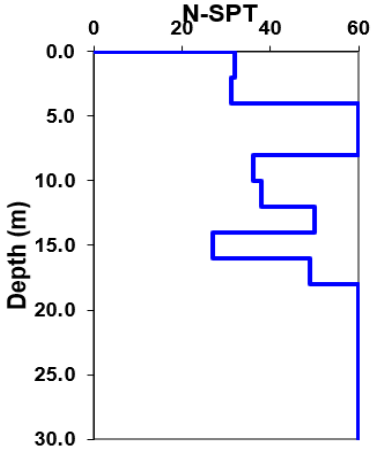
Pada perhitungan kecepatan gelombang geser tanah (Vs) yang dilakukan dengan perhitungan yang dikembangkan oleh Ohta dan Goto (2001), Inai dan Tonouchi (2002) serta Sykora dan Stokoe (1983), sebagaimana disajikan pada persamaan dibawah ini (persamaan 3-5). Perhitungan yang dikembangkan oleh Ohta dan Goto dan Persamaan yang dikembangkan oleh Inai dan Tonouchi serta Sykora dan Stokoe (1983) dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$Vs = 85.3\ N^{0.341}$$ (Persamaan Ohta) (9)

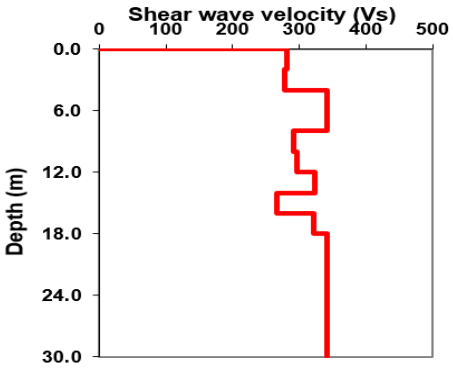
$$Vs = 96.9\ N^{0.314}$$ (Persamaan Imai) (10)

$$Vs = 101\ N^{0.29}$$ (Persamaan Sykora) (11)

Hasil penentuan Vs dengan tiga persamaan di atas dibuat rata-rata dan digambar sesuai dengan hasil yang ada pada gambar 9.

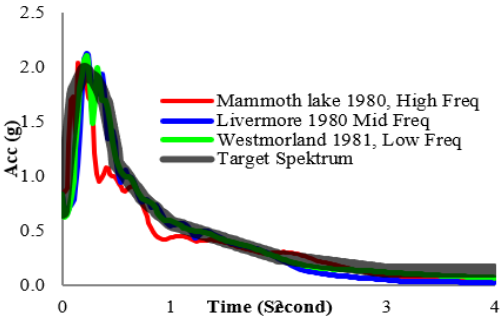


Gambar 8. Hasil Penyelidikan Tanah di Lokasi Bangunan Wilayah DIY

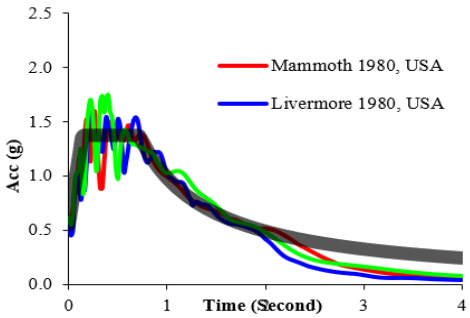


Gambar 9. Hasil Penyelidikan Tanah

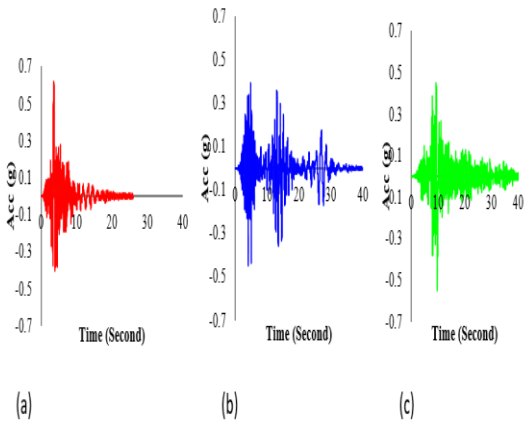
Penentuan target spectra berikutnya berdasarkan Setelah didapat *Response spectrum* hasil perambatan di permukaan dan *response spectrum* berdasarkan *Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake* (MCER) sebagai batas *respons spectrum* dalam kondisi inelastik sebagai dasar gerak tanah yang dipilih untuk analisis struktur bangunan selanjutnya. Adapun pada gambar 11 hasil *spectral matching* antara *respons spectrum* hasil perambatan di permukaan terhadap *respons spectrum MCER.*



Gambar 10. *Respon Spektra* Hasil *Matching*



Gambar 11. *Respon Spektra* Hasil *Matching*



Gambar 12. AGMTH Hasil *Matching* Terhadap *Respons Spectrum* MCER

Pemodelan struktur pada penelitian ini dilakukan menggunakan Program Ruaumoko 3D untuk merancang struktur dengan analisis dinamik nonlinear dan mengetahui perilaku struktur bangunan yang dikenakan beban gempa buatan hasil analisis probabilistik.

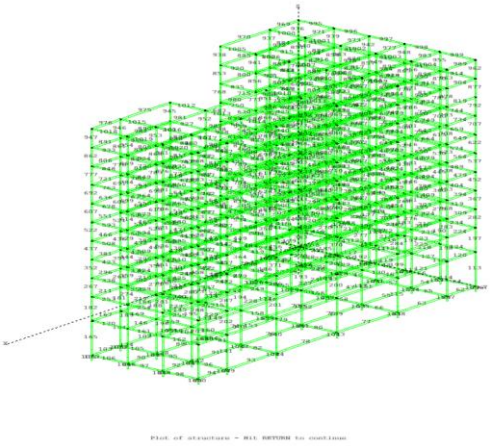
Gambaran Umum Bangunan

Bangunan beton bertulang yang berfungsi sebagai hotel/hunian terdiri dari 12 lantai yang sudah ada di wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta, adapun gambaran umum bangunan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Struktur Bangunan

Fungsi bangunan	Hotel (Hunian)
Lokasi	Daerah Istimewa Yogyakarta
Jumlah Lantai	12 Lantai
Tinggi total	38.8 m

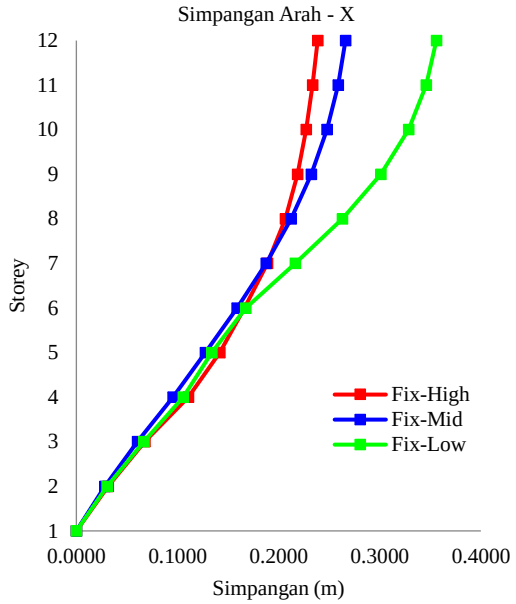
Adapun pemodelan struktur secara 3 dimensi dapat dilihat pada gambar 13.



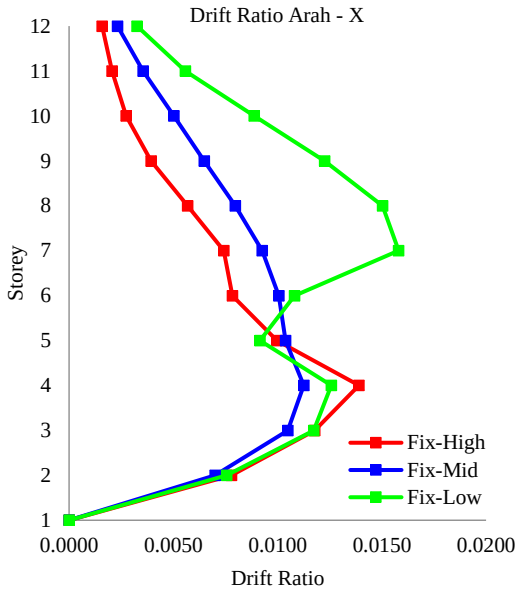
Gambar 13. Pemodelan Struktur Menggunakan Ruaumoko 3D.

Displacement dan *storey drift*

Simpangan yang terjadi (Gambar 14) akibat AGMTH hasil probabilistik pada tumpuan jepit dengan kandungan frekuensi tinggi, sedang dan rendah menunjukan bahwa simpangan pada AGMTH frekuensi tinggi sebesar 238 mm, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 266 mm sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 356 mm, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi rendah. Sedangkan *storey drift ratio* yang terjadi (Gambar 15) akibat AGMTH dengan kandungan frekuensi tinggi, sedang dan rendah menunjukan, frekuensi tinggi yaitu 0.0139, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 0.0112 sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 0.0158, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi rendah.



Gambar 14. Simpangan Gedung

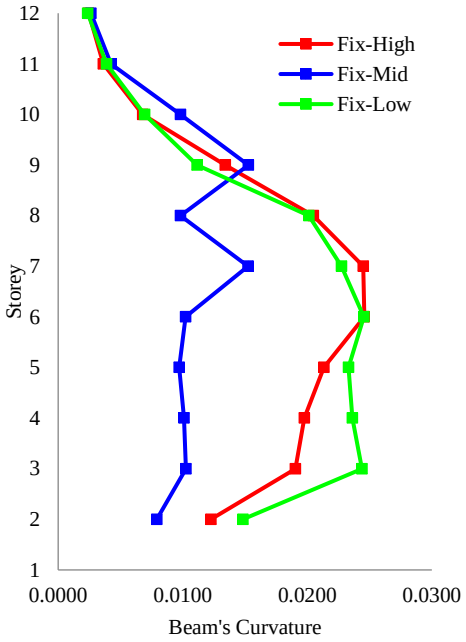


Gambar 15. *Drift Ratio*

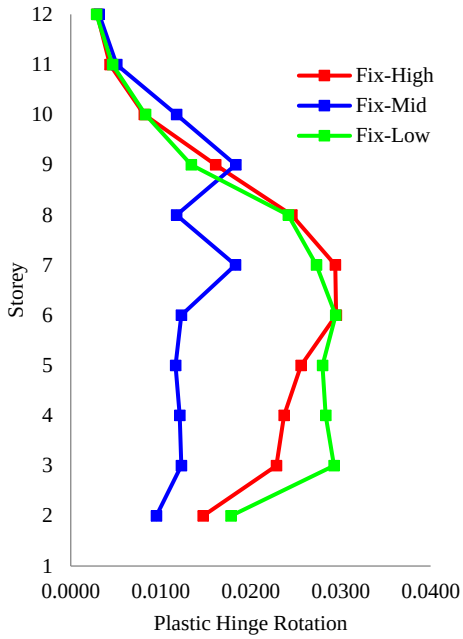
Beam's curvature dan rotasi sendi plastis

Pada *Perfomanced Based Seismic Design* (PBSD) rotasi sendi plastis (*plastic hinge rotation*) sering dipakai sebagai kriteria kinerja struktur. Rotasi sendi plastis diperoleh melalui produk antara *curvature* (rad/m) dengan Panjang sendi plastis. Distribusi *beam's curvature* akibat gerak tanah hasil analisis probabilistik seperti

yang tampak pada gambar dibawah ini (gambar 16). Tampak pada gambar tersebut bahwa distribusi *curvature* diseluruh tingkat mirip dengan distribusi *drift ratio*. Sedangkan rotasi sendi plastis yang terjadi akibat AGMTH (Gambar 17) dengan kandungan frekuensi tinggi, sedang dan rendah menunjukan, pada frekuensi tinggi yaitu 0.0295, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 0.01833 sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 0.02945, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi rendah. Dapat ditarik kesimpulan pada AGMTH dengan kandungan frekuensi rendah sangat berdampak terhadap respon struktur yang mendekati bahaya.



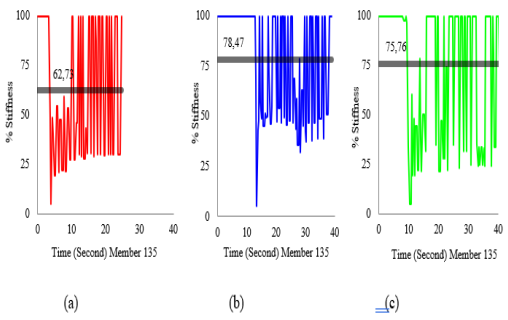
Gambar 16. *Beam's Curvature*



Gambar 17. *Plastic Hinge Rotation*

Sejarah kekakuan elemen

Kekakuan elemen akan berubah-ubah menurut level respons struktur. Sejarah kekakuan elemen kolom 135 adalah seperti yang disajikan pada Gambar 18. Rata-rata kekakuan elemen 135 akibat gempa dengan kandungan frekuensi tinggi, sedang dan rendah menunjukan nilai rata-rata yaitu pada frekuensi tinggi sebesar 62.73 %, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 78.47 % sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 75.76 %, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi tinggi.

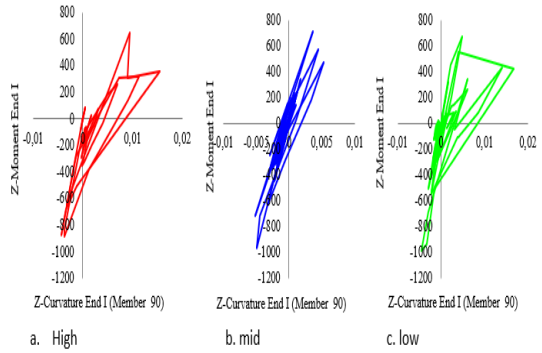


Gambar 18. Sejarah Kekakuan Balok Hasil Gempa PSHA

Hysteritic loop

Hysteretic loops adalah respons inelastik struktur yang merupakan plot antara *momen* dengan *curvature*, ataupun antara gaya dengan simpangan. Sementara itu plot antara momen M dan kurvatur φ adalah seperti yang disajikan pada Gambar 19.

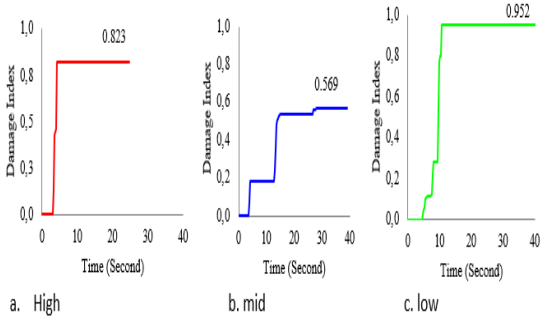
Gambar 19 adalah *hysteretic loops* untuk kolom elemen 90 akibat gempa hasil probabilistik. Tampak pada gambar bahwa gerak tanah pada kandungan frekuensi tinggi, sedang dan rendah menunjukan simpangan plastis maksimum pada AGMTH frekuensi tinggi sebesar yaitu 0.01554, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 0.00523 sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 0.016665, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi rendah.



Gambar 19. *Hysteretic Loops* elemen 90

Indeks kerusakan

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap indeks kerusakan menyeluruh struktur, dari hasil analisis memakai rumusan yang dikembangkan oleh Park dan Ang (1985) hasil indeks kerusakan global dinyatakan sebagai berikut Indeks kerusakan maksimum terjadi akibat gempa hasil probabilistik dengan kandungan frekuensi tinggi, sedang dan rendah menunjukan indeks kerusakan pada AGMTH frekuensi tinggi yaitu 0.8234, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 0.5696 sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 0.9529, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi rendah



Gambar 20. Indeks Kerusakan Struktur Hasil Analisis Probabilistik

8. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis inelastik dengan menggunakan program Ruaumoko 3D dilanjutkan dengan hasil analisis dan pembahasan yang didukung dari studi literatur penelitian-penelitian sebelumnya maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil analisis simpangan dan *drift ratio* menunjukan bahwa simpangan pada AGMTH frekuensi tinggi sebesar 238 mm, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 266 mm sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 356 mm, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi rendah. Sedangkan *storey drift ratio* yang terjadi akibat AGMTH dengan kandungan frekuensi tinggi, sedang dan rendah menunjukan, frekuensi tinggi yaitu 0.0139, dan kandungan frekuensi sedang yaitu 0.0112 sedangkan kandungan frekuensi rendah yaitu 0.0158, hal ini menunjukan adanya respon struktur yang peka terhadap AGMTH frekuensi rendah. Dengan drift ratio sebesar 0.0158 lebih dari 0.015 tetapi kurang dari 0.025 menurut *Vision 2000* masuk kategori tingkat kinerja *Near Collapse* (NC).
2. Hasil analisis *beam curvature* dan *plastic hinge rotation* menunjukan bila *plastic hinge rotation* yang terjadi akibat gempa dengan kandungan frekuensi tinggi sebesar 0.0295,

frekuensi menengah 0.01833 sedangkan frekuensi rendah 0.02945, hal ini menunjukan struktur sangat respons terhadap gerak tanah dengan kandungan frekuensi tinggi.

3. Hasil analisis kekakuan kolom menunjukan bila akibat gempa dengan kandungan frekuensi tinggi sebesar 62.73%, frekuensi menengah 78.47% sedangkan frekuensi rendah 75.76%, hal ini menunjukan struktur sangat respons terhadap gerak tanah dengan kandungan frekuensi tinggi
4. Hasil analisis *Hysteritic loop* menunjukan, akibat gempa dengan kandungan frekuensi rendah lebih besar bila dibandingkan dengan kandungan frekuensi menengah dan tinggi, hal ini menunjukkan struktur sangat respons terhadap gerak tanah dengan kandungan frekuensi rendah
5. Hasil analisis indeks kerusakan menunjukan bila akibat gempa dengan kandungan frekuensi tinggi sebesar 0.823, frekuensi menengah 0.569 sedangkan frekuensi rendah 0.952, hal ini menunjukan struktur sangat respons terhadap gerak tanah dengan kandungan frekuensi rendah. Merujuk nilai indeks kerusakan sebesar 0.952 kurang dari 1 maka tingkat kerusakan berdasarkan klasifikasi Park dan Ang (1985) masuk kategori *Severe Damage* kerusakan yang parah (Beton hancur, tulangan terlihat) ini berarti bangunan tidak dapat diperbaiki atau mendekati keruntuhan senada dengan hasil dari *storey drift ratio.*

DAFTAR PUSTAKA

[1] Abdillah, Affi (2021) Analisis Dinamis Interaksi Tanah-Struktur Pada Bangunan Tahan Gempa Dengan Scaled Boundary Finite Element Method. Tesis, Institut Teknologi Bandung.

[2] Aribowo, B.S., 2014, Pengembangan Peta Percepatan Tanah di Permukaan Berdasarkan Data Geologi untuk Daerah Istimewa Yogyakarta. Tesis, Universitas Islam Indonesia.

[3] Aldiamar, F., 2007, Analisis Resiko Gempa dan Pembuatan Respon Spektra Desain Untuk Jembatan Suramadu dengan Pemodelan Sumber Gempa 3D, Tesis, Institut Teknologi Bandung.

[4] Artati, H,K., 2023, Potensi Likuefaksi menggunakan pendekatan State parameter berdasarkan percepatan maksimum permukaan tanah akibat gempa hasil *codes, Deterministic dan Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, Penelitian Disertasi, Universitas Islam Indonesia.

[5] Makrup L.L., 2009., Pengembangan Peta Deagregasi Hazard untuk Indonesia melalui Pembuatan Software dengan Pemodelan Sumber Gempa Tiga Dimensi, Penelitian Disertasi, Institut Teknologi Bandung.

[6] Makrup L.L., 2013, Seismic Hazard untuk Indonesia, Graha IlmuYogyakarta.

[7] Makrup L.L., 2015, Model Sistem Fisik, Dengan Persamaan Differensial Parsial dan Aplikasinya dalam Keteknikan, Pustaka Pelajar, Yogyakarta.

[8] Makrup L.L., dan Muntafi Y., 2016., *Artificial Ground Motion for the Cities of Semarang and Solo Indonesia Generated Based on Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Spectral Matching*, EJGE, Vol 21, Bund 21, pp 6587-6602.

[9] Makrup, L.L., Sunardi B., dan Muntafi Y., (2016), Pada penelitiannya yang berjudul "*Design Accelerograms by Time and Frequency Domain Matching Based on Seismic Hazard in Sorowako Field of Sulawesi Island,*

Indonesia", EJGE, Vol 21, Bund 21, pp 6629-6644.

[10] Muntafi, Y., 2012, Analisis Risiko dan MIkrozonasi Hazard Gempa Jakarta Metode Probabilitas Dengan Pemodelan Sumber Gempa Tiga Dimensi, Tesis, Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

[11] PusGen, (2022). Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa.

[12] PusGen, (2017). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2107.

[13] Retno, A,. 2022. Respon Seismik Provinsi Jawa Tengah Berdasarkan Seismic Probabilistic Analisis : Peta, Faktor Situs dan Amplifikasi. Tesis, Universitas Islam Indonesia.

[14] SNI 1726-2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung, Badan Standrisasi Nasional, Jakarta.

[15] Widodo, 2012, Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan, Pustaka Pelajar, Yogyakarta.

[16] Widodo, 2017, Analisis Dinamika Struktur, Pustaka Pelajar, Yogyakarta.