

ARTIKEL ILMIAH

**PENGARUH TEKANAN AIR PORI TERHADAP KELONGSORAN
LERENG JALAN AKSES TWA GUNUNG TUNAK
KECAMATAN PUJUT KABUPATEN LOMBOK TENGAH**

*The Influence of Pore Water Pressure on Slope Stability of the Access Road to TWA
Gunung Tunak Pujut District Central Lombok Regency*



Oleh:

HASNA SIHABUDDIN

F1A 019 061

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MATARAM

2023

ARTIKEL ILMIAH

**PENGARUH TEKANAN AIR PORI TERHADAP KESTABILAN
LERENG JALAN AKSES TWA GUNUNG TUNAK
KECAMATAN PUJUT KABUPATEN LOMBOK TENGAH**

Oleh:

Hasna Sihabuddin

F1A 019 061

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

1. Pembimbing Utama



Prof. Ir. Didi S. Agustawijaya, M.Eng. Ph.D
NIP. 19620809 198912 1001

Tanggal : Juli 2023

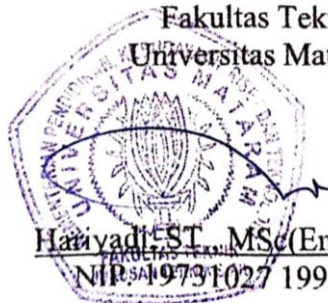
2. Pembimbing Pendamping



Tri Sulistyowati, ST., MT.
NIP. 19730202 199802 2001

Tanggal : Juli 2023

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Mataram



Hayadi, ST., MSc(Eng)., Dr. Eng.
NIP. 19731027 199802 1 001

**PENGARUH TEKANAN AIR PORI TERHADAP KELONGSORAN
LERENG JALAN AKSES TWA GUNUNG TUNAK
KECAMATAN PUJUT KABUPATEN LOMBOK TENGAH**

Hasna Sihabuddin¹, Didi S. Agustawijaya², Tri Sulistyowati²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

²Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

ABSTRAK

Pulau Lombok merupakan salah satu daerah seismik teraktif di Indonesia. Umumnya Pulau Lombok memiliki dua sumber gempa utama yaitu sumber *back-arc thrust* dan *subduction*. Diselatan Pulau Lombok ada dua sumber yaitu yang berlokasi di zona subduksi dan zona *fore-arc basin*. Kedua sumber tersebut adalah akibat dari tumbukan lempeng tektonik Indo-Australia dengan lempeng tektonik Asia. Geologi struktur pulau Lombok yang terbentuk adalah sesar dan kekar. Sesar terletak dibagian selatan Pulau Lombok. Sesar akan bergerak jika terjadi gempa dan akan diam jika tidak terjadi gempa. Pada bulan Januari-Februari 2021, curah hujan di Kecamatan Pujut, Kabupaten Lombok Tengah memiliki intensitas rata-rata sedang hingga tinggi. Terdapat kejadian longsor di Taman Wisata Alam (TWA) Gunung Tunak, Desa Mertak, Kecamatan Pujut, Kabupaten Lombok Tengah, yang menyebabkan kerusakan parah pada jalan akses TWA Gunung Tunak sepanjang 25 m, serta kerusakan pada sistem penyangga, pasangan batu, dan saluran drainase hancur.

Dalam penelitian ini menganalisis pengaruh tekanan air pori terhadap kelongsoran lereng jalan akses TWA Gunung Tunak yang dilakukan menggunakan dua metode, yaitu metode empiris dengan metode Bishop dan metode numerik menggunakan aplikasi *Plaxis v.8.6*.

Dari hasil analisis perhitungan didapatkan bahwa nilai tekanan air pori pada longsor 1 kondisi tidak jenuh $-306,73 \text{ kN/m}^2$ dengan nilai SF (*Safety Factor*) sebesar 2,039, ketika lereng dalam kondisi jenuh tekanan air pori $-306,51 \text{ kN/m}^2$ dengan nilai SF 1,5003. Pada longsor 2 nilai tekanan air pori pada kondisi tidak jenuh sebesar $858,16 \text{ kN/m}^2$ dengan nilai SF 2,2894, sedangkan ketika lereng dalam kondisi jenuh nilai tekanan air pori 1010 kN/m^2 dengan nilai SF 1,4678. Tekanan air pori sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Ketika tekanan air pori meningkat maka SF (*safety factor*) akan menurun, begitu juga sebaliknya. Kedua pemodelan (empiris dan numerik) mengindikasikan hal yang sama.

Kata Kunci : Tekanan air pori, lereng, gempa, hujan

**PENGARUH TEKANAN AIR PORI TERHADAP KELONGSORAN
LERENG JALAN AKSES TWA GUNUNG TUNAK
KECAMATAN PUJUT KABUPATEN LOMBOK TENGAH**

Hasna Sihabuddin¹, Didi S. Agustawijaya², Tri Sulistyowati²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

²Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

ABSTRACT

Lombok Island is one of the most seismically active regions in Indonesia. Generally, the island has two main earthquake sources: back-arc thrust and subduction. In the southern part of Lombok Island, there are two sources located in the subduction zone and fore-arc basin zone. Both sources are the result of the collision between the Indo-Australian tectonic plate and the Asian tectonic plate. The geological structure of Lombok Island is characterized by faults and fractures, with the faults being located in the southern part of the island. These faults will move during earthquakes and remain inactive during seismic quiescence. In January-February 2021, the rainfall in Pujut District, Central Lombok Regency, ranged from moderate to high intensity. A landslide occurred in the Gunung Tunak Nature Park (TWA), Mertak Village, Pujut District, Central Lombok Regency, causing severe damage to the TWA Gunung Tunak access road, which stretched 25 meters long. The incident also resulted in damages to the support system, stone pairs, and drainage channels.

This research analyzes the influence of pore water pressure on the slope instability of the TWA Gunung Tunak access road, utilizing two methods: the empirical method employing the Bishop method and the numerical method using Plaxis v.8.6 application.

The calculation analysis results indicate that the pore water pressure value for landslide 1, under unsaturated conditions, was -306.73 kN/m² with a Safety Factor (SF) of 2.039. When the slope was in saturated condition, the pore water pressure was -306.51 kN/m² with an SF of 1.5003. For landslide 2, the pore water pressure value under unsaturated conditions was 858.16 kN/m² with an SF of 2.2894, while under saturated conditions, the pore water pressure was 1010 kN/m² with an SF of 1.4678. Pore water pressure significantly affects slope stability. As the pore water pressure increases, the SF decreases, and vice versa. Both modeling approaches (empirical and numerical) indicate the same findings.

Keywords: Pore water pressure, slope, earthquake, rainfall.

PENDAHULUAN

LATAR BELAKANG

Tekanan air pori merupakan salah satu parameter penting dalam ilmu mekanika tanah dan geoteknik, karena dapat mempengaruhi perilaku kestabilan tanah dan batuan. Tekanan air pori dapat terjadi pada tanah dan batuan yang terkena hujan atau banjir, dan dapat berdampak pada kemampuan menahan beban atau gaya eksternal yang diberikan serta berpengaruh pada struktur bangunan yang dibangun di atasnya. Batuan yang berpori atau batuan yang banyak memiliki retakan atau celah akan mudah dilalui oleh air sebagai fluida. Penurunan kuat geser yang diakibatkan oleh naiknya tegangan air pori (*pore pressure*) dapat menyebabkan terjadinya longsor.

Longsor merupakan pergerakan tanah atau batuan yang terjadi di lereng dengan kecepatan yang cepat atau lambat. Kelongsoran lereng pada batuan dapat berupa pergerakan atau runtuhnya massa batuan dari suatu lereng atau dinding tebing yang curam karena adanya gaya gravitasi yang berlebih. Kelongsoran lereng pada batuan dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti kondisi geologi yg kurang stabil, aktivitas gempa bumi yang dapat menyebabkan terjadinya retakan atau celah-celah pada tanah atau batuan, erosi dan naiknya tegangan air pori yang disebabkan oleh hujan.

Berdasarkan Agustawijaya dkk (2020) menjelaskan bahwa Pulau Lombok merupakan salah satu daerah seismik teraktif di Indonesia. Umumnya Pulau Lombok memiliki dua sumber gempa utama yaitu sumber *back-arc thrust* dan *subduction*. Diselatan Pulau Lombok ada dua sumber yaitu yang berlokasi di zona subduksi dan zona *fore-arc basin*. Kedua sumber tersebut adalah akibat dari tumbukan lempeng tektonik Indo-Australia dengan lempeng tektonik Asia. Geologi struktur pulau lombok yang terbentuk adalah sesar dan kekar. Sesar terletak dibagian selatan Pulau Lombok.

Pada tahun 2021 di kawasan TWA Gunung Tunak Kecamatan Pujut,

Kabupaten Lombok Tengah telah terjadi longsor, yang menyebabkan kerusakan parah pada lereng jalan akses TWA gunung Tunak sepanjang 25 m, begitu juga dengan sistem penyangga, pasangan batu dan saluran drainase hancur. Kerusakan pada infrastruktur jalan berdampak bagi pengguna dan terganggunya perekonomian masyarakat sekitar karena rusaknya akses antara dua atau lebih wilayah.

Pada tahun 2022 TWA Gunung Tunak Kembali mengalami kelongsoran. Adanya air pada celah dan permukaan longsor di duga menjadi penyebab utama terjadinya longsor. Analisis tekanan air pori bertujuan untuk mengetahui besar pengaruh kenaikan tekanan air pori terhadap kelongsoran pada lereng. Lereng yang jenuh air akan mengurangi kuat geser pada tanah atau batuan dan dapat menyebabkan terjadinya longsor. Analisis pengaruh tekanan air pori terhadap kelongsoran lereng dilakukan dengan dua metode, yaitu dengan metode empiris (Metode Bishop) dan metode numerik (aplikasi). Salah satu aplikasi yang digunakan adalah *Plaxis V.8.6* yang merupakan salah satu program elemen hingga. Perhitungan analisis untuk menentukan faktor aman (*safety factor*) menggunakan konsep *Phi-c reduction* pada *Plaxis* dan limit equilibrium pada Bishop.

Berdasarkan permasalahan yang terjadi, dapat ditarik kesimpulan bahwa pengaruh tekanan air pori terhadap kelongsoran lereng jalan akses TWA Gunung Tunak akan di analisis lebih lanjut untuk mengantisipasi terjadinya longsor lanjutan. Pada usulan tugas akhir ini akan dianalisis seberapa besar pengaruh tekanan air pori terhadap kelongsoran lereng jalan akses TWA Gunung Tunak.

RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan sebelumnya, maka dapat diambil rumusan masalah dalam penelitian, yaitu :

1. Bagaimanakah pengaruh tekanan air pori terhadap kelongsoran lereng jalan akses TWA Gunung Tunak ?
2. Apakah yang menyebabkan terjadinya longsor di lereng jalan akses TWA Gunung Tunak ?
3. Apakah faktor penyebab longsor, dari faktor dalam dan faktor luar pada lereng jalan akses TWA Gunung Tunak ?

TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh nilai tekanan air pori terhadap kelongsoran jalan akses TWA Gunung Tunak
2. Mengetahui penyebab terjadinya longsor pada lereng jalan akses TWA Gunung Tunak
3. Mengetahui pengaruh faktor luar dan faktor dalam terhadap kelongsoran pada lereng jalan akses TWA Gunung Tunak.

DASAR TEORI

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian dari Sari, dkk (2016) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa tekanan air pori menyebabkan kekuatan geser dari tanah menurun, disebabkan adanya air di dalam tanah sehingga parameter stabilitas tanah (kepadatan tanah, kohesi dan sudut geser) menurun. Oleh karena itu diperlukan adanya instrument pengamatan tekanan air pori sehingga dapat dipantau besar dari tekanan pori tersebut untuk mengantisipasi kegagalan pada struktur bendungan. Dalam menganalisis struktur bendungan terhadap tekanan air pori digunakan pemodelan pemrograman, salah satunya adalah aplikasi *Plaxis*, yaitu aplikasi yang menerapkan metode elemen hingga.

Penelitian dari Sompie, dkk (2018) melakukan analisis bahwa parameter tanah yang diperoleh dari laboratorium dimodelkan ke dalam program *Plaxis V.8.6* untuk mendapatkan faktor keamanan (Msf) dan penurunan total (U_{total}). Penelitian dilakukan dengan cara membandingkan hasil yang

didapat dengan menggunakan model material *Mohr-Coulomb* dengan variasi muka air tanah. Dari pemodelan pada program *Plaxis V.8.6* diperoleh bahwa semakin tinggi muka air tanah maka semakin kecil faktor keamanan..

Penelitian dari Arsyad, dkk (2014) dalam penelitiannya memaparkan mekanisme kegagalan lereng poros Jalan Malino-Sinjai dengan menggunakan pemodelan elemen hingga. Lereng pada lokasi penelitian berupa batuan vulkanik dengan stratigrafi lempung kerikil terpadatkan dan lempung keras hingga lempung sangat keras (tufa *impermeable*). Pemodelan dilakukan dengan menggunakan metode Mohr-Coulomb untuk tanah. Pengaruh beban lalu lintas juga dievaluasi untuk menganalisis stabilitas lereng pasca longsor. Hasil simulasi mengindikasikan bahwa kegagalan lereng terjadi karena proses rembesan air ketika muka air tanah meninggi. Pengaruh aliran air tanah sangat signifikan pada proses kelongsoran lereng. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peninggian muka air tanah pada lereng dapat menurunkan nilai SF. Berdasarkan analisis dengan menggunakan *software Plaxis v.8.6* didapatkan nilai SF lereng ketika muka air normal adalah 1,43 menjadi 0,98 ketika muka air tanah meninggi. Potensi longsor susulan pada lereng dimungkinkan karena SF masih rendah, sebesar 1,12.

Penelitian dari Seiring dengan perkembangan teknologi komputer, berkembang pula aplikasi metode *Finite Element* yaitu *software Plaxis V.8.6* untuk analisis kestabilan lereng. *Plaxis* adalah program analisis geoteknik, terutama untuk analisis stabilitas tanah yang mampu melakukan analisis yang dapat mendekati perilaku sebenarnya (Albataineh, 2006). Geometri tanah yang akan dianalisis memungkinkan akan dimasukkan dengan cukup teliti. Karena *Plaxis* dilengkapi dengan fitur-fitur khusus yang berhubungan dengan banyak aspek dari struktur geometri yang kompleks. Metode *Phi-c reduction* digunakan

untuk mencari bidang gelincir dan menghitung faktor keamanan (SF) lereng.

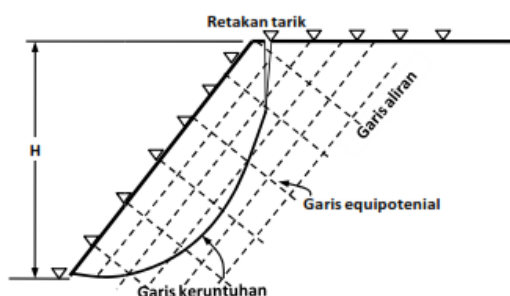
LANDASAN TEORI

Tekanan Air Pori

Tekanan air pori adalah tekanan yang dihasilkan oleh air yang terperangkap dalam pori-pori tanah, dan dapat berdampak pada kestabilan tanah dan struktur bangunan yang dibangun di atasnya (Das, 2016). Dalam Hardiyatmo (2012) bahwa air tanah di bagi dalam dua zona, yaitu zona pori positif dan zona pori negatif. Garis yang membagi kedua zona adalah garis muka air tanah, dimana tekanan hidrostatiknya sama dengan tekanan atmosfer. Dibawah muka air tanah, tanah dalam kondisi jenuh air, dan tekanan air pori adalah positif. Di atas muka air tanah, di dalam zona tanah tidak jenuh, tekanan pori adalah negatif (isapan). Perubahan tekanan pori akan merubah kuat geser tanah, sehingga mempunyai pengaruh besar terhadap stabilitas lereng.

Aliran Air dan Massa Batuan Lereng

Agustawijaya (2018) Pada massa batuan keras, air hanya berada dalam bidang runtuh yang bekerja normal terhadap bidang sehingga memberikan tegangan unkit (*uplift*) pada lereng, dan massa batuan dianggap kedap air. Sementara untuk batuan lunak dan tanah, air berada dalam massa batuan. Air membentuk pola aliran dibelakang lereng, seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Geometri keruntuhan rotasi dan pengaliran air dalam lereng jenuh air saat hujan. (Sumber : Agustawijaya, 2018)

Kelongsoran

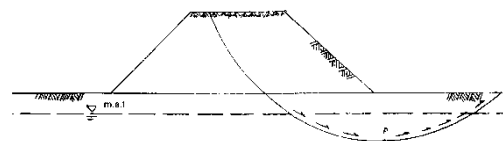
kelongsoran batuan adalah pergerakan massa batuan yang terjadi secara tiba-tiba atau

berangsur-angsur dari lereng batuan yang curam atau landa. Kelongsoran batuan dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti kelembaban. Kondisi geologi, dan aktivitas manusia (Agustawijaya, 2021). Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya longsor antara lain kelembaban tanah, ekstur dan struktur tanah, kemiringan lereng, kecepatan air permukaan tanah, jenis dan tingkat vegetasi, serta aktivitas manusia seperti penggalian dan pemotongan (Das, 2016).

Kelongsoran Lingkaran (rotasi)

Kelongsoran rotasi dapat terjadi pada lereng yang lunak, material lepas, granular, dan mempunyai ketebalan lapisan yang cukup besar, atau runtuh rotasi juga akan terjadi pada batuan yang sudah sangat terpotong-potong oleh bidang diskontinuitas. Prinsip kelongsoran rotasi pada batuan mengadopsi runtuh rotasi pada tanah dalam Mekanika Tanah.

Agustawijaya (2021) menjelaskan bahwa dalam keruntuhan rotasi, material granular tidak mempunyai satupun bidang runtuh yang mengontrol keruntuhan seperti halnya dalam keruntuhan bidang. Dalam keruntuhan rotasi, material granular mencari bidang runtuh, yaitu garis terlemah dari badan atau puncak lereng hingga kaki untuk bidang gelincirnya. Garis ini biasanya berbentuk setengah lingkaran (busur lingkaran), atau juga



bisa tidak berbentuk lingkaran (**Gambar 1**).

Gambar 2 Geometri Keruntuhan Rotasi

(Sumber : Hardiatmo, 2010)

Material batuan yang mengalami keruntuhan seperti ini adalah material tanah, batuan sedimen granular, batuan sangat lapuk, dan batuan yang sudah remuk, atau massa batuan yang sudah terpotong-potong menjadi bentuk blok-blok batuan kecil. Beberapa

Batasan untuk keruntuhan rotasi busur lingkaran seperti **Gambar 2** bahwa :

1. Material batuan dianggap seragam
2. Kuat geser menggunakan persamaan Mohr-Coulomb yang terdiri dari kohesi, friksi dan tegangan normal. Berikut persamaan dari Coulomb :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

(2.1)

Keterangan :

τ = tegangan geser (kN/m²)

c = kohesi (kN/m²)

σ = tegangan normal (kN/m²)

ϕ = sudut gesek dalam (°)

3. Bentuk bidang gelincir adalah busur lingkaran hingga kaki lereng
4. Retakan Tarik terdapat di atas lereng
5. Jarak letak retakan Tarik dengan bidang runtuh sedemikian rupa sehingga faktor keamanan dapat dihitung dengan pertimbangan geometri lereng dan muka air
6. Kisaran air tanah dari kering hingga jenuh.

Untuk mencari nilai faktor keamanan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$F = \frac{\text{kuat geser yang tersedia untuk menahan runtuh}}{\text{tegangan geser yang mendorong pada bidang runtuh}}$$

Maka,

$$\tau_{mb} = \frac{c}{F} + \frac{\sigma \tan \phi}{F}$$

(2.2)

Dengan:

τ_{mb} = tegangan geser yang mendorong sepanjang bidang gelincir (kN/m²)

c = kohesi (kN/m²)

ϕ = sudut geser dalam (°)

F = faktor keamanan

σ = tegangan normal (kN/m²)

Kuat geser tidak dapat dihitung secara statistik sampai distribusi tegangan normal ditentukan. Namun distribusi tegangan normal ini secara praktis terkonsentrasi pada satu titik tegangan normal pada bidang gelincir, yang disebut *lowerbound*. Sementara itu,

upperbound berada pada dua ujung garis lengkung bidang gelincir.

Terdapat beberapa metode untuk menganalisis keruntuhan rotasi lereng. Berikut adalah salah satu metode yang digunakan pada analisis tersebut yaitu sebagai berikut :

1. Metode Bishop

Berikut Langkah-langkah perhitungan pada metode Bishop :

- a. Lereng digambar dengan skala yang tepat
- b. Lereng dibagi-bagi menjadi beberapa irisan/segmen
- c. Diukur : tinggi irisan (h), lebar irisan arah horizontal (b), h_w (untuk lereng dalam kondisi jenuh), dan sudut (θ_i) di tiap-tiap irisan (sebelah kanan sumbu vertikal (+), sebelah kiri (-))
- d. Menghitung berat batuan setiap irisan dengan $W = \gamma \cdot b \cdot h$; untuk lereng dalam kondisi jenuh digunakan γ_{sat} sehingga $W = \gamma_{sat} \cdot b \cdot h$

Keterangan :

γ = berat volume batuan (kN/m³)

γ_{unsat} = berat volume tidak jenuh (kN/m³)

γ_{sat} = berat volume jenuh (kN/m³)

- e. Pada lereng yang dalam kondisi jenuh, dihitung besarnya tekanan *uplift* masing-masing irisan dengan $u = h_w \cdot \gamma_w$

Keterangan :

h_w = tinggi rata-rata batuan yang terendam air (m)

γ_w = berat volume air (9,81 kN/m³)

- f. Dihitung pada masing-masing irisan : $\sin \theta$; $W \cdot \sin \theta$; $U = u \cdot b$ (kondisi jenuh); $(W - U) \tan \phi$; $c \cdot b$; dan $(W - U) \tan \phi + c \cdot b$

Keterangan : c = kohesi (kN/m²)

ϕ = sudut geser dalam batuan (°)

- g. Menghitung nilai faktor keamanan (*safety factor*)

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^n [c' b_i + (W_i - U) \tan \phi'] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \cdot \tan \phi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \theta_i}$$

Dengan :

F = faktor aman

c = Kohesi (kN/m²)

ϕ = sudut gesek dalam (°)

b_i = lebar irisan ke- i (m)

W_i = berat irisan tanah/batuan ke- I (kN)

θ_i = sudut irisan ke- I ($^\circ$)

u_i = tekanan air pori pada irisan (kN/m²)

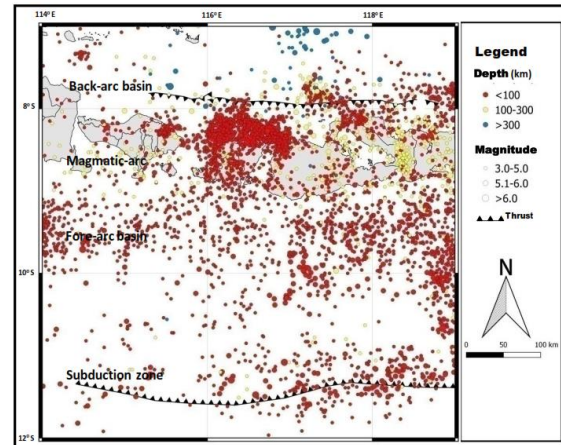
Multiple Landslide

Multiple landslide merupakan sekelompok tanah longsor yang terjadi dalam suatu wilayah tertentu dan dalam kurun waktu tertentu yang relatif singkat, di mana gerakan-gerakan ini berhubungan dengan satu set faktor pemicu yang sama dan yang sering kali menunjukkan hubungan spasial atau temporal yang kuat sama lain (Varnes, 1978).

Multiple landslide mengacu pada situasi di mana terjadi lenih dari satu peristiwa tanah longsor dalam waktu dan lokasi yang relatif dekat. Beberapa titik atau area yang berbeda mengalami pergerakan tanah secara serentak atau dalam waktu yang berdekatan. Multiple landslide sering kali terjadi dalam keadaan cuaca ekstrem, terutama setelah hujan deras yang berkepanjangan.

Kegempaan

Dalam Agustawijaya (2018) gempa adalah getaran yang dirasakan dipermukaan akibat adanya tumbukan lempeng tektonik atau letusan gunung api. Gelombang gempa dirambat dari sumbernya melalui media batuan dan tanah. Agustawijaya dkk (2020) menjelaskan bahwa Pulau Lombok merupakan salah satu daerah seismik teraktif di Indonesia. Umumnya Pulau Lombok memiliki dua sumber gempa utama yaitu sumber *back-arc thrust* dan *subduction*. Pada **Gambar 3**. Sumber gempa dibagian utara sangat dominan terdapat sesar naik yang disebut sesar Flores yang berlokasi di *back-arc basin*. Sedangkan, diselatan pulau ada dua sumber yaitu yang berlokasi di zona subduksi dan zona *fore-arc basin*. Kedua sumber tersebut adalah akibat dari tumbukan lempeng tektonik Indo-Australia dengan lempeng tektonik Asia



Gambar 3 Peta seismik Pulau Lombok
(Sumber : Agustawijaya dkk, 2020)

Program Plaxis V.8.6

Plaxis adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Untuk setiap pemodelan yang akan di analisis terlebih dahulu membuat model geometri. Sebuah model geometri adalah representasi 2D (dua dimensi) dari model tiga dimensi yang sesungguhnya. Pada plaxis 2D, fondasi dimodelkan sebagai elemen triangular 2D dengan memiliki hanya dua derajat kebebasan per-nodal. Setiap elemen fondasi didefinisikan oleh 15 nodal geometri. Pemodelan 15 nodal dipilih untuk setiap elemen agar memperoleh perhitungan yang lebih akurat meskipun akan menjadi lebih rumit.

Teori Safety Factor dengan Plaxis

Dalam menentukan kestabilan atau analisis suatu lereng, parameter yang didapatkan berupa nilai faktor keamanan (*safety factor*) dan bentuk bidang keruntuhan. Faktor keamanan pada lereng berupa perbandingan antara gaya-gaya yang menahan, terhadap gaya-gaya yang mengerakkan, yang terjadi pada massa tanah atau batuan.

Analisis angka keamanan dengan PLAXIS mengacu pada prinsip dasar dari metode *phi-c reduction* yang mana faktor aman dihitung secara global (Sukandi, 2013). Metode *phi-c reduction* didasarkan pada asumsi pendekatan

dengan mereduksi parameter kuat geser tanah yang tersedia berturut – turut, yaitu c dan ϕ secara otomatis sampai terjadi keruntuhan pada batuan (Brinkgreve, 2007). Dengan menggunakan teori Moh-Coulumb, nilai faktor aman diperoleh dengan menggunakan rumus berikut :

$$SF = \frac{c - \sigma_n \tan \phi}{c_r - \sigma_n \tan \phi_r}$$

Dimana c dan ϕ adalah masukan parameter kekuatan dan σ_n adalah komponen tegangan normal aktual. Parameter c_r dan ϕ_r adalah parameter kekuatan tereduksi yang mempunyai nilai tepat untuk mempertahankan keseimbangan. Menurut SNI 8460-2017 persyaratan faktor keamanan lereng untuk analisis kestabilan lereng batuan dapat dilihat pada **Tabel 1**. Pada lereng batuan, pengaruh air perlu diperhitungkan.

Tabel 1 Rekomendasi nilai faktor keamanan untuk lereng batuan

Kondisi lereng batuan	Rekomendasi nilai faktor keamanan
Kondisi Permanen	1,5
Kondisi Sementara	1,2

(Sumber : SNI 8460:2017)

METODOLOGI PENELITIAN

Pada Penelitian ini metode yang digunakan untuk menganalisis pengaruh tekanan air pori terhadap longsor adalah metode numerik menggunakan pemodelan *software Plaxis V.8.6* dan metode irisan Bishop, dengan data yang digunakan berupa data N-SPT (bor log), data hasil pengujian laboratorium, data topografi, data gempa dan data struktur (data beban lalu lintas).

Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kawasan Taman Wisata Alam (TWA) Gunung Tunak, Desa Mertak, Kecamatan Pujut, Kabupaten Lombok Tengah, Nusa Tenggara Barat. Objek penelitian berada pada akses jalan TWA Gunung Tunak.

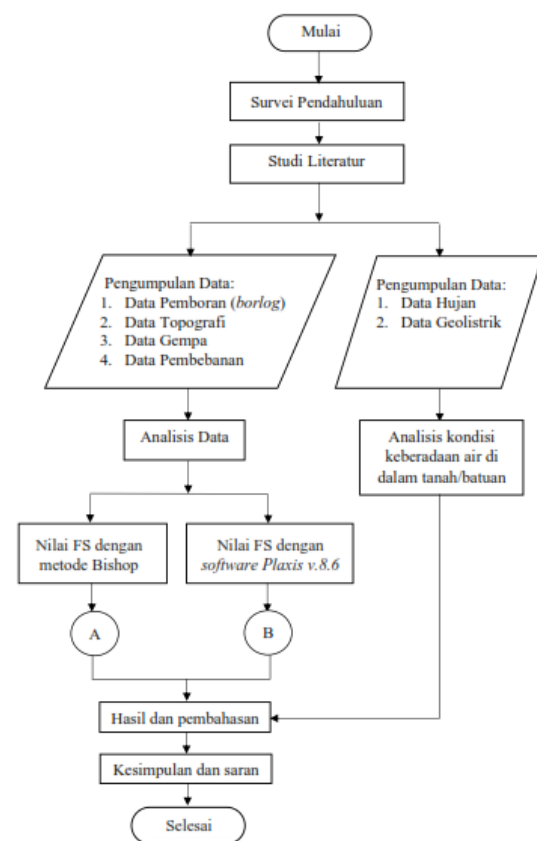
Analisis Data

Analisis data dilakukan dalam dua pemodelan, analisis data yang pertama akan dilakukan pemodelan dengan menggunakan *software Plaxis V.8.6*. Analisis yang kedua yaitu dengan menggunakan metode irisan Bishop. Setelah itu dilakukan perbandingan dari hasil kedua pemodelan tersebut.

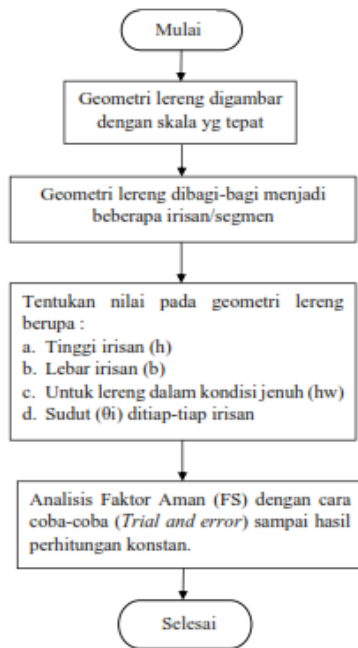
Tahap Pemodelan Aplikasi

Software Plaxis V.8.6 terdapat empat buah sub pemodelan program yaitu program *Input*, program *Calculation*, Program *Output*, dan program *Curve*. Proses analisis dilakukan menggunakan semua rangkaian sub program tersebut secara sistematis.

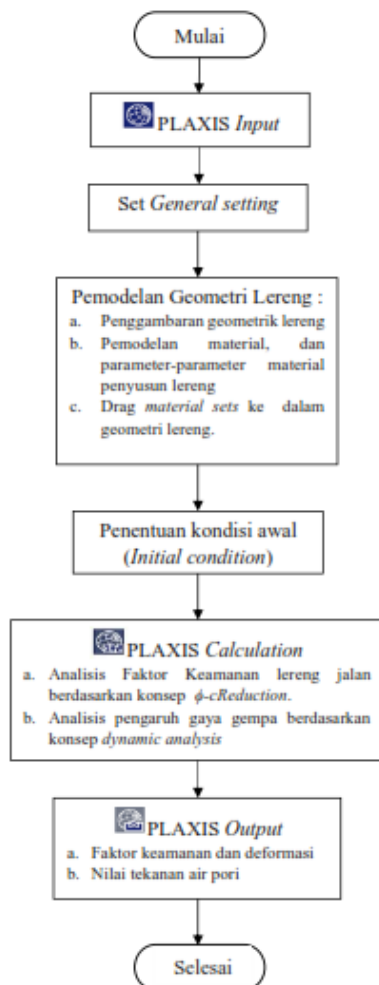
Bagan Alir Penelitian



Gambar 4 Bagan Alir Penelitian



Gambar 5 Bagan Alir analisis lereng dengan metode Bishop (A)



Gambar 6 Bagan Alir analisis lereng dengan Plaxis (B)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Perhitungan dengan Metode Bishop

Untuk mengetahui pengaruh tegangan air pori terhadap kelongsoran, maka dilakukan analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode irisan Bishop. Dalam metode ini massa tanah/batuan pada lereng di bagi menjadi beberapa irisan vertikal. Kemudian, keseimbangan dari tiap-tiap irisan akan diperhitungkan. Sehingga diperoleh angka kemandan total pada lereng.

Berikut tahapan perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada lereng, menggunakan metode Bishop yang disederhanakan :

1. Lereng Digambar dengan skala
2. Lereng dibagi-bagi menjadi beberapa irisan/segmen
3. Diukur : tinggi irisan (h), lebar irisan arah horizontal (b), hw (untuk lereng dalam kondisi jenuh), dan sudut (θ_i) di tiap-tiap irisan (sebelah kanan sumbu vertikal (+), sebelah kiri (-))
4. Menghitung berat batuan setiap irisan dengan $W = \gamma \cdot b \cdot h$; untuk lereng dalam kondisi jenuh digunakan γ_{sat} sehingga $W = \gamma_{sat} \cdot b \cdot h$

Keterangan :

γ = berat volume batuan (kN/m^3)

γ_{unsat} = berat volume kering (kN/m^3)

γ_{sat} = berat volume basah (kN/m^3)

5. Pada lereng yang dalam kondisi jenuh, dihitung besarnya tekanan *uplift* masing-masing irisan dengan $u = h_w \cdot \gamma_w$

Keterangan :

h_w = tinggi rata-rata batuan yang terendam air (m)

γ_w = berat volume air ($9,81 \text{ kN/m}^3$)

6. Dihitung pada masing-masing irisan : $\sin \theta$; $W \cdot \sin \theta$; $U = u \cdot b$ (kondisi jenuh); $(W-U) \tan \phi$; $c \cdot b$; dan $(W-U) \tan \phi + c \cdot b$

Keterangan : c = kohesi (kN/m^2)

Φ = sudut geser dalam batuan ($^\circ$)

Contoh Perhitungan :

Diketahui pada titik longsor 2 (longsor bagian bawah dekat pantai) :

1. Jumlah irisan : 16

Wi = berat batuan pada irisan ke-I (KN)

γ_{unsat} = 19,8 (kN/m³)

γ_{sat} = 26,23 (kN/m³)

b = lebar irisan ke-I (m)

h = tinggi rata-rata irisan ke-I (m)

hw = tinggi rata-rata air irisan ke-I (m)

$W1 TJ_1 = \gamma_{unsat} \times b1 \times h1 TJ_1 \times 1$
 $= 19,8 \times 5,252 \times 0,632 \times 1$
 $= 64 \text{ kN}$

$W2 TJ_1 = \gamma_{unsat} \times b1 \times h2 TJ_1$
 $= 19,8 \times 5,525 \times 0$
 $= 0 \text{ kN}$

$W2 J_1 = \gamma_{sat} \times b1 \times h2 J_1$
 $= 26,23 \times 5,525 \times 2,314$
 $= 335 \text{ kN}$

$W3 TJ_1 = \gamma_{unsat} \times b1 \times h3 TJ_1$
 $= 22,3 \times 5,525 \times 0$
 $= 0 \text{ kN}$

$W3 J_1 = \gamma_{sat} \times b1 \times h3 J_1$
 $= 22,7 \times 5,525 \times 0$
 $= 0 \text{ kN}$

$W_{tot} = W1 TJ_1 + W2 TJ_1 + W2 J_1 + W3 TJ_1$
 $+ W3 J_1$
 $= 64 + 0 + 335 + 0 + 0$
 $= 398,897 \text{ kN}$

2. $\theta_1 = 0^\circ$

Alluvium :

c = 25

$\phi = 23^\circ$

Batupasir Tuf :

c = 155

$\phi = 27^\circ$

Andesit :

c = 25

$\phi = 17$

$W_{tot} \sin \theta_1 = 398,897 \times \sin (0^\circ)$
 $= 0,00 \text{ kN}$

Untuk lereng dalam kondisi jenuh :

u1 = besar tekanan *uplift* irisan-1
(kN/m²)

u1 = $h_{w1} \times \gamma_w$
 $= (2,314 + 0) \times 9,81$
 $= 22,70 \text{ kN/m}^2$

U1 = $u1 \times b1 \times 1$
 $= 22,70 \times 5,525 \times 1$
 $= 125,419 \text{ kN}$

Gaya normal :

$(W-U) \cdot \tan \phi_{total} = (398,897 - 125,419) \times (\tan (23^\circ) + \tan (27^\circ))$
 $= 225,429$

$c \cdot b_{tot} \times 1 = (c1 \cdot b + c2 \cdot b + c3 \cdot b)$
 $= 994,5$

$(W-U) \cdot \tan \phi + c \cdot b1 = 225,429 + 994,5$
 $= 1249,93 \text{ kN}$

*Perhitungan selanjutnya ditabelkan.

Tabel 2a Hasil pengukuran dan perhitungan gaya yang bekerja pada lereng (kondisi jenuh)

No.	H1J	H2J	b	θ_i	W1 = $\gamma_{unsat} \cdot b \cdot h1$	W1 = $\gamma_{sat} \cdot b \cdot h1$	W2 = $\gamma_{sat} \cdot b \cdot h2$	Wtot
Irisan	(m)	(m)	(m)	°	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
1	0,05	0,41	0,68	2,5	0	2	20	67,059
2	0,15	1,16	1,92	2,5	4	7	57	189,859
3	0,23	1,68	3,18	2,5	11	10	83	301,734
4	0,32	1,82	4,62	2,5	19	15	90	407,152
5	0,41	1,73	6,04	2,5	18	19	85	499,931
6	0,51	1,75	7,18	2,5	22	23	86	580,221
7	0,6	1,87	7,95	2,5	27	27	92	640,719
8	0,69	1,59	8,86	2,5	32	31	78	690,697
9	0,78	0,58	10,19	2,5	37	35	29	732,264
10	1,17	0,5	9,91	2,5	43	53	25	727,708
11	0,83	0,76	7,98	2,5	49	38	37	598,484
12	0,5	0,96	5,14	2,5	56	23	47	407,086
13	0,17	1,27	1,23	2,5	64	8	63	150,940

(lanjutan)

sin θ_i	W · sin θ_i	u = hw · γ_w	U = b · u	$\tan^2 \psi'$	$\tan \psi'$	$\tan \psi'_{tot}$	W-U · tan ψ'	c1 · b	c2 · b	cb tot	$(W-U) \cdot \tan \psi' + (c \cdot b)$
(kN)	(kN/m ²)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
0,000	0,00	10,69	26,732	0,268	0,70	0,968	39,042	70,25	125	195	234,29
0,070	13,24	30,21	75,537	0,268	0,70	0,968	110,682	70,25	125	195	305,93
0,191	57,57	47,68	119,192	0,268	0,70	0,968	176,729	70,25	125	195	371,98
0,326	132,56	63,18	157,941	0,268	0,70	0,968	241,275	70,25	125	195	436,52
0,309	154,49	76,22	190,559	0,268	0,70	0,968	299,520	70,25	125	195	494,77
0,375	217,35	87,60	219,008	0,268	0,70	0,968	349,711	70,25	125	195	544,96
0,454	290,88	96,33	240,836	0,268	0,70	0,968	387,150	70,25	125	195	582,40
0,530	366,01	102,51	256,286	0,268	0,70	0,968	420,578	70,25	125	195	615,83
0,602	440,69	105,65	264,134	0,268	0,70	0,968	453,223	70,25	125	195	648,47
0,682	496,30	102,12	255,305	0,268	0,70	0,968	457,360	70,25	125	195	652,61
0,755	451,68	85,74	214,349	0,268	0,70	0,968	371,903	70,25	125	195	567,15
0,829	337,49	59,84	149,603	0,268	0,70	0,968	249,284	70,25	125	195	444,53
0,899	135,66	24,53	61,313	0,268	0,70	0,968	86,773	70,25	125	195	282,02
Σ	3093,926										

Tabel 3 Perhitungan *safety factor* (faktor aman) lereng, berdasarkan hasil perhitungan gaya-gaya yang bekerja pada lereng (kondisi jenuh)

$M_i = \{(\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \cdot \tan \psi') / F)\}$							
3,000	2,566	2,429	2,380	2,362	2,356	2,353	2,352
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,023	1,028	1,030	1,030	1,031	1,031	1,031	1,031
1,043	1,054	1,058	1,060	1,060	1,061	1,061	1,061
1,047	1,064	1,070	1,072	1,073	1,074	1,074	1,074
1,038	1,060	1,069	1,072	1,073	1,074	1,074	1,074
1,018	1,045	1,055	1,059	1,061	1,061	1,062	1,062
0,986	1,018	1,030	1,035	1,037	1,037	1,037	1,038
0,951	0,987	1,000	1,006	1,008	1,008	1,009	1,009
1,023	1,081	1,104	1,112	1,115	1,117	1,117	1,117
0,983	1,046	1,070	1,079	1,083	1,084	1,085	1,085
0,936	1,002	1,028	1,038	1,042	1,043	1,044	1,044
0,882	0,951	0,979	0,989	0,993	0,994	0,995	0,995
0,833	0,905	0,933	0,944	0,948	0,950	0,950	0,951
0,648	0,699	0,720	0,727	0,730	0,731	0,732	0,732
0,560	0,610	0,630	0,638	0,641	0,642	0,642	0,642
0,496	0,548	0,568	0,576	0,579	0,580	0,580	0,581

(lanjutan)

No.	{(W.tg φ)+(c.b)}/[cos θi (1+tg θi . tg φ/F)]							
Irisan	3,000	2,566	2,429	2,380	2,362	2,356	2,353	2,352
1	1249,929	1249,929	1249,929	1249,929	1249,929	1249,929	1249,929	1249,929
2	1826,105	1817,950	1814,789	1813,586	1813,131	1812,959	1812,895	1812,870
3	2001,442	1980,643	1972,647	1969,614	1968,468	1968,037	1967,874	1967,813
4	2196,751	2163,132	2150,296	2145,439	2143,607	2142,916	2142,656	2142,558
5	2326,744	2277,888	2259,383	2252,403	2249,773	2248,782	2248,409	2248,269
6	2800,087	2727,372	2700,023	2689,733	2685,860	2684,402	2683,853	2683,646
7	2926,237	2835,091	2801,061	2788,292	2783,491	2781,684	2781,004	2780,748
8	2968,116	2862,096	2822,769	2808,049	2802,519	2800,438	2799,655	2799,360
9	3557,169	3367,141	3298,413	3272,928	3263,386	3259,801	3258,452	3257,944
10	3514,577	3305,429	3230,446	3202,729	3192,364	3188,471	3187,007	3186,456
11	3607,685	3369,306	3284,652	3253,467	3241,821	3237,448	3235,804	3235,185
12	3677,704	3408,153	3313,429	3278,665	3265,700	3260,835	3259,006	3258,317
13	3474,651	3197,758	3101,359	3066,098	3052,963	3048,036	3046,184	3045,487
14	2929,719	2713,097	2637,045	2598,738	2594,834	2593,366	2592,814	2592,814
15	4193,228	3843,729	3722,704	3678,518	3662,070	3655,903	3653,585	3652,712
16	4381,535	3968,225	3827,403	3776,528	3757,287	3750,172	3747,497	3746,491
	47631,678	45086,938	44186,348	43854,871	43731,106	43684,648	43667,175	43660,597
SF	2,566	2,429	2,380	2,362	2,356	2,353	2,352	2,352

Pada perhitungan faktor aman di atas, dilakukan secara coba-coba (*trial and error*), sampai di dapat hasil *SF* yang konstan. Sehingga dari perhitungan di atas didapatkan nilai *SF* sebesar 2,140. Rekapitulasi Nilai faktor aman terdapat pada **Tabel 3** berikut.

Tabel 4 Rekapitulasi nilai *SF* hasil analisis metode empiris

Lereng jalan	1. Kondisi kering	Ket.	2. Kondisi jenuh	Ket.	Tambahan beban gempa 1	Ket.	Tambahan beban gempa 2	Ket.
Longsor 1	2,637	Aman	2,352	Aman	1,820	Aman	1,510	Aman
Longsor 2	2,931	Aman	1,856	Aman	2,271	Aman	1,239	Tidak aman

Gaya Gempa

Beban gempa horizontal, yang berlawanan dengan beban horizontal atau gaya normal lereng, adalah gaya gempa yang bekerja pada lereng. Perhitungan beban gempa yang digunakan adalah sebagai berikut :

Diketahui:

(Berdasarkan SNI-1726-2019)

I = faktor keutamaan (kategori non Gedung dengan resiko tinggi) = 1,25

R = elastisitas penuh ($\mu = 1$; $F_1=1,6$) = $\mu \times F_1 = 1,25 \times 1,6 = 2$

$S_{DS} = 0,83$

$C_s = S_{DS} \times I / R = 0,83 \times 1,25 / 2$

W_t = beban total (kN)

$V = C_s \times W_t$

$= 0,83 \times 1,25 \times W_t / 2$

$= 0,519 W_t$

Rumus faktor keamanan yang dipengaruhi oleh gaya gempa:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n [c' b_i + (W_i - U) \tan \phi' - V \cdot \sin \theta_i] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \cdot \tan \phi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \theta_i + V \cdot \cos \theta}$$

Contoh perhitungan :

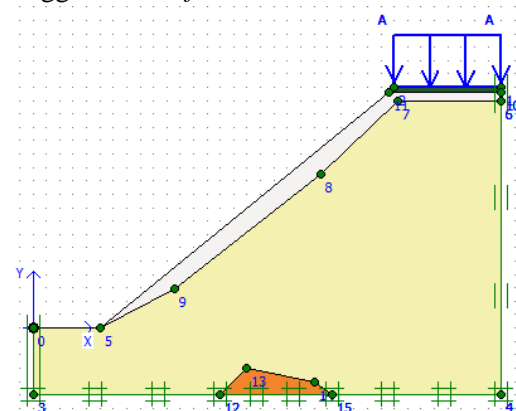
Tabel 5 Perhitungan pengaruh gaya gempa pada lereng (kondisi jenuh)

V.sin θi	V.cos θi	(W-U).tan φ	(W-U).tan φ - V.sin θi	cb tot	((W-U).tan φ - V.sin θi)+(c.b)
(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
0,000	207,028	255,429	255,429	994,5	1249,93
59,184	676,471	874,207	815,023	994,5	1809,52
181,505	853,912	1092,758	911,254	994,5	1905,75
318,846	981,308	1306,078	987,232	994,5	1981,73
475,673	1020,084	1420,388	944,715	994,5	1939,21
709,624	1181,012	1854,633	1145,010	994,5	2139,51
842,913	1118,583	1890,771	1047,859	994,5	2042,36
910,618	1011,343	1829,566	918,948	994,5	1913,45
932,940	869,980	2551,881	1618,941	1088,4	2707,37
932,872	728,839	2368,094	1435,222	1088,4	2523,65
921,846	598,654	2288,746	1366,900	1088,4	2455,32
866,240	460,588	2153,855	1287,615	1088,4	2376,04
707,254	314,890	1806,486	1099,232	1088,4	2187,66
506,999	184,533	947,224	440,225	950,3	1390,52
675,150	180,906	1257,871	582,721	1088,4	1671,15
592,739	115,217	1086,667	493,928	1088,4	1582,35

*Perhitungan penambahan pengaruh gaya gempa diberikan kepada semua kondisi pada lereng.

Analisis Perhitungan Menggunakan Software Plaxis

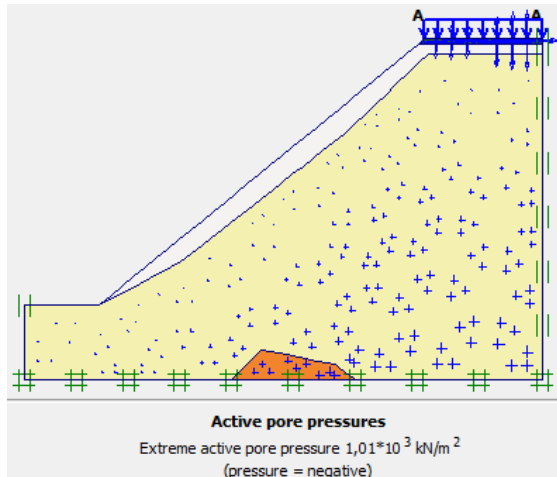
Software Plaxis V.8.6 terdapat empat buah sub pemodelan program yaitu program *Input*, program *Calculation*, Program *Output*, dan program *Curve*. Proses analisis dilakukan menggunakan semua rangkaian sub program tersebut secara sistematis. Berikut adalah contoh hasil analisis perhitungan menggunakan software Plaxis :



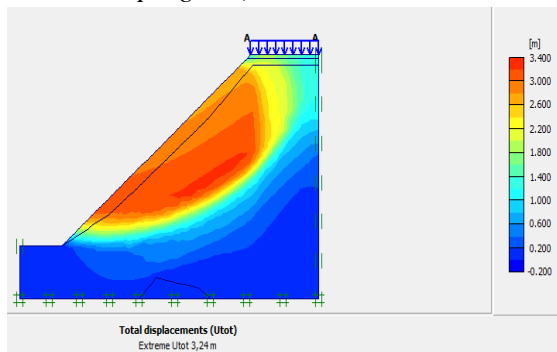
Gambar 5 Tahapan pemodelan geometri lereng dan program input

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First
Tatap awal	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
✓ KONDISI JENUH	1	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	1	1
✓ SF	2	1	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	1	25
✓ PPOP	3	1	Consolidation analysis	Minimum pore pressure	31,4 ...	1	85
✓ SF PPOP	4	3	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	1	106
✓ DYNAMIC	5	1	Dynamic analysis	Total multipliers	0,52 s	1	156
✓ SF DYNAMIC	6	5	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	1	256

Gambar 6 Nilai SF (Hasil Calculation)



Gambar 7 Nilai tekanan air pori (*output program*)



Gambar 8 Total *displacement* longsor 2

Dari gambar deformasi di atas (**Gambar 8**) dapat dilihat garis deformasi yang terjadi pada lereng terkonsentrasi pada tubuh lereng dekat dengan kaki lereng. Hal ini ditandai dengan garis berwarna orange yang menandakan *displacement* maksimum terjadi pada bagian tersebut dengan total *displacement* maksimum sebesar 3,24 m pada kondisi jenuh. Berikut rekapitulasi nilai SF hasil analisis dengan *software Plaxis*

Tabel 5 Rekapitulasi nilai SF hasil analisis *software Plaxis*

Lereng jalan	1. Kondisi kering	Ket.	2. Kondisi jenuh	Ket.	Tambahan beban gempa 1	Ket.	Tambahan beban gempa 2	Ket.
Longsor 1	1,5416	Aman	1,2444	Tidak aman	1,0877	Aman	0,9764	Aman
Longsor 2	2,2894	Aman	1,4678	Tidak aman	2,2821	Aman	1,4663	Aman

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng jalan akses TWA Gunung Tunak Kecamatan Pujut Kabupaten Lombok Tengah, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Tekanan air pori sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Ketika tekanan air pori meningkat maka SF (*safety factor*) akan menurun, begitu juga sebaliknya. Dari hasil analisis didapatkan Nilai tekanan air pori pada longsor 1 kondisi tidak jenuh -306,73 kN/m² dengan nilai SF sebesar 2,039, ketika lereng dalam kondisi jenuh tekanan air pori -306,51 kN/m² dengan nilai SF 1,5003. Pada longsor 2 nilai tekanan air pori pada kondisi tidak jenuh sebesar 858,16 kN/m² dengan nilai SF 2,2894, sedangkan ketika lereng dalam kondisi jenuh nilai tekanan air pori 1010 kN/m² dengan nilai SF 1,4678. Kedua pemodelan (empiris dan numerik) mengindikasikan hal yang sama.
2. Berdasarkan Peta Geologi Struktur Pulau Lombok, Lombok bagian selatan terdapat sesar. Lokasi longsor lereng jalan akses TWA Gunung Tunak adalah sisi longsor (sesar) secara geologi (Mahendra dkk, 2021). Sesar akan bergerak jika terjadi gempa dan akan diam jika tidak terjadi gempa. Di selatan Pulau Lombok ada dua sumber gempa yaitu yang berlokasi di zona subduksi dan zona fore-arc basin. Kedua sumber di selatan adalah akibat dari tumbukan lempeng tektonik Indo-Australia dengan lempeng tektonik Asia. Dari data BMKG NTB, 2021 didapatkan bahwa Intensitas hujan pada Kecamatan Pujut Kabupaten Lombok Tengah memiliki intensitas hujan rata-rata sedang hingga tinggi. Pengukuran geolistrik pada tanggal 7-9 Mei 2021 untuk melakukan pemodelan struktur bawah permukaan lokasi longsor. Pada VES 5 lokasi titik longsor atas dan VES 7 lokasi titik longsor bawah, menunjukkan bahwa material batuan tersebut mengandung air dan bertindak sebagai pembawa air.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan peneliti antara lain :

1. Untuk mendapatkan analisis perhitungan yang lebih akurat sebaiknya analisis perhitungan dilakukan menggunakan metode yang sama.
2. Untuk mengantisipasi terjadinya longsor lanjutan, di upayakan sedini mungkin untuk dilakukan perbaikan pada kelongsoran lereng jalan akses TWA Gunung Tunak.
3. Untuk mendapatkan stabilitas lereng jalan yang aman, dibutuhkan analisis lanjutan mengenai perkuatan pada lereng tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustawijaya, Didi S. (2019). *Geologi Teknik*. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Agustawijaya, Didi S., Taruna, Rian M., Agustawijaya, AUSA R. (2020). "An Update to Seismic Hazard Levels and PSHA for Lombok and Surrounding Islands After Earthquakes in 2018". *Journal of Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 53, No. 4.
- Albataineh, N. (2006). "Slope Stability Analysis Using 2D and 3D Method". Thesis, University of Akron. Amerika Serikat.
- Arsyad, Ardy., Hamid, Wahniar., Yusmin, Andi., Ibrahim, Fadly. (2014). "Analisa Kegagalan Lereng Batuan Vulkanik pada Jalan Malino-Sinjai dengan Menggunakan Pemodelan Elemen Hingga". *Jurnal Konferensi Regional Teknik Universitas Hasanuddin*. Makassar.
- Brinkgreve, R.B.J., Al-Khoury, R. Bakker, K.J., Bonnier, P.G., Brand, P.J.W., Broere, W. Burd, H.J., Chandra, Y.P., Gouw, T.L., Hutapea, B.M., Soltys, G., Varmeer, P.A., Handoko, S.G. (1998). *Plaxis Versi 8. Manual Acuan*. Plaxis Belanda.
- Das, Braja M. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering*. Tenth Edition. California State University. USA.
- Hardiyatmo, Hary Christady. (2012). "*Tanah Longsor & Erosi kejadian dan penanganan*". Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Mahendra, Made., Agustawijaya, Didi S., Suteja, I wayan., Fahmi, Khaerul. (2022). "*Kajian Teknik Akibat Adanya Kerusakan Jalan Akses Taman Wisata Alam (TWA) Gunung Tunak, Desa Mertak Kecamatan Pujut Kabupaten Lombok Tengah*". Fakultas Teknik. Universitas Mataram. Mataram.
- Sari, Undayani C., Wardani, Sri PR., Suharyanto., Partono, W. (2016). "Analisis Tekanan Air Pori Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Pemodelan Mohr-Coulomb pada Plaxis". *Jurnal Universitas Atma Jaya*. Yogyakarta.
- Setyanto., Zakaria, Ahmad., Permana, Giwa W. (2016). "Analisa Stabilitas Lereng dan Penanganan Longsoran Menggunakan Metode Elemen Hingga Plaxis V.8.2 (Studi Kasus : Ruas Jalan Liwa-Simpang Gunung Kemala STA.263+650)". *Jurnal Rekayasa*, Vol. 20, No. 2.
- Sompie, Gracia M.E., Sompie, O.A.B., Rondonuwu, Steeva. (2018). "Analisis Stabilitas Tanah dengan Model Material Mohr-Coulomb dan Soft Soil". *Jurnal Sipil Statik Universitas Sam Ratulangi*. Manado. Vol.6 No.10, ISSN : 2337-6732.