



## Analisis Geoteknik dan Alternatif Penanganan Tebing *Limestone* di Kawasan Wisata Pantai Tanah Barak

I Made Aryatirta Predana<sup>a</sup>, Putu Ira Pramesti Wiraningsih<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup> Program Studi Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, Badung

\*Corresponding author, email address: [aryatirta@unud.ac.id](mailto:aryatirta@unud.ac.id)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 26 Februari 2026

Revised: 20 Maret 2026

Accepted: 31 Maret 2026

Available Online: 30 April 2026

#### Kata Kunci:

Tebing Limestone, Stabilitas Lereng, Alternatif Penanganan, Mitigasi Kelongsoran

#### Keywords:

Limestone Cliff, Slope Stability, Mitigation Alternatives, Slope Failure Mitigation

### ABSTRAK

Kawasan Pantai Tanah Barak di Bali Selatan telah menjadi destinasi wisata unggulan dengan karakteristik unik berupa akses jalan yang membelah tebing batu kapur alami. Namun, kondisi geologis tebing yang memiliki kemiringan sub-vertikal sangat rentan terhadap pelapukan mekanis dan kimiawi, yang dibuktikan dengan terjadinya insiden kelongsoran batuan pada Januari 2025. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis parameter geoteknik tanah di tebing Pantai Tanah Barak dan mengevaluasi stabilitas lereng terhadap potensi kelongsoran, serta merekomendasikan alternatif penanganan yang tepat. Metode penelitian diawali dengan penyelidikan lapangan melalui pengeboran *borehole* hingga kedalaman 30 meter, uji *Standard Penetration Test* (SPT), serta pengujian laboratorium untuk mendapatkan sifat fisik dan mekanis batuan. Analisis stabilitas lereng kemudian dilakukan menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) berbantuan perangkat lunak GeoStudio 2022 SLOPE/W pada berbagai skenario pembebanan yaitu kondisi eksisting, jenuh air, dan penambahan beban konstruksi. Hasil investigasi menunjukkan stratigrafi didominasi formasi *limestone* dengan tingkat pelapukan bervariasi (nilai N-SPT  $\geq 50$ ) namun memiliki *Rock Quality Designation* (RQD)  $< 10\%$  yang tergolong sangat buruk. Melalui evaluasi keamanan lereng, penelitian ini mengkaji alternatif mitigasi kelongsoran, baik secara struktural maupun non-struktural, seperti modifikasi geometri lereng (*bench-cut*), dinding penahan tanah, perkuatan *soil nailing*, dan manajemen air permukaan. Rekomendasi ini diharapkan mampu meminimalisir risiko kegagalan lereng sekaligus menjaga nilai estetika tebing kapur demi mendukung keberlanjutan pariwisata di Bali.

### ABSTRACT

The Tanah Barak Beach area in South Bali has emerged as a prominent tourist destination characterized by its unique road access cutting through natural limestone cliffs. However, the geological condition of the sub-vertikal cliffs makes them highly susceptible to mechanical and chemical weathering, as evidenced by a rockfall incident in January 2025. This study aims to analyze the geotechnical parameters of the soil at Tanah Barak cliff, evaluate slope stability against potential landslides, and recommend appropriate mitigation alternatives. The research methodology commenced with field investigations, including borehole drilling to 30 meters, Standard Penetration Tests (SPT), and laboratory testing to determine the rock's physical and mechanical properties. Slope stability analysis was subsequently conducted using the Limit Equilibrium Method (LEM) in GeoStudio 2022 SLOPE/W under various loading scenarios: existing, saturated, and surcharge. Investigation results revealed a stratigraphy dominated by limestone formations with varying degrees of weathering (N-SPT values  $\geq 50$ ) but possessing a Rock Quality Designation (RQD) of  $< 10\%$ , classified as very poor. Through slope safety evaluation, this study assesses landslide mitigation alternatives, both structurally and non-structurally, such as slope geometry modification (*bench-cut*), retaining walls, soil nailing reinforcement, and surface water management. These recommendations are expected to minimize the risk of slope failure while preserving the aesthetic value of the limestone cliffs to support sustainable tourism in Bali.



## 1. PENDAHULUAN

Sektor pariwisata di Provinsi Bali merupakan fondasi utama bagi stabilitas ekonomi regional, di mana kawasan pesisir di Bali Selatan dengan morfologi tebing kapur putih menjadi daya Tarik bagi pasar global. Di antara berbagai destinasi yang berkembang, Kawasan Pantai Pandawa di Desa Kutuh, Kecamatan Kuta Selatan, Kabupaten Badung, telah bertransformasi menjadi pusat pertumbuhan baru dalam satu dekade terakhir. Karakteristik unik kawasan ini terletak pada aksesibilitasnya yang diciptakan melalui pemotongan formasi batu kapur alami, yang memberikan pengalaman visual monumental bagi wisatawan. Seiring dengan peningkatan popularitas Pantai Pandawa, muncul destinasi baru di sekitarnya, salah satunya adalah Pantai Tanah Barak. Lokasi ini menawarkan daya tarik berupa tebing kapur yang indah dan menjulang tinggi serta akses jalan yang membelah dari formasi batu kapur alami [1].

Namun demikian, pengembangan fisik di kawasan Tanah Barak menghadapi tantangan dan risiko geologi berupa kemiringan sub-vertikal tebing yang curam sehingga sangat rentan terhadap proses pelapukan batuan atau degradasi mekanis akibat paparan iklim tropis [2]. Batu kapur atau gamping, walaupun secara visual tampak kokoh, namun memiliki sifat kimiawi yang mudah larut dalam air yang mengandung karbon dioksida dan dapat mempercepat pelapukan internal [3], [4]. Peristiwa kelongsoran material batuan pada Januari 2025 di akses jalan utama Tanah Barak setelah hujan intensitas tinggi menunjukkan bahwa kekuatan tebing eksisting tidak memadai untuk mengakomodasi beban lingkungan sekitar akibat kemiringan tebing yang curam [5]. Meskipun tidak menimbulkan korban jiwa, insiden ini memperjelas urgensi untuk melakukan evaluasi teknis terhadap stabilitas lereng di kawasan wisata tersebut. Kegagalan lereng di kawasan wisata bukan hanya masalah teknis infrastruktur, tetapi juga ancaman langsung terhadap keselamatan wisatawan dan masyarakat umum serta reputasi Bali sebagai destinasi aman di dunia.

Penyelidikan tanah dan analisis geoteknik khususnya stabilitas lereng menjadi langkah fundamental untuk memahami mekanisme kegagalan dan menentukan parameter perkuatan yang tepat. Parameter kekuatan geser tanah atau batuan dan kondisi hidrogeologi harus diidentifikasi secara akurat. Dengan mengetahui parameter geoteknik yang dibutuhkan, analisis stabilitas lereng dapat dilakukan berbasis metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) yang memungkinkan simulasi berbagai skenario pembebanan, mulai dari kondisi eksisting hingga potensi tambahkan beban konstruksi di atas tebing. Selain aspek teknis, strategi mitigasi di Tanah Barak perlu untuk mempertimbangkan sensitivitas estetika Kawasan, dimana penggunaan struktur beton masif yang tidak terencana dapat merusak nilai visual tebing kapur yang menjadi nilai utama kawasan pariwisata tersebut. Oleh karena itu, diperlukan integrasi antara rekayasa geoteknik dan alternatif penanganan yang efektif namun tetap harmonis dengan alam.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis parameter geoteknik kondisi tanah di tebing Pantai Tanah Barak melalui hasil pengeboran borehole, uji SPT, dan geofisika, serta menganalisis stabilitasnya terhadap potensi kelongsoran. Dengan mengevaluasi berbagai alternatif perkuatan sebagai mitigasi struktural dan non-struktural, diharapkan penelitian ini dapat memberikan rekomendasi bagi pemerintah daerah dengan kondisi lokasi pariwisata dominan tebing *limestone* curam dalam pengambilan keputusan pembangunan yang berbasis mitigasi risiko. Keberhasilan penanganan stabilitas tebing di Tanah Barak sangat penting untuk pengelolaan destinasi wisata berbasis tebing di wilayah Bali Selatan lainnya, guna mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*).

## 2. KAJIAN PUSTAKA

### 2.1 Geologi dan Karakteristik *Limestone*

Batu kapur atau limestone merupakan jenis batuan sedimen kimiawi dan organik yang komposisi utamanya terdiri dari mineral kalsit atau kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) [4]. Di Pulau Bali, formasi batuan ini terkonsentrasi di Semenanjung Bukit Badung dan Nusa Penida, yang secara geologis dikenal sebagai Formasi Selatan atau Limestone Selatan yang terbentuk pada kala Miocen hingga Pliocen [6]. Batuan ini terbentuk dari sedimentasi organisme laut, terumbu karang, dan akumulasi material karbonat lainnya yang mengalami proses diagenesis dan pengangkatan tektonik. Karakteristik fisik batu kapur sangat bervariasi

tergantung pada tingkat porositas, densitas, dan kandungan material lainnya seperti lempung atau pasir. Di daerah tropis seperti Bali, batuan ini mengalami pelapukan kimiawi yang intensif melalui proses karstifikasi, di mana air hujan yang bersifat asam melarutkan mineral karbonat dan membentuk rongga-rongga sekunder, saluran drainase bawah tanah, serta memperlebar rekahan (*joint*) yang ada pada massa batuan [7], [8].

Kekuatan mekanis massa batuan *limestone* tidak hanya ditentukan oleh kekuatan batuan utuh (*intact rock*), tetapi lebih didominasi oleh keberadaan diskontinuitas atau bidang lemah [9]. Parameter kunci dalam analisis geoteknik meliputi kohesi ( $c$ ), sudut geser dalam ( $\Phi$ ), dan berat volume ( $\gamma$ ). Pada kondisi baik, *limestone* dapat memiliki kuat tekan uniaksial (UCS) yang sangat tinggi, namun seiring dengan meningkatnya derajat pelapukan, nilai kohesi dan sudut geser dalam akan menurun secara signifikan, mengubah karakteristik massa batuan menjadi tanah residual yang bersifat pasiran atau lempungan [7]. Penyelidikan geofisika seperti geolistrik dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona-zona pelapukan ini berdasarkan variasi nilai resistivitasnya. Batuan yang kompak dan dalam kondisi baik cenderung memiliki resistivitas tinggi, sementara zona jenuh air atau batuan lapuk menunjukkan resistivitas yang rendah [10].

## 2.2 Teori Stabilitas Lereng dan Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

Analisis stabilitas lereng bertujuan untuk menentukan nilai Faktor Keamanan (*Factor of Safety* - FS), yang didefinisikan sebagai rasio antara kekuatan geser material penahan terhadap tegangan geser yang bekerja akibat beban penggerak [11]. Secara matematis, stabilitas lereng dievaluasi berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, yang menghubungkan kekuatan geser ( $\tau$ ) dengan tegangan normal ( $\sigma$ ) melalui parameter kohesi dan gesekan internal. Dalam kondisi statis, angka keamanan minimum yang umumnya disyaratkan oleh standar desain seperti SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik adalah 1,5, sementara untuk kondisi gempa (dinamis), ambang batasnya adalah 1,1 hingga 1,25 [12].

Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method* - LEM) merupakan pendekatan yang dapat digunakan dalam praktik rekayasa untuk menghitung faktor keamanan suatu potongan lereng [13]. Metode ini membagi massa tanah di atas bidang gelincir potensial menjadi beberapa irisan vertikal dan menerapkan persamaan kesetimbangan statis pada setiap irisan. Beberapa teknik irisan yang umum meliputi [14], [15]:

- a. Metode Fellenius (*Ordinary Method of Slices*): Hanya mempertimbangkan kesetimbangan momen dan mengabaikan gaya antar irisan, sehingga hasilnya cenderung sangat konservatif.
- b. Metode Bishop yang Disederhanakan: Memperhitungkan gaya vertikal antar irisan dan memenuhi kesetimbangan momen, baik untuk bidang gelincir berbentuk busur lingkaran.
- c. Metode Spencer: Merupakan metode yang memperhitungkan keseluruhan kesetimbangan gaya horizontal, gaya vertikal, dan momen secara simultan, serta mengasumsikan kemiringan gaya antar irisan yang konstan.
- d. Metode Morgenstern-Price: Mirip dengan Metode Spencer namun memungkinkan variasi fungsi kemiringan gaya antar irisan, memberikan fleksibilitas tinggi untuk bidang gelincir non-sirkular.

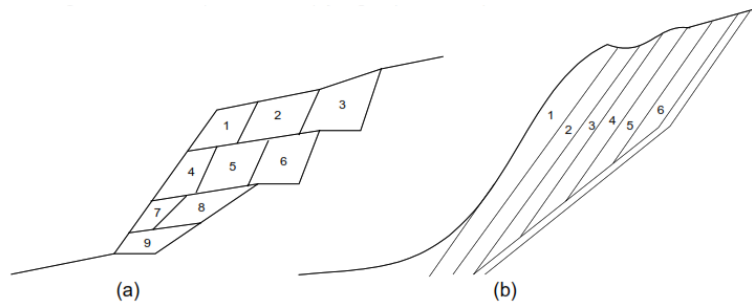
## 2.3 Alternatif Penanganan Kelongsoran Tebing

Kestabilan sebuah lereng sangat dipengaruhi oleh interaksi antara gaya pendorong (berasal dari beban massa tanah) dan gaya penahan (berasal dari kekuatan geser tanah). Analisis yang membandingkan kedua komponen gaya ini sangat krusial untuk menentukan tingkat stabilitas lereng. Kelongsoran umumnya terjadi ketika keseimbangan tersebut terganggu, yaitu saat gaya pendorong melampaui kapasitas gaya penahan, sehingga nilai faktor keamanan lereng turun di bawah batas minimum. Oleh sebab itu, prinsip utama dalam mencegah dan menangani longsor adalah dengan meminimalkan gaya pendorong atau memaksimalkan gaya penahan. Pemilihan metode penanganan ini perlu disesuaikan dengan jenis keruntuhan, karakteristik tanah, serta kondisi geologi di lokasi secara spesifik [16].

Beberapa alternatif penanganan atau mitigasi tanah rawan kelongsoran dalam bentuk mitigasi struktural maupun non-struktural dapat dijabarkan sebagai berikut.

a. Modifikasi Geometri Lereng

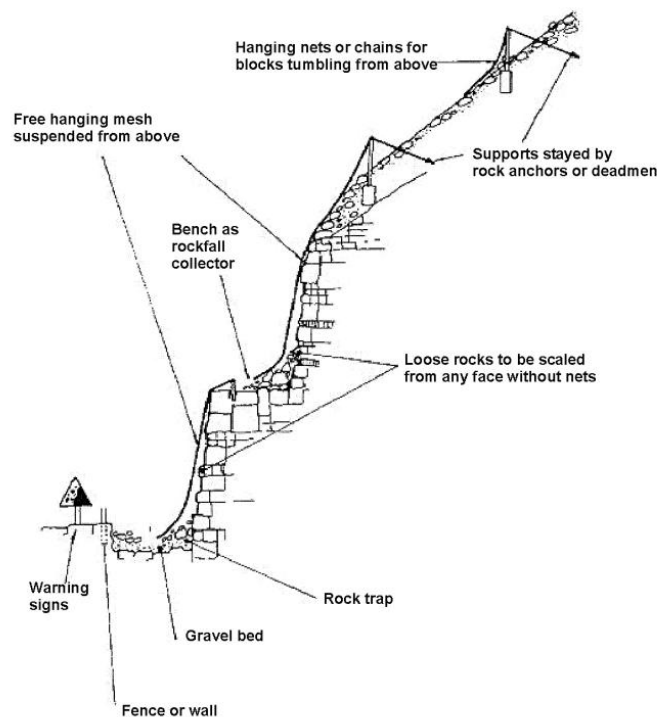
Lereng yang rentan mengalami longsor umumnya memiliki profil yang sangat curam. Alternatif penanganannya utamanya adalah melandaikan sudut kemiringan lereng tersebut hingga mencapai batas aman. Berdasarkan pedoman teknis yang berlaku, rekayasa geometri lereng ini umumnya dilakukan melalui dua metode penggalian, yakni sistem berjenjang (*bench-cut*) atau pemotongan dari arah bawah (*down hill cut*) seperti ditunjukkan pada Gambar 1a dan 1b.



**Gambar 1.** Metode pekerjaan pemotongan lereng [17]

Sebelum memodifikasi geometri, perlu kehati-hatian ekstra karena proses penggalian, curah hujan, dan pelapukan justru bisa menjadi pemicu longsor. Observasi visual yang mendetail wajib dilakukan untuk mendeteksi adanya retakan, rembesan air tanah, hingga jejak longsor lama di sekitar lokasi. Dengan pengawasan yang ketat selama masa penggalian, risiko keruntuhan dapat diminimalisasi.

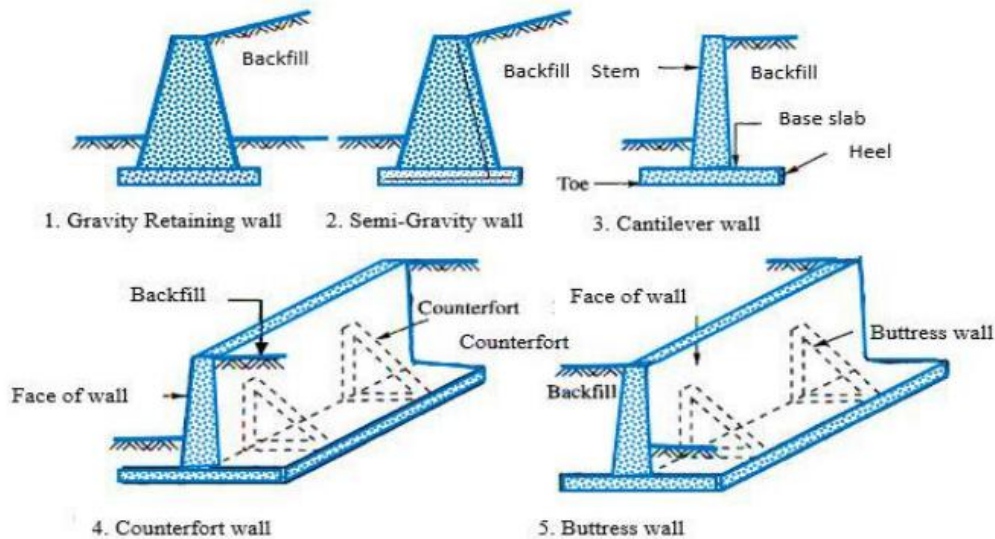
Pelandaian lereng, khususnya dengan penerapan sistem terasering (*bench*), akan membuat lereng jauh lebih stabil. Sebagai perlindungan ekstra, dapat ditambahkan jaring kawat (*wire mesh*) atau *cable net* untuk mengantisipasi bahaya jatuhnya batuan (*rockfalls*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Jika terjadi runtuhannya dari area atas, jaring kawat tersebut akan menahan laju serpihan tanah atau batu, sementara area *bench* berfungsi sebagai wadah penampung atau kolektor agar material tidak langsung jatuh menghantam area di bawahnya. Hal ini secara signifikan akan meningkatkan keselamatan di sekitar kaki lereng.



**Gambar 2.** Pengendalian kelongsoran dengan bench oleh Fookes and Sweeney (1976) dalam Hoek [18]

b. Pembangunan Dinding Penahan Tanah (DPT)

Dinding Penahan Tanah (DPT) adalah struktur dinding yang dibangun untuk menahan dorongan massa tanah dan tekanan tanah lateral, baik dari tanah asli maupun tanah urugan yang tidak stabil [19], [20]. DPT umumnya dibangun menggunakan material pasangan batu, beton, maupun struktur beton bertulang. Kinerja DPT sangat bergantung pada ketahanannya terhadap gaya geser, kemampuannya menahan momen guling, serta kecukupan daya dukung tanah dasar penopang struktur DPT. Selain menahan tanah, struktur ini juga bertindak sebagai elemen proteksi untuk menjaga kestabilan lereng secara keseluruhan dan mencegah terjadinya keruntuhan. Skema dari jenis-jenis DPT ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Jenis-jenis dinding penahan tanah [21]

Terdapat beberapa jenis-jenis dinding penahan tanah sebagai berikut [22].

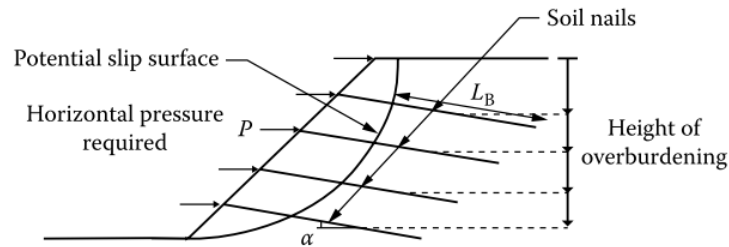
- i. Dinding Gravitasi (*Gravity Wall*), yaitu dinding dari beton murni atau pasangan batu kali yang murni mengandalkan bobot massanya sendiri untuk mencapai kestabilan konstruksi.
- ii. Dinding Kantilever (*Cantilever Wall*), yaitu dinding yang terbuat dari struktur beton bertulang dengan elemen dinding vertikal dan tapak horizontal. Stabilitas didapat dari kombinasi berat dinding itu sendiri dan beban tanah yang menumpu pada bagian tumit (*heel*) tapak.
- iii. Dinding Kontrafort (*Counterfort Wall*), yaitu dinding yang memiliki prinsip seperti dinding kantilever, namun dilengkapi dengan sirip pengikat tambahan yang menyatukan dinding dan alas pada sisi belakang dengan jarak tertentu.
- iv. Dinding Buttres (*Buttress Wall*), yaitu dinding yang memiliki kemiripan dengan dinding kontrafort, dengan perbedaannya adalah elemen sirip penguatnya diletakkan di sisi depan dinding.
- v. Dinding Turap (*Sheet Pile*), yaitu dinding penahan menerus berbahan kayu, baja, atau beton yang dipancang ke dalam tanah dan saling mengunci untuk meredam tekanan lateral.

Sistem DPT sebaiknya dilengkapi dengan fasilitas drainase yang baik, seperti lubang pembuangan (*weep holes*) dan pipa saluran (*drain pipes*) yang dibalut material filter anti-sumbat. Fasilitas yang ditempatkan di belakang dinding ini sangat vital untuk mencegah penumpukan air tanah dan menghindari peningkatan tekanan hidrostatik. Air yang ditangkap oleh material berpermeabilitas tinggi ini nantinya akan dialirkan keluar dengan lancar melalui sistem perpipaan tersebut [12].

c. Perkuatan dengan *Soil Nailing* dan *Ground Anchors*

*Soil nailing* merupakan teknik perkuatan lereng atau DPT secara pasif (tanpa gaya prategang) [12], [14]. Metode ini diaplikasikan dengan cara memasukkan batang tulangan (*nail bar*) ke dalam tanah melalui proses pengeboran atau pemancangan, umumnya dengan posisi miring ke bawah, untuk memberikan

perlawanan tambahan jika terjadi pergerakan tanah. Apabila lereng membutuhkan perkuatan aktif berupa gaya prategang, maka yang digunakan adalah sistem *ground anchors*. Untuk mengoptimalkan kekuatan di bagian permukaan lereng, metode ini sering dikombinasikan dengan penyemprotan beton (*shotcrete*) dan jaring baja (*wiremesh*). Skema perkuatan dengan *soil nailing* ditunjukkan pada Gambar 4.

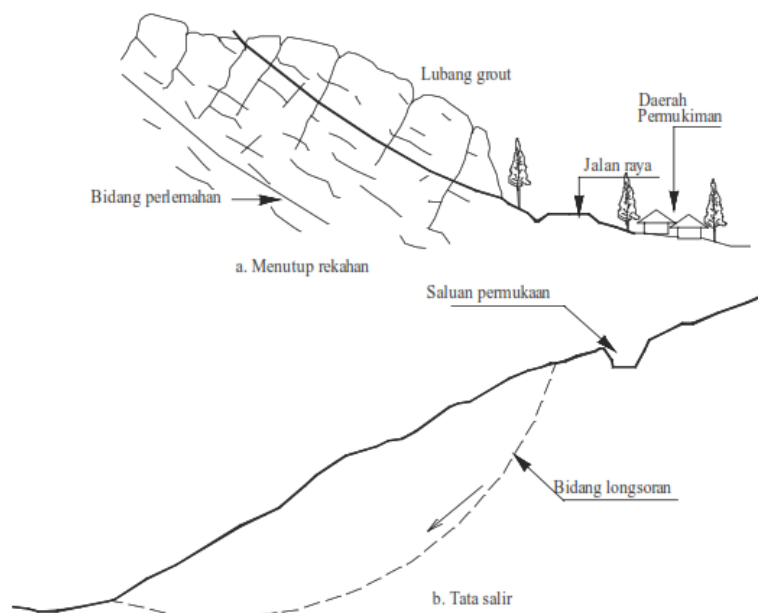


**Gambar 4.** Skema perkuatan dengan *soil nailing* [14]

#### d. Manajemen Air Permukaan

Pengendalian air di permukaan merupakan langkah esensial untuk menurunkan risiko kelongsoran. Dengan mengelola arah dan resapan air, beban tanah yang memicu longsor dapat dikurangi sekaligus menjaga kekuatan material penyusun lereng. Fokus utamanya adalah mengelola air yang mengalir di atas permukaan serta mencegah peresapan (infiltrasi) yang berlebihan. Hal ini diwujudkan dengan membangun sistem drainase di area puncak dan kaki lereng untuk mengarahkan laju air hujan agar tidak terserap dan memicu peningkatan tekanan pori tanah.

Sistem saluran drainase permukaan sebaiknya ditempatkan di luar zona rawan longsor dan dibangun melingkari area tersebut guna mencegah masuknya limpasan air dari tempat yang lebih tinggi. Saluran air yang dibuat di area rawan harus memiliki kemiringan yang tepat agar aliran air dapat bergerak cepat, dan bagian dasarnya wajib dilapisi material kedap air untuk mencegah rembesan. Ukuran dan kemiringan saluran harus diperhitungkan dengan seksama sesuai perkiraan debit air. Khusus untuk saluran air yang melintasi area dengan material tanah yang gembur atau lepas, sangat disarankan menggunakan sistem pipa tertutup guna menghindari bahaya erosi dan penyusutan air ke dalam tanah. Skema sistem tata salir atau saluran permukaan ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Penanganan keruntuhan lereng dengan pengendalian air permukaan [17]

### 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Gambaran Umum

Daya Tarik Wisata (DTW) Tanah Barak merupakan destinasi pesisir baru yang sedang berkembang pesat di wilayah Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Bali. Secara administratif, kawasan wisata ini terletak di Desa Kutuh, yakni sebuah wilayah di bagian selatan Pulau Bali yang didominasi oleh perbukitan karst dan menghadap langsung ke Samudera Hindia. Luas wilayah Desa Kutuh mencapai sekitar 97,68 hektar, di mana penggunaan lahannya didominasi oleh area perbukitan, tebing kapur, dan kawasan pesisir. Secara geografis, lokasi Tanah Barak berbatasan dengan Kelurahan Jimbaran di sebelah utara, Kelurahan Benoa di sebelah timur, Samudera Hindia di sebelah selatan, dan Desa Ungasan di sebelah barat. Sebelumnya area ini hanyalah tebing berbatu dengan akses jalan setapak yang terbatas, namun kini telah bertransformasi melalui rekayasa tebing yang dibelah yang sekaligus menjadi akses jalan masuk. Daya tarik utama dari kawasan ini adalah tebing batu kapur dengan ketinggian mencapai 30 meter yang juga menjadi landasan penamaan Tanah Barak.

#### 3.2 Parameter Geoteknik

Pelaksanaan analisis geoteknik di Kawasan Wisata Pantai Tanah Barak diawali dengan serangkaian penyelidikan lapangan untuk memperoleh data primer mengenai stratigrafi dan parameter geoteknik bawah permukaan. Pengeboran dilakukan pada area atas tebing hingga kedalaman minimum 30 meter, sesuai dengan rekomendasi SNI 8460:2017 mengenai klasifikasi situs dan analisis stabilitas lereng yang komprehensif [12]. Hasil pengeboran dicatat dalam bentuk *bore-log* yang mendeskripsikan klasifikasi tanah/batuan secara visual, warna, tingkat kekerasan, nilai N-SPT tiap kedalaman 2 meter, serta persentase *Rock Quality Designation* (RQD) untuk mengevaluasi derajat fragmentasi massa batuan.

Sampel tanah tidak terganggu (*undisturbed sample*) diambil menggunakan tabung tipis pada kedalaman tertentu untuk dilakukan pengujian sifat fisik dan mekanis pada laboratorium mekanika tanah. Parameter fisik yang diuji meliputi kadar air asli ( $w_c$ ), berat jenis ( $G_s$ ), berat volume ( $\gamma$ ), dan analisis gradasi butiran menggunakan saringan. Untuk menentukan parameter kekuatan geser yang akan digunakan dalam pemodelan stabilitas tebing, dilakukan pengujian *Direct Shear Test* (uji geser langsung) dan *Unconfined Compressive Strength* (UCS) untuk mendapatkan nilai kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\Phi$ ).

#### 3.3 Pemodelan Stabilitas Lereng dan Analisis Alternatif Penanganan Tebing

Analisis stabilitas tebing dilakukan secara komputasi dengan Metode Keseimbangan Batas (LEM) menggunakan perangkat lunak GeoStudio 2022 SLOPE/W. Pemilihan metode ini didasarkan pada efisiensi dan keandalan dalam menentukan nilai Faktor Keamanan (FS) secara langsung melalui parameter kuat geser tanah atau batuan, dibandingkan dengan pemodelan numerik berbasis elemen hingga yang membutuhkan parameter kekakuan tanah atau batuan yang kompleks dan waktu komputasi yang tinggi. Pemodelan difokuskan pada penampang kritis yang mewakili geometri tebing di lokasi Tanah Barak. Geometri lereng ditentukan berdasarkan hasil survei topografi, yang memberikan profil ketinggian dan kemiringan tebing. Beberapa skenario kondisi pembebanan disimulasikan untuk mengevaluasi variasi angka keamanan tebing yaitu:

- Existing Slopes*: Kondisi lereng alami tanpa beban tambahan dan dalam kondisi kadar air normal.
- Saturated Conditions*: Mensimulasikan kondisi musim hujan ekstrem di mana permukaan tanah terendam oleh muka air tanah yang naik hingga ke permukaan lereng, yang secara signifikan meningkatkan tekanan air pori.
- Surcharge Load Conditions*: Menambahkan beban merata di atas tebing, mewakili rencana pembangunan fasilitas wisata.

Hasil FS dari setiap skenario dibandingkan dengan standar keamanan yang berlaku untuk menentukan urgensi dan alternatif jenis penanganan tebing yang dibutuhkan untuk meminimalisir keruntuhan tebing.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil N-SPT dan Parameter Geoteknik

Berdasarkan hasil investigasi lapangan melalui pengeboran dan pengujian laboratorium, karakteristik tanah dan batuan di Kawasan Tanah Barak menunjukkan profil stratigrafi yang didominasi oleh formasi *limestone* dengan tingkat pelapukan yang bervariasi. Meskipun secara umum tetap didominasi *limestone*, terdapat lapisan pasir *limestone* berpasir halus pada kedalaman tertentu yang berada di antara lapisan batu pecah yang lebih keras. Keberadaan lapisan pasir ini sangat krusial karena dapat bertindak sebagai bidang lemah dengan permeabilitas yang berbeda, yang dapat memicu tekanan pori lokal yang tinggi.

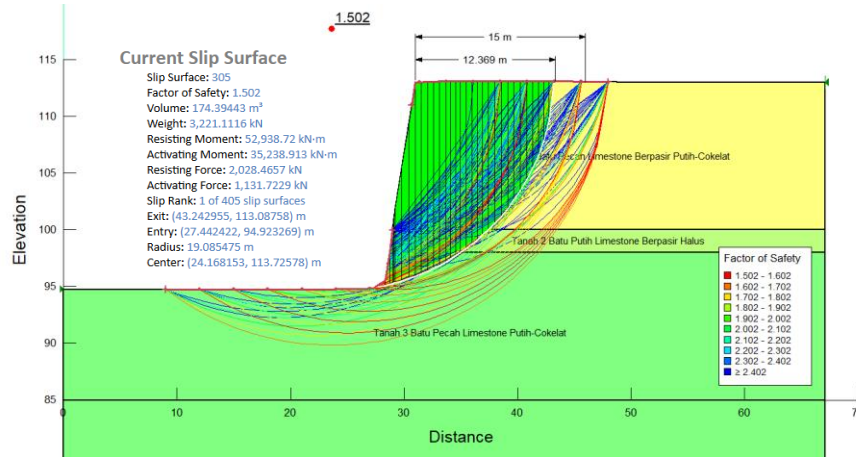
Rangkuman hasil pengujian N-SPT dan parameter geoteknik yang dilakukan di lokasi pada bulan Februari 2025 seperti sifat fisik, sifat mekanis dan kuat geser ditunjukkan pada Tabel 1. Secara umum hasil pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa lapisan tanah dari kedalaman 0 m sampai 13 m mengandung lapisan batu pecah *limestone* berpasir warna putih-cokelat dengan nilai SPT  $N \geq 50$  termasuk jenis tanah keras dan sangat rapat. Tanah dari kedalaman 13 m sampai 15 m mengandung lapisan batu putih *limestone* berpasir putih dengan nilai SPT  $N \geq 50$  termasuk jenis tanah keras dan sangat rapat. Tanah dari kedalaman 15 m sampai 30 m mengandung lapisan batu pecah *limestone* warna putih dan cokelat dengan nilai SPT  $N \geq 50$  termasuk jenis tanah keras dan sangat rapat. Nilai RQD didapatkan sebesar  $< 10\%$  dimana batuan diklasifikasikan sangat buruk (*very poor*). Terdapat nilai kohesi yang sangat besar pada lapisan tanah ketiga karena pengujian dilakukan terhadap batuan untuk mendapatkan nilai kuat tekan uniaksial (UCS).

**Tabel 1.** Parameter geoteknik hasil pengeboran di Tanah Barak (2025)

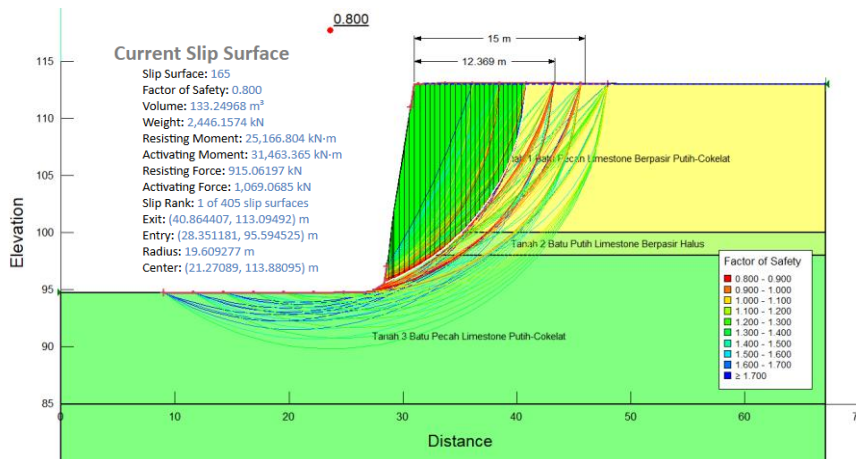
Parameter	Tanah 1: Batu Pecah Limestone Berpasir Putih-Cokelat	Tanah 2: Batu Putih Limestone Berpasir Halus	Tanah 3: Batu Pecah Limestone Putih-Cokelat
Kedalaman dari permukaan (m)	0-13 m	13-15 m	15-30 m
N SPT	$\geq 50$	$\geq 50$	$\geq 50$
RQD (%)	$< 10$	-	$< 10$
Specific gravity, Gs	2,70	2,71	2,70 - 2,72
Kadar Air, w (%)	0,52	0,46	1,14 - 1,20
Berat Volume, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,14	18,41	22,24 - 23,03
Kohesi, c (kN/m <sup>2</sup> )	13,73	12,75	8640,45 - 10463,35
Sudut Geser, $\phi$ (°)	49,87	53,36	-

### 4.2 Analisis Geometri dan Stabilitas Tebing

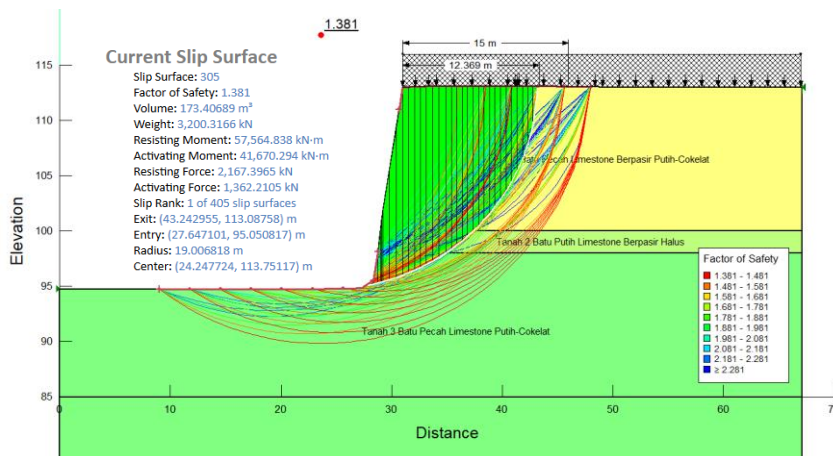
Tebing di Tanah Barak secara geometris dikategorikan sebagai lereng sub-vertikal dengan ketinggian berkisar antara 12 hingga 30 meter dan kemiringan antara  $80^\circ$  hingga  $85^\circ$ . Kemiringan yang ekstrem ini secara teoretis menciptakan kondisi kritis di mana gaya gravitasi dominan bekerja searah dengan bidang runtuh potensial [23]. Selanjutnya ditentukan salah satu potongan geometri tebing untuk analisis stabilitas dengan tinggi 18 meter dan kemiringan  $85^\circ$  yang mencerminkan kondisi tebing pada posisi terjadinya kegagalan lereng tahun 2025. Hasil pemodelan menggunakan GeoStudio 2022 menunjukkan variasi nilai FS yang signifikan di bawah standar minimum dengan berbagai kondisi lingkungan dan beban seperti ditunjukkan pada Gambar 6, 7, dan 8.



**Gambar 6.** Pemodelan Tebing Tanah Barak Kondisi *Existing Slopes* - Tanpa beban



**Gambar 7.** Pemodelan Tebing Tanah Barak Kondisi *Saturated Conditions* – Jenuh Air



**Gambar 8.** Pemodelan Tebing Tanah Barak Kondisi *Surcharge Load* – Tambahan Beban

Hasil analisis dan pemodelan tebing menunjukkan bahwa tebing tampak stabil dalam kondisi kering dan alami dengan nilai FS sebesar 1,502 seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Namun, berdasarkan analisis sensitivitas parameter, stabilitas tebing sangat rentan terhadap perubahan kondisi hidrologi dan penambahan beban luar. Bila kondisi tebing tanpa beban dianalisis dalam kondisi tanah jenuh air, terdapat penurunan nilai FS dari 1,502 menjadi 0,800 seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Tanpa adanya upaya

manajemen air permukaan, kondisi jenuh air menunjukkan reduksi kekuatan sebesar lebih dari 46%. Sedangkan bila kondisi tebing ditambahkan beban tambahan merata di permukaan atas lereng, hasil pemodelan ditunjukkan pada Gambar 8. FS juga berkurang menjadi senilai 1,381 dan belum mencukupi standar minimum  $FS \geq 1,50$ . Hasil analisis juga menunjukkan terdapat pengaruh jarak beban (*setback*), yaitu beban bangunan atau infrastruktur yang ditempatkan tepat di tepi tebing dapat menurunkan stabilitas lereng. Diperlukan jarak bebas minimal 15 meter dari tepi lereng agar beban di permukaan atas tidak memberikan pengaruh lateral yang signifikan terhadap tegangan geser pada massa tebing.

#### 4.3 Analisis Alternatif Penanganan Secara Struktural dan Non-Struktural

Berdasarkan hasil analisis stabilitas tebing dan kondisi teknis di kawasan wisata Tanah Barak, terdapat beberapa kombinasi alternatif penanganan yang mengintegrasikan solusi struktural dan arsitektural pada lokasi sebagai berikut:

a. Alternatif 1: Perkuatan *Soil Nailing* Secara Penuh

Alternatif ini menggunakan metode *soil nailing* sepanjang profil tebing dengan panjang paku antara 10 hingga 15 meter, yang ditambahkan *finishing* dengan lapisan *shotcrete* dan *wiremesh*. Paku baja yang di-*grouting* pada tebing dapat meningkatkan kohesi massa batuan secara internal, mengikat lapisan batuan lapuk dengan zona stabil di belakang bidang gelincir. Alternatif ini memungkinkan tebing tetap berdiri tegak tanpa mengubah geometri aslinya yang ikonik, dan teknik *shotcrete* dapat di-*finishing* dengan pola yang mirip dengan batu *limestone* untuk menjaga estetika visual. Namun, perlu analisis lebih lanjut terkait metode konstruksi, kebutuhan biaya serta kedalaman dan jumlah *soil nailing* yang dibutuhkan agar efektif untuk menstabilkan tebing.

b. Alternatif 2: Dinding Penahan Tanah (DPT) Beton Masif

Alternatif ini berupa pembangunan DPT beton bertulang setinggi tebing (hingga 18-25 m) dari kaki lereng. Walaupun opsi ini memungkinkan untuk dibangun, namun ukuran dinding yang sangat masif dapat memerlukan penambahan *ground anchor* untuk mencegah kegagalan guling. Biaya pengerjaan alternatif ini juga dapat menjadi yang tertinggi di antara semua opsi dan risiko pengurangan lebar jalan sangat besar untuk mengakomodasi tapak dari DPT.

c. Alternatif 3: Sistem Kombinasi DPT dan *Soil Nailing*

Alternatif ini mengkombinasikan konstruksi dinding beton setinggi 6 meter di bagian bawah tebing sebagai pelindung kaki lereng (*toe protection*) dan *soil nailing* pada profil tebing di atasnya. Struktur kaku di dasar tebing memberikan ketahanan terhadap erosi permukaan akibat aliran air jalan raya, sementara perkuatan paku baja di atas menangani stabilitas massa batuan secara internal.

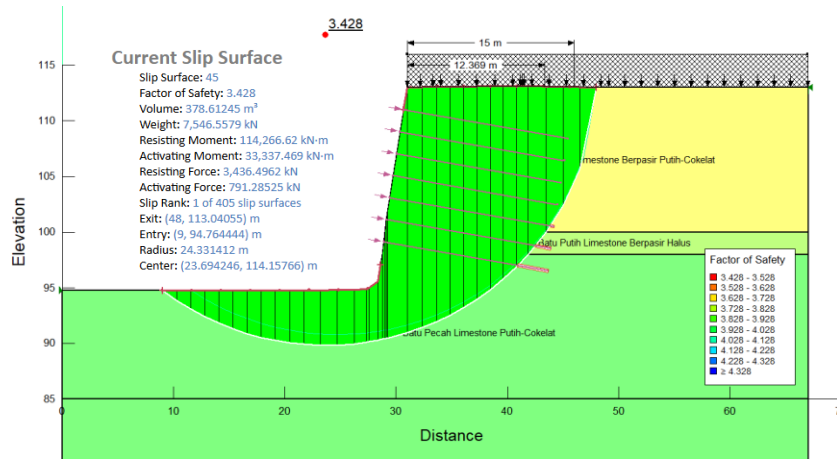
d. Alternatif 4: *Shotcrete* Proteksi Permukaan dan Pengaturan Jarak Aman (*Setback*)

Alternatif ini merupakan opsi jangka pendek yaitu hanya melakukan penyemprotan beton (*shotcrete*) untuk menutup rekahan permukaan guna mencegah masuknya air hujan, tanpa perkuatan struktural internal, yang dikombinasikan dengan kebijakan larangan membangun dalam jarak 15 m dari tepi tebing sesuai hasil analisis jarak aman. Opsi ini hanya layak sebagai solusi jangka pendek (< 1 tahun) karena tidak dapat memberikan ketahanan terhadap beban dinamis gempa atau pergerakan massa batuan yang sudah terdegradasi secara internal.

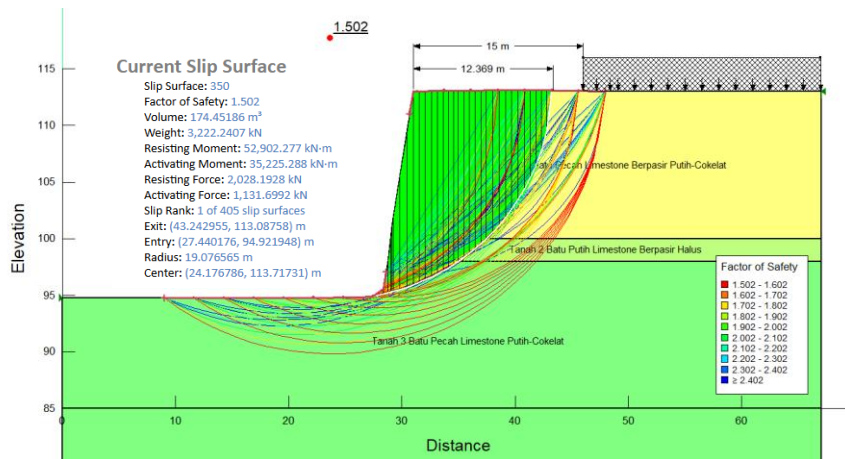
e. Alternatif 5: Pemotongan Tebing (Terasering)

Alternatif ini mengubah geometri tebing dari vertikal menjadi berjenjang (*bench-cut*) dengan kemiringan yang lebih landai ( $60^\circ$ ) untuk mengurangi gaya pendorong kelongsoran tebing. Namun, alternatif ini memiliki kekurangan yaitu menghilangkan karakteristik estetika "belahan tebing" yang menjadi magnet utama pariwisata Tanah Barak. Sehingga, opsi ini secara arsitektural dinilai kurang menguntungkan bagi pengembangan pariwisata di kawasan wisata Tanah Barak.

Dari kelima kombinasi alternatif penanganan yang dikaji, dilakukan pemodelan analisis stabilitas tebing tanpa mengubah geometri asli tebing *limestone* sub-vertikal yang menjadi daya tarik utama wisata. Alternatif 1 dan 4 dipilih sebagai model representatif yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



**Gambar 9.** Pemodelan Penanganan Tebing Tanah Barak dengan Alternatif 1 (*Soil Nailing*)



**Gambar 10.** Pemodelan Penanganan Tebing Tanah Barak dengan Alternatif 4 (*Setback 15 m*)

Simulasi penanganan tebing dengan Alternatif 1 yaitu dengan perkuatan *soil nailing* menunjukkan bahwa terdapat peningkatan nilai FS menjadi 3,428 seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Sedangkan pemodelan Alternatif 4 yang ditunjukkan pada Gambar 10 menawarkan pendekatan mitigasi tata letak dengan cara menjauhkan beban rencana bangunan sejauh 15 meter dari tepi tebing (*setback*). Hasil analisis pada model ini menunjukkan bahwa nilai FS sama dengan kondisi eksisting tanpa beban sebesar 1,502. Model penanganan ini mengindikasikan bahwa pengendalian tata letak beban (*surcharge load*) secara efektif mampu meminimalisir potensi kelongsoran tebing.

Selain perkuatan fisik atau mitigasi struktural, pengelolaan risiko kelongsoran tebing di Tanah Barak harus mencakup strategi non-struktural. Hasil analisis stabilitas menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap air, sehingga diperlukan pembuatan drainase permukaan di atas tebing untuk mencegah infiltrasi ke dalam rekahan batuan. Drainase ini harus dirancang untuk mengalirkan air menjauhi muka tebing dan dibuang melalui saluran tertutup di kaki lereng guna menghindari erosi kaki (*toe erosion*). Selain itu, pemasangan *inclinometer* sebagai sistem peringatan dini terhadap pergerakan lereng dapat digunakan sebagai salah satu upaya mitigasi lanjutan untuk evaluasi stabilitas lereng.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, maka didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi geologi bawah permukaan di Tanah Barak didominasi oleh formasi limestone (batu kapur) dengan derajat pelapukan dan fragmentasi yang bervariasi secara vertikal dan lateral. Hasil pengeboran hingga 30 meter mengidentifikasi adanya zona-zona kritis dengan nilai RQD rendah

(< 10%), terutama pada kedalaman 0-15 meter di area yang mengalami kelongsoran Januari 2025. Zona-zona ini mencerminkan tingginya densitas rekahan batuan yang memfasilitasi akumulasi air pori.

2. Analisis stabilitas tebing dengan metode kesetimbangan batas menunjukkan bahwa kemiringan tebing sub-vertikal memiliki angka keamanan yang sangat mendekati kebutuhan syarat minimum dalam kondisi eksisting tanpa beban (FS 1,502) dan menurun tanpa memenuhi syarat minimum saat kondisi jenuh air (FS 0,800) dan saat kondisi pembebanan di atas tebing (FS 1,381). Hal ini mengonfirmasi bahwa air permukaan merupakan pemicu utama kegagalan lereng di lokasi ini. Penambahan beban konstruksi di tepi tebing tanpa jarak bebas yang cukup juga menunjukkan penurunan stabilitas hingga di bawah batas aman desain.
3. Beberapa alternatif penanganan diberikan berupa dengan perkuatan *soil nailing*, dinding penahan tanah, pemberian jarak aman dan pemotongan tebing. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut terkait kebutuhan biaya, efektivitas tiap alternatif dan kesesuaian dengan rencana penataan kawasan pariwisata Tanah Barak kedepan.
4. Manajemen hidrologi dan kebijakan zonasi beban merupakan faktor kunci dalam mitigasi jangka panjang. Tanpa adanya sistem drainase permukaan yang efektif dan penerapan jarak bebas bangunan (*setback*) minimal 15 meter, alternatif struktur perkuatan fisik apa pun akan menghadapi beban geometri tebing yang berlebihan, yang dapat meningkatkan potensi kelongsoran tebing.

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, beberapa rekomendasi dan saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Prioritas utama perlu diberikan pada pembangunan sistem drainase terpadu di bagian atas tebing untuk mengurangi jalur infiltrasi air hujan ke dalam massa batuan kapur. Langkah ini merupakan tindakan mitigasi dengan kebutuhan biaya paling minimum namun manfaat tertinggi dibandingkan alternatif penanganan lain.
2. Pemerintah daerah perlu menerbitkan regulasi tata ruang khusus untuk kawasan tebing karst di Bali Selatan yang mewajibkan jarak bebas (*setback*) sesuai hasil analisis stabilitas tebing dari tepi lereng untuk segala bentuk konstruksi permanen yang bertujuan untuk menjaga stabilitas massa tebing secara kolektif.
3. Instalasi sistem peringatan dini (*early warning system*) berbasis sensor pergerakan tanah (*inclinometer*) dan pengukur curah hujan otomatis di kawasan Tanah Barak untuk memberikan data *real-time* bagi pengelola kawasan dalam mengambil tindakan darurat operasional pariwisata saat cuaca ekstrem.
4. Peningkatan kapasitas SDM pengelola kawasan melalui pelatihan tanggap bencana geologi dan pengawasan visual rutin terhadap munculnya retakan baru di permukaan atas tebing sebagai indikator awal deformasi massa batuan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Pariwisata Republik Indonesia, “Menikmati Keindahan Pantai Tanah Barak dengan Tebing Estetik.” <https://www.indonesia.travel/id/id/travel-ideas/marine/tanah-barak-hidden-gem-di-bali-yang-wajib-kamu-kunjungi/>
- [2] M. D. W. Ardana and I. N. Aribudiman, “Analisis Karakteristik Batuan Kapur (Limestone dan Chalk) di Kawasan Bukit Pecatu Kabupaten Badung Bali,” *J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 23, no. 1, pp. 1–5, 2019.
- [3] C. F. K. Sari, “Analisis Geoteknik dalam Perencanaan Kestabilan Lereng pada Operasi Penambangan Batu Kapur di PT . SBV – Sumatera Selatan,” *J. Ilm. Teknosains*, vol. VI, no. 1, pp. 1–6, 2020.
- [4] F. A. Natasya, E. N. Lydia, and Irwansyah, “Karakteristik Sifat Fisik dan Mekanis Batuan Kapur dengan Kadar Kalsium Karbonat di Desa Kaloy,” *J. Ilm. Telsinas*, vol. 7, no. 1, pp. 52–64, 2024.
- [5] Detikcom, “Tebing Ikonik Tanah Barak Longsor, Jalan ke Pantai Pandawa Tertutup,” 2025. <https://www.detik.com/bali/berita/d-7720014/tebing-ikonik-tanah-barak-longsor-jalan-ke-pantai->

- pandawa-tertutup
- [6] M. Kázmér, R. Nahar, and K. Gaidzik, "Late Holocene seismic uplift events depicted by coastal karst formations in Bali, Indonesia," *Quat. Int.*, vol. 712, no. March, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1016/j.quaint.2024.10.009.
  - [7] D. R. Sharma, "Slope stability analysis in weak rock formations: Engineering implications and risk mitigation," *Int. J. Geogr. Geol. Environ.*, vol. 7, no. 8, pp. 35–45, 2025.
  - [8] Y. Ulfa, A. A. B. Putra, and I. N. Simpen, "Karakterisasi Batu Kapur Alam Bukit Jimbaran Bali," *J. Kim. (Journal Chem.)*, vol. 13, no. 1, pp. 67–73, 2019.
  - [9] S. Liu, M. Li, and L. Shao, "Jointed Rock Slope Stability Analysis Using Finite-Element Limit-Equilibrium Method," *Int. J. Geomech.*, vol. 25, 2025, doi: 10.1061/IJGNAI.GMENG-11733.
  - [10] I. N. Simpen, I. W. Redana, I. N. Aribudiman, and N. N. Pujianiki, "Searching on Groundwater Using Geoelectric Method as Physics Application Learning Model," *Int. J. Manag. IT Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 276–283, 2019.
  - [11] H. Darjanto, H. Farichah, and R. Lumintang, "Analisis Stabilitas Lereng dan Alternatif Penanganan Kelongsoran Studi Kasus Ruas Jalan Ir. H. Nursyirwan Ismail, Kota Samarinda," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 19, no. 3, pp. 215–219, 2021, doi: 10.12962/j2579-891x.v19i3.8495.
  - [12] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik*. 2017.
  - [13] A. B. Khalkhali and M. K. Koochaksaraei, "Evaluation of Limit Equilibrium and Finite Element Methods in Slope Stability Analysis - Case Study of Zaremroud Landslide, Iran," *Comput. Eng. Phys. Model.*, vol. 2, no. 3, pp. 01–15, 2019.
  - [14] Y. M. Cheng and C. K. Lau, *Slope Stability Analysis and Stabilization*. 2008. doi: 10.4324/9780203927953.
  - [15] J. M. Duncan, S. G. Wright, and T. L. Brandon, *Soil Strength and Slope Stability*. 2014.
  - [16] M. M. Aryasatya *et al.*, *Mitigasi Bencana di Provinsi Bali (Disaster Mitigation in Bali Province)*. Makassar: Arsy Media, 2025.
  - [17] Departemen Pekerjaan Umum, "Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng Pada Tanah Residual dan Batuan," 2005.
  - [18] E. Hoek, *Practical Rock Engineering*. 2007.
  - [19] R. E. Hunt, *Geotechnical Engineering Investigation Handbook*. 2005. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
  - [20] G. Kouretzis, *Fundamentals of Foundation Engineering and Their Applications*. 2018.
  - [21] P. A. Yadav, A. H. Padade, P. P. Dahale, and V. M. Meshram, "Analytical and experimental analysis of retaining wall in static and seismic conditions: A review," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 522–530, 2018.
  - [22] I. Kurniawan and M. Endayanti, "Analisa Perkuatan Dinding Penahan Tanah (Studi Kasus : Area Bendungan Wampu Kecamatan Kuta Buluh Kabupaten Karo)," *J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 11, no. 1, pp. 108–118, 2022.
  - [23] A. F. Muhammad and I. G. B. Indrawan, "Identifikasi Kestabilan Lereng Menggunakan Metode Analisis Kinematika dan Keseimbangan Batas Di Jalan Akses Menuju Wisata Sermo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Yogyakarta," *Forum Tek.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–14, 2025.