

KAJIAN STABILITAS EMBUNG RANO TADULAKO TERHADAP ASPEK GEOTEKNIS

Martini^{a*}, Arifin B^b, Sriyati Ramadhani^c, Fiisyatin Rodiah^d

^a Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia

^b Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia ^cProgram Studi Teknik Sipil, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia ^dProgram Studi Teknik Sipil, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia

ABSTRAK

Embong Rano Tadulako di Kelurahan Tondo, Palu, dirancang sebagai tumpungan air skala kecil dengan luas genangan sekitar 11.000 m² dan daerah tangkapan kurang dari 200 ha. Meski tergolong struktur sederhana, embong ini berpotensi menghadapi persoalan geoteknis serius seperti rembesan, penurunan, dan piping, terutama karena adanya selisih elevasi muka air antara hulu dan hilir. Untuk memastikan keamanan struktur, dilakukan kajian lapangan dan laboratorium yang meliputi sondir, hand boring, test pit, serta serangkaian uji sifat fisik dan mekanis tanah. Hasilnya menunjukkan bahwa tanah dasar umumnya terdiri dari material granular non-plastis dengan kadar air rendah dan kepadatan cukup baik, sehingga relatif stabil terhadap perubahan volume. Namun, kohesi yang sangat rendah (0,02–0,05 kg/cm²) dan permeabilitas cukup tinggi (0,0057–0,0124 cm/det) menjadi catatan penting karena berpotensi mempercepat aliran rembesan, terutama saat muka air tinggi. Lapisan tanah lunak hingga sedang di kedalaman 2–3 meter juga berisiko mengalami penurunan jika tidak dikelola dengan baik. Meski analisis menunjukkan faktor keamanan terhadap piping masih dalam batas aman, potensi rembesan tetap perlu diantisipasi agar tidak berkembang jadi erosi internal atau kerusakan struktural. Temuan ini menjadi dasar penting untuk perencanaan mitigasi, seperti pemasangan filter, pemasangan optimal, dan monitoring jangka panjang, sehingga embong bisa berfungsi secara aman dan berkelanjutan sebagai sarana konservasi air dan pelayanan kebutuhan masyarakat sekitar

Kata kunci : Stabilitas, Embong, Rano, Geoteknis, Rembesan, Piping, Penurunan

1. PENDAHULUAN

Embong skala kecil berperan penting dalam mendukung pertanian dan ketersediaan air di Indonesia, terutama di daerah seperti Kota Palu di mana pengelolaan air sangat krusial untuk ketahanan pangan. Sistem irigasi ini terbukti efektif dalam menjaga pasokan air yang andal sepanjang tahun serta lebih adil dalam distribusi dibanding sistem skala besar (Purwantini & Suhaeti, 2018). Embong juga berfungsi menjaga keberlanjutan pertanian melalui konservasi air dan pengurangan ketergantungan pada infrastruktur irigasi besar (Suhaeti et al., 2018), sekaligus mendukung pengelolaan air di wilayah dengan curah hujan bervariasi (Handoko et al., 2024).

Selain manfaat pertanian, Universitas Tadulako dapat memanfaatkan embong skala kecil sebagai sarana penelitian, pendidikan, dan inovasi teknologi pertanian berkelanjutan. Keterlibatan universitas juga memungkinkan transfer pengetahuan kepada masyarakat untuk meningkatkan produktivitas pertanian dan ketahanan terhadap variabilitas iklim (Napitu et al., 2022; Suhaeti et al., 2018). Namun, keberhasilan embong sangat bergantung pada pemeliharaan infrastruktur, keterlibatan masyarakat, serta pengelolaan dampak lingkungan agar tetap berkelanjutan (Purwantini & Suhaeti, 2018; Handoko et al., 2024).

Embong yang menjadi objek penelitian ini memiliki luas genangan sekitar ±11.000 m² dengan daerah tangkapan air (DTA) relatif kecil, yaitu kurang dari 200 ha. Secara teknis, kondisi hidrauliknya ditandai dengan $H_f = \pm 110$ m, elevasi muka air hulu berada pada ±61 m, sedangkan elevasi hilir pada ±49 m, sehingga terdapat selisih tinggi (ΔH) sekitar 12 m.

Dengan karakteristik tersebut, embong ini menarik untuk dikaji lebih dalam, khususnya terkait dengan potensi rembesan, penurunan (settlement), dan piping. Ketiga aspek ini menjadi penting karena berhubungan langsung dengan keamanan tubuh embong. Jika tidak diperhatikan sejak dulu, potensi permasalahan seperti kebocoran, deformasi, hingga kegagalan struktur bisa terjadi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi potensi permasalahan geoteknis yang mungkin terjadi pada embong, seperti rembesan, penurunan, dan risiko piping. Selain itu, penelitian ini juga diarahkan untuk memberikan gambaran mengenai tingkat keamanan tanggul melalui hasil analisis yang dilakukan, sehingga dapat menjadi dasar pertimbangan dalam pengelolaan maupun upaya mitigasi di lapangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tantangan geoteknik seperti perpipaan, penurunan, dan rembesan menimbulkan risiko serius terhadap integritas struktur tanah, termasuk tanggul embung. Perpipaan terjadi akibat gaya rembesan yang mengikis partikel tanah dan membentuk saluran yang dapat memicu kegagalan (Wang et al., 2021). Uji laboratorium menunjukkan bahwa fenomena ini dapat merusak lapisan tanah liat di bawah tanggul melalui deformasi dan retakan hidrolik (Jianshen, 2013). Kondisi hidrolik kritis bahkan dapat memicu perpipaan pada gradien lebih rendah dari asumsi sebelumnya, tergantung sifat tanah dan konfigurasi aliran (Fleshman, 2013).

Selain itu, erosi akibat rembesan merupakan salah satu penyebab utama kegagalan tanggul embung, di mana gradien kritis sangat dipengaruhi sifat tanah (Fleshman, 2013). Pada tanah lunak atau organik, penurunan berlebih juga dapat mengancam stabilitas konstruksi (Thurairajah et al., 2022). Aliran rembesan di dekat outlet pipa tanggul berperan penting dalam erosi mundur sehingga perlu dikaji secara analitis untuk mengembangkan strategi mitigasi (Xiao et al., 2020).

Dari sisi manajemen risiko, studi terdahulu menekankan pentingnya pemahaman variabilitas tanah, kondisi hidrolik, serta kepatuhan desain untuk mencegah kegagalan (Wijeyesekera & Wijeyesekera, 2021). Kerusakan pipa drainase, misalnya, dapat memicu erosi rembesan dan keruntuhan tanah di sekitar embung (Gu et al., 2024). Oleh karena itu, penerapan pendekatan probabilistik serta integrasi data pemantauan diperlukan untuk memprediksi dan mengurangi risiko geoteknik pada tanggul embung (Peng et al., 2025).

Urgensi analisis geoteknik untuk embung terletak pada potensi risiko akibat ketidakpastian geologi dan sifat tanah yang dapat memengaruhi stabilitas serta keamanan struktur, terutama saat terjadi penurunan muka air atau pembilasan. Udara yang terperangkap di dalam tanah juga dapat memengaruhi konduktivitas hidrolik dan distribusi tekanan pori, sehingga diperlukan investigasi geoteknik yang cermat untuk mengurangi risiko (Ausweger & Schweiger, 2016).

Analisis geoteknik berperan penting dalam menilai stabilitas embung, khususnya saat muka air turun cepat. Variabilitas stratigrafi dan sifat tanah perlu diperhitungkan dengan kerangka probabilistik untuk menghindari salah estimasi risiko longsor dan akumulasi tekanan pori (Meng et al., 2024). Kasus longsor di Bendungan Artvin menunjukkan pentingnya penilaian risiko berbasis geoteknik dalam memetakan kerentanan serta menentukan langkah pencegahan (Yener et al., n.d.).

Kegagalan tanggul embung bukan hanya mengancam infrastruktur, tetapi juga berdampak pada produktivitas pertanian, ketahanan pangan, dan keselamatan masyarakat sekitar. Namun, penelitian terkait stabilitas embung skala kecil di kawasan dengan kondisi geologi kompleks seperti Palu masih sangat terbatas, sehingga diperlukan kajian geoteknik yang lebih mendalam.

3. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kombinasi antara analisis teknis, investigasi lapangan, serta pengujian laboratorium untuk memperoleh gambaran kondisi geoteknis Embung Rano Tadulako. Objek penelitian dipilih di kawasan Universitas Tadulako, Kota Palu, dengan pertimbangan bahwa embung ini berskala kecil, memiliki karakteristik geologi khas daerah Sulawesi Tengah, serta berpotensi menghadapi risiko geoteknik yang perlu ditinjau secara lebih detail.

Embung Rano Tadulako berlokasi di Kelurahan Tondo, Kecamatan Mantikulore, Kota Palu, Sulawesi Tengah, dengan posisi koordinat sekitar $0^{\circ}50'20"S$ dan $119^{\circ}53'29"E$. Embung ini direncanakan sebagai tumpungan air skala kecil mencapai $\pm 11.000 \text{ m}^2$ dengan luas daerah tangkapan air (DTA) kurang dari 200 ha untuk mendukung kebutuhan masyarakat sekaligus menjadi bagian dari upaya konservasi sumber daya air di wilayah tersebut. Secara umum, kondisi topografi berupa dataran dengan kemiringan landai hingga sedang, dikelilingi oleh pemukiman dan lahan terbuka.



Gambar 1. Peta Lokasi Pengambilan Data Geoteknis
Sumber: Hasil Penyelidikan Tanah, Universitas Tadulako, 2024

Dalam rangka perencanaan konstruksi embung, dilakukan serangkaian investigasi tanah untuk memahami kondisi geoteknis dasar dan sekitarnya. Kegiatan ini meliputi sondir, hand boring, dan test pit, yang dipadukan dengan uji laboratorium guna memperoleh parameter teknis tanah. Lokasi titik pengujian ditampilkan pada Gambar berikut, yang menunjukkan penyebaran titik sondir (S), hand boring (HB), test pit (TP), serta titik uji tambahan lainnya.

Hasil investigasi ini menjadi dasar dalam menilai karakteristik tanah dominan di lokasi studi, termasuk daya dukung, permeabilitas, serta potensi permasalahan teknis lainnya. Dengan pendekatan tersebut, informasi geoteknis diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kelayakan lahan dan perencanaan detail embung.

Data Penelitian

Data yang digunakan terdiri dari dua jenis, yaitu data primer dan sekunder. Data primer diperoleh langsung melalui kegiatan investigasi lapangan seperti sondir, hand boring, dan test pit, yang kemudian dilanjutkan dengan pengujian laboratorium meliputi kadar air (w), berat isi, uji geser langsung, permeabilitas (falling head), berat jenis butiran tanah (Gs), analisis saringan, batas-batas Atterberg, serta pemandatan. Sementara itu, data sekunder dikumpulkan dari dokumen perencanaan seperti gambar DED, peta topografi, data curah hujan, kondisi geologi, serta literatur dan laporan teknis dari instansi terkait.

Tahapan Penelitian

Alur penelitian dilakukan secara bertahap, dimulai dengan pengumpulan data lapangan dan sekunder, dilanjutkan dengan pengolahan data untuk menentukan klasifikasi tanah dan parameter geoteknik yang relevan. Selanjutnya dilakukan analisis teknis yang meliputi:

1. Analisis rembesan dengan membandingkan nilai koefisien permeabilitas hasil uji dengan rentang klasifikasi standar (low, medium, high permeability)

Tabel 1. Klasifikasi Koefisien Permeabilitas Tanah (k) - Terzaghi & Peck (1967)

| Jenis Permeabilitas | Nilai Koefisien Permeabilitas (m/s) | Contoh Material |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| High permeability | $k > 10^{-3}$ m/s | Kerikil, pasir kasar |
| Medium permeability | $10^{-3} \geq k \geq 10^{-6}$ m/s | Pasir halus, lanau berpasir |

- | Low permeability | $k < 10^{-6}$ m/s | Lempung, lanau halus |
|------------------|--|----------------------|
| 2. | Analisis potensi penurunan (settlement) secara empiris berdasarkan hasil sondir (CPT) serta referensi standar geoteknik. Analisis potensi penurunan dilakukan secara empiris berdasarkan hasil sondir (CPT) dan rujukan literatur (Peck dkk., 1974; Das, 2010) serta pedoman SNI 8460:2017. | |
| 3. | Analisis potensi piping pada tubuh tanggul embung dilakukan dengan membandingkan gradien hidrolik aktual (i) dengan gradien kritis (i_{cr}). Gradien aktual dihitung berdasarkan perbandingan perbedaan tinggi muka air (ΔH) terhadap panjang lintasan rembesan (L) sebagai berikut: | |

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

Sementara itu, gradien kritis dihitung menggunakan rumus Terzaghi (1943) yang memperhitungkan sifat fisik tanah, khususnya berat jenis butiran (G_s) dan angka pori (e):

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

Faktor keamanan (FK) terhadap piping kemudian diperoleh dari perbandingan antara gradien kritis dan gradien aktual:

$$FK = \frac{i_{cr}}{i} \quad (3)$$

Apabila nilai FK $\geq 1,25-1,5$ maka kondisi tanah dianggap aman terhadap bahaya piping (Das, 2010; SNI 8460:2017).

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang utuh mengenai kondisi tanah dasar dan sekitarnya, serta menilai potensi permasalahan geoteknis utama seperti rembesan, penurunan, maupun piping yang berpengaruh terhadap stabilitas embung.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Geoteknis Tanah Dasar dan Sekitar Embung

Tabel 2. Rekap Data Uji Lapangan (Sondir, Hand Boring, dan Test Pit)

| Pengujian Sondir | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------|
| No Titik Sondir | Kedalaman Maksimum (m) | qc (kg/cm ²) | Tf (kg/cm) | fs (kg/cm ²) | Rf (%) | Interpretasi Geoteknis |
| S1 | 2.60 | >200 | 489.2 6 | 3.62 | 1.76 tanah | Menunjukkan |
| S2 | 2.20 | >200 | 344.2 9 | 3.17 | 1.50 lapisan | keras/padat, pendukung baik |
| S3 | 2.40 | >200 | 271.8 1 | 3.17 | 1.50 | untuk konstruksi |
| S4 | 3.20 | >200 | 471.1 3 | 3.17 | 1.50 | dangkal |

Pengujian Hand Boring

| Kode Sampel | Kedalaman | Interpretasi Geoteknis |
|-------------|-----------------|--|
| HB01 | 1,40 m – 1,80 m | Didominasi |
| HB02 | 1,20 m – 1,60 m | lempung berlanau, kohesi rendah, |
| HB03 | 1,80 m – 2,20 m | potensi kembang- cocok untuk material timbunan |

| | | |
|-------------|-----------------|-------------------------------|
| HB04 | 1,80 m – 2,20 m | susut kecil |
| <hr/> | | |
| Test Pit | | |
| Kode Sampel | Kedalaman | Interpretasi Geoteknis |
| TP01 | 0,60 m – 0,80 m | Tanah dominan pasir berlanau, |
| TP02 | 0,60 m – 0,80 m | |

(sumber: Data Pengujian Lapangan, 2024)

Hasil investigasi tanah di lokasi rencana pembangunan meliputi pengujian Sondir (CPT), Hand Boring, dan Test Pit. Dari pengujian sondir yang dilakukan di 4 titik, perlawan konus (qc) menunjukkan >200 kg/cm 2 dengan karakteristik relatif lunak hingga sedang pada kedalaman dangkal berikisar 2 sampai 3 meter. Hal ini menggambarkan bahwa kondisi tanah permukaan masih cukup lemah, sementara pada kedalaman tertentu ditemukan lapisan tanah keras dengan daya dukung yang lebih baik.

Pengujian hand boring mendukung hasil sondir, di mana pada kedalaman dangkal ditemukan tanah berbutir halus berupa lempung pasiran hingga lanau dengan plastisitas rendah hingga sedang. Gambaran ini diperkuat oleh hasil test pit yang menunjukkan lapisan tanah bagian atas terdiri dari material lempung bercampur pasir dengan ketebalan tertentu, diikuti oleh lapisan lanauan. Seiring bertambahnya kedalaman, kondisi tanah cenderung lebih padat dengan konsistensi yang meningkat, sehingga meskipun tanah permukaan relatif kurang stabil, terdapat potensi lapisan tanah yang lebih baik di bawahnya untuk mendukung pondasi.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian Laboratorium Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

| No. | Pengujian | Satuan | Jumlah Sampel | Rentang nilai / Hasil |
|-----|---------------------------------|------------|---------------|-----------------------|
| 1. | Kadar Air (w) | % | 4 | 4,41 – 13,24 |
| 2. | Berat Isi | | | |
| | Berat Isi Basah (γ_b) | g/cm 3 | 4 | 1,47 – 1,71 |
| | Berat Isi Kering (γ_d) | | 4 | 1,36 – 1,64 |
| 3. | Geser Langsung | | | |
| | Kohesi (c) | kg/cm 2 | 4 | 0,02 – 0,05 |
| | Sudut Gesek (ϕ) | ° | 4 | 19,27 – 30,04 |
| 4. | Permeabilitas (KT) | cm/det | 4 | 0,0057 – 0,0124 |
| 5. | Berat jenis (Gs) | | 2 | 2,61 – 3,62 |
| 6. | Analisa Saringan | | | |
| | Tertahan #200 | % | 2 | 82,69 – 83,22 |
| | Lolos #200 | % | 2 | 16,78 – 17,31 |
| 7. | Batas-Batas Atterberg | % | 2 | Non Plastis |
| 8. | Pemadatan | | | |
| | Kadar air optimum (w) | % | 2 | 5,90 – 9,15 |
| | Berat Isi Kering (γ_d) | g/cm 3 | 2 | 1,90 – 1,99 |

(sumber: Data Pengujian Lapangan, 2024)

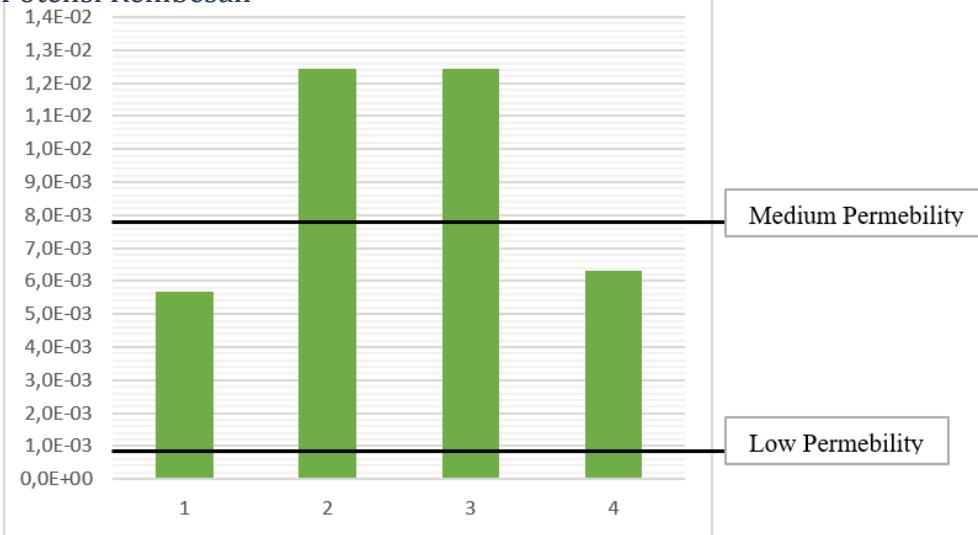
Hasil pengujian laboratorium menunjukkan kadar air tanah berkisar 4,41–13,24% dengan berat isi kering 1,36–1,64 g/cm 3 , menandakan kondisi tanah relatif padat dan cukup baik. Uji geser langsung memperlihatkan kohesi sangat rendah (0,02–0,05 kg/cm 2) dengan sudut gesek dalam 19,27–30,04°, sehingga kekuatan geser lebih didominasi gesekan antar butir. Permeabilitas berada pada 0,0057–0,0124 cm/det yang tergolong cukup permeabel. Berat jenis tanah 2,61–3,62 sesuai dengan komposisi mineral silika dan pasir. Analisa saringan memperlihatkan dominasi fraksi kasar (pasir-lanauan) dengan sifat non-plastis berdasarkan batas Atterberg. Sementara itu, uji pemadatan menunjukkan kadar air optimum 5,90–9,15% dan berat isi kering maksimum 1,90–1,99 g/cm 3 , yang berarti tanah memiliki potensi pemadatan baik pada kadar air rendah.

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik dan mekanis, tanah dasar Embung Rano Tadulako pada umumnya berupa material granular non-plastis dengan kadar air relatif rendah serta nilai berat isi kering yang cukup baik. Kondisi ini mendukung stabilitas tanah terhadap perubahan volume, sehingga potensi terjadinya kembang-susut sangat kecil. Dari sisi mekanis, nilai kohesi yang rendah menegaskan bahwa kekuatan tanah lebih dipengaruhi oleh sudut geser dalam,

yang berada pada kisaran menengah ($\pm 19\text{--}30^\circ$). Sementara itu, hasil sondir menunjukkan tanah keras/padat dengan daya dukung yang memadai. Kombinasi karakteristik ini mengindikasikan bahwa tanah dasar embung relatif stabil untuk menahan beban konstruksi. Hal ini penting mengingat embung direncanakan sebagai tampungan air skala kecil dengan luas genangan $\pm 11.000 \text{ m}^2$ dan daerah tangkapan air (DTA) kurang dari 200 ha, sehingga dibutuhkan kestabilan tanah dasar dan tanggul agar embung dapat berfungsi optimal dalam mendukung kebutuhan masyarakat serta konservasi sumber daya air. Meski demikian, keberadaan lapisan lempung berlanau dengan kohesi rendah tetap menjadi catatan penting, karena berpotensi menjadi jalur rembesan atau menyebabkan deformasi lokal, sehingga diperlukan pengendalian dan pemasangan yang baik pada saat konstruksi maupun pemeliharaan tanggul embung.

Analisis Potensi Permasalahan

Geoteknis Potensi Rembesan



Gambar 2. Grafik Koefisien Permeabilitas Tanah Hasil Uji Falling Head
(Sumber: Hasil Analisis Data, 2025)

Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian permeabilitas yaitu nilai koefisien (k) berada pada kisaran $0,0057\text{--}0,0124 \text{ cm/det}$, yang tergolong cukup permeabel untuk tanah berbutir halus hingga sedang. Kondisi ini sejalan dengan hasil analisis gradasi yang memperlihatkan dominasi butiran kasar serta sifat non-plastis tanah, sehingga tanah dasar embung cenderung lebih mudah dilalui aliran air dibandingkan dengan tanah lempung yang kedap. Situasi tersebut dapat menimbulkan potensi rembesan apabila tidak diantisipasi, terutama pada saat embung beroperasi dengan tinggi muka air yang cukup signifikan. Selain itu, keberadaan lapisan lempung berlanau dengan kohesi rendah dapat menjadi jalur aliran preferensial, yang memperbesar risiko terjadinya kehilangan air. Jika tidak dikendalikan, rembesan ini berpotensi berkembang menjadi masalah lebih serius seperti erosi internal atau piping, yang dapat mengganggu kestabilan dasar maupun tubuh embung.

Potensi Penurunan

Hasil pengujian sondir pada empat titik menunjukkan nilai perlawanan konus (qc) $>200 \text{ kg/cm}^2$ dengan karakteristik tanah relatif lunak hingga sedang pada kedalaman dangkal sekitar 2–3 meter. Kondisi ini mengindikasikan adanya potensi penurunan (settlement), khususnya jika beban konstruksi diaplikasikan tanpa perbaikan tanah yang memadai. Secara empiris, Peck, Hanson, dan Thornburn (1974, *Foundation Engineering*) menekankan bahwa lapisan tanah dengan daya dukung sedang pada kedalaman dangkal cenderung mengalami penurunan awal yang signifikan akibat beban konstruksi. Hal serupa juga dijelaskan oleh Braja M. Das (2010, *Principles of Foundation Engineering*), yang menyatakan bahwa meskipun qc tinggi menunjukkan daya dukung yang baik, karakteristik lapisan lunak–sedang di kedalaman dangkal masih dapat memicu penurunan konsolidasi sekunder.

Selain itu, menurut SNI 8460:2017 tentang Perencanaan Geoteknik, penilaian potensi penurunan tanah harus mempertimbangkan kondisi stratifikasi lapisan tanah, nilai qc , serta beban rencana yang bekerja. Dengan demikian, meskipun data kuantitatif kompresibilitas (uji oedometer) tidak tersedia, data lapangan berupa qc dan stratigrafi tanah sudah cukup untuk memberikan gambaran empiris mengenai potensi settlement.

Potensi Piping

Dari hasil analisis geoteknis, fokus pembahasan kali ini adalah potensi piping pada tanggul embung. Berdasarkan data yang diperoleh, panjang tanggul yang mengalami rembesan (H_f) adalah 110 m, dengan perbedaan tinggi antara hulu 61 m dan hilir 49 m, sehingga $\Delta H = 12$ m. Analisis parameter tanah dilakukan pada empat sampel (HB01–HB04) dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Analisis Piping pada Sampel Tanah Embung

| Sam pel | γ_d (kN/m ³) | Gs | e | n | H_f (m) | H (m) | FK |
|---------|------------------------------------|-------|------|------|--------------|----------|-------|
| HB01 | 13,8 | 3,115 | 1,21 | 0,55 | 110 | 12 | 30,52 |
| HB02 | 15 | 3,115 | 1,04 | 0,51 | 110 | 12 | 28,90 |
| HB03 | 16,4 | 3,115 | 0,86 | 0,46 | 110 | 12 | 27,30 |
| HB04 | 13,6 | 3,115 | 1,25 | 0,55 | 110 | 12 | 30,82 |

(sumber: Hasil Analisis Data, 2025)

Dari tabel di atas, FK merupakan faktor keamanan terhadap piping. Nilai FK yang diperoleh untuk seluruh sampel berada di atas angka aman minimum, sehingga risiko terjadinya piping relatif rendah untuk kondisi tanah yang dianalisis.

Secara keseluruhan, meskipun panjang rembesan mencapai 110 m, tinggi muka air aktual (H) adalah 12 m serta karakteristik tanah yang ada mendukung stabilitas tanggul terhadap fenomena piping. Analisis ini menjadi bagian penting dalam evaluasi keamanan geoteknis embung, untuk memastikan tampungan air dapat berfungsi optimal tanpa risiko kegagalan akibat rembesan di masa mendatang.

Implikasi terhadap Kinerja Embung

Berdasarkan hasil investigasi tanah, tanah dasar di lokasi Embung Rano Tadulako umumnya berupa material granular non-plastis dengan kadar air rendah dan berat isi kering yang cukup baik. Karakteristik ini membuat tanah relatif stabil, karena tidak menunjukkan potensi kembang–susut yang signifikan. Namun, nilai kohesi yang rendah (0,02–0,05 kg/cm²) menunjukkan bahwa kekuatan tanah lebih banyak dipengaruhi oleh sudut geser dalam ($\pm 19\text{--}30^\circ$). Dengan kata lain, stabilitas tanah terutama bergantung pada gesekan antarbutir, bukan daya ikatnya.

Dari sisi rembesan, nilai permeabilitas yang berada pada kisaran 0,0057–0,0124 cm/det tergolong cukup tinggi untuk ukuran tanah urugan atau tanah dasar embung. Hal ini berarti air relatif mudah bergerak melewati pori-pori tanah, apalagi ditambah sifat tanah yang non-plastis. Kondisi ini bisa menjadi jalur utama rembesan, terutama saat muka air embung berada pada elevasi tinggi.

Terkait kapasitas tampungan, embung ini tergolong skala kecil dengan luasan genangan ± 11.000 m² dan daerah tangkapan air kurang dari 200 ha. Dengan kapasitas terbatas, rembesan dalam jumlah kecil sekalipun bisa cukup berpengaruh terhadap ketersediaan air, terutama di musim kemarau. Oleh karena itu, sistem drainase, filter, atau lapisan kedap pada tubuh embung perlu dijaga fungsinya agar rembesan tidak berkembang menjadi masalah serius.

Secara keseluruhan, tanah dasar embung cukup mendukung fungsi konstruksi, tetapi sifatnya yang permeabel menjadi tantangan utama terhadap kinerja jangka panjang. Jika potensi rembesan tidak dikendalikan, dampaknya bukan hanya berkurangnya daya tampung, tetapi juga ancaman keamanan struktur, terutama saat embung menghadapi beban gempa atau fluktuasi muka air yang cepat.

Rekomendasi dan Arah Penelitian Lanjutan

Hasil kajian awal ini menunjukkan bahwa kondisi tanah dasar Embung Rano Tadulako relatif mendukung stabilitas, namun sifatnya yang cukup permeabel masih menyisakan potensi rembesan. Namun demikian, investigasi lanjutan tetap diperlukan untuk melengkapi parameter geoteknis lainnya, seperti uji triaksial, konsolidasi, maupun uji geser tak terdrainase, sehingga analisis perilaku tanah dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

Selain itu, monitoring embung secara periodik penting dilakukan untuk mendeteksi dini adanya gejala penurunan, rembesan, maupun retakan pada tubuh embung. Dari sisi teknis, beberapa alternatif perbaikan dapat dipertimbangkan,

seperti pemasangan cut-off wall, pelapisan tanah kedap (clay lining), atau perkuatan pada dasar embung untuk mengurangi potensi kehilangan air.

Sebagai arah penelitian ke depan, kajian stabilitas tanggul embung dengan data geoteknis yang lebih lengkap sangat direkomendasikan. Analisis ini akan memberikan gambaran lebih menyeluruh mengenai faktor keamanan embung, terutama dalam menghadapi kondisi ekstrem seperti fluktuasi muka air dan beban gempa.

5. KESIMPULAN

Hasil kajian terhadap stabilitas Embung Rano Tadulako ditinjau dari aspek geoteknis, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Karakteristik tanah pada tubuh embung menunjukkan kondisi yang cukup baik untuk mendukung kestabilan konstruksi.
2. Analisis potensi rembesan memperlihatkan bahwa aliran air masih berada dalam batas wajar dan tidak menimbulkan risiko kebocoran signifikan.
3. Analisis penurunan menunjukkan deformasi yang terjadi relatif kecil sehingga tidak berpengaruh besar terhadap fungsi embung.
4. Faktor keamanan terhadap piping sangat aman karena nilainya jauh melebihi batas aman yang disyaratkan.

Secara keseluruhan, stabilitas Embung Rano Tadulako dapat dikategorikan aman dari sisi geoteknis, baik ditinjau dari aspek rembesan, penurunan, maupun potensi piping.

DAFTAR PUSTAKA

- Ausweger, G. M., & Schweiger, H. (2016). *Numerical study on the influence of entrapped air bubbles on the time-dependent pore pressure distribution in soils due to external changes in water level*. 9, 16010. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20160916010>
- Chen, J. (2013). Laboratory tests on development of seepage failure of overlying layer during piping of two-stratum dike foundation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-YTGC201310003.htm
- Fleshman, M. S. (2013). *Laboratory modeling of critical hydraulic conditions for the initiation of piping*. 1044–1055. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.106>
- Gu, Z., Wei, H., & Liu, Z. (2024). *Study on the influence of water supply and drainage pipeline damage on urban silt ground collapse*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1334/1/012019>
- Handoko, D. (2024). *Analysis of Mini Polder Performance for Improved Water Management in the Dadahup Swampy Irrigation Area*. 1323, 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1323/1/012004>
- Napitu, U., Corry, C., Sinurat, A., Harianja, T., Arent, E., Mardiani, M., Nasution, A. M. L., & Napitu, H. (2022). Sosialisasi peran perguruan tinggi dan akademisi sebagai inkubator bisnis dalam penguatan koperasi sebagai lembaga ekonomi kerakyatan menuju koperasi modern bagi pelaku ukm di sumatera utara. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Sapangambei Manoktok Hitei*, 2(1), 43–59. <https://doi.org/10.36985/914vq849>
- Meng, F., Pei, H., Ye, M., & He, X. (2024). Stability analysis of reservoir slope under water-level drawdown considering stratigraphic uncertainty and spatial variability of soil property. *Computers and Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106199>
- Peng, M., Liang, Y., Xing, H., Yang, G., Zhu, Y., Zhang, L., Li, B., Cai, S., & Bi, J. (2025). Stochastic seepage stability analysis of the Pubugou clay core rockfill dam with potentially high permeability zone by integrating multi-source monitoring information. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/17499518.2024.2445929>
- Purwantini, T. B., & Suhaeti, R. N. (2018). *Irigasi Kecil: Kinerja, Masalah, dan Solusinya*. 35(2), 91–105. <https://doi.org/10.21082/FAE.V35N2.2017.91-105>
- Suhaeti, R. N., Saleh, A., & Abbas, A. (2018). *Factors on Community Investment-Based Small Scale Irrigation Development in Indonesia: Case of West Nusa Tenggara*. 6(1). <https://doi.org/10.22500/SODALITY.V6I1.21202>
- Thurairajah, A., Saad, B., Williams, R. L., Fernando, V., & Seid-Karbasi, M. (2022). *Integrity Management Considerations for Pipes in Peat Muskeg and Organic Rich Soils. Volume 3: Operations, Monitoring, and Maintenance; Materials and Joining*. <https://doi.org/10.1115/ipc2022-86987>

Occurrence during Tunneling through Spatially Variable Soils. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 7(2), 04021009.
<https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0001124>

Wijeyesekera, D. C., & Wijeyesekera, D. C. (2021). Forensic geotechnical investigations into varied pipeline failures. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S41062-021-00583-0>

Xiao, Y., Xiao, Y., Cao, H., Luo, G., & Zhai, C. (2020). Modelling seepage flow near the pipe tip. *Acta Geotechnica*, 15(7), 1953–1966. <https://doi.org/10.1007/S11440-019-00878-8>

Yener, A., Durmaz, S., & Demir, B. (n.d.). *The importance of geological and geotechnical investigations of landslides occurred at dam reservoirs*. <https://doi.org/10.1201/9780203885284-c61>