

Evaluasi Perilaku Tanah Dasar Embung Rano Tadulako terhadap Pengaruh Gempa

Fiisytin Rodiah ^{*1a}, Hardiyanti Sarika ^{*2}, Rizki Amaliah ^{*3}, Sri Warliawati ^{*4}, Ni Made Ayu Juli Andjani ^{*5}

Submit:
10 September
2025
Review:
8 Oktober 2025
Revised:
1 November
2025
Published:
27 Desember
2025

^{*1}Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, fiisytinrodiah@untad.ac.id

^{*2}Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, hardiyanti.sarika@untad.ac.id

^{*3}Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, rizkyamaliaw97@gmail.com

^{*4}Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, sriwarliawati@untad.ac.id

^{*5}Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, ni.made.ayu@untad.ac.id

^aCorresponding Author: fiisytinrodiah@untad.ac.id

Abstrak

Kota Palu dikenal sebagai wilayah rawan gempa dengan catatan peristiwa besar, salah satunya gempa 28 September 2018 (Mw 7,4) yang menimbulkan dampak signifikan. Embung Rano Tadulako memiliki peran penting sebagai penyedia air baku di kawasan Universitas Tadulako, sehingga perlu dipastikan kondisi tanah dasarnya tetap aman terhadap pengaruh gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas tanah dasar embung berdasarkan analisis daya dukung dinamis menggunakan metode *Pseudostatik*. Data primer berupa hasil uji sondir di 4 titik (S1-S4) dengan 20 potongan melintang sepanjang embung, sedangkan data sekunder meliputi parameter gempa dari studi mikrotremor yang menunjukkan nilai PGA = 0,919 g di kawasan Universitas Tadulako. Analisis dilakukan dengan menghitung koefisien gempa horizontal ($k_h = 0,46$ dengan $\alpha = 0,5$), daya dukung ultimate menggunakan metode Terzaghi, dan reduksi kapasitas akibat gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa 84% area embung (16 dari 19 segmen) memenuhi kriteria keamanan dengan faktor keamanan (SF) $\geq 1,5$, dengan nilai SF berkisar antara 0,150 hingga 7,402. Namun teridentifikasi titik kritis pada segmen 9-10 dengan SF = 0,150 yang mengindikasikan adanya zona lemah. Secara umum, tanah dasar embung relatif aman terhadap pengaruh gempa, namun diperlukan perkuatan lokal pada titik kritis dan monitoring berkelanjutan untuk memastikan stabilitas jangka panjang.

Kata kunci: Embung Rano Tadulako, daya dukung dinamis, gempa, stabilitas tanah dasar, Metode *Pseudostatik*

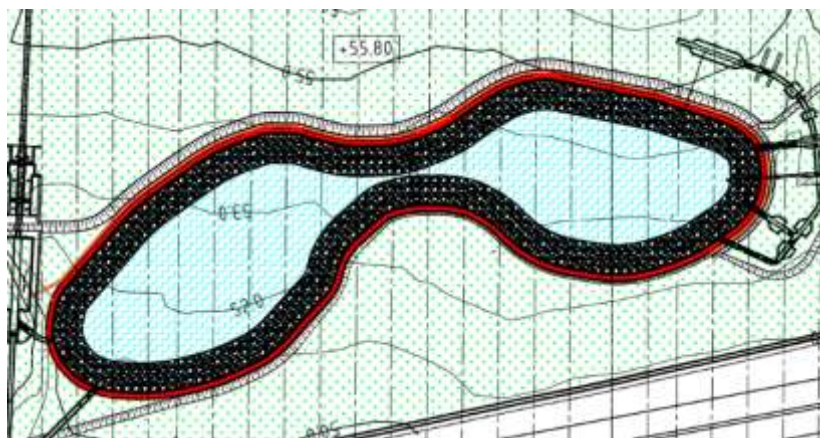
Abstract

Palu City is an earthquake-prone area, notably marked by the September 28, 2018 earthquake (Mw 7.4) which caused significant damage. Rano Tadulako Reservoir serves as a crucial raw water supply for Tadulako University, necessitating evaluation of its subgrade stability against seismic effects. This study evaluates subgrade stability through dynamic bearing capacity analysis using the pseudostatic method. Primary data includes Cone Penetration Tests at 4 points across 20 cross-sections, while secondary data comprises seismic parameters showing PGA = 0.919 g. Analysis involved calculating horizontal seismic coefficient ($k_h = 0.46$), ultimate bearing capacity using Terzaghi's method, and seismic capacity reduction. Results show 84% of the reservoir (16 of 19 segments) meets safety criteria with SF ≥ 1.5 , ranging from 0.150 to 7.402. Critical points were identified at segments 9-10 with SF = 0.150. Overall, the subgrade is relatively safe, though local reinforcement and continuous monitoring are essential for long-term stability.

Keywords: Rano Tadulako Reservoir, dynamic bearing capacity, earthquake, subgrade stability, pseudostatic method

PENDAHULUAN

Kota Palu merupakan wilayah dengan aktivitas seismik tinggi yang dibuktikan oleh gempa bumi dahsyat berkekuatan 7,5 Mw pada 28 September 2018 yang berpusat di Patahan Palu-Koro. Gempa ini terjadi pada kedalaman 10 km dengan rupture sepanjang lebih dari 140 km dan perpindahan rata-rata 3-5 meter, mengakibatkan lebih dari 4.000 korban jiwa, kerusakan 68.451 rumah, serta kerusakan infrastruktur yang masif [1][2]. Peristiwa ini juga memicu tsunami lokal di Teluk Palu dan pencairan tanah yang parah di beberapa lokasi, menunjukkan kerentanan tinggi wilayah terhadap bahaya seismik [3][4]. Kondisi geologi dan tektonik kompleks kawasan Palu dengan sistem patahan aktif menekankan pentingnya evaluasi stabilitas struktur infrastruktur kritis seperti embung terhadap pengaruh gempa untuk memastikan keamanan jangka panjang [1].



Gambar 1. Layout Embung Rano Tadulako

Embung Rano Tadulako merupakan infrastruktur penting yang berfungsi sebagai penyedia air baku dengan kapasitas 11.000 m³ di kawasan Universitas Tadulako. Mengingat lokasi embung berada di zona gempa tinggi dengan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) mencapai 0,919 g [5], evaluasi stabilitas tanah dasar menjadi aspek krusial untuk memastikan keamanan struktur terhadap pengaruh gempa. Stabilitas tanah dasar pada kondisi seismik dipengaruhi oleh dua faktor utama yaitu reduksi kapasitas daya dukung akibat gaya inersia horizontal dan peningkatan beban akibat momen guling. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa gempa dengan PGA tinggi dapat menyebabkan penurunan daya dukung tanah hingga 50-90% dari kondisi statik [6].

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait evaluasi stabilitas tanah terhadap pengaruh gempa. Richards et al. (1993) mengembangkan metode analisis daya dukung seismik menggunakan pendekatan *Pseudostatik* yang mempertimbangkan gaya inersia horizontal [6]. Puri (2013) meneliti pengaruh beban dinamis terhadap kapasitas dukung dan penurunan fondasi [7]. Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya bersifat teoritis dan belum secara spesifik mengevaluasi kondisi embung di wilayah dengan aktivitas seismik ekstrem seperti Kota Palu.

Kebaruan penelitian ini terletak pada aplikasi metode *Pseudostatik* untuk evaluasi stabilitas tanah dasar embung di zona seismik dengan nilai PGA sangat tinggi (0,919 g) berdasarkan data gempa aktual 28 September 2018. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan parameter gempa generik, penelitian ini mengintegrasikan data mikrotremor spesifik lokasi [5] dengan investigasi geoteknik lapangan (uji sondir 4 titik dan 20 potongan melintang) serta pengujian laboratorium untuk menghasilkan evaluasi

yang komprehensif dan realistis. Penelitian ini juga mengidentifikasi segmen-segmen kritis secara detail sepanjang embung yang memerlukan perkuatan, bukan hanya penilaian stabilitas secara umum.

Kontribusi penelitian ini terhadap pengembangan ilmu geoteknik adalah memberikan metodologi praktis untuk evaluasi stabilitas infrastruktur air skala kecil di wilayah rawan gempa dengan PGA ekstrem, serta menghasilkan rekomendasi mitigasi berbasis segmen yang dapat diaplikasikan langsung untuk embung-embung sejenis di Sulawesi Tengah dan wilayah seismik aktif lainnya di Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas tanah dasar Embung Rano Tadulako terhadap pengaruh gempa menggunakan metode *Pseudostatik* dan analisis daya dukung dinamis, mengidentifikasi segmen-segmen kritis yang berpotensi mengalami kegagalan, serta memberikan rekomendasi perkuatan untuk meningkatkan keamanan embung dalam menghadapi ancaman gempa.

METODOLOGI

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Embung Rano Tadulako yang terletak di Kelurahan Tondo, Kecamatan Mantikulore, Kota Palu, Sulawesi Tengah. Secara geografis, embung berada pada koordinat 0°50'20" Lintang Selatan dan 119°53'29" Bujur Timur, tepatnya di kawasan Universitas Tadulako.

Embung ini dirancang sebagai tampungan air skala kecil dengan kapasitas mencapai $\pm 11.000 \text{ m}^3$ dan memiliki daerah tangkapan air (DTA) seluas kurang dari 200 hektar. Keberadaannya cukup strategis mengingat perannya tidak hanya sebagai penyedia air baku untuk kebutuhan masyarakat sekitar, tetapi juga sebagai bagian dari upaya konservasi sumber daya air di wilayah Kota Palu yang dikenal memiliki tantangan kelangkaan air, terutama saat musim kemarau.

Kondisi topografi lokasi penelitian umumnya berupa dataran dengan kemiringan yang relatif landai hingga sedang. Area sekitar embung didominasi oleh pemukiman penduduk dan lahan terbuka, dengan akses yang cukup mudah dari jalan utama kampus. Pemilihan lokasi ini juga mempertimbangkan aspek kerawanan gempa mengingat Kota Palu berada pada zona seismik aktif, sehingga evaluasi stabilitas tanah dasar menjadi sangat penting untuk memastikan keamanan struktur dalam jangka panjang.

B. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan kombinasi data primer dan sekunder untuk mendukung analisis stabilitas tanah dasar embung. Data primer diperoleh dari hasil pengujian lapangan dan laboratorium, sedangkan data sekunder berasal dari studi terdahulu dan dokumen perencanaan embung.



Gambar 2. Titik Pengujian Lapangan

Data Lapangan dan Laboratorium

Investigasi tanah dasar dilakukan melalui uji sondir (CPT) di 4 titik lokasi (S1, S2, S3, dan S4) mengacu pada SNI 03-2827-2008 untuk memperoleh profil kedalaman dan nilai perlawanan konus (q_c). Selain itu, dilakukan pengujian laboratorium terhadap sampel tanah yang meliputi:

- Kadar Air, mengikuti prosedur SNI 03-1965-2019
- Analisa Saringan, sesuai SNI 03-1968-1990 untuk mengetahui distribusi ukuran butir
- Berat Jenis, berdasarkan SNI 03-1964-2008
- Batas Atterberg (batas cair dan batas plastis), mengacu pada SNI 03-1967-2008
- Permeabilitas, sesuai SNI 03-6870-2002 untuk mengukur tingkat kelulusan air
- Geser Langsung (*direct shear test*), mengikuti SNI 03-2813-2008 untuk memperoleh parameter kuat geser tanah berupa kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ)
- Pengujian *hand boring* juga dilakukan sesuai SNI 03-2436-2008 untuk mengambil sampel tanah terganggu guna keperluan uji laboratorium.

Data Parameter Gempa

Parameter seismik berupa *Peak Ground Acceleration* (PGA) di wilayah Universitas Tadulako dilaporkan antara 0,914 g dan 0,924 g, yang dianggap tinggi dan menunjukkan risiko kerusakan tanah yang signifikan karena gerakan tanah [8]. Nilai ini menjadi dasar perhitungan koefisien gempa horizontal (k_h) dalam analisis daya dukung dinamis menggunakan metode *Pseudostatik*.

Data Geometri Embung

Data dimensi embung seperti lebar dasar, elevasi tanah dasar, dan volume tanggul diperoleh dari gambar *Detail Engineering Design* (DED) Embung Rano Tadulako. Data geometri ini digunakan untuk menghitung luas dasar pondasi pada setiap segmen (STA) dan distribusi beban kerja (q_{work}) sepanjang embung.

C. Metode Analisis

Interpretasi profil tanah dasar embung dilakukan berdasarkan data *Cone Penetration Test* (CPT) menggunakan metode klasifikasi Robertson (1990) yang memanfaatkan nilai perlawanan konus (q_c) dan rasio gesekan (R_f) untuk mengidentifikasi jenis tanah. Metode ini dipilih karena efisiensi dan keandalannya dalam menentukan karakteristik tanah dari data CPT [9]. Klasifikasi dilakukan dengan memplot nilai q_c dan R_f pada diagram klasifikasi untuk mengidentifikasi jenis tanah yang dapat berkisar dari lempung hingga pasir berdasarkan sifat mekanisnya [10]. Metode ini sangat efektif diterapkan pada lokasi dengan profil tanah kompleks seperti kawasan Palu yang memiliki variasi stratigrafi signifikan [5].

Identifikasi batas lapisan tanah mengacu pada pendekatan Kanai & Tanaka (1961) yang berfokus pada penentuan zona homogen menggunakan metode berlapis mekanis berdasarkan data CPT [9]. Pendekatan ini penting untuk memahami stratigrafi tanah dan mengidentifikasi tantangan potensial yang ditimbulkan oleh perbedaan karakteristik antar lapisan dalam desain geoteknik [11].

Perhitungan Koefisien Gempa Horizontal (k_h)

Koefisien gempa horizontal (k_h) merupakan parameter penting dalam analisis stabilitas struktur geoteknik terhadap beban seismik menggunakan metode *Pseudostatik*. Nilai k_h dihitung menggunakan formula:

$$k_h = \alpha \times (PGA/g) \quad (1)$$

dimana α adalah faktor respons dinamis, PGA adalah percepatan tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration*), dan g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Nilai α dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 0,5 mengikuti rekomendasi Hynes-Griffin & Franklin (1984) yang telah banyak digunakan dalam praktik untuk menjelaskan ketidakpastian dalam respons seismik struktur geoteknik [12]. Meskipun nilai $\alpha = 0,5$ merupakan penyederhanaan, pendekatan ini memberikan dasar yang konservatif dan berguna untuk analisis *pseudostatik* struktur seperti embung dan tanggul [13]. Parameter PGA diperoleh dari hasil studi mikrotremor oleh Meidji et al. (2022) yang menunjukkan nilai PGA berkisar 0,914–0,924 g di kawasan Universitas Tadulako. Nilai PGA ini mewakili percepatan tanah maksimum yang mungkin terjadi selama gempa bumi dan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti magnitudo, jarak episentrum, serta kondisi geologi dan sifat tanah lokal [14]. Kondisi tanah di lokasi penelitian, yang didominasi oleh material pasir padat hingga lempung sangat kaku berdasarkan hasil CPT, turut mempengaruhi respons seismik dan nilai k_h yang dihitung [12].

Analisis Daya Dukung Tanah

A. Daya Dukung Statik

Daya dukung ultimit tanah pada kondisi statik dihitung menggunakan persamaan Terzaghi (1943):

$$q_{ult} = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (2)$$

dimana c adalah kohesi tanah, q adalah tekanan *overburden*, γ adalah berat volume tanah, B adalah lebar dasar pondasi, dan N_c , N_q , N_γ adalah faktor daya dukung yang bergantung pada sudut gesekan dalam (ϕ).

Kohesi merepresentasikan kemampuan tanah saling mengikat dan dominan pada tanah kohesif [15], sedangkan sudut gesekan merupakan parameter kritis untuk tanah granular yang mempengaruhi faktor daya dukung [16]. Faktor daya dukung diperoleh dari tabel standar atau metode numerik berdasarkan nilai ϕ hasil pengujian laboratorium [17].

B. Daya Dukung Dinamis

Kapasitas daya dukung tanah pada kondisi seismik mengalami reduksi akibat pengaruh gaya gempa horizontal. Reduksi daya dukung dihitung menggunakan pendekatan:

$$q_{seismic} = q_{ult} \times (1 - kh) \quad (3)$$

dimana kh adalah koefisien gempa horizontal. Pendekatan ini memperhitungkan penurunan kapasitas tanah karena adanya komponen beban miring (*inclined load*) akibat gaya inersia horizontal yang timbul selama gempa [6]. Metode ini banyak digunakan dalam analisis *Pseudostatik* untuk struktur geoteknik seperti embung dan tanggul karena kesederhanaan perhitungan dan tingkat konservatisme yang memadai untuk desain praktis.

Perhitungan Beban Kerja (q_{work})

Tekanan yang bekerja pada tanah dasar embung (q_{work}) dihitung berdasarkan berat total struktur yang meliputi berat tanggul dan berat air yang ditampung. Perhitungan beban kerja menggunakan persamaan:

$$q_{work} = \frac{W_{total}}{A_{dasar}} \quad (4)$$

$$\text{dimana } W_{total} = W_{tanggul} + W_{air} \quad (5)$$

Volume tanggul dihitung menggunakan metode *Average End Area* yang merupakan metode standar dalam perhitungan volume pekerjaan tanah (*earthwork*) dengan cara merata-ratakan luas penampang melintang pada dua segmen berurutan dan mengalikannya dengan jarak antar segmen [18]. Metode ini dipilih karena kesederhanaan dan efisiensinya dalam menghitung volume struktur dengan geometri yang bervariasi sepanjang bentangan [3]. Formula perhitungan volume menggunakan *Average End Area* adalah:

$$V = [(A_1 + A_2) / 2] \times L \quad (6)$$

dimana A_1 dan A_2 adalah luas penampang pada dua potongan berurutan, dan L adalah jarak antar potongan. Perhitungan dilakukan untuk 20 potongan melintang sepanjang embung berdasarkan data *Detail Engineering Design (DED)*.

Berat tanggul dihitung dengan mengalikan volume total dengan berat volume tanah ($\gamma_{tanah} = 1,47 \text{ t/m}^3$ dari hasil pengujian laboratorium), sehingga :

$$\begin{aligned} W_{tanggul} &= V_{total} \times \gamma_{tanah} \\ &= 7.967,30 \text{ m}^3 \times 1,47 \text{ t/m}^3 \\ &= 11.711,93 \text{ ton.} \end{aligned}$$

Berat air dihitung dari kapasitas tampungan embung dengan $W_{air} = V_{air} \times \gamma_{air}$, dimana volume air sebesar 11.000 m^3 dan berat jenis air 1 t/m^3 , menghasilkan $W_{air} = 11.000 \text{ ton}$. Total beban yang harus dipikul tanah dasar adalah $W_{total} = 22.711,93 \text{ ton}$.

Luas dasar pondasi (A_{dasar}) untuk setiap segmen dihitung menggunakan metode yang sama dengan perhitungan volume, namun menggunakan lebar dasar embung pada masing-masing potongan melintang. Distribusi beban per segmen bervariasi tergantung pada luas kontak antara struktur dan tanah dasar, dimana

segmen dengan luas dasar lebih kecil akan mengalami tekanan kontak (*contact pressure*) yang lebih tinggi [6]. Variasi q_{work} yang signifikan antar segmen, berkisar dari 40,56 t/m² hingga 1.622,28 t/m², mencerminkan perbedaan geometri embung pada setiap station yang menjadi faktor kritis dalam evaluasi stabilitas.

Evaluasi Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan (SF) merupakan parameter penting dalam evaluasi stabilitas struktur geoteknik terhadap beban seismik. Perhitungan faktor keamanan dilakukan untuk setiap segmen embung menggunakan persamaan:

$$SF = \frac{q_{seismic}}{q_{work}} \quad (7)$$

dimana $q_{seismic}$ adalah kapasitas daya dukung tanah pada kondisi dinamis dan q_{work} adalah tekanan kerja aktual yang bekerja pada tanah dasar. Rasio ini menunjukkan seberapa besar kapasitas tanah dapat menahan beban yang bekerja saat terjadi gempa [6].

Kriteria keamanan mengacu pada SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik dan standar praktik internasional untuk desain seismik struktur penahan tanah. Untuk kondisi beban seismik, nilai minimum faktor keamanan yang disyaratkan adalah $SF \geq 1,5$ yang menunjukkan kondisi aman, sedangkan $SF = 1,0-1,5$ dikategorikan marginal atau batas kritis, dan $SF < 1,0$ mengindikasikan kondisi tidak aman dengan potensi kegagalan struktur [6], [19].

Evaluasi stabilitas menggunakan prinsip "*weakest link*" dimana segmen dengan nilai SF terendah menjadi pertimbangan utama dalam penilaian keamanan keseluruhan struktur. Pendekatan ini mengakui bahwa kegagalan pada satu titik kritis dapat mempengaruhi integritas struktur secara keseluruhan, sehingga identifikasi dan perkuatan zona lemah menjadi prioritas dalam mitigasi risiko [19]. Segmen dengan $SF < 1,5$ memerlukan perhatian khusus berupa perkuatan struktural atau modifikasi desain untuk memenuhi kriteria keamanan yang dipersyaratkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Profil Tanah Dasar Berdasarkan Data Pengujian

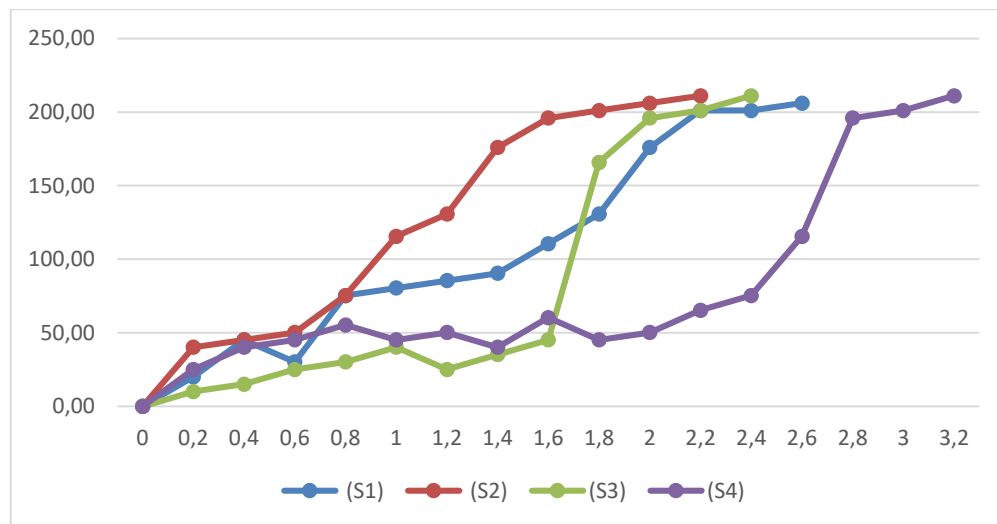
Tabel 1. Data Sondir

Kedalaman	Titik Sondir			
	(S1)	(S2)	(S3)	(S4)
d	q_c	q_c	q_c	q_c
(m)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	20,10	40,20	10,05	25,13
0,4	45,23	45,23	15,08	40,20
0,6	30,15	50,25	25,13	45,23
0,8	75,38	75,38	30,15	55,28
1	80,40	115,58	40,20	45,23
1,2	85,43	130,65	25,13	50,25
1,4	90,45	175,88	35,18	40,20
1,6	110,55	195,98	45,23	60,30
1,8	130,65	201,00	165,83	45,23
2	175,88	206,03	195,98	50,25
2,2	201,00	211,05	201,00	65,33
2,4	201,00		211,05	75,38

2,6	206,03	115,58
2,8		195,98
3		201,00
3,2		211,05

Investigasi tanah dasar di lokasi Embung Rano Tadulako dilakukan melalui uji sondir pada empat titik berbeda (S1, S2, S3, dan S4). Data hasil pengujian disajikan pada Tabel 1, yang menampilkan nilai perlawanan konus (q_c) pada berbagai kedalaman.

Secara umum, nilai q_c di keempat titik sondir menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya kedalaman. Titik S2 mencatatkan nilai q_c tertinggi yaitu 211,05 kg/cm² pada kedalaman 2,2 m, sedangkan S1 dan S3 mencapai nilai maksimal di kedalaman 2,2–2,4 m. Titik S4 menunjukkan penetrasi paling dalam hingga 3,2 m dengan nilai q_c akhir 211,05 kg/cm², mengindikasikan lapisan tanah keras baru tercapai pada kedalaman tersebut. Variasi kedalaman penetrasi ini menunjukkan adanya heterogenitas kondisi tanah dasar di lokasi embung.



Gambar 3. Grafik Kedalaman dan Nilai q_c

Gambar 3, menyajikan grafik hubungan antara kedalaman dan nilai q_c untuk keempat titik sondir. Dari grafik terlihat bahwa pola peningkatan nilai q_c berbeda-beda di setiap titik pengujian. Titik S2 (garis oranye) menunjukkan peningkatan paling cepat dan konsisten, mencapai nilai di atas 200 kg/cm² pada kedalaman sekitar 1,8 m. Sementara itu, S1 dan S3 memperlihatkan pola yang lebih bertahap dengan beberapa fluktuasi pada kedalaman tertentu sebelum akhirnya meningkat tajam.

Titik S4 (garis biru muda) menunjukkan karakteristik yang cukup unik, dimana nilai q_c cenderung rendah hingga kedalaman 2,6 m, baru kemudian meningkat drastis hingga mencapai nilai di atas 200 kg/cm². Perbedaan pola ini semakin memperkuat indikasi adanya variasi kondisi lapisan tanah di lokasi embung, yang perlu menjadi pertimbangan dalam analisis stabilitas struktur.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Laboratorium

Jenis Pengujian	Sampel	Rentang Nilai	Nilai Rata-rata	Keterangan
Kadar Air (%)	4	4,41 – 13,24	8,14	Kondisi lembab
Berat Isi (γ)	4	1,36 – 1,64	1,47	Tanah lepas hingga sedang

Geser Langsung	4			
(c) t/m ²		0,02-0,05	0,0325	Tanah pasir
(φ)		19°-30°	25,83°	kelanauan

Pengujian laboratorium dilakukan terhadap 4 sampel tanah untuk mengevaluasi sifat fisik dan mekanik tanah dasar embung. Hasil pengujian kadar air menunjukkan nilai berkisar antara 4,41% hingga 13,24% dengan rata-rata 8,14%, mengindikasikan kondisi tanah dalam keadaan lembab.

Berat isi tanah bervariasi dari 1,36 t/m³ hingga 1,64 t/m³ dengan rata-rata 1,47 t/m³, yang menunjukkan tanah berada dalam kondisi lepas hingga sedang. Uji geser langsung menghasilkan nilai kohesi (c) yang sangat rendah berkisar 0,02–0,05 t/m² dengan rata-rata 0,0325 t/m², serta sudut geser dalam (φ) antara 19°–30° dengan rata-rata 25,83°. Kombinasi kohesi rendah dan sudut geser sedang mengindikasikan bahwa tanah dasar embung didominasi oleh material pasir kelanauan yang memiliki daya ikat antar butir lemah namun cukup baik dalam menahan gaya geser.

B. Interpretasi Jenis Tanah dan Karakteristik Lapisan

Berdasarkan klasifikasi nilai qc, dapat diidentifikasi beberapa lapisan tanah yang menyusun dasar Embung Rano Tadulako. Pada kedalaman 0–0,2 m di semua titik pengujian, nilai qc masih berada pada angka 0 hingga 40,20 kg/cm², mengindikasikan lapisan permukaan berupa lempung sangat kaku hingga pasir padat. Memasuki kedalaman 0,2–1,0 m, nilai qc berkisar antara 20–115 kg/cm², yang menunjukkan dominasi lapisan pasir padat atau lempung sangat kaku dengan tingkat kepadatan yang bervariasi antar titik.

Lapisan tanah keras dengan nilai qc > 200 kg/cm² mulai ditemukan pada kedalaman yang berbeda-beda: S2 mencapainya di kedalaman 1,8 m, S1 dan S3 di kedalaman sekitar 2,2–2,4 m, sedangkan S4 baru mencapai lapisan keras pada kedalaman 2,8 m. Hal ini mengonfirmasi bahwa tanah dasar embung didominasi oleh lapisan pasir padat hingga lempung sangat kaku dengan tingkat konsistensi tinggi.

Hasil pengujian laboratorium memperkuat interpretasi ini, dimana nilai berat isi rata-rata 1,47 t/m³ mengindikasikan tanah dalam kondisi lepas hingga sedang yang konsisten dengan material pasir padat. Parameter kuat geser menunjukkan kohesi sangat rendah (c = 0,0325 t/m²) dan sudut geser dalam sedang (φ = 25,83°), yang khas untuk tanah berbutir kasar seperti pasir kelanauan dengan daya ikat lemah namun resistensi gesek antar butir cukup baik.

Dari segi karakteristik mekanis, tanah dengan nilai qc yang tinggi cenderung memiliki resistensi yang baik terhadap deformasi, sehingga mampu menopang beban struktur dengan baik. Namun, variasi kedalaman lapisan keras mengindikasikan potensi penurunan tidak merata (*differential settlement*) jika pembebanan tidak didistribusikan secara *uniform*. Permeabilitas tanah diperkirakan rendah hingga sedang mengingat dominasi material lempung sangat kaku hingga pasir padat, yang dapat memengaruhi kondisi drainase dan tekanan air pori saat terjadi beban dinamis seperti gempa.

C. Parameter Gempa Rencana

Penentuan parameter gempa rencana untuk evaluasi stabilitas Embung Rano Tadulako mengacu pada gempa 28 September 2018 dengan magnitudo Mw 7,4 yang menjadi peristiwa gempa paling destruktif di Kota Palu. Gempa ini berpusat di Donggala dengan jarak hiposenter sekitar 70 km dari kawasan Universitas Tadulako, sehingga dijadikan sebagai skenario gempa rencana dalam analisis ini [8].

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Meidji et al. (2022) menggunakan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) pada 14 titik pengukuran mikrotremor di kawasan Universitas Tadulako, diperoleh nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang berkisar antara 0,914 g hingga 0,924 g. Distribusi nilai PGA ini menunjukkan pola yang sesuai dengan jarak hiposenter gempa, dimana nilai PGA lebih besar di bagian

utara kawasan dan semakin mengecil ke arah selatan karena semakin jauh dari episentrum. Nilai PGA tersebut mengindikasikan tingkat kerusakan tanah tahap pertama akibat pergerakan tanah (*ground motion*) dan termasuk dalam kategori sangat tinggi.

Lokasi Embung Rano Tadulako yang berada di kawasan Universitas Tadulako memiliki klasifikasi tanah tipe IV berdasarkan klasifikasi Kanai, yang terdiri dari batuan aluvial hasil sedimentasi dengan ketebalan lapisan sedimen yang sangat tebal. Kondisi geologi ini menyebabkan periode dominan tanah (T_0) berkisar antara 1,709 s hingga 3,816 s, yang mengindikasikan potensi amplifikasi gelombang gempa yang cukup signifikan.

D. Perhitungan Koefisien Gempa Horizontal (k_h)

Koefisien gempa horizontal (k_h) dihitung menggunakan metode *Pseudostatik* dengan formula

$$k_h = \alpha \times \left(\frac{PGA}{g} \right) \quad (8)$$

Dengan keterangan :

- $\alpha = 0,5$ (faktor reduksi) mengikuti rekomendasi Hynes-Griffin & Franklin (1984) untuk analisis stabilitas struktur geoteknik seperti bendungan dan embung. Faktor reduksi ini memperhitungkan bahwa tidak seluruh massa struktur bergerak secara simultan saat gempa, sehingga menghasilkan gaya inersia efektif yang lebih realistis dibandingkan pendekatan tanpa reduksi ($\alpha = 1,0$).
- PGA (*Peak Ground Acceleration*) = 0,919 g, merupakan nilai percepatan tanah maksimum dari studi mikrotremor di kawasan Universitas Tadulako [8]. Nilai ini merepresentasikan respons maksimum gerakan tanah akibat gempa 28 September 2018 dengan magnitudo Mw 7,4.
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s² atau 1 g)

Berdasarkan parameter di atas, diperoleh koefisien gempa horizontal:

$$k_h = 0,5 \times \left(\frac{0,919g}{1g} \right) = 0,460$$

Nilai $k_h = 0,46$ menunjukkan bahwa gaya inersia horizontal yang bekerja pada struktur embung saat gempa adalah sekitar 46% dari berat total struktur. Meskipun nilai PGA sangat tinggi (0,919 g), penggunaan faktor reduksi $\alpha = 0,5$ menghasilkan koefisien gempa yang lebih realistis dan sesuai dengan praktik standar dalam analisis *Pseudostatik* untuk struktur geoteknik [6], [19].

E. Evaluasi Daya Dukung dan Stabilitas Tanah Dasar

Daya Dukung Tanah Kondisi Statik dan Dinamis

Analisis daya dukung tanah dasar embung dilakukan menggunakan metode Terzaghi B = lebar embung yang bervariasi setiap 10 meter sesuai data potongan melintang DED

Tabel 3. Daya Dukung Kondisi Dinamis

STA	Lebar Embung (B) m	q_{ult} t/m ²	$q_{seismic}$ t/m ³
0+040	0,00	448,82	242,59
0+050	56,00	555,42	300,21
0+060	36,75	518,78	280,40
0+070	42,85	530,39	286,68
0+080	39,10	523,25	282,82
0+090	49,70	543,43	293,72
0+100	44,95	534,39	288,84

0+110	30,05	506,02	273,51
0+120	8,90	465,76	251,74
0+130	1,40	451,48	244,03
0+140	1,40	451,48	244,03
0+150	9,60	467,09	252,46
0+160	23,80	494,13	267,07
0+170	32,30	510,31	275,82
0+180	34,60	514,68	278,19
0+190	34,25	514,02	277,83
0+200	32,65	510,97	276,18
0+210	25,75	497,84	269,08
0+220	26,05	498,41	269,39
0+230	32,65	510,97	276,18

Perhitungan dilakukan untuk kondisi statik (q_{ult}) dan kondisi dinamis ($q_{seismic}$) dengan memperhitungkan pengaruh beban gempa melalui koefisien gempa horizontal ($k_h = 0,46$). Hasil analisis menunjukkan bahwa daya dukung ultimate statik berkisar antara 448,82–555,42 t/m² dengan rata-rata 507,18 t/m², sedangkan daya dukung dinamis mengalami reduksi menjadi 242,59–300,21 t/m² dengan rata-rata 273,60 t/m².

Variasi nilai daya dukung antar segmen dipengaruhi oleh perbedaan lebar embung (B) pada setiap *station* (STA), dimana segmen dengan lebar lebih besar cenderung memiliki kapasitas dukung lebih tinggi sesuai dengan kontribusi komponen $0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$ dalam persamaan Terzaghi.

Beban Yang Bekerja Pada Tanah Dasar

Tabel 4. Daya Dukung dengan Beban Bekerja

STA	Luasan dasar Pondasi m ²	V tanggul m ³	q work t/m ²
0+040	0,00		0,00
0+050	560,00	1654,20	40,56
0+060	367,50		61,80
0+070	428,50	1314,85	53,00
0+080	391,00		58,09
0+090	497,00	1068,15	45,70
0+100	449,50		50,53
0+110	300,50	788,70	75,58
0+120	89,00	491,65	255,19
0+130	14,00		1622,28
0+140	14,00	474,25	1622,28
0+150	96,00		236,58
0+160	238,00	507,75	95,43
0+170	323,00		70,32
0+180	346,00	558,25	65,64
0+190	342,50		66,31
0+200	326,50	515,75	69,56
0+210	257,50		88,20
0+220	260,50	593,75	87,19
0+230	326,50		69,56
V total		7967,30	

Perhitungan beban kerja (q_{work}) pada tanah dasar embung mempertimbangkan kontribusi berat tanggul dan berat air yang ditampung. Volume total tanggul embung mencapai 7.967,30 m³ yang dengan berat isi tanah 1,47 t/m³ menghasilkan berat tanggul ($W_{tanggul}$) sebesar 11.711,93 ton. Ditambah dengan berat air (W_{air}) sebesar 11.000 ton, maka total beban yang harus dipikul tanah dasar (W_{total}) adalah 22.711,93 ton.

Beban total ini kemudian didistribusikan ke setiap segmen berdasarkan luas dasar pondasi masing-masing station. Hasil perhitungan menunjukkan variasi q_{work} yang signifikan antar segmen, berkisar dari 40,56 t/m² hingga 1.622,28 t/m². Nilai q_{work} tertinggi terjadi pada segmen 0+130 dan 0+140 (1.622,28 t/m²) yang disebabkan oleh luas dasar pondasi yang sangat kecil (14,00 m²), sehingga beban terkonsentrasi pada area terbatas. Sebaliknya, segmen dengan luas dasar lebih besar seperti 0+050 (560,00 m²) dan 0+090 (497,00 m²) menghasilkan q_{work} yang relatif rendah yaitu 40,56 t/m² dan 45,70 t/m².

Distribusi tegangan yang tidak merata ini menjadi faktor penting dalam evaluasi stabilitas, mengingat segmen dengan q_{work} tinggi memerlukan kapasitas daya dukung yang lebih besar untuk memenuhi kriteria faktor keamanan.

Evaluasi Faktor Keamanan

Tabel 5. Daya Dukung dengan Beban Bekerja

STA	q seismic t/m ³	q work t/m ²	Angka Aman (FS)	Keterangan
0+040	242,59	0,00	0,00	Tidak ada beban
0+050	300,21	40,56	7,40	Sangat aman
0+060	280,40	61,80	4,54	Aman
0+070	286,68	53,00	5,41	Sangat aman
0+080	282,82	58,09	4,87	Aman
0+090	293,72	45,70	6,43	Sangat aman
0+100	288,84	50,53	5,72	Sangat aman
0+110	273,51	75,58	3,62	Aman
0+120	251,74	255,19	0,99	Tidak aman
0+130	244,03	1622,28	0,15	Sangat tidak aman
0+140	244,03	1622,28	0,15	Sangat tidak aman
0+150	252,46	236,58	1,07	Batas kritis
0+160	267,07	95,43	2,80	Cukup aman
0+170	275,82	70,32	3,92	Aman
0+180	278,19	65,64	4,24	Aman
0+190	277,83	66,31	4,19	Aman
0+200	276,18	69,56	3,97	Aman
0+210	269,08	88,20	3,05	Aman
0+220	269,39	87,19	3,09	Aman
0+230	276,18	69,56	3,97	Aman

Stabilitas tanah dasar embung dievaluasi melalui faktor keamanan (FS) dengan syarat minimum $FS \geq 1,5$. Hasil analisis menunjukkan 16 dari 19 segmen (84%) memenuhi kriteria keamanan dengan nilai FS berkisar 2,80–7,40. Segmen paling aman adalah 0+050 ($FS = 7,40$), 0+090 ($FS = 6,43$), dan 0+100 ($FS = 5,72$).

Teridentifikasi titik kritis pada segmen 0+120 hingga 0+150 dengan $FS < 1,5$. Segmen 0+130 dan 0+140 merupakan zona paling berbahaya dengan $FS = 0,15$, disebabkan luas dasar pondasi sangat kecil (14,00 m²) yang menghasilkan konsentrasi beban ekstrem (1.622,28 t/m²). Segmen 0+120 ($FS = 0,99$) dan 0+150 ($FS = 1,07$) juga tidak memenuhi syarat keamanan. Kondisi ini mengindikasikan potensi kegagalan struktur saat gempa, sehingga diperlukan perkuatan struktural seperti pelebaran pondasi atau *grouting* pada zona tersebut.

SIMPULAN

Karakteristik Tanah Dasar: Tanah dasar didominasi pasir padat hingga lempung sangat kaku ($q_c > 200$ kg/cm² pada kedalaman 1,8–2,8 m) dengan kohesi sangat rendah ($c = 0,0325$ t/m²) dan sudut geser sedang ($\phi = 25,83^\circ$), mengindikasikan material pasir kelanauan dengan kekuatan dominan dari friksi antar butir. Kapasitas Daya Dukung: Nilai PGA = 0,919 g dan $k_h = 0,46$ menyebabkan reduksi daya dukung sebesar 46%, menghasilkan kapasitas dinamis 242,59–300,21 t/m². Distribusi Stabilitas: 84% area embung (16 dari 19 segmen) memenuhi kriteria aman ($SF \geq 1,5$) dengan SF berkisar 0,15–7,40. Segmen paling aman pada STA 0+050 ($SF = 7,40$), 0+090 ($SF = 6,43$), dan 0+070 ($SF = 5,41$). Zona Kritis: Teridentifikasi titik kritis pada segmen 0+130 dan 0+140 ($SF = 0,15$) akibat konsentrasi beban ekstrem (1.622,28 t/m²) pada luas dasar kecil (14,00 m²). Segmen 0+120 ($SF = 0,99$) dan 0+150 ($SF = 1,07$) juga tidak memenuhi kriteria minimum, mengindikasikan potensi kegagalan saat gempa.

Stabilitas Keseluruhan: Tanah dasar embung relatif aman untuk mayoritas area, namun 16% segmen lemah memerlukan mitigasi segera. Variasi kapasitas lebih disebabkan faktor geometris desain daripada heterogenitas tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Panitia Penyelenggara Seminar Nasional Keteknikan 2 (Sematek 2) Fakultas Teknik Universitas Tadulako atas dukungan dan fasilitas yang diberikan sehingga artikel ini dapat dipresentasikan dan dipublikasikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] M. Acharya and I. P. Acharya, "Reliability Analysis of Bearing Capacity of Shallow Foundation on c - ϕ Soil," *J. Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 5, pp. 71–78, 2019, doi: 10.3126/JACEM.V5I0.26690.
- [2] M. Al-Arafat, M. E. Kabir, A. Dasgupta, and O. F. Nahid, "Designing earthquake-resistant foundations: a geotechnical perspective on seismic load distribution and soil-structure interaction," *Asian J. Sci. Technol. Eng. Math.*, vol. 4, no. 4, pp. 19–36, 2024, doi: 10.69593/ajsteme.v4i04.119.
- [3] Y. M. Cheng and Z. Y. Chen, "Calculation of Earthwork Allocation," in *Soil Slope Stability Analysis: Theory, Methods and Programs*, Science Press, 2013, pp. 23–45.
- [4] M. G. Cilia, W. D. Mooney, and C. Nugroho, "Field Insights and Analysis of the 2018 Mw 7.5 Palu, Indonesia Earthquake, Tsunami and Landslides," *Pure Appl. Geophys.*, 2021, doi: 10.1007/S00024-021-02852-6.
- [5] S. Collico, M. Arroyo, and M. Devincenzi, "A simple approach to probabilistic CPTu-based geotechnical stratigraphic profiling," *Comput. Geotech.*, 2024, doi: 10.1016/j.compgeo.2023.105905.
- [6] B. M. Das, *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning, 2010.
- [7] M. E. Hynes-Griffin and A. G. Franklin, "Rationalizing the Seismic Coefficient Method," US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1984.
- [8] D. A. Lestari and N. S. Fitriarsi, "Determination of Earthquake Prone Zones at University of Tadulako Based on Dominant Periods and Peak Ground Acceleration (PGA)," doi: 10.1088/1757-899X/1212/1/012037.
- [9] S. T. Suhartati, "Pembuatan Program Bantu Klasifikasi Jenis Tanah Berdasarkan Uji ICPT(u) dengan Metode ROBERTSON (1990) Menggunakan MICROSOFT EXCEL," *Pros. Semin. Intelekt. Muda.*, 2019, doi: <https://doi.org/10.25105/psia.v1i1.5907>.
- [10] D. W. E. Simarankir, C. V. N. Sianturi, and F. N. A. S. Sari, "Implikasi Hukum Lingkungan terhadap Pengelolaan Limbah Plastik dengan Recycle Waste," vol. 1, no. 5, pp. 173–182, 2024, doi: 10.62383/aliansi.v1i5.399.
- [11] "Data-driven soil profile characterization using statistical methods and artificial intelligence algorithms," CRC Press, 2022, pp. 708–714. doi: 10.1201/9781003329091-104.
- [12] K. (n. d. . Karimi, S., Hazeghian, M., & Barkhordari, "A Numerical Assessment of the Horizontal Seismic Coefficient for Soil-Nailed Walls," [Online]. Available: <https://doi.org/10.24200/j30.2024.62608.3235>

- [13] A. Yazdandoust, M., & Ghalandarzadeh, "Pseudo-static coefficient in reinforced soil structures. Pseudo-static coefficient in reinforced soil structures.," *Int. J. Phys. Model. Geotech.*, pp. 1–48, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/JPHMG.18.00013>
- [14] A. Shiuly, "Global Attenuation Relationship for Estimating *Peak Ground Acceleration*," *J. Geol. Soc. India*, vol. 92, no. 1, pp. 54–58, 2018, doi: 10.1007/S12594-018-0952-4.
- [15] D. Han, X. Xie, L. Zheng, and L. Huang, "The bearing capacity factor N_γ of strip footings on $c-\phi-\gamma$ soil using the method of characteristics," *Springerplus*, vol. 5, no. 1, 2016, doi: 10.1186/S40064-016-3084-6.
- [16] A. S. Kumbhojkar, "Numerical Evaluation of Terzaghi's N_γ ," *J. Geotech. Eng.*, vol. 119, no. 3, pp. 598–607, 1993, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:3(598).
- [17] R. J. Krizek, "Approximation for Terzaghi's Bearing Capacity," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 91, no. 2, pp. 1–4, 1965.
- [18] A. L. Epps and E. T. Corey, "A Modification to the Average End Area Method for Volumes," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1288, pp. 21–29, 1990.
- [19] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 1996.