

METODE PRAKTIS DALAM ESTIMASI RESPONS DINAMIK TANAH AKIBAT GEMPA DAN STABILITAS TIMBUNAN BERLERENG DI ATAS SITUS TANAH SEDANG

DELFE Briyadi Sofyan¹

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas.

*Corresponding Author : ✉ delfebri@eng.unand.ac.id

Naskah diterima 31 Oktober 2025. Disetujui: 12 Desember 2025. Diterbitkan : 30 Desember 2025.

ABSTRAK

Pemanfaatan metode praktis dalam perhitungan respons dinamik tanah akibat penjarangan gelombang gempa dalam deposit tanah dan dampaknya terhadap struktur di atasnya ditampilkan dalam makalah ini. Metode praktis biasa digunakan dalam preliminary desain untuk memperkirakan dimensi-dimensi struktur yang ideal dari ketersediaan data yang didapat dari penyelidikan lapangan dan laboratorium sebelum diolah kembali dengan detail dengan perangkat pemrograman rekayasa. Pada makalah ini, perhitungan dilakukan merujuk pada tabel-tabel yang dipublikasikan SNI-1726 dan tabel paper referensi Studi kasus dilakukan pada timbunan berlereng terhadap beban seismik di suatu situs kelas tanah sedang (Sd). Hasil yang diperoleh adalah pemetaan angka keamanan lereng akibat percepatan gempa dipilih yang diaplikasikan terhadap struktur tersebut.

Kata kunci : metode praktis, penjarangan gempa, timbunan berlereng, situs tanah sedang

1. PENDAHULUAN

Kejadian gempa Loma Prieta 1989 (BMKG & USGS, 2009; CNN, 2014; NBC Bay Area, 2019) telah memberikan pelajaran penting akan fenomena amplifikasi pada deposit tanah. Amplitudo getaran gempa yang tidak begitu besar di batuan dasar dapat mengalami pembesaran sekitar dua kali lipat saat sampai di permukaan tanah.. Kerusakan besar akibat penjarangan gelombang gempa ke permukaan, terjadi di kawasan yang didominasi oleh deposit tanah lunak yang tebal. Peristiwa ini secara jelas memperlihatkan bahwa dalam desain beban gempa harus dipertimbangkan kondisi tanah lokal untuk mendapatkan secara detail perilaku respons dinamik tanah akibat getaran gempa bumi. Peraturan desain gempa SNI 1726 SNI-2002; SNI-2012; SNI-2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019; Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung, 2002; Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung, 2012) telah

mengimplementasikan faktor tersebut dengan mengelompokkan situs tanah lokal ke dalam dua kelas situs batuan (Sa, Sb) dan tiga kelas situs tanah (Sc, Sd, Se) yang ditentukan dari ukuran kecepatan gelombang geser ataupun kuat geser tahanan penetrasi rata-rata hingga kedalaman 30 meter di bawah permukaan tanah (Syahbana et al., 2022).

Saat ini, kemajuan perkembangan prosesor komputer yang masif telah dimanfaatkan dalam bidang rekayasa struktur dinamik untuk mengkombinasikan pemrograman grafis dan perhitungan numerik pada analisa penjaralan gelombang gempa mulai dari batuan dasar hingga beresonansi pada model struktur yang ditinjau dalam skala penuh. Perangkat tersebut mengolah kombinasi parameter-parameter desain yang sangat kompleks dengan pemakaian durasi olah data yang lebih singkat, dimana saat dulu sulit untuk dilakukan.

Akan tetapi, penggunaan perangkat bantu analisa di atas membutuhkan kejelian dan pemahaman *user* akan pengaruh input data-data yang dimasukkan sehingga benar-benar akan didapat hasil olah data yang sesuai dengan teori-teori dalam rekayasa. Istilah yang cukup familiar seperti *"jika input sampah maka output berupa sampah pula"* adalah sesuatu yang perlu diperhatikan para insinyur saat menggunakan perangkat bantu analisa dalam mendesain proyek. Penggunaan metode praktis dalam analisa rekayasa tetap dibutuhkan sebagai pembanding hasil olah data. Seharusnya tidak terjadi perbedaan hasil yang sangat mencolok dari perbandingan kedua metode pekerjaan di atas. Selain itu penggunaan metode praktis juga bisa dimanfaatkan dalam *preliminary* desain untuk memperkirakan dimensi-dimensi struktur yang ideal dari ketersediaan data yang didapat dari penyelidikan lapangan dan laboratorium sebelum diolah kembali dengan detail dengan perangkat pemrograman teknik yang biasa dipakai dalam bidang rekayasa.

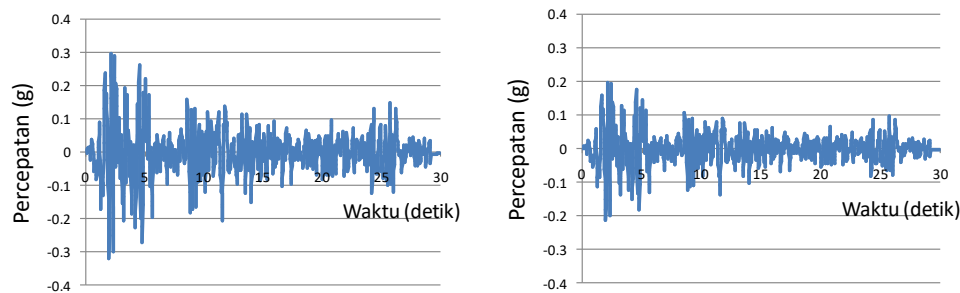
Penggunaan metode praktis dalam analisa penjaralan gelombang gempa di bidang rekayasa sipil ditampilkan dalam makalah ini. Analisa-analisanya dilakukan merujuk pada tabel-tabel yang dipublikasikan SNI-1726 dan tabel paper referensi Studi kasus juga dilakukan pada struktur geoteknik berupa stabilitas timbunan berlereng terhadap beban seismik di situs kelas tanah sedang (Sd). Hasil yang diperoleh adalah pemetaan angka keamanan lereng akibat percepatan gempa yang diaplikasikan terhadap struktur.

2. METODA PENELITIAN

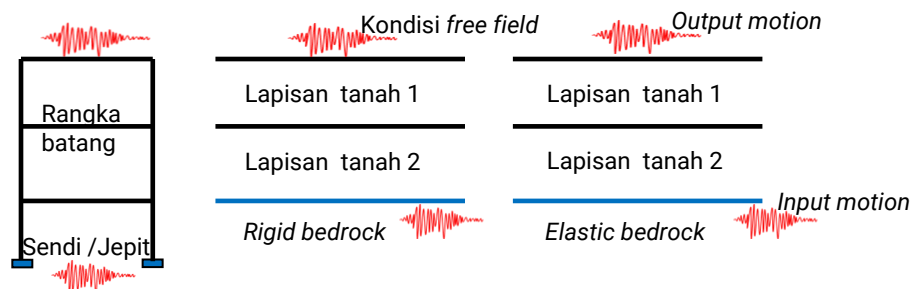
Cara paling umum untuk menggambarkan getaran gempa adalah dari riwayat waktu. Parameter-parameternya dapat berupa percepatan, kecepatan, dan perpindahan. Percepatan gempa arah horisontal digunakan untuk mendeskripsikan pergerakan tanah dalam kaitannya dengan gaya inersial pada struktur geoteknik. Nilai percepatan puncak (pga) dapat diketahui dari ukuran amplitudo riwayat waktu pada akselerogram. Nilai percepatan puncak bisa berkorelasi dengan intensitas gempa bumi. Getaran gempa dengan parameter percepatan puncak yang tinggi biasanya akan berpotensi lebih merusak pada berbagai tipe struktur.

Dalam desain beban percepatan gempa untuk diaplikasikan pada struktur geoteknik biasa dilakukan dengan melakukan penskalaan secara proporsional terhadap pga rekaman percepatan gempa referensi yang terdokumentasi di suatu stasiun pencatat gempa yang umumnya berada di atas kelas situs tanah keras maupun tanah sedang. Sebagai contohnya teknik penskalaan terhadap pga yang dilakukan pada rekaman percepatan gempa El Centro 1940 arah utara-selatan ($pga=0.32g$) seperti yang terlihat pada Gambar 1, Perhitungan dilakukan secara sederhana yaitu dengan mengalikan percepatan di sepanjang waktu

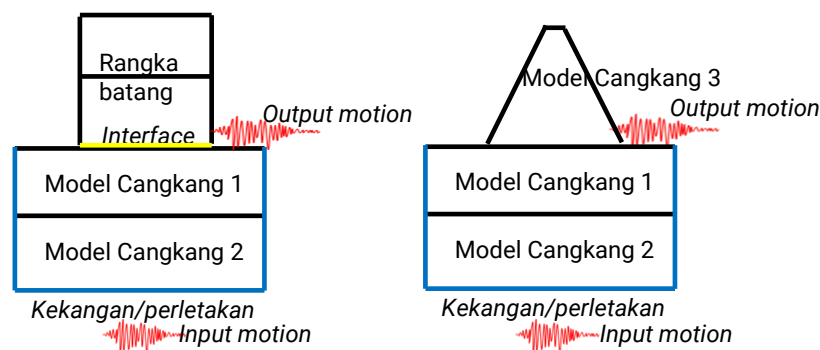
rekaman dengan faktor amplifikasi 0.667 untuk semua frekuensi gelombang sehingga akan dihasilkan pga percepatan sebesar 0.2g.. Faktor amplifikasi yang dimaksud tersebut adalah nilai perbandingan amplitudo percepatan gempa di permukaan deposit tanah dengan amplitudo percepatan gempa di batuan dasar suatu situs tanah untuk frekuensi gelombang tertentu akibat penjararan gelombang gempa ke permukaan tanah yang bisa dilakukan dalam domain waktu maupun frekuensi gelombang.



Gambar 1. Penskalaan terhadap PGA dari accelerogram gempa El Centro 1940



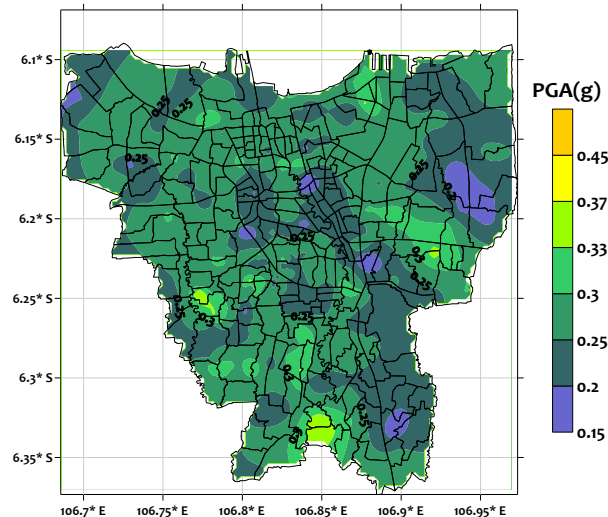
Gambar 2. Pemodelan pada analisa struktur dinamik



Gambar 3. Pemodelan pada interaksi tanah struktur

Untuk mendapatkan percepatan gempa di satu titik lokasi permukaan tanah suatu situs dapat dilakukan secara numerik seperti yang dikerjakan pada analisa struktur bangunan tinggi terhadap beban dinamik lateral. Beberapa perbedaan filosofis perhitungannya adalah lebar model,, tipe perletakan yang digunakan serta pengaruh muka air tanah apabila ikut disertakan dalam analisa (Gambar 2). Saat ini, dengan kemajuan perkembangan prosesor komputer untuk mendukung pemograman maka akan sangat memudahkan untuk

dilakukan perhitungan analisa dinamik dalam skala penuh (pemodelan interaksi tanah struktur) seperti yang ditampilkan pada Gambar 3. Untuk kebutuhan mikrozonasi gempa, maka dapat dilakukan perhitungan di banyak titik situs tanah yang umumnya dilakukan dalam *grid* jarak tertentu sehingga dapat dibuatkan kontur hasil percepatannya. Contoh dari hasil kontur tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Mikrozonasi gempa bumi M_w 7,0 (Alisyahbana dkk., 2022)

Secara praktis, nilai faktor amplifikasi pga kondisi *free field* dilampirkan di dalam standar pedoman perencanaan bangunan gedung. Diantaranya adalah standar SNI-1726 (SNI-1726-2002; SNI-1726-2012; SNI-1726-2019) (Badan Standardisasi Nasional, 2019; *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung*, 2002; *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung*, 2012) yang telah beberap kali diperbaharui seperti yang terlihat berturut-turut pada Tabel 1 hingga Tabel 3. Dari tabel-tabel yang dilampirkan terlihat bahwa semakin besar nilai amplitudo pga gempa maka nilai faktor amplifikasi tanah akan cenderung mengalami penurunan. Selain besar pga di batuan dasar, kelas situs tanah juga berpengaruh terhadap nilai amplifikasi. Pada standar perencanaan tersebut, ketiga kelas situs tanah (S_c untuk tanah keras, S_d untuk tanah sedang; S_e untuk tanah lunak) didefinisikan dari nilai kecepatan gelombang geser (V_s) tanah seragam yang dihitung rata-rata hingga kedalaman 30 meter menurut Persamaan 1. Dalam kondisi tidak lengkapnya data V_s di lapangan kadangkala memungkinkan untuk dilakukan konversi nilai hasil uji standar penetration test (N_{SPT}) ke nilai V_s . Persamaan-persamaan konversi yang bisa diaplikasikan untuk kebutuhan tersebut telah banyak dipublikasikan pada sejumlah simposium maupun jurnal ilmiah. Salah satunya hasil studi terdahulu yang ditampilkan pada Gambar 5. Situs tanah sedang (S_d) akan memiliki rata-rata V_s mulai dari 175 hingga 350 m/detik. Di batuan dasar dapat digunakan V_s sebesar 750 hingga 1500 m/detik.

Tabel 1. Perbandingan *pga* di batuan dasar dan muka tanah (SNI-1726-2002)

Wilayah Gempa	Percepatan puncak batuan dasar ('g')	Percepatan puncak muka tanah A_0 ('g')			
		Tanah Keras	Tanah Sedang	Tanah Lunak	Tanah Khusus
1	0,03	0,04	0,05	0,08	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi
2	0,10	0,12	0,15	0,20	
3	0,15	0,18	0,23	0,30	
4	0,20	0,24	0,28	0,34	
5	0,25	0,28	0,32	0,36	
6	0,30	0,33	0,36	0,38	

Tabel 2. Faktor amplifikasi *pga* (SNI-1726-20012)

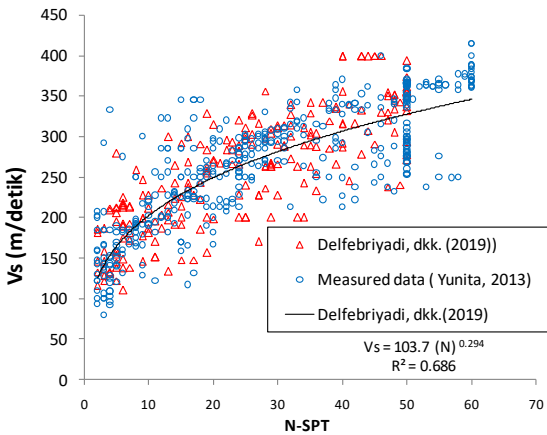
Kelas Situs	PGA ≤ 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA ≥ 0,5
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

Tabel 3. Faktor amplifikasi *pga* (SNI-1726-2019)

Kelas Situs	PGA ≤ 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA = 0,5	PGA ≥ 0,6
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
SE	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1

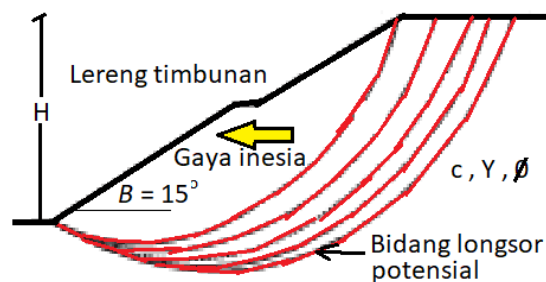
$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n h_i / v_{si}}$$

Persamaan (1)



Gambar 5. Korelasi nilai V_s dengan N_{spt} (Sofyan et al., 2019)

Pada analisa seismik stabilitas lereng, bidang-bidang longsor potensial dicari secara *trial-error* hingga didapatkan nilai angka keamanan (*FS*) yang paling kecil. Untuk mempermudahnya bisa dibuatkan kedalam suatu kontur nilai. *FS* tersebut dapat didefinisikan sebagai perbandingan tegangan yang diakibatkan oleh inersia massa tanah di atas bidang longsor dengan tegangan geser tahanan yang dimiliki di sepanjang bidang longsor tersebut. Kelongsoran akan terjadi apabila tegangan geser tahanan total yang dimiliki lebih kecil dari tegangan akibat inersia massa tanah yang bekerja akibat aktivitas seismik. Prater (Prater, 1979) mempublikasikan tabel-tabel (Tabel 4) untuk mendapatkan parameter dimensi lereng timbunan kritis dan properti kekuatan geser massa tanah berdasarkan gaya lateral akibat gempa yang bekerja di atas bidang longsor yang berbentuk busur (Gambar 6).



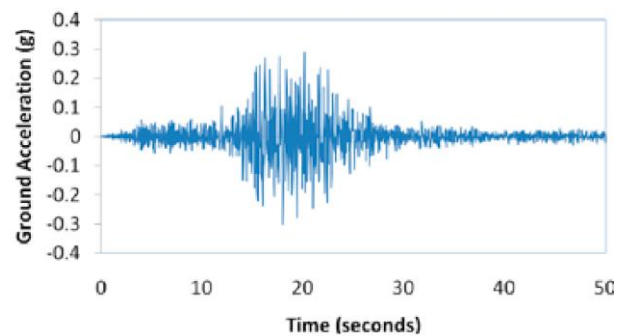
Gambar 6. Bidang longsor potensial dan dimensi lereng timbunan

Tabel 4. Nilai percepatan gempa kritis (dalam satuan *g) lereng 15° (Prater, 1979)

$\tan \phi$	$c/\gamma H$			
	0.05	0.10	0.15	0.20
0.1	0.00	0.08	0.15	0.20
0.2	0.10	0.20	0.27	0.33
0.3	0.20	0.31	0.39	0.44
0.4	0.30	0.41	0.50	0.55
0.5	0.40	0.51	0.60	0.66
0.6	0.49	0.61	0.70	0.76
0.7	0.58	0.70	0.80	0.87
0.8	0.66	0.79	0.89	0.97
0.9	0.74	0.87	0.98	1.07

3. STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

Pada studi ini akan disimulasikan stabilitas timbunan berlereng yang berada di atas tanah dasar situs tanah sedang (Sd) di daerah kota Padang. Beban gempa yang digunakan dalam simulasi adalah gempa Padang 2009 dengan magnitudo (M_w) 7,6 dengan jarak sumber gempa (R) 60 km dari kota Padang di kedalaman 81 km (Earthquake Engineering Research Institute, 2009). Gempa yang terekam memiliki percepatan puncak sekitar 0,3g di lokasi stasiun pencatat di dekat kota Padang (Gambar 7).



Gambar 7. Accelerogram Gempa Padang 2009 (BMKG/USGS, 2009)

Satu-satunya rekaman accelerogram gempa pada saat itu adalah rekaman getaran gempa yang terekam di stasiun Limau Manis. Stasiun pencatat gempa berada kaki bukit di atas situs tanah keras (S_c). Sehingga tidak dimungkinkan mendapatkan accelerogram yang terekam di daerah situs tanah sedang (S_d). Untuk menyiasati masalah ini maka dapat dilakukan pembuatan accelerogram artifisial ataupun memodifikasi accelerogram yang terekam di situs tanah keras (S_c) dengan faktor amplifikasi tanah yang dilampirkan dalam SNI-1726.

Merujuk pada SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019) (Tabel 3), maka untuk p_{ga} batuan dasar = 0.3g dan kelas situs S_c diperoleh faktor amplifikasi tanah f_{pga} sebesar 1.2. Dan, untuk kelas situs S_d diperoleh faktor amplifikasi tanah f_{pga} sebesar 1.3. Sehingga percepatan tanah puncak p_{ga} di situs tanah sedang (S_d) dapat dihitung perbandingan secara sederhana sebagai; $p_{ga(Sd)} = (1.3/1.2) * p_{ga(Sc)} = 0.33g$.

Setelah didapatkannya p_{ga} untuk situs tanah sedang (S_d) dari gempa Padang 2009, maka langkah selanjutnya adalah menghitung stabilitas lereng timbunan berdasarkan beban seismik tersebut. Dengan memanfaatkan metode yang dipublikasikan Prater (Prater, 1979) maka dapat diaplikasikan perhitungan stabilitas lereng terhadap beban seismik secara sederhana dan dilakukan pemetakan nilai-nilai parameter desain timbunan berlereng seperti yang ditampilkan dalam Tabel 5. Akan disimulasikan 3 nilai kemiringan lereng (β) yaitu 30, 45 dan 60 derajat (Gambar 6). Berat volume material timbunan (γ) = 16.5 kN/m³, dan kohesi material timbunan (c) = 20 kPa. Dimensi ketinggian lereng (H) dan sudut geser material timbunan (ϕ) akan dibuat sebagai variabel input desain. Nilai percepatan gempa maksimum akan bervariasi di kedalaman timbunan. Bidang longsor diasumsikan berbentuk busur hingga mencapai ujung dasar timbunan. Sehingga dapat diasumsikan percepatan gempa maksimum rata-rata sepanjang kedalaman longsor akan mendekati nilai percepatan gempa kondisi *free field*.

Tabel 5. Hasil pemetaan nilai parameter timbunan berlereng dan angka keamanannya

Slope	H (m)	ϕ (deg)								
		6	11	17	22	27	31	35	39	42
β (deg) =30	6	FS < 1.0			FS > 1.0					
	4									
	3									
β (deg) =45	6	FS < 1.0			FS > 1.0					
	4									
	3									
β (deg) =60	6	FS < 1.0						FS > 1.0		
	4									
	3									

Kelongsoran ($FS \leq 1.0$) terjadi apabila percepatan gempa di permukaan tanah kelas situs Sd (0.33g) lebih besar dari percepatan gempa kritis lereng timbunan yang ditinjau dan menyebabkan terjadinya deformasi permanen pada massa tanah. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa untuk ketinggian desain timbunan 3 meter dengan kemiringan lerengnya hingga 45 derajat belum nampak perubahan peta angka keamanan terhadap kelongsoran. Pada ketinggian desain timbunan lebih dari 3 meter mulai terjadi perubahan peta angka keamanan secara proporsional. Diperlihatkan pula bahwa semakin curam kemiringan timbunan maupun semakin tinggi timbunan yang akan didesain maka dibutuhkan nilai sudut geser material yang semakin besar pula agar terhindar dari kelongsoran saat menerima beban gempa yang direncanakan. Perlu dicermati frekuensi getaran gelombang gempa yang bekerja karena akan memberikan efek mekanisme geser yang terjadi antar lapisan-lapisan deposit timbunan.

4. KESIMPULAN

Studi ini menghasilkan pemetaan angka keamanan pada timbunan berlereng akibat simulasi beban percepatan gempa bumi 0.33g di dasar timbunan. Perhitungan analisa dilakukan secara manual dengan memanfaatkan metode-metode praktis yang terpublikasikan pada jurnal ilmiah maupun buku standar perencanaan.

Hasil analisa yang didapat memperlihatkan bahwa semakin curam kemiringan maupun semakin tinggi timbunan yang akan didesain maka dibutuhkan propertis parameter kekuatan material yang semakin besar pula agar terhindar dari kelongsoran saat menerima beban gempa yang disimulasikan. Kecenderungan-kecenderungan yang didapat dari hasil analisa tersebut masih sesuai dengan teori-teori dasar dalam stabilitas lereng dan penalaran gelombang gempa pada deposit tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung.
BMKG, & USGS. (2009). September 30, 2009 Strong Ground Motion Record from Padang.
<http://www.bmg.go.id/depan.bmkg>
CNN. (2014). San Francisco Shaken: The 1989 Earthquake.
<https://www.youtube.com/watch?v=TxjcjSRs6Ak>

- Earthquake Engineering Research Institute. (2009). Learning from Earthquakes: The Mw 7.6 Western Sumatra Earthquake of September 30, 2009.
- NBC Bay Area. (2019). Documentary: Loma Prieta Earthquake, 30 Years Later. https://www.youtube.com/watch?v=NfR-cC_1A4s
- Prater, E. G. (1979). Yield Acceleration for Seismic Stability of Slopes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(GT5), 682–687.
- Sofyan, D., Irsyam, M., Hutapea, B. M., Imran, I., & Asrurifak, M. (2019). Determination of the Site Amplification on Deep Soil Layer Using 1-D Site Response Analysis (Case Study: Jakarta City, Indonesia). *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 51(6), 824–838.
- Syabhana, A. J., Irsyam, M., Sofyan, D., Tanjung, M. I., Misliniyati, R., Ridwan, M., Aldiamar, F., Hanifa, N. R., Beddu, A., & Himawan, A. (2022). Role of the Indonesian Society for Geotechnical Engineering in the Development of Sustainable Earthquake Resilience Infrastructure in the Recent Years. In *Sustainable Geo-Technologies for Climate Change Adaptation* (pp. 185–194). Springer Nature.
- Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung (Issue SNI 03-1726-2002). (2002).
- Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung (Issue SNI 03-1726-2012). (2012).