

RESPON GEDUNG PORTAL BAJA AKIBAT PEMBESARAN GEMPA OLEH LAPISAN TANAH

STEEL FRAME RESPONSE SUBJECT TO SEISMIC AMPLIFICATION BY SOIL DEPOSIT

Mahmud Kori Effendi^{*1}, Herlina Susilawati², Nur Ayu Diana³, F. Dona Artha⁴

^{1,2,3,4}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra
Korespondensi: *kori.effendi@janabadra.ac.id

ABSTRAK

Kota Yogyakarta merupakan salah satu daerah rawan gempa di Indonesia yang memiliki bangunan bersejarah, gedung bertingkat, struktur jalan dan jembatan. Profil tanah mempengaruhi amplifikasi dari batuan dasar ke permukaan tanah. Percepatan batuan dasar diambil dari spektrum respons desain yang sesuai dengan SNI menggunakan software SeismoMatch. Keluaran software NERA menunjukkan bahwa percepatan tanah meningkat dari 0,249 g menjadi 0,385 g atau sekitar 1,5 kali lipat dibandingkan batuan dasar. SAP2000v14 digunakan sebagai perangkat lunak analisis dinamis dengan input gempa dari NERA. Hasil analisis modal bahwa 7 moda tersebut cukup untuk analisis, sehingga memenuhi persyaratan rasio partisipasi massa dalam pasal 7.9.1 SNI-1726-2012 yaitu $\geq 90\%$. Hasil analisis gempa dinamik baik analisis Time History maupun Response Spectrum memiliki hasil yang relatif sama dalam perpindahan, gaya aksial dan momen lentur. Pada Modal Time History 1 (MHIST 1) interval waktu yang besar mempengaruhi momen lentur. Setelah interval waktu kecil digunakan, baik Modal Riwayat Waktu 2 (MHIST 2) dan Riwayat Waktu Integrasi Langsung (DHIST 2) memberikan hasil yang sama.

Kata Kunci: NERA, Percepatan spectral, Portal baja, Pembesaran, Riwayat waktu.

ABSTRACT

Yogyakarta city is one of the earthquake prone areas in Indonesia that has historical buildings, high-rise buildings, road structures and bridges. The soil profile affects the amplification from bedrock to the ground surface. The bedrock acceleration is taken from the matched design response spectrum SNI by means SeismoMatch. The output of the NERA software shows that the ground acceleration is increasing from 0,249 g to 0,385 g or about 1,5 times compared to bedrock. The SAP2000v14 is used as dynamic analysis software. The modal analysis result that the 7 modes are enough for the analysis, so that it meets the mass participation ratio requirements in article 7.9.1 SNI-1726-2012 which is $\geq 90\%$. The results of dynamic earthquake analysis by both Time History and Response Spectrum analysis have relatively the same results in displacement, axial force and bending moment. In the Modal Time History 1 (MHIST 1) the large time interval affects the bending moment. After the small-time interval is used, both Modal Time History 2 (MHIST 2) and Direct Integration Time History (DHIST 2) give the same results.

Keywords: Amplification, NERA, Spectral Acceleration, Steel Frame, Time history.

PENDAHULUAN

Kota Yogyakarta merupakan salah satu daerah yang memiliki kerawanan gempa yang tinggi. Kota ini memiliki bangunan bersejarah, gedung tinggi, struktur jalan dan jembatan yang berpotensi terkena gempa. Kerusakan akibat gempa tidak hanya dipengaruhi oleh kekuatan gempa dan letak episentrumnya, tetapi juga oleh profil tanah. Jarak dan kekuatan gempa juga dipengaruhi oleh kondisi tanah setempat, yang berkaitan dengan fenomena amplifikasi gempa yang dipengaruhi oleh jenis dan ketebalan lapisan tanah di atas batuan dasar. Lapisan tanah memainkan peran penting dalam amplifikasi gerakan tanah (Kramer, 1996).

Analisis satu dimensi dapat digunakan untuk mempelajari perilaku tanah dan amplifikasi tanah di bawah percepatan tanah akibat gempa (Zalbuin, Tobita and Likitlersuang, 2017). Dalam analisis ini, permukaan tanah dan batuan dasar dianggap memanjang tak terhingga dalam arah horizontal. Sejumlah besar program komputer dengan analisis satu dimensi tersedia seperti SHAKE (Schnabel, Lysmer and Seed, 2012), DEEPSOIL, NERA (Bardet and Tobita, 2001) dll. Respon percepatan lapisan bawah tanah dipelajari dengan membandingkan metode ekuivalen linier dan nonlinier dengan DEEPSOIL (Iswanto and Yee, 2016). Prediksi respon lapisan tanah akibat gempa dihitung menggunakan SHAKE untuk analisis linier dan ekuivalen-linear (Kaklamanos and Bradley, 2015). NERA digunakan untuk mempelajari respon deposit tanah yang mengalami percepatan tanah inkremental (Effendi and Uckan, 2013).

Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak NERA untuk melakukan respon lapisan tanah akibat percepatan tanah. Data yang dibutuhkan untuk memodelkan lapisan tanah terdiri dari tebal lapisan, *bulk density*, modulus geser awal material tanah, dan hubungan modulus geser dengan regangan geser.

Pada penelitian ini, respon tanah akibat gempa akan digunakan sebagai input percepatan tanah pada struktur portal baja. Software SAP2000 dapat digunakan untuk analisis struktur portal baja akibat percepatan gempa bumi. Analisis riwayat waktu dan spektrum respons dilakukan untuk analisis dinamik portal baja di bawah percepatan tanah. SeismoSignal dan SeismoMatch digunakan

untuk memproses dan mencocokkan akselerasi tanah.

TINJAUAN PUSTAKA

Gambar 1 menunjukkan kondisi geometri dan batas dari analisis respon situs satu dimensi dengan perangkat lunak NERA (Bardet and Tobita, 2001). Gelombang geser merambat secara vertikal dalam sistem lapisan satu dimensi, di mana lapisan tanah diasumsikan (1) homogen secara horizontal, (2) dengan batas horizontal yang tidak terbatas, dan (3) percepatan gempa bumi pada gerakan horizontal dari batuan dasar. Persamaan yang digunakan adalah:

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (1)$$

Dimana:

ρ = kepadatan tanah (kN/m³)

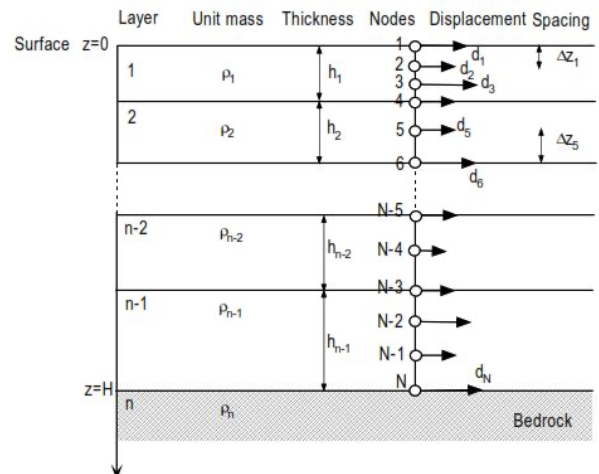
d = perpindahan horizontal (m/s)

τ = tegangan geser (MPa)

t = waktu (second)

η = koefisien redaman proporsional massa

z = kedalaman (meter)



Gambar 1. Sistem tanah berlapis satu dimensi dan diskritisasi spasialnya

Sumber: (Bardet and Tobita, 2001)

Kondisi batas ditentukan pada permukaan tanah ($z=0$) dan di bagian kolom bawah atau tanah batuan dasar (yaitu, $z=H$): $\tau=0$ pada $z=0$ dan $\tau=\tau_B$ pada $z=H$. Tegangan geser τ_B pada $z=H$,

yang biasanya tidak diketahui, dihitung dari kecepatan pada $z = H$.

METODE

Data Tanah

Lokasi uji N-SPT berada di Desa Tlogorejo, Kecamatan Gamping, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Karena keterbatasan data pengujian, hanya satu data lubang bor yang digunakan untuk analisis NERA. Data penyelidikan tanah diwakili oleh nilai N-SPT. Data dilakukan pada satu titik sampai kedalaman 40 meter dan tidak ada muka air tanah pada profil tanah. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Jenis tanah diklasifikasikan berdasarkan nilai N-SPT (Terzaghi, 1993) pada (Satrya, 2014) dimana sebagian besar berupa pasir. Data N-SPT yang diperoleh harus diubah menjadi nilai kecepatan gelombang geser. Telah banyak peneliti mengkaji tentang konversi kecepatan gelombang geser dari nilai N-SPT (Hasancebi and Ulusay, 2007; Dikmen, 2009; Hafezi Moghaddas, Azadi and Amanian, 2010; Maheswari, Boominathan and Dodagoudar, 2010; Chatterjee and Choudhury, 2013). Gambar 2 adalah perhitungan kecepatan gelombang geser menurut data N-SPT berdasarkan rumus Seed dan Idriss ((Seed and Idriss, 1981)) dalam (Ataee, Moghaddas and Lashkaripour, 2019):

$$V_s = 61,24 N^{0,544} \quad (2)$$

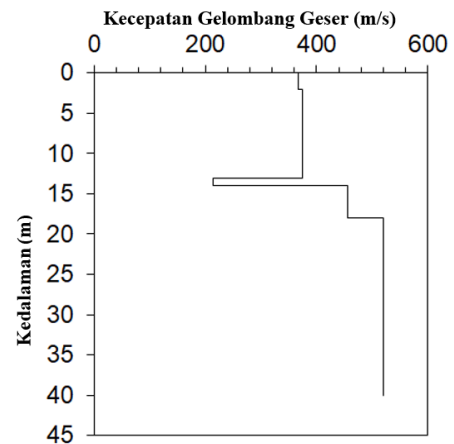
Dimana:

V_s = kecepatan gelombang geser (m/s)

N = resistansi penetrasi standar atau nilai N

Tabel 1. Data N-SPT

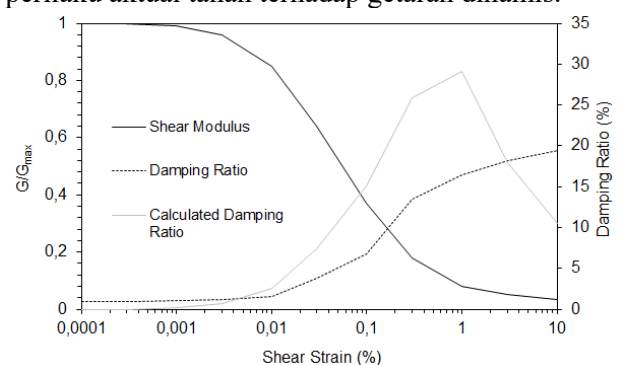
Lapis- i	Dalam (m)	Tebal Lapisan (m)	Tipe Tanah	Nilai N-SPT
1	0-2	2	Medium Sand	27
2	2-13	11	Medium Sand	28
3	13-14	1	Medium Clay	10
4	14-18	4	Dense Sand	40
5	18-40	22	Dense Sand	51



Gambar 2. Nilai kecepatan gelombang geser

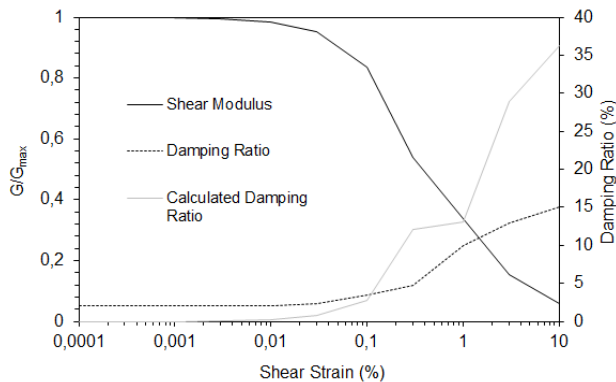
G/G_{max} dan Redaman untuk Tanah

Parameter tanah dinamis merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi respon tanah terhadap gempa. Karakteristik dinamik tanah terdiri dari parameter kekuatan tanah untuk menahan gaya geser gempa, yaitu modulus geser (G) dan rasio redaman (γ). Sifat redaman tanah memperhitungkan disipasi energi. Redaman ini tergantung pada regangan geser siklik yang dikenal sebagai rasio reduksi G (G/G_{max}). Data G/G_{max} dan γ laboratorium yang ada dikumpulkan dari berbagai sumber ((Zhang, Andrus and Juang, 2005)). Sifat dinamik tanah pasir dan tanah liat yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4 menggambarkan hubungan antara modulus geser dinamis dan rasio redaman terhadap regangan geser. Rasio redaman pada masing-masing jenis tanah dihitung secara otomatis oleh perangkat lunak NERA melalui prosedur iteratif berbasis analisis respon nonlinier satu dimensi, sehingga diperoleh nilai redaman yang merepresentasikan perilaku aktual tanah terhadap getaran dinamis.



Gambar 3. Grafik G/G_{max} dan redaman untuk tanah pasir

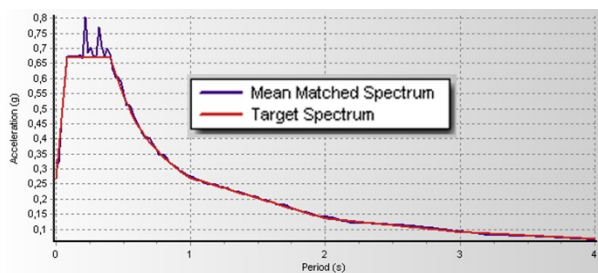
Sumber: (Shih, Thompson and Zervos, 2017)



Gambar 4. Grafik G/G_{max} dan redaman untuk tanah lempung
Sumber: (Chen *et al.*, 2019)

Data Gempa di Batuan Dasar

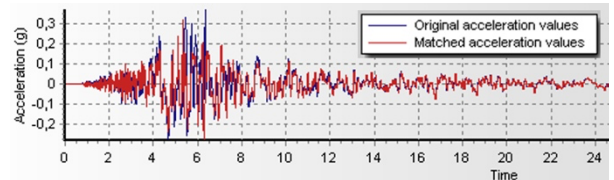
Data gempa yang terekam pada gempa bumi Loma Prieta 1989-magnitudo 6,9 yang diperoleh dari USGS (*United States Geological Survey*) (Haddadi *et al.*, 2008) digunakan sebagai masukan percepatan gempa. Gempa berkekuatan 8,4 Mw ini terletak di kedalaman 34 km di bawah permukaan bumi. Data yang masih dalam format SMC harus diolah terlebih dahulu melalui program komputer SeismoSignal (Antoniou and Pinho, 2004; Yuliasuti and Setiadipura, 2018). Data gempa telah diskalakan kembali untuk disamakan dengan spektra seismik kota Yogyakarta untuk tanah batuan dasar berdasarkan SNI-1726-2012 (BSN, 2012) menggunakan software SeismoMatch (Seismosoft, 2018). Spektra seismik desain dapat diambil dari website Cipta Karya, Kementerian PUPR (Saidi *et al.*, 2018).



Gambar 5. Spektrum respons diperoleh dari SeismoMatch
Sumber: (Seismosoft, 2020)

Data gempa yang diolah menggunakan perangkat lunak SeismoMatch menghasilkan spektrum respon dan riwayat waktu percepatan yang telah disesuaikan terhadap spektrum target. Spektrum respon hasil penyesuaian ditunjukkan

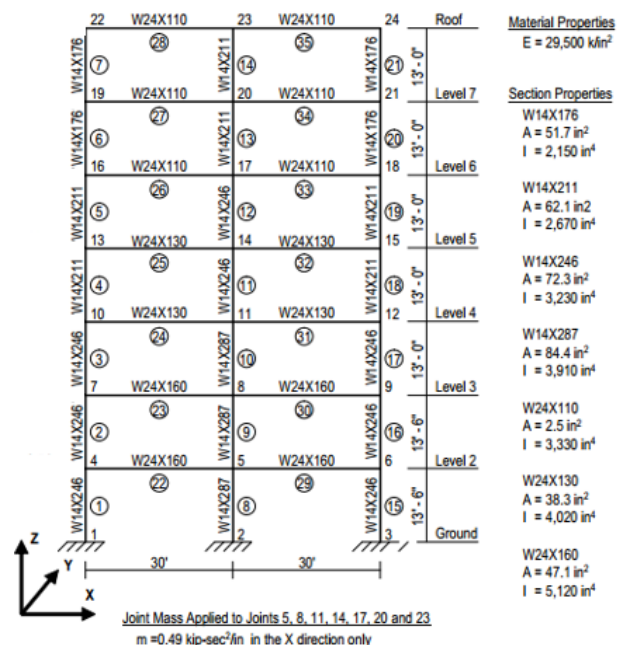
pada Gambar 5, memperlihatkan kesesuaian antara rekaman gempa dan spektrum desain, sedangkan Gambar 6 menampilkan bentuk riwayat waktu percepatan yang telah dimodifikasi sehingga konsisten dengan karakteristik spektral yang diinginkan.



Gambar 6. Riwayat waktu diperoleh dari SeismoMatch
Sumber: (Seismosoft, 2020)

Deskripsi dan Teknis

Portal baja menggunakan contoh dari SAP2000 *Verification Problem 22* yang merupakan template pemodelan struktur 2 dimensi yang disediakan oleh SAP2000 (CSI, 2017). Pemodelan struktur untuk *Problem 22* dapat dilihat pada Gambar 7. Portal baja struktural terdiri dari 7 lantai, 2 dimensi, dikenai beban gempa berupa *response spectrum* dan *time history* di permukaan tanah yang diperoleh dari software NERA.



Gambar 7. Model Struktur 2D
Sumber: (CSI, 2013)

Pemodelan struktur baja di atas memiliki spesifikasi baja sebagai berikut:

$E = 200000 \text{ MPa}$
 $\mu = 0.3$
 $f_y = 248.2 \text{ MPa}$
 $f_u = 400 \text{ MPa}$

Kasus Analitis

Kasus analitik dinamis terdiri dari analisis modal, spektrum respons (*response spectrum*) dan riwayat waktu (*time history*) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Analisis modal digunakan untuk menentukan mode yang diambil maksimum 7 jumlah mode. Analisis spektrum respon SPECSRSS adalah analisis dinamik dengan teknik kombinasi modal SRSS, sedangkan Analisis spektrum respon SPECCQC adalah analisis dinamik dengan teknik kombinasi modal CQC. Selain analisis respon spektrum, analisis riwayat waktu juga dilakukan. Analisis riwayat waktu modal, MHIST1, dan analisis riwayat waktu integrasi langsung, DHIST1, menggunakan interval waktu pengambilan sampel sebesar 0,02 detik untuk analisis. Untuk menyelidiki apakah interval ini terlalu kasar untuk hasil yang konvergen, interval waktu sampling dikurangi menjadi 0,001. Kasus interval baru ini diberi nama MHIST2 dan DHIST2. Peredaman untuk analisis respon spektrum adalah sebesar 0,05 untuk semua mode. Peredaman untuk analisis riwayat waktu modal adalah redaman proporsional konstan dengan nilai koefisien proporsional massa 0,3686 dan nilai koefisien proporsional kekakuan $5,127 \times 10^{-3}$. Redaman untuk analisis riwayat waktu integrasi langsung sama dengan analisis riwayat waktu modal. Analisis riwayat waktu menggunakan metode integrasi waktu Hiber-Hughes-Taylor.

Tabel 2. Kasus Analisis

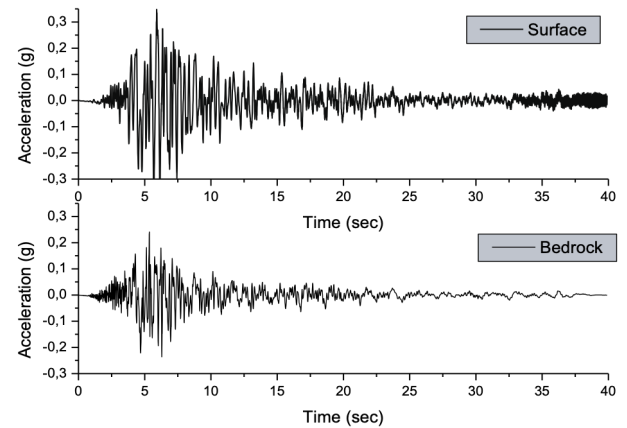
Case	Load Case
1	Modal
2	Response Spectrum Analysis SPECSRSS
3	Response Spectrum Analysis SPECCQC
4	Modal Time History MHIST1
5	Direct Integration Time History DHIST1
6	Modal Time History MHIST2
7	Direct Integration Time History DHIST2

Sumber: CSI (2013)

HASIL DAN PEMBAHASAN

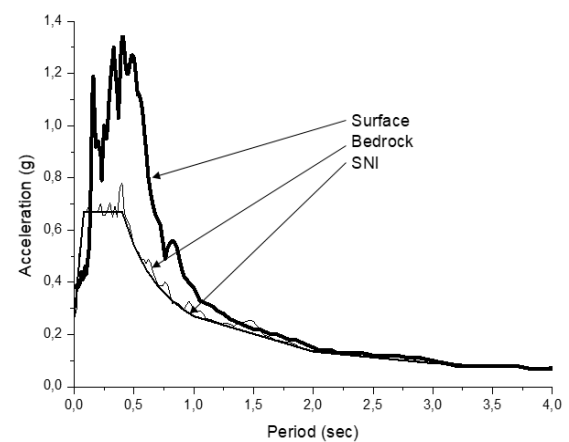
Hasil Perangkat Lunak NERA

Keluaran dari perangkat lunak NERA adalah riwayat waktu dan spektrum respons di permukaan tanah. Gambar 8 menunjukkan riwayat waktu profil tanah. Terlihat bahwa percepatan pada lapisan 1 atau permukaan tanah sebesar 0,385g sedangkan pada batuan dasar sebesar 0,249g. Ada peningkatan percepatan dari batuan dasar ke permukaan sebesar 1,5.



Gambar 8. Riwayat waktu gempa di batuan dasar terhadap permukaan tanah

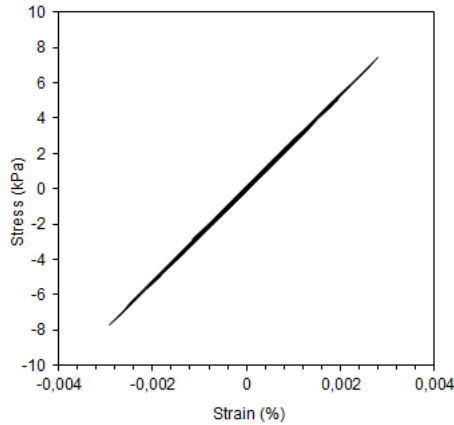
Gambar 9 menunjukkan spektrum respon dengan rasio redaman 5% pada batuan dasar dan permukaan tanah dibandingkan dengan SNI (BSN, 2012). Spektrum respon di batuan dasar dan SNI (BSN, 2012) relatif sama tetapi spektrum respon di permukaan tanah lebih tinggi dari pada batuan dasar dan SNI. Dapat dilihat bahwa profil tanah mempengaruhi amplifikasi percepatan seismik dari batuan dasar ke permukaan tanah.



Gambar 9. Perbandingan spektrum respons

Kurva tegangan-regangan adalah fitur terbaik untuk mengidentifikasi perilaku tanah

nonlinier terutama di bawah percepatan gempa. Kurva histeresis pada Gambar 10 menunjukkan bahwa tanah berperilaku dalam kondisi elastis. Tanah mempunyai kekakuan yang tinggi untuk menahan percepatan tanah akibat gempa.



Gambar 10. Perbandingan spektrum respons

Analisis Dinamis Berdasarkan Respons Spesifik Situs

Rasio massa partisipasi modal/*Modal participating mass ratio* menentukan persentase seberapa banyak massa struktural model berpartisipasi pada arah dan modal tertentu. Model struktural dapat digunakan dalam analisis statik non-linier jika modal pertama dinyatakan dominan. Modal pertama dinyatakan dominan dalam suatu struktur apabila kontribusi rasio massa partisipasi modal pertama terhadap modal lainnya lebih besar dari 80%.

Dari hasil keluaran SAP2000, berdasarkan Tabel 3, rasio massa partisipasi modal pertama adalah 79,9%. Modal pertama ini lebih dominan dibandingkan modal lainnya. Ditemukan bahwa respon struktur tidak dipengaruhi oleh modal 1, rasio massa partisipasi modal 1 tidak dominan, maka modal selanjutnya harus ditinjau kembali hingga rasio massa partisipasi lebih besar 90%. Ditemukan 7 moda tersebut cukup untuk dianalisis, sehingga memenuhi persyaratan rasio partisipasi massa dalam pasal 7.9.1 SNI-1726-2012 lebih besar dari 90%(BSN, 2012).

Tabel 3. Rasio massa partisipasi modal

Mode	Period (sec)	U_x (unitless)	Sum U_x (unitless)
1	1,273	0,7996	0,7996
2	0,432	0,113	0,913
3	0,242	0,041	0,955

Mode	Period (sec)	U_x (unitless)	Sum U_x (unitless)
4	0,16	0,021	0,975
5	0,119	0,014	0,99
6	0,095	0,006	0,997
7	0,079	0,003	1

Tabel 4. Hasil analisis dinamis

Analysis Case	Output		
	Lendutan U_x join 22 (m)	Gaya Aksial frame 1 (kN)	Moment frame 1 (kNm)
Respon Spektrum SRSS	0,147	1239,44 6	1261,12
Respon Spektrum CQC	0,147	1238,22	1269,49
Modal Time History 1 (MHIST 1)	0,143	1221,1	1141
Direct Integration Time History (DHIST 1)	0,143	1218,56	1122,35
Modal Time History 2 (MHIST 2)	0,143	1219,76	1121,85
Direct Integration Time History (DHIST 2)	0,143	1219,75	1121,86

Keluaran dari analisis dinamik terdiri dari perpindahan (m), gaya aksial (kN) dan momen (kN/m) dapat dilihat pada Tabel 4. Perpindahan diambil dari join nomer 22, kemudian untuk gaya aksial dan momen, diambil dari frame nomer 1.

Hasil respon spektrum memberikan hasil yang sama pada perpindahan dan relatif sama untuk gaya aksial, namun untuk momen lentur terdapat sedikit perbedaan sekitar 8 kNm. Perbedaannya dapat dianggap perbedaan kecil dan dianggap hasil yang sama. Analisis riwayat waktu memberikan hasil perpindahan, gaya aksial dan momen lentur yang sama. Namun untuk *modal time history 1* (MHIST 1), hasil momen lentur relatif besar perbedaannya dengan analisis time history lainnya. Hasil ini berasal dari interval waktu yang besar, 0,02 detik. Interval ini tidak mempengaruhi riwayat waktu integrasi langsung/

Direct Integration Time History (DH1ST 1). Analisis riwayat waktu harus menggunakan interval waktu sekecil mungkin agar supaya untuk menangkap data input percepatan gempa yang tinggi.

KESIMPULAN

Profil tanah sebagian besar pasir mempengaruhi amplifikasi dari batuan dasar ke permukaan tanah. Untuk mencocokkan spektrum respons desain SNI, SeismoMatch digunakan untuk mencocokkan percepatan tanah yang diambil dari database PEER. Ini digunakan sebagai percepatan batuan dasar. Keluaran software NERA, terlihat bahwa percepatan tanah meningkat dari 0,249g menjadi 0,385g atau percepatan permukaan sekitar 1,5 kali lipat dibandingkan batuan dasar. Dapat dikatakan bahwa software NERA dapat digunakan untuk mengetahui pengaruh profil tanah terhadap amplifikasi percepatan tanah. SAP2000v14 digunakan sebagai perangkat lunak analisis dinamis. Hasil analisis modal bahwa 7 moda tersebut cukup untuk analisis, sehingga memenuhi persyaratan rasio partisipasi massa dalam pasal 7.9.1 SNI-1726-2012 yaitu 90%. Hasil analisis gempa dinamik baik analisis *Time History* maupun *Response Spectrum* memiliki hasil yang relatif sama dalam perpindahan, gaya aksial dan momen lentur. Pada *Modal Time History 1* (MHIST 1) interval waktu yang besar mempengaruhi momen lentur. Setelah interval waktu kecil digunakan, baik *Modal Time History 2* (MHIST 2) dan *Direct Integration Time History* (DHIST 2) memberikan hasil yang sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Universitas Janabadra atas dana hibah internal penelitian dan publikasi tahun 2025 dan para mahasiswa Muhamad Iklas Sul Amal dan Karina Oktavia.

DAFTAR PUSTAKA

- Antoniou, S. and Pinho, R. (2004) *SeismoSignal: A computer program for signal processing of strong-motion data*. Technical Report 4.0. 0. Pavia, Italy: SeismoSoft.
- Ataee, O., Moghaddas, N.H. and Lashkaripour, G.R. (2019) 'Estimating shear wave velocity of soil using standard penetration test (SPT)

blow counts in Mashhad city', *Journal of Earth System Science*, 128(3), pp. 1–25.

- Bardet, J.P. and Tobita, T. (2001) 'NERA: a computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits', *Department of Civil Engineering, University of Southern California* [Preprint].
- BSN (2012) 'Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1726: 2012', *Jakarta: BSN* [Preprint].
- Chatterjee, K. and Choudhury, D. (2013) 'Variations in shear wave velocity and soil site class in Kolkata city using regression and sensitivity analysis', *Natural hazards*, 69(3), pp. 2057–2082.
- Chen, G. *et al.* (2019) 'Shear modulus and damping ratio of sand–gravel mixtures over a wide strain range', *Journal of Earthquake Engineering*, 23(8), pp. 1407–1440.
- CSI (2013) 'SAP2000, Computers and structures Inc', *Berkeley, CA, USA* [Preprint].
- CSI (2017) 'SAP2000: Integrated Software for Structural Analysis and Design, Ver. 19.' CSI Berkeley, CA.
- Dikmen, Ü. (2009) 'Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils', *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), pp. 61–72.
- Effendi, M.K. and Uckan, E. (2013) 'True nonlinear seismic response analyses of soil deposits', in *Procedia Engineering*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.035>.
- Haddadi, H. *et al.* (2008) 'Center for engineering strong-motion data (CESMD)', in *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, October*, pp. 12–17.
- Hafezi Moghaddas, N., Azadi, A. and Amanian, M. (2010) 'Assessment of shear wave velocity based on standard penetration and accuracy of the results in the range of Mashhad City', in *Fourteenth Conference of Iran Geophysics, Geophysical Institute (in Persian)*.
- Hasancebi, N. and Ulusay, R. (2007) 'Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,

- 66(2), pp. 203–213.
- Iswanto, E.R. and Yee, E. (2016) ‘Comparison of Equivalent Linear and Non Linear Methods on Ground Response Analysis: Case Study at West Bangka Site’, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 18(1), pp. 23–29.
- Kaklamanos, J. and Bradley, B.A. (2015) ‘Evaluation of 1D nonlinear total-stress site response model performance at 114 KiK-net downhole array sites’, in *Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp. 1–4.
- Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Maheswari, R.U., Boominathan, A. and Dodagoudar, G.R. (2010) ‘Use of surface waves in statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance of Chennai soils’, *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(2), pp. 119–137.
- Saidi, T. *et al.* (2018) ‘Spectral displacement (SD) of banda aceh’s soft soil for seismic vulnerability assessment’, in *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, p. 10001.
- Satrya, T.R. (2014) ‘Engineering Geological Mapping at Center of Surabaya Region by Developing Geo-Tomography Image Analysis’, in *Celeb. Int. Conf. Earth Sci.*, no.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (2012) ‘Computer program SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites’, *University of California, Berkeley, California* [Preprint].
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1981) ‘Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes’, in *ASCE national convention (MO)*, pp. 481–544.
- Seismosoft (2018) ‘SeismoMatch—a computer program for spectrum matching of earthquake records’.
- Seismosoft (2020) ‘SeismoMatch 2021: A computer program for spectrum matching of earthquake records’.
- Shih, J.-Y., Thompson, D.J. and Zervos, A. (2017) ‘The influence of soil nonlinear properties on the track/ground vibration induced by trains running on soft ground’, *Transportation Geotechnics*, 11, pp. 1–16.
- Terzaghi, K. (1993) ‘Peck, R. B. 1993’, *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa* [Preprint].
- Yuliasuti, Y. and Setiadipura, T. (2018) ‘Winston-Batan: A Seismological Ground-Motion Analysis Code’, *Jurnal Natural*, 18(3), pp. 152–160.
- Zalbuin, L., Tobita, T. and Likitlersuang, S. (2017) ‘One-dimensional analysis of liquefaction potential: A case study in Chiang Rai Province, Northern Thailand’, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, 73(4), pp. 135–147.
- Zhang, J., Andrus, R.D. and Juang, C.H. (2005) ‘Normalized shear modulus and material damping ratio relationships’, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(4), pp. 453–464.