JURMATEKS : Jurnal Manajemen Teknologi dan Teknik Sipil
Volume 7 Nomor 2 Tahun 2024 E-ISSN 2621-7686

Tersedia Secara Online di
http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jurmateks/index
https://dx.doi.org/ 10.30737/jurmateks.v7i2.6651

JURMATEKS

Analisis Alternatif Kelongsoran Bendungan Ameroro Pada Batuan Sekis Dengan Metode Elemen Hingga

H. Setiawan[1*], T. R. Satrya[2]

[1,2]*Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*

Email : [1*] herdy.setiawan1515@gmail.com, [2] trendysatrya@its.ac.id

ARTICLE INFO

Article history :
Artikel masuk : 12 - 12 - 2024
Artikel revisi : 20 - 12 -2024
Artikel diterima : 31 - 12 -2024

Keywords :
Finite Element Method, Metamorphic schist, Safety Factor, Slope Failure.

Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:
H. Setiawan dan T. R. Satrya "Analisis Alternatif Kelongsoran Bendungan Ameroro Pada Batuan Sekis Dengan Metode Elemen Hingga" Jurmateks, vol.7, no.2, pp. 160 – 175, 2024, doi: 10.30737/jurmateks.v7i2.6651

ABSTRACT

The geological characteristics of Ameroro Dam, dominated by schist metamorphic rocks, make this highly vulnerable to weathering, leading to reduced material strength and slope stability. This is exacerbated by rain infiltration which increases pore water pressure and earthquake loads which can trigger soil mass movement, causing a decrease in the slope safety factor.This study aims to evaluate the effect of a combination of environmental factors on slope stability using the finite element method. The research utilizes Plaxis 2D software to simulate various slope conditions under different scenarios, including static conditions, rain infiltration, and seismic loads. The results indicate that Under static conditions, the SF was 2.204, which decreased to 1.867 after rain infiltration, highlighting the adverse impact of water infiltration. To address these challenges, different reinforcement strategies were evaluated. The most effective solution was found to be the combination of 20 cm thick shotcrete, retaining wall, and 5-meter anchor, which increased the SF to 1.81, even under rain infiltration conditions. This combination enhances slope stability by providing surface protection, lateral support, and deep anchorage, effectively distributing loads and minimizing deformation risks. The findings can be the basis for developing optimized slope reinforcement strategies for dams with complex geological conditions.

1. Pendahuluan

Bendungan Ameroro merupakan salah satu dari tujuh bendungan strategis di Wilayah Sungai Lasolo-Konaweha yang memiliki peran vital dalam mendukung berbagai sektor di wilayah tersebut. Bendungan ini dirancang untuk memenuhi beragam fungsi penting, seperti penyediaan air baku, irigasi pertanian, pengendalian banjir, serta pembangkit listrik, yang berkontribusi langsung terhadap ketahanan air dan energi. Selain itu, keberadaan bendungan ini

(cc) BY-SA

juga memberikan manfaat tambahan dalam sektor perikanan dan pariwisata, yang berpotensi meningkatkan perekonomian lokal. Dengan perannya yang multifungsi, stabilitas dan keandalan struktur bendungan menjadi faktor krusial dalam menjaga keberlanjutan dan optimalisasi manfaat yang dihasilkan bagi masyarakat dan lingkungan sekitar.

Lokasi pembangunan Bendungan Ameroro menghadapi tantangan geologi yang kompleks, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam proses perencanaan dan konstruksi. Wilayah ini didominasi oleh batuan metamorf sekis dan tanah residual. Batuan metamorf sekis adalah jenis batuan yang terbentuk dari proses metamorfisme dengan tekanan dan suhu tinggi. Batuan ini cenderung memiliki kekuatan sedang hingga rendah serta rentan terhadap pelapukan dan pergerakan akibat infiltrasi air. Sedangkang tanah residual memiliki karakteristik umum berupa kepadatan rendah, porositas tinggi, serta rentan terhadap erosi dan perubahan volume akibat siklus basah-kering. Kondisi geologi tersebut dapat menyebabkan perubahan sifat mekanik material, yang berpotensi mengurangi stabilitas lereng dan struktur bendungan [1], [2]. Selain itu, tantangan stabilitas diperparah oleh adanya retakan di puncak bendungan yang disebabkan oleh infiltrasi air hujan serta aktivitas seismik, mengingat wilayah ini berada di zona dengan potensi aktivitas tektonik yang tinggi. Fenomena ini menunjukkan adanya risiko kegagalan struktural yang membutuhkan analisis mendalam dan pendekatan mitigasi yang tepat.

Penelitian menunjukkan bahwa siklus basah-kering dapat menurunkan kekuatan batuan hingga 34% setelah 15 siklus per tahun [1]. Selain itu, pelapukan intensif yang dihasilkan oleh infiltrasi hujan pada lapisan tanah residual berdampak langsung pada stabilitas lereng, sebagaimana diungkapkan oleh Miscevic & Vlastelica yang menyatakan bahwa siklus basah-kering pada permukaan lereng mempercepat pelepasan butiran dan pelapukan [2]. Retakan sepanjang puncak lereng, seperti yang ditemukan di Bendungan Ameroro, menunjukkan adanya tegangan tarik yang melebihi kekuatan tarik batuan, yang berpotensi menjadi jalur infiltrasi air tambahan dan mempercepat kelongsoran [3].

Pentingnya analisis gabungan antara infiltrasi hujan dan gempa juga ditegaskan oleh [4], yang menunjukkan bahwa bahkan dalam level air waduk yang konstan, infiltrasi hujan dapat menyebabkan kejenuhan progresif di lereng hilir. Simulasi yang dilakukan membantu memahami bagaimana tekanan air pori yang meningkat karena infiltrasi dapat memicu mekanisme likuifaksi atau pelemahan lapisan tanah. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa kondisi jenuh yang dipengaruhi oleh infiltrasi hujan dan guncangan gempa dapat menyebabkan penurunan signifikan pada faktor keamanan (*Safety Factor*/SF), yang memerlukan intervensi

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

mitigasi, seperti pemasangan sistem drainase, penggunaan wiremesh dan shotcrete untuk melindungi lereng, serta pemasangan borepile sebagai struktur penahan. Meskipun banyak penelitian telah dilakukan mengenai stabilitas bendungan pada kondisi geologi kompleks masih terbatas kajian komprehensif yang mengintegrasikan pengaruh siklus basah-kering, infiltrasi air hujan, dan aktivitas seismik secara bersamaan terhadap stabilitas struktur bendungan, khususnya dengan kondisi geoteknik pada Bendungan Ameroro

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi faktor lingkungan tersebut terhadap stabilitas lereng dengan menggunakan metode elemen hingga. Studi ini akan menganalisis dampak infiltrasi hujan dan beban gempa potensi penurunan *Safety Factor* (SF) lereng. Melalui penelitian ini akan ditemukan strategi mitigasi yang efektif yang dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan metode perkuatan lereng berbasis pemodelan numerik dan dapat dijadikan acuan dalam desain teknis perkuatan lereng pada bendungan dengan kondisi geologi kompleks.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method*/FEM) untuk menganalisis stabilitas lereng Bendungan Ameroro. Metode ini memungkinkan pemodelan interaksi antara material geoteknik dan perubahan lingkungan sehingga dapat memberikan gambaran yang akurat mengenai distribusi tegangan, deformasi, dan potensi kelongsoran. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak geoteknik Plaxis 2D untuk mensimulasikan kondisi serta respon lereng terhadap gaya lateral yang bekerja pada struktur bendungan. Analisis stabilitas lereng pada Bendungan Ameroro dilakukan dengan mengacu pada kriteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown [5],

Sumber: Dokumentasi Penulis (2024).

Gambar 1. Tanda Pergerakan Tanah berupa *Debris Slide* pada Tebing Tumpuan Kiri

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

2.1 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan sekunder yang diperoleh melalui penyelidikan lapangan, meliputi layout lokasi bendungan, lokasi titik kelongsoran, gambar potongan memanjang dan melintang lereng yang mengalami kelongsoran, serta hasil pengujian tanah dasar di lapangan setelah kejadian longsor. Untuk mendukung analisis yang lebih mendalam, sampel batuan metamorf sekis dan tanah residual akan diambil untuk dianalisis di laboratorium guna menentukan parameter geoteknik. Selain itu, data spesifikasi bahan material yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng dikumpulkan untuk memastikan kesesuaian dengan kondisi eksisting.

1) Data Pengukuran Topografi meliputi pemetaan kontur wilayah bendungan untuk menentukan elevasi dan kemiringan lereng guna memahami geometri area studi. Data ini penting dalam pemodelan lereng untuk mendapatkan representasi yang akurat [6].
2) Data Borlog (SPT Test) Diperoleh melalui pengujian lapangan dengan Standard Penetration Test (SPT) untuk mengetahui kepadatan tanah, daya dukung tanah, serta kedalaman lapisan tanah yang berbeda di lokasi bendungan [7], [8], [9].
3) Uji Laboratorium melibatkan analisis sifat fisik dan mekanik tanah serta batuan meliputi uji kuat geser langsung (*direct shear test*), uji permeabilitas, uji batas Atterberg, dan analisis gradasi tanah, yang bertujuan untuk menentukan parameter geoteknik yang digunakan dalam perhitungan stabilitas lereng [10], [11].
4) Data Curah Hujan Maksimum Wilayah Sulawesi Tenggara dikumpulkan dari badan meteorologi setempat, digunakan untuk menganalisis pola infiltrasi air ke dalam lereng dan dampaknya terhadap kestabilan bendungan [12].
5) Data Gempa meliputi data percepatan puncak tanah (*Peak Ground Acceleration*/PGA), magnitude, dan durasi gempa, yang digunakan untuk memodelkan pengaruh beban dinamis terhadap stabilitas lereng [13].

2.2 Pemodelan

Pemodelan dilakukan secara bertahap, dimulai dengan penentuan zona analisis dan penyusunan tabel parameter geoteknik, yang mencakup sifat fisik dan mekanik tanah serta batuan. Setelah tahap ini selesai, dilakukan pemodelan kondisi eksisting lereng yang bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas struktur dengan dan tanpa faktor gempa. Hasil dari analisis pemodelan harus menunjukkan nilai faktor keamanan (*Safety Factor*/SF) ≥ 1.5, yang dijadikan acuan stabilitas lereng berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Apabila hasil pemodelan menunjukkan SF ≤ 1.5, maka diperlukan evaluasi ulang terhadap parameter input dan

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

konfigurasi geometri model untuk mencapai tingkat keamanan yang disyaratkan. Namun, jika nilai SF berada dalam kisaran 1.3 hingga 2, lereng masih dapat dianggap stabil dengan tingkat keamanan yang perlu terus dipantau dan diperkuat jika diperlukan [14]–[18]. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai kondisi beban, termasuk beban statis dan dinamis akibat gempa, guna memahami respons lereng terhadap berbagai skenario lingkungan yang mungkin terjadi. Hasil pemodelan numerik ini akan divalidasi menggunakan data lapangan dan pengujian laboratorium untuk memastikan akurasi hasil serta mengidentifikasi potensi area yang memerlukan perbaikan.

2.3 Alternatif Perkuatan Lereng Bendungan

Pemodelan numerik untuk stabilitas pada perbaikan lereng dengan *shotcrete*, *retaining wall,* dan *anchor* [19], [20] sebagai tujuan mencari alternative perbaikan terhadap permasalahan yang terjadi serta nantinya akan dilakukan analisis dengan menginpretasikan nilai parameter gempa untuk dilakukan analisis stabilitas bendungan dalam beberapa tahap yaitu klasifikasi kelas beban bendungan, kelas risiko bendungan, kriteria beban bendungan dan koefisien gempa terkoreksi bendungan. Analisa hasil ini dilakukan dengan cara membuat grafik hubungan infiltrasi hujan dengan nilai factor keamanan (SF). Berdasarkan analisis pada tahap sebelumnya, apabila SF ≤ 1.5, maka dilakukan pengecekan ulang dengan menambahkan perkuatan lereng bendungan [21]. Penentuan alternatif perkuatan lereng dapat ditentukan berdasarkan hasil analisa pergerakan bidang gelincir longsor [22]–[25]. Adapun usulan perkuatan lereng berdasarkan bidang gelincirnya dengan memberikan factor gempa, yaitu:

1. Perkuatan lereng berdasarkan hasil analisa bidang gelincir termasuk longsor permukaan.
2. Apabila hasil analisa setelah ditambahkan perkuatan lereng, nilai faktor keamanan SF ≤ 1.5, maka dapat dilakukan analisa dengan simulasi penambahan nilai kemiringan lereng.

2.4 Analisis dan Hasil Pembahasan

Analisis hasil ini dilakukan dengan cara melakukan pemetaan data dari peneliti terdahulu serta data sekunder sebagai dasar atau gambaran dari pemodelan lereng bendungan yang aman melalui faktor curah hujan tinggi yang telah dilakukan perbaikan atau pemasangan *shotcrete*, *retaining wall*, dan *anchor* dengan meningkatkan nilai *shear strength.* Hasil dari model numerik akan divalidasi dengan data lapangan dan hasil analisis laboratorium

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Kondisi Eksisting Bendungan Ameroro

a) Karakteristik Batuan

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

Pada lokasi peluncur (STA 0+200), nilai GSI berkisar antara 21 hingga 40, yang termasuk dalam kategori Poor (IV). Nilai GSI = 27 pada batuan sekis mengindikasikan kualitas *poor* (buruk) akibat pelapukan signifikan yang mengurangi integritas dan kekuatan massa batuan Massa batuan ini terdiri atas satuan filit muskovit kuarsa dengan kualitas yang tergolong buruk hingga sedang, serta tingkat pelapukan yang moderat (*moderately weathered*). Struktur batuan ini menunjukkan adanya foliasi (*slaty-schistose*) dengan tekstur lepidoblastik, yang disertai kondisi diskontinuitas yang bervariasi dari buruk hingga sedang. Pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS) dilakukan langsung di lapangan menggunakan alat *Schmidt Hammer*, dengan hasil kuat tekan batuan berkisar antara 100 hingga 300 kgf/cm². Batuan ini diklasifikasikan dalam kelas CH-CL. Kondisi ini ditandai oleh banyaknya rekahan, disintegrasi mineral, dan ikatan antar blok yang sangat lemah, membuat batuan lebih rentan terhadap deformasi atau keruntuhan. Oleh karena itu, batuan sekis dengan GSI rendah membutuhkan dukungan tambahan seperti shotcrete, rock bolts, atau penyangga mekanik untuk menjaga stabilitas.

b) Stabilitas Lereng Eksisting

Pemodelan lereng eksisting dilakukan berdasarkan karakterisasi geologi teknik, analisis kualitas massa batuan, dan pengujian laboratorium. Parameter geoteknik yang digunakan dalam analisis ini meliputi sifat fisik dan mekanik batuan sekis yang diperoleh melalui pendekatan Hoek-Brown. Drainase lereng dirancang bersifat non-porous, dengan parameter utama pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter Input Plaxis Batuan Sekis yang ada di STA 0+200 Bendungan Ameroro

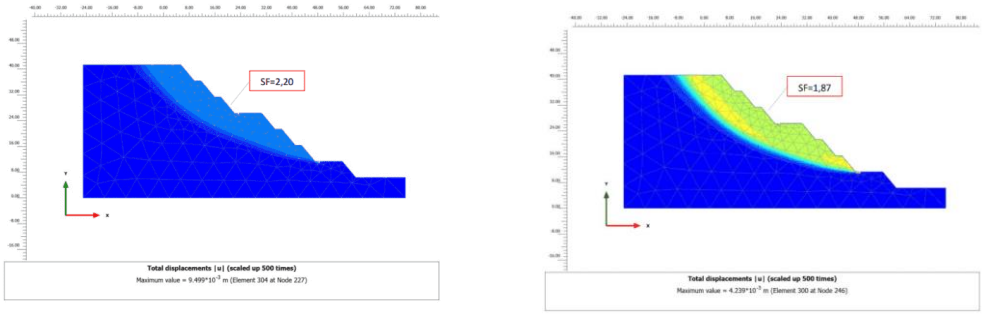
Identification	Sekis
Material Model	Hoek-Brown
Drainage Type	Non-Porous
γunsat (kN/m3)	20
UCS	50000
RM	400
Erm (kN/m2)	20000000
v' (nu)	0,35
|σci| (kN/m2)	51876.42079
RMR	32
mi	15
GSI	27
D	1

Sumber : Hasil Analisis (2024).

Pemodelan kondisi eksisting pelimpah Bendungan Ameroro menggunakan Plaxis 2D menunjukkan nilai *Safety Factor* (SF) sebesar 2,204 untuk massa batuan sekis tanpa beban eksternal pada **Gambar 2.** Hal ini menandakan bahwa massa batuan memiliki stabilitas yang

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

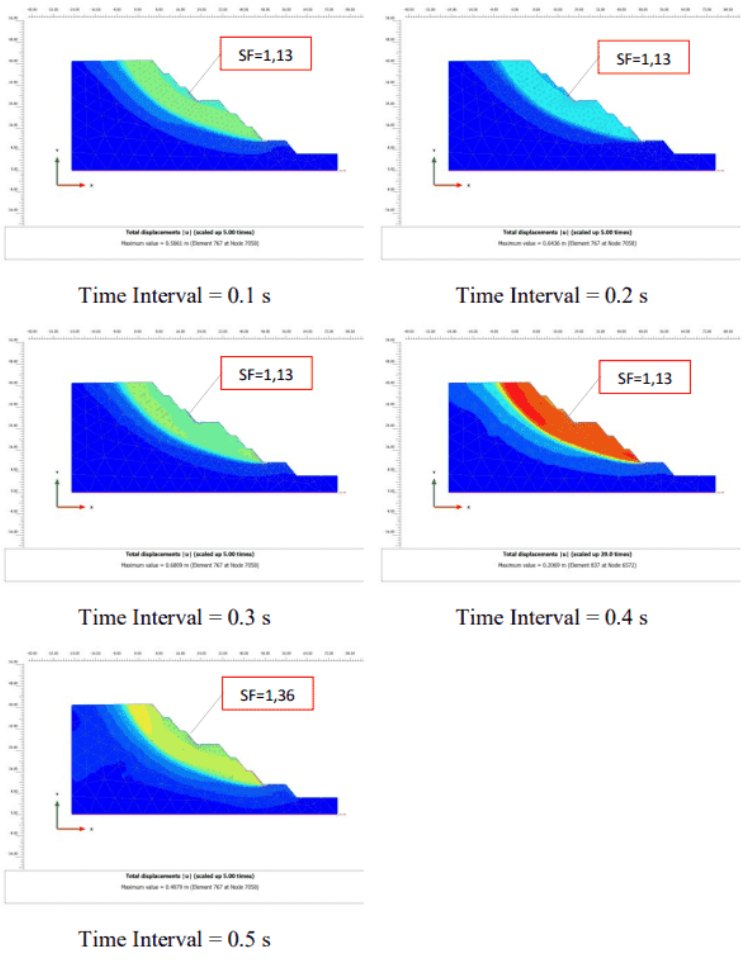
baik, dengan kemampuan menahan beban gravitasi dua kali lipat dari batas kegagalan. Karakteristik batuan sekis yang belum terpelapuk menunjukkan struktur mineral yang masih kuat, dengan nilai mi (konstanta material) mendekati 15 dan GSI lebih dari 50, mengindikasikan material yang utuh. Namun, orientasi lapisan batuan dapat menjadi titik kelemahan saat menghadapi beban tambahan atau pelapukan. Stabilitas yang tinggi ini dapat menurun bila terjadi degradasi atau beban eksternal signifikan.



(a)

Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 2. Stabilitas Lereng Kondisi Eksisting (a) Tanpa Infiltrasi; (b) Infiltrasi Hujan



Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 3. Kondisi Eksisting dengan Faktor Gempa.

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

Gambar di atas menunjukkan analisis stabilitas lereng Bendungan Ameroro dalam kondisi eksisting tanpa infiltrasi hujan, dengan infiltrasi hujan, dan di bawah pengaruh faktor gempa. Pada Gambar 2, analisis kondisi eksisting tanpa infiltrasi hujan menunjukkan nilai *Safety Factor* (SF) = 2.20, yang menunjukkan kondisi stabil, sedangkan infiltrasi hujan menyebabkan penurunan nilai SF menjadi 1.87, mengindikasikan bahwa air hujan berdampak negatif terhadap stabilitas lereng dengan meningkatkan tekanan air pori dan menurunkan kekuatan geser batuan sekis

Gambar 3 memperlihatkan pengaruh faktor gempa terhadap stabilitas lereng pada berbagai interval waktu, di mana nilai SF turun hingga 1.13 pada interval 0.1 hingga 0.4 detik, yang menunjukkan kondisi mendekati batas kritis, sebelum meningkat menjadi 1.36 pada interval 0.5 detik. Penurunan nilai SF ini menunjukkan bahwa infiltrasi hujan dan beban seismik berkontribusi signifikan terhadap ketidakstabilan lereng, sehingga diperlukan langkah-langkah mitigasi seperti sistem drainase yang lebih efektif dan perkuatan lereng untuk meningkatkan stabilitas struktur dalam kondisi ekstrem.

3.2 Analisis Stabilitas Perkuatan Lereng

Analisis stabilitas perkuatan lereng dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai metode perkuatan dalam meningkatkan keamanan struktur lereng Bendungan Ameroro. **Tabel 2** menyajikan karakteristik teknis dari empat metode perkuatan utama, yaitu Dinding Penahan Tanah, Shotcrete 15 cm, Anchor, dan Grout Body, dengan masing-masing parameter geoteknik yang digunakan dalam pemodelan.

Tabel 2. Karakteristik Perkuatan

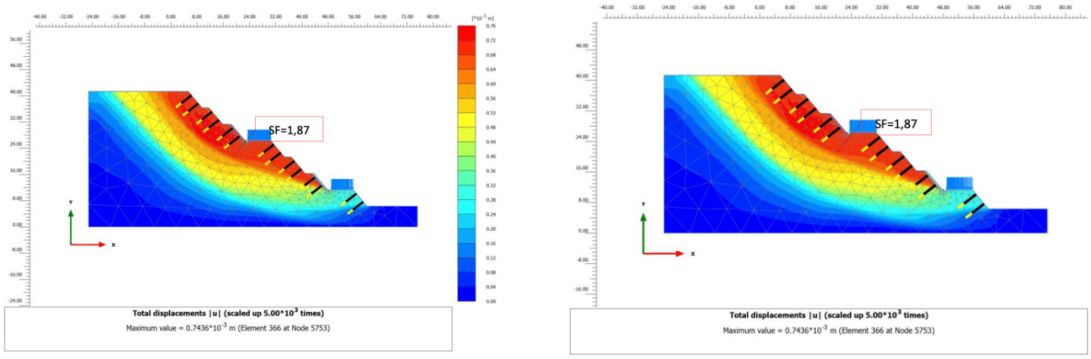
Identification	Dinding Penahan Tanah	Shotcrete 15 cm	Anchor	Grout Body
Material Model	Linear Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
fc' (Mpa)	30	30	30	30
E (kN/m2)	25742960.2	25742960.2	25742960.2	25742960.2
A (m2)	-	00.15	0.049087385	0.031415927
EA (kN/m)	-	3861444.03	1.263.654.604	8.087.389.465
EI (kN/m2 m)	-	7.240.207.557	1	-
d (m)	-	00.15	-	-
I (m4)	-	0.00028125	-	-
Drainage Type	Non-Porous	-	-	-
gunsat (kN/m3)	24	-	-	-
v' (nu)	0,2	-	-	-

Sumber : Hasil Analisis (2024)

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

a) Perkuatan Anchor dan Retaining Wall

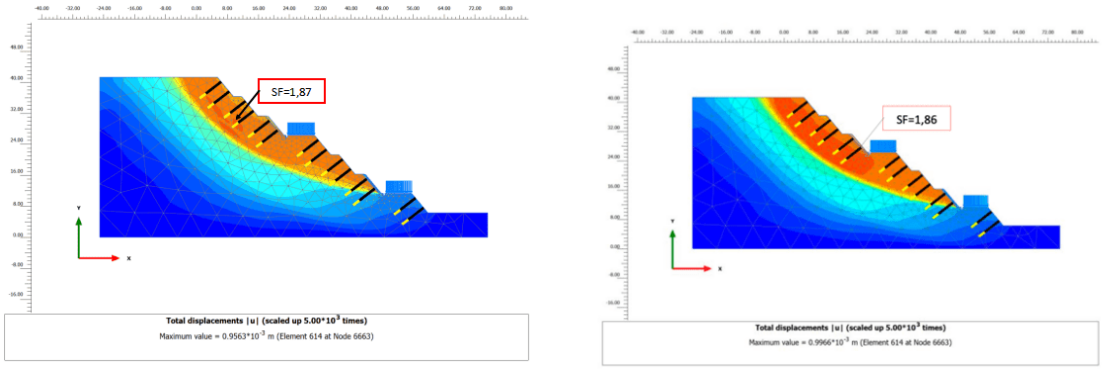
Gambar 4 dan **5** menunjukkan hasil analisis stabilitas lereng Bendungan Ameroro dengan penerapan perkuatan menggunakan *anchor* dan *retaining wall*, yang dianalisis dalam dua kondisi, yaitu tanpa infiltrasi hujan dan dengan infiltrasi hujan.



Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 4. Kondisi Perkuatan dengan Anchor 3 m dan Retaining Wall (a) tanpa factor Infiltrasi Hujan (b) dengan Faktor Infiltrasi Hujan.

Gambar 4 menggambarkan kondisi perkuatan lereng dengan anchor sepanjang 3 meter dan *retaining wall*. Pada kondisi tanpa infiltrasi hujan, nilai *Safety Factor* (SF) = 1.87, yang menunjukkan bahwa lereng masih dalam kondisi stabil. Namun, ketika faktor infiltrasi hujan diperhitungkan, nilai SF tetap pada 1.87, menunjukkan bahwa perkuatan dengan anchor 3 meter cukup efektif dalam menjaga kestabilan lereng meskipun terdapat infiltrasi air hujan.



Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 5. Kondisi Perkuatan dengan Anchor 5 m dan Retaining Wall (a) tanpa factor Infiltrasi Hujan (b) dengan Faktor Infiltrasi Hujan.

Gambar 5 menunjukkan kondisi perkuatan dengan anchor sepanjang 5 meter dan retaining wall. Pada kondisi tanpa infiltrasi hujan, nilai SF = 1.87, sedangkan dengan infiltrasi hujan nilai SF sedikit turun menjadi 1.86, yang menunjukkan adanya dampak infiltrasi terhadap stabilitas lereng. Meskipun demikian, nilai SF masih berada dalam batas aman, yang menandakan bahwa perkuatan dengan anchor 5 meter memberikan kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan anchor 3 meter, terutama dalam kondisi cuaca ekstrem.

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

Tabel 3. Perbandingan *Safety Factor* Perkuatan Anchor dan Retaining Wall

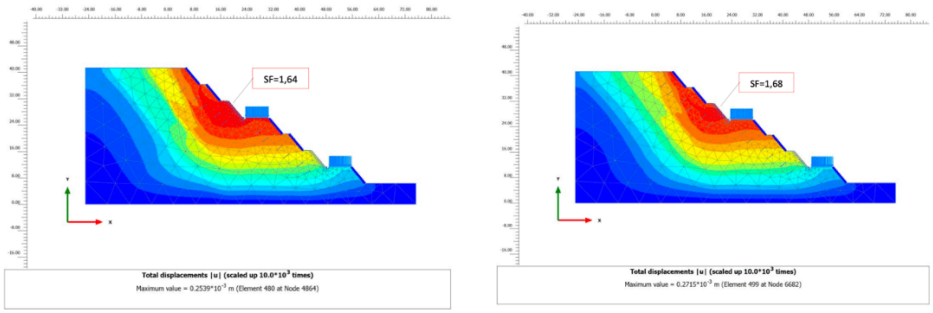
No.	Analisis	Statis	Infiltrasi Hujan	Time Interval (s)				
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	Perkuatan Anchor (3 m) dan Retaining Wall	1.87	1.87	1.37	1.40	1.47	1.64	1.74
2	Perkuatan Anchor (5 m) dan Retaining Wall	1.87	1.86	1.57	1.61	1.61	1.75	1.76

Sumber: Hasil Analisis (2024).

Tabel 3 menunjukkan hasil analisis stabilitas lereng dengan perkuatan Anchor 3 meter dan 5 meter yang dikombinasikan dengan Retaining Wall. Pada perkuatan dengan Anchor 3 meter, nilai Safety Factor (SF) dalam kondisi statis adalah 1.87, yang tetap stabil meskipun terjadi infiltrasi hujan. Namun, saat terpapar gempa, SF awalnya turun menjadi 1.37 pada 0.1 detik dan meningkat hingga 1.74 pada 0.5 detik, menunjukkan pemulihan stabilitas secara bertahap. Sementara itu, perkuatan dengan Anchor 5 meter juga memiliki SF statis 1.87, tetapi sedikit menurun menjadi 1.86 akibat infiltrasi hujan. Saat gempa terjadi, SF awalnya turun ke 1.57, namun meningkat hingga 1.76 pada 0.5 detik, yang menunjukkan bahwa anchor yang lebih panjang memberikan stabilitas yang lebih baik dibandingkan anchor 3 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan anchor 5 meter lebih efektif dalam menghadapi infiltrasi hujan dan gempa dibandingkan anchor 3 meter, dengan perbaikan yang lebih signifikan dalam nilai SF pada interval waktu gempa yang lebih panjang.

b) Perkuatan Shortcrete dan Retaining Wall

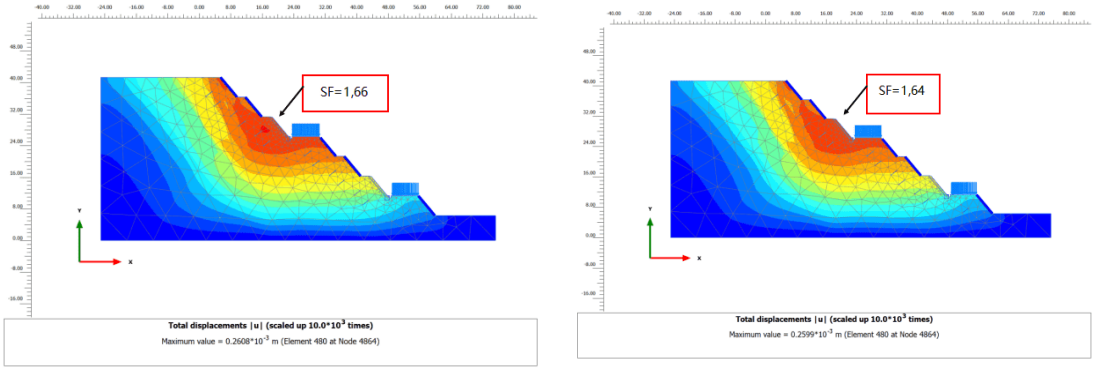
Dengan mengkombinasikan *shotcrete* dan *retaining wall*, stabilitas lereng dapat ditingkatkan secara signifikan dalam menghadapi kondisi statis maupun pengaruh infiltrasi hujan. Analisis pada perkuatan dengan *shotcrete* tebal 15 cm menunjukkan bahwa dalam kondisi tanpa infiltrasi hujan, nilai *Safety Factor* (SF) mencapai 1.68, sementara dengan infiltrasi hujan, SF mengalami sedikit penurunan menjadi 1.64, menunjukkan bahwa sistem perkuatan ini mampu mengurangi dampak infiltrasi air terhadap stabilitas lereng.



Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 6. Kondisi Perkuatan dengan Shotcrete Tebal 15 cm dan Retaining Wall (a) tanpa Faktor Infiltrasi Hujan (b) dengan Faktor Infiltrasi Hujan

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA



Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 7. Kondisi Perkuatan dengan Shotcrete Tebal 20 cm dan Retaining Wall (a) tanpa Faktor Infiltrasi Hujan (b) dengan factor Infiltrasi Hujan.

Pada perkuatan dengan shotcrete tebal 20 cm, nilai SF dalam kondisi tanpa infiltrasi hujan adalah 1.66, yang menurun menjadi 1.64 ketika infiltrasi hujan terjadi. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun penambahan ketebalan shotcrete meningkatkan kekakuan lereng, dampak infiltrasi air tetap menjadi faktor yang perlu diperhatikan dalam desain stabilitas lereng.

Tabel 4. Perbandingan *Safety Factor* Perkuatan Shotcrete dan Retaining Wall

No.	Analisis	Statis	Infiltrasi Hujan	Time Interval (s)				
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	Perkuatan Shotcrete (15 cm) dan Retaining Wall	1.68	1.64	1.40	1.42	1.40	1.43	1.40
2	Perkuatan Shotcrete (20 cm) dan Retaining Wall	1.66	1.64	1.52	1.55	1.57	1.59	1.64

Sumber: Hasil Analisis (2024).

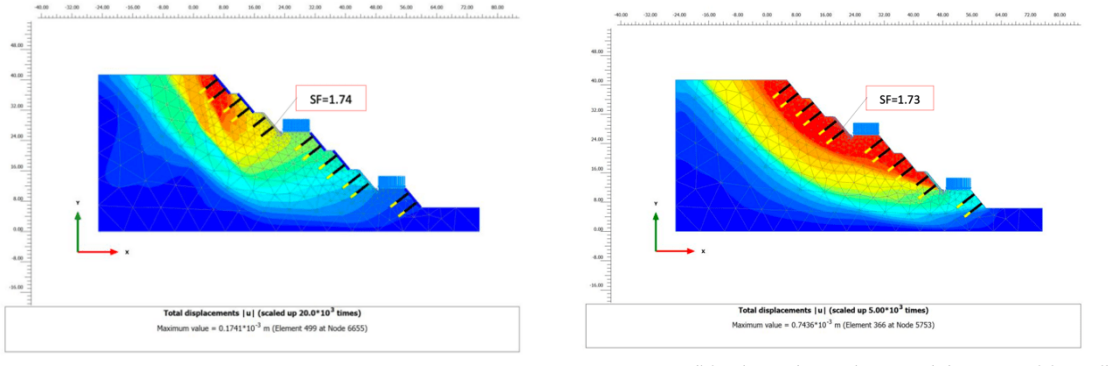
Tabel 4 menunjukkan hasil analisis stabilitas lereng dengan perkuatan *shotcrete* 15 cm dan 20 cm yang dikombinasikan dengan retaining wall dalam kondisi statis, infiltrasi hujan, dan beban gempa pada berbagai interval waktu. Pada perkuatan shotcrete 15 cm, nilai *Safety Factor* (SF) dalam kondisi statis adalah 1.68, yang turun menjadi 1.64 akibat infiltrasi hujan. Selama beban gempa, SF mengalami fluktuasi di kisaran 1.40–1.43, menunjukkan pemulihan yang relatif lambat.

Sebaliknya, perkuatan dengan shotcrete 20 cm menunjukkan nilai SF yang lebih stabil, dengan kondisi statis sebesar 1.66 dan sedikit penurunan menjadi 1.64 akibat infiltrasi hujan. Saat gempa terjadi, SF mengalami peningkatan progresif dari 1.52 hingga 1.64, menunjukkan efektivitas yang lebih baik dalam menahan beban dinamis dibandingkan shotcrete 15 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan shotcrete meningkatkan stabilitas lereng, terutama terhadap kombinasi infiltrasi hujan dan beban gempa, sehingga dapat menjadi pilihan yang lebih efektif untuk memperkuat lereng dalam kondisi ekstrem.

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

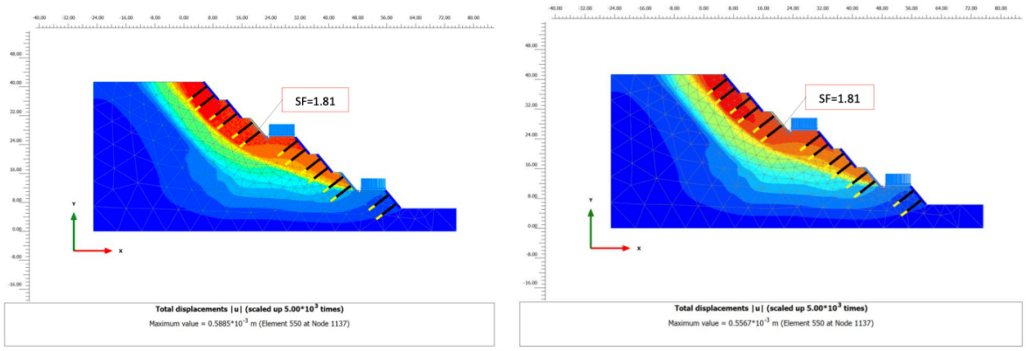
c) Perkuatan Shotcrete, Retaining Wall dan Anchor

Mengkombinasikan tiga metode perkuatan, yaitu *shotcrete*, *retaining wall*, dan *anchor*, terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng Bendungan Ameroro terhadap berbagai kondisi, termasuk infiltrasi hujan dan beban dinamis. Kombinasi ini bekerja secara sinergis, di mana shotcrete berfungsi sebagai lapisan pelindung permukaan lereng untuk mencegah erosi dan memperkuat ikatan antar material, retaining wall berperan dalam menahan gaya lateral akibat tekanan tanah, sedangkan anchor memberikan kekuatan tambahan dengan menahan gaya tarik dan mencegah pergerakan massa tanah.



Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 8. Kondisi Perkuatan Shortcrete (20 cm), Retaining Wall dan Anchor (m) (a) tanpa Faktor Infiltrasi Hujan (b) dengan factor Infiltrasi Hujan.



Sumber: Hasil Analisis (2024).

Gambar 9. Kondisi Perkuatan Shortcrete (20 cm), Retaining Wall dan Anchor (5m) (a) tanpa Faktor Infiltrasi Hujan (b) dengan Faktor Infiltrasi Hujan.

Berdasarkan hasil analisis yang ditampilkan dalam **Gambar 8** dan **Gambar 9**, kombinasi perkuatan dengan shotcrete tebal 20 cm, *retaining wall*, dan *anchor* menunjukkan perbedaan kinerja antara panjang anchor yang digunakan. Pada perkuatan dengan anchor yang lebih pendek, nilai *Safety Factor* (SF) adalah 1.74 dalam kondisi tanpa infiltrasi hujan dan sedikit menurun menjadi 1.73 dengan adanya infiltrasi. Sementara itu, pada kombinasi dengan anchor sepanjang 5 meter, nilai SF lebih tinggi, yaitu 1.81, baik dalam kondisi tanpa maupun

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

dengan infiltrasi hujan, menunjukkan efektivitas anchor yang lebih panjang dalam meningkatkan stabilitas lereng.

Tabel 5. Perbandingan *Safety Factor* Perkuatan Shotcrete, Retaining Wall dan Anchor

No.	Analisis	Statis	Infiltrasi Hujan	Time Interval (s)				
				0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	Perkuatan Shortcrete (20 cm), Retaining Wall dan Anchor (3m)	1.74	1.73	1.35	1.37	1.49	1.48	1.59
2	Perkuatan Shortcrete (20 cm), Retaining Wall dan Anchor (5m)	1.81	1.81	1.49	1.50	1.49	1.49	1.63

Sumber: Hasil Analisis (2024).

Tabel 5 menunjukkan analisis stabilitas lereng dengan perkuatan shotcrete (20 cm), retaining wall, dan anchor pada dua skenario panjang anchor, yaitu 3 meter dan 5 meter, dalam kondisi statis, infiltrasi hujan, dan beban gempa. Perkuatan dengan anchor 3 meter memiliki *Safety Factor* (SF) sebesar 1.74 dalam kondisi statis, sedikit menurun menjadi 1.73 akibat infiltrasi hujan. Saat gempa terjadi, SF turun ke 1.35 pada 0.1 detik, kemudian meningkat bertahap hingga 1.59 pada 0.5 detik, menunjukkan kestabilan yang relatif terbatas.

Sebaliknya, perkuatan dengan anchor 5 meter menunjukkan stabilitas lebih baik, dengan SF tetap di 1.81 pada kondisi statis dan infiltrasi hujan. Saat gempa, SF turun ke 1.49 namun tetap stabil dan meningkat hingga 1.63, menandakan efektivitas perkuatan dalam menghadapi beban dinamis. Dari hasil ini, perkuatan dengan anchor 5 meter direkomendasikan karena memberikan kestabilan lebih tinggi dan lebih tahan terhadap beban gempa dibandingkan anchor 3 meter.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa infiltrasi hujan dan beban gempa berdampak signifikan terhadap stabilitas lereng Bendungan Ameroro, dengan menyebabkan penurunan faktor keamanan (*Safety Factor*/SF) dari kondisi statis sebesar 2,204 menjadi 1,867 akibat infiltrasi hujan, menunjukkan bahwa tekanan air pori berperan dalam pelemahan massa batuan sekis dan tanah residual. Pemodelan menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak Plaxis 2D telah mengevaluasi pengaruh peningkatan tekanan air pori dan pelemahan material lereng. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan dengan kombinasi *shotcrete*, *retaining wall*, dan *anchor* 5 meter adalah yang paling efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng dibandingkan skema perkuatan lainnya. Kombinasi ini bekerja secara sinergis, di mana shotcrete melindungi permukaan dari erosi dan pelapukan, retaining wall menahan gaya lateral tanah, dan anchor 5 meter memperkuat kestabilan pada lapisan yang lebih dalam. Temuan ini dapat membantu dalam pengambilan keputusan strategis**,** baik dalam

https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6651
(cc) BY-SA

tahap desain maupun operasi bendungan, guna meminimalkan risiko kelongsoran dan memastikan keberlanjutan operasional bendungan.

Daftar Pustaka

[1] H. Zheng, H., Chen, L., & Li, "Influence of Cyclic Wetting-Drying on Mechanical Properties of Sandstone," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 51, no. 4, pp. 1187–1203, 2018, doi: 10.1007/s00603-018-1413-4.

[2] G. Miscevic, P., & Vlastelica, "The Effects of Weathering on Strength and Durability of Rocks in Open Pit Mines in Croatia," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 73, no. 3, pp. 581–589, 2014, doi: 10.1007/s10064-013-0544-4.

[3] R. Baker, "Isolation and Biocontrol Potential of Trichoderma hamatum from Soil Naturally Suppressive to Rhizoctonia solani," *Phytopathology*, vol. 71, no. 3. p. 286, 1981. doi: 10.1094/phyto-71-286.

[4] Y. Su, Y. Wen, P. Gao, X. Mu, M. Li, and H. Wang, "Experimental study on landslides in terraced fields in the Chinese loessial region under extreme rainfall," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/w13030270.

[5] D. Pratiwi, Y. A. Yakin, and A. Mahaputra, "Analisis Stabilitas Lereng Batuan dengan Pendekatan Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown dan Mohr Coulomb Menggunakan Metode Numerik Plaxis 2D," *Publ. Ris. Orientasi Tek. Sipil*, vol. 4, no. 2, pp. 74–81, 2022, doi: 10.26740/proteksi.v4n2.p74-81.

[6] C. Vanneschi, M. Eyre, M. Francioni, and J. Coggan, "The Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring and Characterization of Slope Instability," *Procedia Eng.*, vol. 191, pp. 150–157, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.166.

[7] M. R. Shaik, H. Atyam, S. Dharavath, and C. Nageshwar Rao, "Comparative Study of Various Machine Learning Models for Estimating Standard Penetration Test-N Value," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2024, pp. 371–383. doi: 10.1007/978-981-97-0072-1_33.

[8] A. B. Göktepe, S. Altun, and A. Sezer, "Evaluation and use of clustering algorithms for standard penetration test data classification," *Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf. AIEDAM*, vol. 29, no. 1, pp. 55–64, 2014, doi: 10.1017/S089006041400033X.

[9] X. Li, Y. Li, D. Lv, S. He, and W. Zhang, "Influence of Drilling Methods on the Results of Standard Penetration Test in Loess–Paleosol Sequence," *Front. Built Environ.*, vol. 8, 2022, doi: 10.3389/fbuil.2022.846815.

(cc) BY-SA

[10] O. V Solodiankin, O. S. Kovrov, and N. N. Ruban, "Investigation of physical and mechanical properties of subsiding soils at the Yevpatoriyskaya ravine located in the city of Dnepropetrovsk," *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 1, pp. 15–20, 2015, [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84937942835&partnerID=40&md5=a3ddbf071cea4eb0560fd4010c337a83

[11] Y. Wang, S. Zhang, Y. Ren, Z. Qi, and Q. Yang, "Characterization of engineering properties of deep-water soils in the South China Sea," *Eng. Geol.*, vol. 320, 2023, doi: 10.1016/j.enggeo.2023.107138.

[12] Y.-S. Yang, H.-F. Yeh, C.-C. Ke, L.-W. Wei, and N.-C. Chen, "The Evaluation of Rainfall Warning Thresholds for Shallow Slope Stability Based on the Local Safety Factor Theory," *Geosci.*, vol. 14, no. 10, 2024, doi: 10.3390/geosciences14100274.

[13] Y. Bao, Y. Huang, and C. Zhu, "Effects of near-fault ground motions on dynamic response of slopes based on shaking table model tests," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 149, 2021, doi: 10.1016/j.soildyn.2021.106869.

[14] F. Tschuchnigg, H. F. Schweiger, and M. Sallinger, "Effect of failure criterion on slope stability analysis," in *Numerical methods in geotechnical engineering IX*, 2018, pp. 1055–1062. [Online]. Available: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85061307598&partnerID=40&md5=d0f25159f43ea7c6734bc2196cc802d2

[15] M. Nobahar, M. S. Khan, and J. Ivoke, "Combined Effect of Rainfall and Shear Strength on the Stability of Highway Embankments Made of Yazoo Clay in Mississippi," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 2787–2802, 2020, doi: 10.1007/s10706-020-01187-8.

[16] M. I. Khan and S. Wang, "Slope Stability Analysis to Correlate Shear Strength With Slope Angle and Shear Stress by Considering Saturated and Unsaturated Seismic Conditions," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 10, 2021, doi: 10.3390/app11104568.

[17] M. Nasiri and M. Mohammadzade, "Cut slope stability assessment along forest roads using the limit equilibrium approaches and Slide software," *J. For. Sci.*, vol. 68, no. 5, pp. 182–189, 2022, doi: 10.17221/21/2022-JFS.

[18] R. Hassan, A. Ibrahim, and Z. Ahmad, "Factor of Safety," in *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, 2023, pp. 75–77. doi: 10.1007/978-981-19-2697-6_7.

[19] S. Harabinová, K. Kotrasová, E. Kormaníková, and I. Hegedüsová, "Analysis of Slope Stability," *Civ. Environ. Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 192–199, 2021, doi: 10.2478/cee-2021-0020.

[20] S. Muraro, A. Madaschi, and A. Gajo, "Passive soil pressure on sloping ground and

(cc) BY-SA

design of retaining structures for slope stabilisation," *Geotechnique*, vol. 65, no. 6, pp. 507–516, 2015, doi: 10.1680/geot.14.P.211.

[21] Q. Chen and M. Tang, "Probabilistic analysis of slope stability of earth dams during rainfall infiltration," in *Geotechnical Special Publication*, 2010, pp. 2022–2031. doi: 10.1061/41095(365)205.

[22] T. Jiang, J. Lei, R. Wang, and J. Zhang, "Comparative Model Test Study on Reinforcement Effect of Anti-slide Pile with Different Arrangements," *Yingyong Jichu yu Gongcheng Kexue Xuebao/Journal Basic Sci. Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 404–417, 2019, doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2019.02.015.

[23] P. T. K. Sari, Y. Lastiasih, and N. A. Shoffiana, "Comparison Of Safety Factor And Geosyntetic Reinforcement Requirement For Slope Stability Using 2-D And 3-D Analysis Method," *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 1016–1026, 2022, doi: 10.5937/jaes0-34051.

[24] D. Wu, Y. Gao, X. Chen, and Y. Wang, "Effects of Soil Strength Nonlinearity on Slip Surfaces of Homogeneous Slopes," *Int. J. Geomech.*, vol. 21, no. 1, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001896.

[25] Y. Wang, Z. Wang, Q. Li, and Z. Tao, "Construction monitoring and dynamic design of siltstone cutting high slope," *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal Cent. South Univ. (Science Technol.*, vol. 50, no. 2, pp. 400–408, 2019, doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.02.020.

(cc) BY-SA