

ARTIKEL ILMIAH
PEMODELAN NUMERIK KESTABILAN TEROWONGAN
PENGELAK-PELIMPAH BENDUNGAN MENINTING DI
KABUPATEN LOMBOK BARAT

*Numerical Modeling of the Stability of the Meninting Diver-Sliding Tunnel in
Lombok Barat*



Oleh:

Dinda Amalia Giffari

F1A 118 021

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MATARAM

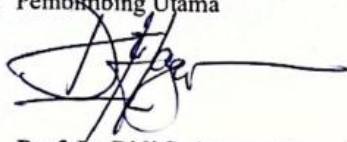
2023

ARTIKEL ILMIAH
PEMODELAN NUMERIK KESTABILAN TEROWONGAN
PENGELAK-PELIMPAH BENDUNGAN MENINTING DI KABUPATEN
LOMBOK BARAT

Oleh:
Dinda Amalia Giffari
FIA 118 021

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

1. Pembimbing Utama



Prof. Ir. Didi S. Agustawijaya, M.Eng., Ph.D.
NIP. 19620809 198912 1 001

Tanggal:

2. Pembimbing Pendamping



Tri Sulistvowati, ST., MT.
NIP. 19730202 199802 2 001

Tanggal:

Mengetahui,
Sekretaris Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Mataram



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

ARTIKEL ILMIAH

PEMODELAN NUMERIK KESTABILAN TEROWONGAN PENGELAK PELIMPAH BENDUNGAN MENINTING DI KABUPATEN LOMBOK BARAT

Oleh :

Dinda Amalia Giffari

F1A 118 021

Telah diujikan di depan Tim Penguji

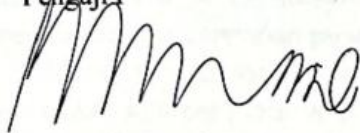
Pada tanggal 23 Februari 2023

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat derajat Sarjana (S-1)

Jurusan Teknik Sipil

Susunan Tim Penguji

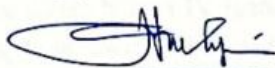
1. Penguji I



Ir. Ismail Hoesain M., MT.
NIP. 19650717 199403 1 001

Tanggal: Februari 2023

2. Penguji II



Dr. Muhajirah, ST., MT.
NIP. 19730719 199903 2 002

Tanggal: Februari 2023

3. Penguji III



Agus Suroso, ST., MT.
NIP. 19680813 199703 1 002

Tanggal: Februari 2023

Mataram, Februari 2023
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Mataram



Muhammad Syamsu Iqbal, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19720222 199903 1 002

PEMODELAN NUMERIK KESTABILAN TEROWONGAN PENGELAK-PELIMPAH BENDUNGAN MENINTING DI KABUPATEN LOMBOK BARAT

Dinda Amalia Giffari¹, 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

Bendungan Meninting dibangun berdasarkan kebutuhan masyarakat terhadap kesediaan air untuk irigasi dan merupakan salah satu konsep untuk mempertahankan status Provinsi Nusa Tenggara Barat. Pada Bendungan Meninting terdapat dua terowongan yaitu *intake* dan pelimpah. Pembangunan suatu terowongan memerlukan pengalaman serta pemahaman tentang pengaruh struktur terhadap kondisi tanah, sifat-sifat tanah dan masalah apa saja yang dapat terjadi saat konstruksi selesai dibangun. Oleh karena itu, perlu diketahui kekuatan batuan di sekitar terowongan Pengelak-Pelimpah Bendungan Meninting dengan mempertimbangkan perubahan parameter batuan.

Metode yang digunakan untuk analisis data adalah metode numerik dengan pemodelan menggunakan *software Plaxis versi 8.6 full version* dengan data yang digunakan adalah data sondir, data geologi, dan data hasil pengujian laboratorium.

Meninting terbangun atas dasar batuan breksi vulkanik lapuk sedang hingga kuat yang mempunyai kuat tekan $\sigma'_{ci} = 1.926$ MPa, kategori klasifikasi massa batuan ini termasuk ke dalam massa batuan IV (batuan jelek) dengan nilai *RMR inlet* 27 dan nilai *RMR outlet* 37. Kategori ini memberikan waktu tunggu (*stand up time*) saat galian 1 jam – 9 jam inlet dan 6 jam – 65 jam outlet. Pemodelan numerik terhadap kestabilan terowongan pengelak-pelimpah dan seterusnya saat waktu tunggu (*stand up time*) sebelum dipasang penyangga memberikan hasil deformasi tertinggi pada STA 0+255 sebesar 0.38 m pada dinding C terowongan. Pada STA 0+255 sisi *inlet* dengan nilai *SF* sebesar 2.64 pada pemodelan. Pemodelan ini terkonfirmasi dengan perhitungan empirik yaitu nilai *SF* sebesar 0.77 pada titik deformasi dinding C.

Kata kunci: Bendungan meninting, *Plaxis 8.6*, Terowongan, *Stand up time*.

ABSTRACT

Meninting Dam was built based on the community's need for water supply for irrigation and is one of the concepts to maintain the status of West Nusa Tenggara Province. There are two tunnels in Meninting Dam, namely the intake and spillway. The construction of a tunnel requires experience and an understanding of the influence of the structure on soil conditions, soil properties, and what problems can occur when construction is completed. Therefore, it is necessary to know the strength of rocks around the Meninting Dam Spillway Tunnel by considering changes in rock parameters.

The method used for data analysis is a numerical method with modeling using Plaxis software version 8.6 full version. The data used are sonar data, geological data, and laboratory test data.

Meninting is built on the basis of medium- to strongly weathered volcanic breccia rock, which has a compressive strength of $\sigma'_{ci} = 1,926$ MPa. This rock mass classification category is included in rock mass IV (bad rock) with an inlet RMR value of 27 and an outlet RMR value of 37. This category specifies a stand-up time of 1 hour to 9 hours at the inlet and 6 hours to 65 hours at the outlet when excavating. Numerical modeling of the stability of the spillway tunnel and so on during the stand-up time before the buffer is installed gives the highest deformation results at STA 0+255 of 0.38 m on the C wall of the tunnel. at STA 0+255 on the inlet side with a SF value of 2.64 in the modeling. This modeling is confirmed by empirical calculations, namely the SF value of 0.77 at the C wall deformation point.

Keywords: *Meninting dam, Plaxis 8.6, Tunnel, Stand up time.*

PENDAHULUAN

LATAR BELAKANG

Bendungan Meninting dibangun berdasarkan kebutuhan masyarakat terhadap kesediaan air untuk irigasi dan merupakan salah satu konsep untuk mempertahankan status Provinsi Nusa Tenggara Barat sebagai salah satu Lumbung Padi Nasional, dan untuk mengatasi bencana kekeringan di Kabupaten Lombok Barat, serta untuk meningkatkan perekonomian pedesaan melalui usaha pertanian dan perdagangan. Secara tektonik, Provinsi NTB merupakan wilayah rawan gempa yaitu berada di sebelah timur Busur Sunda, membentang dari Selat Sunda ke timur hingga Pulau Sumba.

Bendungan adalah bangunan penahan air buatan, jenis urugan atau jenis lainnya untuk menampung air. Sebuah bendungan berfungsi sebagai penangkap air dan menyimpannya di musim hujan, air yang tersimpan umumnya akan digunakan untuk keperluan irigasi, air minum, dan industri. Dengan memiliki daya tampung tersebut, sejumlah besar air sungai yang melebihi kebutuhan dapat disimpan dalam waduk dan akan dilepas kembali mengalir ke dalam hilir sungai sesuai dengan kebutuhan pada saat diperlukan. Menurut *International Commission On Large Dams* (dalam Soedibyo, 2003), bendungan urugan ialah bendungan yang dibangun dari hasil suatu kegiatan penggalian material tanpa adanya tambahan bahan lain yang bersifat campuran secara kimia. Bendungan urugan memiliki alas yang luas sehingga beban yang didukung oleh pondasi bendungan persatuan unit kecil. Beban utama dari tubuh bendungan yaitu berat sendiri dari tubuh bendungan tersebut dan tekanan hidrostatik dari air tampungan bendungan.

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya, dan mempunyai gradien memanjang kurang dari 15%. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkungan luar. Beberapa ahli teknik sipil mendefinisikan terowongan sebagai sebuah tembusan di bawah permukaan yang memiliki panjang minimal 0,1 mil (160,9 meter), dan yang lebih pendek dari itu dinamakan *underpass* (Rahardjo, 2004).

Salah satu dari banyak proyek konstruksi yang ada di Pulau Lombok adalah Bendungan Meninting. Pada Bendungan Meninting terdapat dua terowongan yaitu *intake* dan pelimpah. Pembangunan suatu terowongan memerlukan pengalaman serta pemahaman tentang pengaruh struktur terhadap kondisi tanah, sifat-sifat tanah dan masalah apa saja yang dapat terjadi saat konstruksi selesai dibangun. Hal ini perlu dilakukan untuk menghindari terjadinya kegagalan konstruksi pada pembangunan terowongan.

Dari uraian di atas, untuk mengetahui kekuatan batuan di sekitar terowongan Pengelak-Pelimpah Bendungan Meninting akibat gempa bumi dengan mempertimbangkan perubahan parameter batuan, maka perlu digunakan analisa kestabilan menggunakan pemodelan numerik berupa *Software Plaxis V.8.6* dengan judul penelitian "***Pemodelan Numerik Kestabilan Terowongan Pengelak-Pelimpah Bendungan Meninting di Kabupaten Lombok Barat***".

RUMUSAN MASALAH

Bendungan Meninting memiliki terowongan yang merupakan salah satu bangunan dengan fungsi sebagai saluran pengelak-pelimpah. Terowongan

Bendungan Meninting nantinya akan difungsikan untuk mengalirkan air ke daerah pertanian dan perkebunan seluas 1559,2 Ha. Terowongan Bendungan Meninting pada saat perencanaan memenuhi standar perencanaan terhadap beban gempa terbaru. Ketika gaya gempa bekerja pada batuan, maka batuan tersebut berada dalam kondisi geser dinamis. Dimana, kuat geser dinamis akan mengalami penurunan dari kuat geser statis setelah terjadinya *blasting* atau galian. Waktu tunggu (*Stand Up Time*) pada saat galian memiliki pengaruh besar terhadap ketahanan struktur terowongan tersebut. Sehingga perlu adanya analisis pemodelan numerik terowongan agar mengetahui seberapa kuat dan seberapa lama ketahanan struktur terowongan setelah galian menuju galian selanjutnya.

TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui besar pengaruh waktu tunggu (*Stand Up Time*) pada ketahanan struktur batuan dan stabilitas di sekitar Terowongan yang disebabkan oleh galian yang dilakukan.
2. Memodelkan terowongan dengan metode numerik menggunakan *software Plaxis V.8.6*.
3. Mengetahui besar nilai *safety factor* dari terowongan setelah mengidentifikasi waktu tunggu (*Stand Up Time*).

DASAR TEORI

TINJAUAN PUSTAKA

Alfredo (2017), dalam tugas akhirnya melakukan studi perilaku terowongan bor dibawah fondasi tiang rakit menggunakan *Plaxis 8.6*. Dari hasil analisis yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa semakin dekat terowongan bor dibangun

terhadap struktur *existing*, semakin besar dampak yang dihasilkan terhadap struktur *existing* maupun terowongan tersebut.

Amalia (2016), melakukan penelitian mengenai metode kriteria runtuh Hoek & Brown dalam menentukan faktor keamanan pada analisa kestabilan lereng di *Loop.2* PT. Kaltim Batu Manunggal, Kalimantan Timur. Dari hasil analisis kestabilan lereng didapat geometri lereng untuk lereng keseluruhan *Loop 2* adalah dengan tinggi jenjang yaitu 42 m. lebar jenjang yaitu 5 m , dan sudut kemiringan 35°.

Prabawa (2020), melakukan penelitian yang bertujuan untuk menggariskan hubungan parameter fisik batuan dengan radius runtuh atap terowongan menggunakan metode numerik dan membandingkan hasil metode numerik dengan analitik. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan signifikan pada *RMR* 50,70, dan 90 , sedangkan *RMR* 10 dan 30 menghasilkan nilai yang berbeda. Radius runtuh juga memperlihatkan *trend* serupa : *RMR* 50-70-90 menghasilkan nilai yang mendeteksi satu sama lain sedangkan *RMR* 10-30 jauh.

Nurmaya (2017), melakukan analisis pengaruh penyangga pada deformasi terowongan di batuan lemah pada pembangunan *double* terowongan jalur tol Cisumdawu (Cileunyi – Sumedang – Dawuan), Jawa Barat. Dari hasil perhitungan didapatkan besarnya deformasi terkecil pada pembuatan terowongan untuk dengan penyangga *steel rib* sebesar 2.1826 mm dan *shotcrete* 2.1219 mm dan nilai deformasi terbesar untuk *steel rib* sebesar 2.1219 mm dan *shotcrete* 159.3114 mm. Untuk nilai zona plastis terkecil dari terowongan dengan penyangga *steel rib* 4.5051 mm dan *shotcrete* 4.4729 mm, untuk nilai zona plastis terbesar dari

penyangga *steel rib* 113.5986 mm dan *shotcrete* 111.9032 mm.

Darmawan (2018), melakukan analisis perilaku terowongan sirkular akibat beban gempa dengan pemodelan elemen hingga pada terowongan MRT Jakarta dari Stasiun Istora sampai Stasiun Bendungan Hilir. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa hasil rata-rata kenaikan deformasi *lining* terowongan sebesar 3,03 mm (17,68 %), gaya aksial sebesar 207, 97 Kn (9,24 %), momen lentur sebesar 22,95 kNm (18,57 %) dan penurunan permukaan tanah sebesar 3,95 mm (25,32 %). Untuk penurunan pada permukaan tanah ditinjau secara horizontal. Nilai angka aman rata-rata dari analisis stabilitas terowongan sebesar 4,6. Sehingga kekuatan batas struktur terowongan yang dapat diterima akibat beban gempa yaitu pada PGA 550 cm/detik² dan masih dalam keadaan stabil. Semakin dalam air tanah dari permukaan tanah, semakin besar dampak yang dihasilkan terhadap struktur terowongan tersebut.

Nugraha (2018), melakukan penelitian tentang analisis *stand up time* menggunakan metode *rock mass rating* dan faktor keamanan. Hasil analisis grafik *stand up time* batubara memiliki nilai *RMR* 55 dengan *stand up time* selama 700 jam atau 4 minggu lebih 1 jam dengan span 6,2 m . Batu lanau memiliki *RMR* 67 dengan *stand up time* selama 6500 jam atau 9 bulan dengan span 8,4 m , dan dari pengolahan data yang dilakukan faktor keamanan lubang tambang BMK 14 termasuk dalam kategori aman karena memiliki nilai faktor keamanan > 1. Berdasarkan nilai *RMR* dan parameter-parameter yang diolah menggunakan *software phase2* maka dapat disimpulkan bahwa dengan *stand up time* selama 6500 jam atau 9 bulan dengan span

8,4, serta nilai faktor keamanan sebesar 1,30 dapat dikategorikan aman.

LANDASAN TEORI

Terowongan

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya, dan mempunyai gradien memanjang kurang dari 15%. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkungan luar.

Klasifikasi Terowongan

Terowongan dapat diklasifikasikan berdasarkan kondisi material di lapangan, kegunaan dan lokasi.

1. Terowongan Berdasarkan Material Lapangan
 - a. Terowongan Batuan (*Rock Tunnel*)
 - b. Terowongan melalui tanah lunak (*Soft Ground Tunnel*)
 - c. Terowongan gali-timbun (*Cut and Cover Tunnel*)
2. Terowongan Berdasarkan Kegunaan
 - a. Terowongan Lalu-Lintas (*Traffic Tunnel*)
 - b. Terowongan Angkutan
3. Terowongan Berdasarkan Lokasi
 - a. Terowongan pegunungan (*Mountain tunnels*)
 - b. Terowongan bawah air (*Underwater tunnels*)
 - c. Terowongan bawah tanah perkotaan (*Tunnels at shallow depth and water city streets*)
4. Terowongan Berdasarkan Bentuknya
 - a. Terowongan Lingkaran
 - b. Terowongan persegi
 - c. Terowongan Tapal Kuda
 - d. Terowongan Berbentuk Huruf D
 - e. Terowongan Bentuk Telur
5. Metode Konstruksi Terowongan
 - a. *Tunnel bore machine (TBM)*

- b. *Earth Pressure balance shield machine (EPB)*
- c. *New austrian tunneling method (NATM)*

Rock Mass Rating (RMR)

Rock mass rating (RMR) atau dikenal juga dengan *geomechanics classification* merupakan sistem yang awalnya dikembangkan di *South African Council of Scientific and Industrial Research (CSIR)* oleh Bieniawski (1973). Metode klasifikasi *RMR* merupakan metode yang sederhana dalam penggunaannya, dan parameter-parameter yang digunakan dalam metode ini dapat diperoleh baik dari data lubang bor maupun dari pemetaan struktur bawah tanah.

Kuat tekan batuan utuh

Kekuatan batuan harus diperoleh dari batuan sesuai dengan kondisi lokasi. Pada perhitungan nilai *RMR*, parameter kekuatan batuan utuh ditentukan berdasarkan nilai *Uniaxial Compressive Strength (UCS)* atau nilai *Point Load Index*

(*PLI*) dari material batuan seperti yang tertera pada **Tabel 1**.

➤ **Rock Quality Designation (RQD)**

RQD harus ditentukan dari inti batuan atau jumlah sambungan volumetrik. Pada perhitungan nilai *RMR*, parameter *Rock Quality Designation (RQD)* diberi nilai seperti tertera pada **Tabel 1**.

➤ **Spasi bidang diskontinuitas (joint or discontinuity spacing)**

Pada perhitungan nilai *RMR*, parameter spasi bidang diskontinuitas diberi bobot berdasarkan nilai spasi kekarnya seperti tertera pada **Tabel 1**.

➤ **Kondisi Bidang Diskontinuitas (joint condition)**

Pemberian bobot kondisi kekar (*condition of discontinuities*) dapat dilihat pada **Tabel 1**.

➤ **Kondisi air tanah (groundwater condition)**

Pada perhitungan nilai *RMR*, parameter kondisi air tanah (*ground water conditions*) diberi bobot berdasarkan **Tabel 1**.

Tabel 1. RMR System

| PARAMETER | | KISARAN NILAI | | | | | | | |
|-----------|----------------------------------|---|---|--|--|---|---|------|-----|
| 1 | Keteguhan Material Batuan Intact | $I_{s(50)}$ | >8 | 4-8 | 2-4 | 1-2 | Untuk kisaran nilai rendah ini, pengujian UCS diutamakan | | |
| | | UCS (MPa) | >200 | 100-200 | 50-100 | 25-50 | 10-25 | 3-10 | 1-3 |
| | Rating | | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 2 | RQD (%) | | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 | | |
| | Rating | | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| 3 | Spasi Bidang Retakan (m) | | >3 | 1-3 | 0.3-1 | 0.05-0.3 | <0.05 | | |
| | Rating | | 30 | 25 | 20 | 15 | 5 | | |
| 4 | Kondisi Bidang Retakan | | Permukaan sangat kasar, tidak menerus, tidak ada pemisahan, dinding permukaan keras | Permukaan sedikit kasar, terpisah <1 mm, dinding permukaan lunak | Permukaan sedikit kasar, terpisah <1 mm, dinding permukaan lunak | Gores garis atau pengisi tebal <5 mm atau retakan terbuka 1-5 mm, retakan menerus | Material pengisi lunak tebal >5 mm, atau retakan terbuka >5 mm, retakan menerus | | |
| | Rating | | 25 | 20 | 12 | 6 | 0 | | |
| 5 | Air Tanah | Laju aliran per 10 m panjang terowongan | None | <25 lt/mnt | 25-125 lt/mnt | >125 lt/mnt | | | |
| | | Rasio | Tekanan air pada retakan/tegangan utama terbesar | 0.0-0.2 | 0.2-0.5 | >0.5 | | | |
| | | Kondisi umum | Kering total | Lembab (air permukaan) | Air dengan tekanan sedang | Masalah air tinggi | | | |
| | | Rating | | 10 | 7 | 4 | 0 | | |

Deformasi

Software *Matrix Laboratory* atau biasa disebut *MATLAB* merupakan suatu

software yang digunakan untuk melakukan perhitungan matematik, analisis data, mengembangkan algoritma, melakukan

simulasi dan pemodelan, serta menyajikannya dalam bentuk grafis. Di dalam MATLAB terdapat aplikasi bawaan yang bernama ZMAP versi 6. ZMAP merupakan software yang digunakan dalam penelitian ini untuk menghitung *a-value* dan *b-value* dengan menggunakan data gempa sehingga hal tersebut dapat memudahkan para pengguna aplikasi tersebut.

Faktor Aman

Faktor aman menurut Mohr-Coloumb menyatakan perbandingan keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut, dapat dirumuskan sebagai berikut (Yunita,2016) :

$$SF : \frac{\text{kekuatan batuan}}{\text{tegangan yang bekerja}}$$

Geological Strength Index (GSI)

Nilai *GSI* diperoleh dari hasil deskripsi geologi dengan berdasarkan struktur dan kondisi permukaan struktur. Nilai *GSI* dapat juga di dekati dari nilai *Rock Mass Rating (RMR)* yang diperoleh dari klasifikasi massa batuan menurut Bieniawski (1989) dengan persamaan :

$$GSI = RMR - 5$$

Kriteria Keruntuhan Batuan

Kriteria keruntuhan batuan adalah kriteria yang digunakan untuk memperkirakan kekuatan batuan. Ekspresi dari kriteria ini mengandung satu atau lebih parameter sifat mekanik dari batuan. Parameter sifat mekanik batuan ini menjadi sederhana apabila dihitung dalam dua dimensi dengan asumsi regangan bidang (*plane strain*) atau tegangan bidang (*plane stress*).

Tegangan pada Terowongan

Tegangan awal pada terowongan terdiri dari tegangan vertikal dan tegangan

horizontal. Tegangan vertikal pada penampang tanah/batuan merupakan fungsi kedalaman. Dengan mengetahui tegangan vertikal pada suatu titik, dapat dihitung tegangan horizontal titik tersebut melalui hubungan rasio *Poisson*. Hubungan tegangan ini dirumuskan dengan, (Hardiman, 2007).

$$\sigma_v = \gamma \cdot h$$

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v$$

Stand-up Time

Menurut Schuerch (2016), *stand-up time* adalah jarak waktu antara penggalian selesai sampai dengan terjadinya keruntuhan. Menurut Hoek dan Brown (1980), *unsupported span/active span* didefinisikan sebagai bagian terowongan yang tidak disangga atau jarak antara muka terowongan dan penyangga terdekat jika jaraknya lebih besar dari lebar terowongan. Sedangkan, *stand-up time* didefinisikan sebagai jarak waktu dimana galian *active span* dapat bertahan tanpa penyangga.

Metode Shear Strength Reduction

Metode *Shear Strength Reduction* atau biasa disebut *phi-c reduction* merupakan suatu metode yang dimanfaatkan untuk menentukan suatu nilai *safety factor* dengan pendekatan elemen hingga. Metode *phi-c reduction* juga berfungsi untuk menghitung bidang keruntuhan. Rumus dari metode ini dapat dilihat sebagai berikut :

$$SF = \frac{c}{c \text{ reduce}} = \frac{\tan \phi}{\tan (\phi \text{ reduction})}$$

Metode Elemen Hingga (FEM)

Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial

yang seringkali digunakan sebagai model permasalahan *engineering*.

Penggunaan Perangkat Lunak *Plaxis 2 Dimensi Versi 8.6*

Plaxis adalah paket program elemen hingga yang secara khusus digunakan untuk menganalisis deformasi dan penurunan bidang geoteknik.

Parameter *Mohr-Coulomb* dalam *Plaxis*

Parameter yang digunakan pada model *Mohr Coulomb* adalah sebagai berikut :

1. *Modulus Young* (E)
2. *Poisson Ratio* (ν)
3. Berat volume tanah (γ)
4. Kohesi (c)
5. Sudut geser (ϕ)
6. Permeabilitas (k)

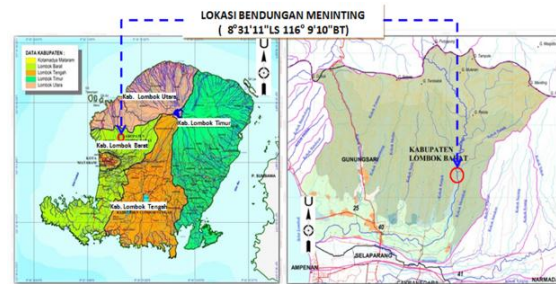
METODOLOGI PENELITIAN

Metode Penelitian

Metode yang digunakan untuk analisis data adalah metode numerik dengan pemodelan menggunakan *software Plaxis versi 8.6 full version* dengan data yang digunakan adalah data sondir, data geologi, dan data hasil pengujian laboratorium.

Lokasi Penelitian

Lokasi Penelitian adalah di Bendungan Meninting, Desa Bukit Tinggi Kecamatan Gunung Sari dan Desa Gegerung Kecamatan Lingsar, Kabupaten Lombok Barat.



Gambar 1. Peta Lokasi Bendungan Meninting (Sumber: PT. Indra Karya, 2018)

Prosedur Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kasus yang menggunakan metode numerik dengan *software Plaxis V.8.6*. Tahapan penelitian yang dilakukan adalah pengumpulan literatur-literatur dan referensi yang menjadi landasan teori yang dapat memberikan gambaran dalam langkah-langkah yang akan diambil dalam studi. Pengambilan data dari instansi ataupun pihak-pihak yang mendukung dalam mencapai tujuan studi.

Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahapan pengumpulan informasi-informasi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan topik penelitian sehingga dapat menunjang penelitian ini. Adapun literatur yang dimaksud adalah seperti:

- Literatur berupa buku elektronik.
- Laporan penelitian dengan topik yang sama.

Pengumpulan Data

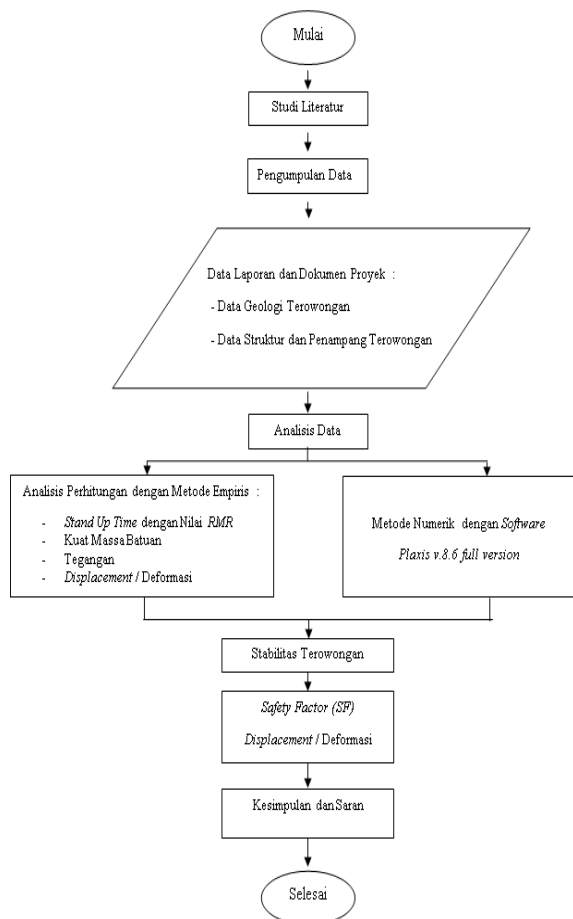
Data yang diperlukan untuk penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder adalah data-data yang diperoleh dari instansi terkait untuk mendukung penelitian. Data sekunder yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain adalah

literatur dari instansi terkait yaitu PT. Indra Karya dan Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara 1 yaitu peta, data gambar, data batuan, grafik dan tabel yang berkaitan dengan proses penelitian.

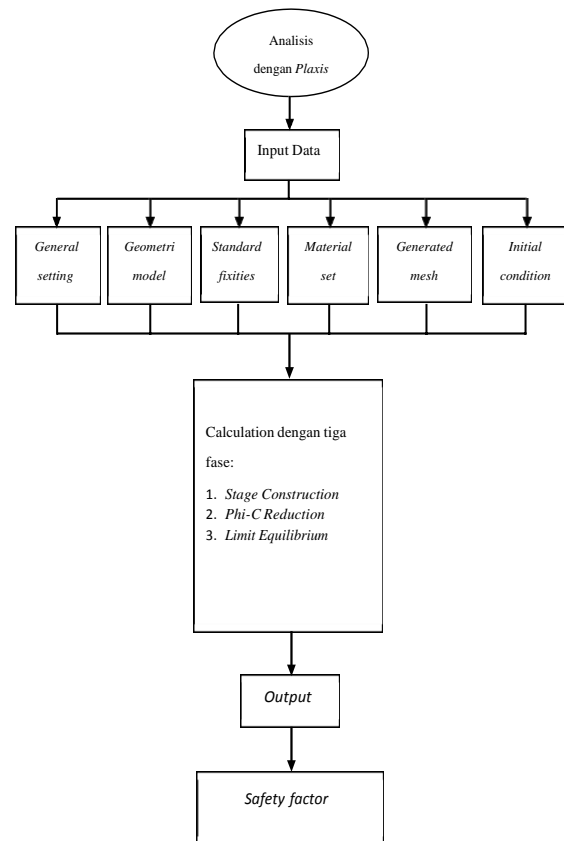
Analisis Data

Analisis data dilakukan setelah data-data yang dibutuhkan terkumpul. Selanjutnya diidentifikasi, sehingga diperoleh pemecahan masalah yang efektif dan terarah. Adapun analisis yang akan dilakukan adalah dengan pemodelan menggunakan *software Plaxis versi 8.6*.

Bagan Alir Penelitian



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian



Gambar 3. Bagan Alir Penelitian dengan *Software Plaxis 8.6*.

HASIL DAN PEMBAHASAN Menentukan Stand Up Time Terowongan

Adapun nilai *stand-up time* adalah sebagai berikut:

- a. Untuk massa batuan pada STA 0+255 sisi *inlet*, didapat nilai *RMR* sebesar 27 untuk jenis batuan breksi vulkanik. Dari plot nilai *RMR* ke grafik *stand-up time* didapatkan hasil *stand-up time* yaitu kurang lebih 1,5 jam dengan span tanpa penyangga yaitu 2,5 m.
- b. Untuk massa batuan pada STA +623 sisi *oulet*, didapat nilai *RMR* sebesar 37 untuk jenis batuan breksi vulkanik. Dari plot nilai *RMR* ke grafik *stand-up time* didapatkan hasil *stand-up time* yaitu kurang lebih 28 jam dengan *span* tanpa penyangga yaitu 2,5 m.

Analisis Kuat Massa Batuan

Analisis kuat massa batuan sisi *inlet* dan *outlet* pada terowongan Meninting pada titik A, titik B dan dinding C dapat dilihat pada **Tabel 2** hingga **Tabel 3**.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kuat Massa Batuan Sisi *Inlet* Metode Coulumb

| Parameter | Titik A | Titik B | Titik C | Titik D | Titik E |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Batuan | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik |
| γ (MN/m ³) | 0.0210 | 0.0210 | 0.0210 | 0.0210 | 0.0210 |
| H (m) | 12.8000 | 13.5600 | 15.4000 | 17.2400 | 18.0000 |
| k | 0.2710 | 0.2710 | 0.2710 | 0.2710 | 0.2710 |
| σ_{ci} (Mpa) | 1.93 | 1.93 | 1.93 | 1.93 | 1.93 |
| σ_3 (Mpa) | 0.0728 | 0.0772 | 0.0876 | 0.0981 | 0.1024 |
| ϕ | 35.0000 | 35.0000 | 35.0000 | 35.0000 | 35.0000 |
| $\cos \phi$ | 0.8192 | 0.8192 | 0.8192 | 0.8192 | 0.8192 |
| $\sin \phi$ | 0.5736 | 0.5736 | 0.5736 | 0.5736 | 0.5736 |
| c (Mpa) | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| σ_{cm} (Mpa) | 0.0384 | 0.0384 | 0.0384 | 0.0384 | 0.0384 |
| M | 3.69 | 3.69 | 3.69 | 3.69 | 3.69 |
| mi | 19.0000 | 19.0000 | 19.0000 | 19.0000 | 19.0000 |
| RMR | 27.0000 | 27.0000 | 27.0000 | 27.0000 | 27.0000 |
| GSI | 22.0000 | 22.0000 | 22.0000 | 22.0000 | 22.0000 |
| mb | 0.1830 | 0.1830 | 0.1830 | 0.1830 | 0.1830 |
| s | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| a | 0.5382 | 0.5382 | 0.5382 | 0.5382 | 0.5382 |
| σ_1 (Mpa) | 0.31 | 0.32 | 0.36 | 0.40 | 0.42 |

Tabel 3. Hasil Perhitungan Kuat Massa Batuan Sisi *Outlet* Metode Coulumb

| Parameter | Titik A | Titik B | Titik C | Titik D | Titik E |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Batuan | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik | Breksi Vulkanik |
| γ (MN/m ³) | 0.0210 | 0.0210 | 0.0210 | 0.0210 | 0.0210 |
| H (m) | 20.0450 | 21.4200 | 24.7450 | 28.0700 | 29.4450 |
| k | 0.2710 | 0.2710 | 0.2710 | 0.2710 | 0.2710 |
| σ_{ci} (Mpa) | 1.93 | 1.93 | 1.93 | 1.93 | 1.93 |
| σ_3 (Mpa) | 0.1141 | 0.1219 | 0.1408 | 0.1597 | 0.1676 |
| ϕ | 35.0000 | 35.0000 | 35.0000 | 35.0000 | 35.0000 |
| $\cos \phi$ | 0.8192 | 0.8192 | 0.8192 | 0.8192 | 0.8192 |
| $\sin \phi$ | 0.5736 | 0.5736 | 0.5736 | 0.5736 | 0.5736 |
| c (Mpa) | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 | 0.0100 |
| σ_{cm} (Mpa) | 0.0384 | 0.0384 | 0.0384 | 0.0384 | 0.0384 |
| M | 3.69 | 3.69 | 3.69 | 3.69 | 3.69 |
| mi | 19.0000 | 19.0000 | 19.0000 | 19.0000 | 19.0000 |
| RMR | 37.0000 | 37.0000 | 37.0000 | 37.0000 | 37.0000 |
| GSI | 32.0000 | 32.0000 | 32.0000 | 32.0000 | 32.0000 |
| mb | 0.3318 | 0.3318 | 0.3318 | 0.3318 | 0.3318 |
| s | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| a | 0.5195 | 0.5195 | 0.5195 | 0.5195 | 0.5195 |
| σ_1 (Mpa) | 0.46 | 0.49 | 0.56 | 0.63 | 0.66 |

Tegangan Pada Bagian-Bagian Terowongan

Analisis tegangan disekitar terowongan akibat penggalian batuan dapat menggunakan persamaan *Kirsch* pada titik tinjau dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Rangkuman Perhitungan Tegangan Sisi *Inlet*

| Parameter | Atap A | Atap B | Dinding C |
|--|--------|--------|-----------|
| Tegangan Radial, σ_{rr} (Mpa) | 0.077 | 0.101 | 0.136 |
| Tegangan Tangensial, $\sigma_{\theta\theta}$ (Mpa) | 0.091 | 0.261 | 0.485 |
| Tegangan Geser, $\sigma_{r\theta}$ (Mpa) | 0.000 | -0.135 | 0.000 |

Tabel 5. Hasil Rangkuman Perhitungan Tegangan Sisi *Outlet*

| Parameter | Atap A | Atap B | Dinding C |
|--|--------|--------|-----------|
| Tegangan Radial, σ_{rr} (Mpa) | 0.120 | 0.159 | 0.219 |
| Tegangan Tangensial, $\sigma_{\theta\theta}$ (Mpa) | 0.142 | 0.413 | 0.779 |
| Tegangan Geser, $\sigma_{r\theta}$ (Mpa) | 0.000 | -0.213 | 0.000 |

Faktor Aman (SF)

Nilai *SF* untuk terowongan Meninting terhadap kekuatan massa batuan dan tegangan-tegangan yang terjadi adalah:

Tabel 6. Nilai Faktor Aman Sisi *Inlet* Terowongan

| Bagian Terowongan | Nilai Faktor Aman | | |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| | SF/ σ_{rr} | SF/ $\sigma_{\theta\theta}$ | SF/ $\sigma_{r\theta}$ |
| Titik A | 4.00 | 3.39 | 0 |
| Titik B | 3.21 | 1.24 | 0 |
| Dinding C | 2.66 | 0.75 | 0 |

Tabel 7. Nilai Faktor Aman Sisi *Outlet* Terowongan

| Bagian Terowongan | Nilai Faktor Aman | | |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| | SF/ σ_{rr} | SF/ $\sigma_{\theta\theta}$ | SF/ $\sigma_{r\theta}$ |
| Titik A | 3.82 | 3.23 | 0 |
| Titik B | 3.07 | 1.18 | 0 |
| Dinding C | 2.55 | 0.72 | 0 |

Metode Numerik Dengan Melakukan Pemodelan Analisis *Plaxis 8.6* Pada Terowongan Meninting

Perilaku batuan yang menerima beban dapat dianalisis dengan menggunakan konsep dari metode elemen hingga. Salah satu alat bantu untuk memudahkan perhitungan dengan metode elemen hingga yaitu program *Plaxis*. Analisis secara numerik dengan *Plaxis* dapat menghitung besarnya perpindahan dan distribusi tegangan-regangan pada lapisan batuan. Pada penelitian ini,

digunakan model kondisi terowongan tanpa ada beban gempa dengan 2 jenis batuan yaitu breksi vulkanik dan breksi lapuk sedang Model 83 Mohr-Coulomb

merupakan suatu konstuti model yang digunakan untuk menganalisa perilaku batuan akibat beban yang bekerja.

Pembahasan

Tabel 8. Rangkuman Hail Perhitungan

| Parameter | | | Dinding C | Dinding C |
|---|-------|-------|-----------|-----------|
| kedalaman, h (m) | | | 20.60 | 24.75 |
| RMR | | | | |
| stand-up time (jam) | | | | |
| GSI | | | | |
| σ'_{ci} (MPa) | | | | |
| m_i | | | | |
| Disturbance factor (D) | | | | |
| m_b | | | | |
| s | | | | |
| a | | | | |
| σ'_{cm} (MPa) | | | | |
| σ'_{3max} (MPa) | 0.238 | | | 0.275 |
| σ'_{3n} (MPa) | 0.124 | | | |
| c (MPa) | 0.022 | 0.022 | | |
| | | | | |
| | | | | |
| τ (MPa) | 0.126 | 0.139 | 0.170 | 0.200 |
| σ_{rr} (MPa) | 0.120 | 0.183 | 0.070 | 0.124 |
| $\sigma_{\theta\theta}$ (MPa) | 0.336 | 0.564 | 0.317 | 0.549 |
| $\tau_{r\theta}$ (MPa) | 0.000 | 0.074 | 0.000 | 0.000 |
| SF ($\sigma'1/\sigma_{rr}$) | 4.06 | 2.84 | 4.03 | 5.48 |
| SF ($\sigma'1/\sigma_{\theta\theta}$) | 1.45 | 0.92 | | 1.24 |
| SF ($\tau/\tau_{r\theta}$) | 0.00 | 1.00 | | 0.00 |

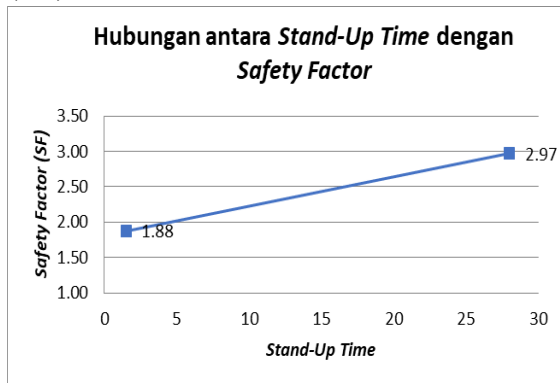
Pada tabel diatas, dapat dilihat bahwa angka keamanan (SF) terhadap tegangan geser ($\tau_{r\theta}$) pada setiap lokasi stasiun terowongan $SF > 1$ dengan SF terbesar berada pada STA 0+623 dan SF terkecil berada pada STA 0+255. Nilai SF ini dipengaruhi oleh besarnya nilai kuat geser massa batuan (τ) dan tegangan geser ($\tau_{r\theta}$).

Pada STA 0+255 nilai kuat geser massa batuan (τ) memiliki nilai kecil dikarenakan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) memiliki nilai paling kecil

dibandingkan dengan stasiun lainnya, yang mana dipengaruhi oleh besar nilai RMR .

Sedangkan nilai tegangan geser ($\tau_{r\theta}$) pada STA 0+255 memiliki nilai paling besar dibandingkan tegangan geser ($\tau_{r\theta}$) pada stasiun lainnya. Besarnya nilai tegangan geser ($\tau_{r\theta}$) ini sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai tegangan utama minor ($\sigma'3$). Semakin besar nilai $\sigma'3$, maka tegangan geser ($\tau_{r\theta}$) akan semakin besar. Tegangan utama minor ($\sigma'3$) dipengaruhi oleh besarnya sudut geser dalam (ϕ), dimana semakin besar sudut geser dalam (ϕ) maka tegangan utama minor ($\sigma'3$) akan

semakin kecil. Dapat dilihat pada **Tabel 8.** diatas, pada STA 0+255, sudut geser dalam (ϕ) memiliki nilai paling kecil dibandingkan stasiun lainnya dikarenakan nilai *RMR* pada stasiun tersebut kecil. Dengan nilai sudut geser dalam (ϕ) yang kecil, maka tegangan utama minor (σ_3) pada STA 0+255 memiliki nilai paling besar. Dengan nilai tegangan utama minor (σ_3) yang besar, maka tegangan geser (τ) akan besar pula. Sehingga pada STA 0+255 memiliki angka keamanan (*SF*) lebih kecil kecil dibandingkan STA 0+623 dikarenakan nilai kuat geser massa batuan (τ) lebih kecil sedangkan tegangan geser (τ) lebih besar.



Gambar 4. Grafik Hubungan *Stand Up Time* dengan *Safety Factor (SF)*

Berdasarkan **Gambar 4.** diatas, dapat dilihat bahwa nilai stand-up time cenderung meningkat seiring meningkatnya angka keamanan (*SF*),

dimana pada grafik tersebut merupakan angka keamanan terhadap tegangan geser. Angka keamanan (*SF*) sangat dipengaruhi oleh kuat geser massa batuan dan tegangan yang bekerja.

Pada **Tabel 8.** dapat dilihat bahwa nilai *RMR* pada STA 0+255 dan STA 0+623 kecil, terlebih pada STA 0+255 yaitu sebesar 27. Pada lampiran V-9 dapat dilihat juga bahwa menunjukkan material pada STA0+255 termasuk material batuan jelek. Kemudian dari hasil analisa *stand up time* menunjukkan hubungan nilai *RMR* dan *stand up time* berpengaruh yang menyebabkan nilai keamanan atau *safety factor (SF)* terowongan sebelum dipasang penyangga menjadi kecil, tegangan di sekitar terowongan juga semakin besar. Dengan hasil nilai tegangan yang besar cenderung mengakibatkan terowongan menjadi tidak stabil. Dapat dilihat juga pada **Tabel 9.** nilai *safety factor (SF)* dengan pemodelan numerik bernilai kecil karena tegangan pada sisi-sisi terowongan cukup besar berkisar $373 \text{ kN/m}^2 - 724.7 \text{ kN/m}^2$. Nilai *safety factor (SF)* menjadi kecil dan deformasi pada terowongan menjadi besar.

Tabel 9. Rangkuman Hasil *Plaxis 8.6*

| Parameter | Breksi Vulkanik | | Lapuk Sedang | |
|-------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | STA 0+255 Inlet | STA 0+623 Outlet | STA 0+255 Inlet | STA 0+623 Outlet |
| Deformasi Horizontal, (cm) | 0.9 | 3.6 | 2.4 | 3.2 |
| Deformasi Vertikal, (cm) | 0.8 | 2.1 | 1.2 | 1.8 |
| Deformasi Total, (cm) | 1.0 | 3.8 | 2.4 | 3.3 |
| Tegangan Total (kN/m ²) | 59.31 | 119.73 | 66.51 | 122.05 |
| SF | 20.22 | 8.272 | 17.257 | 8.932 |

Pada tabel diatas, dapat dilihat bahwa angka keamanan (*SF*) pada setiap stasiun berbeda karena parameter material yang dipakai juga berbeda, diameter terowongan berpengaruh dalam penentuan nilai *SF* pada *software plaxis 8.6* tersebut.

PENUTUP

Kesimpulan

Meninting terbangun atas dasar batuan breksi vulkanik lapuk sedang hingga kuat yang mempunyai kuat tekan $\sigma'_{ci} = 1.926$ MPa, kategori klasifikasi massa batuan ini termasuk ke dalam massa batuan IV (batuan jelek) dengan nilai *RMR inlet* 27 dan nilai *RMR outlet* 37. Kategori ini memberikan waktu tunggu (*stand up time*) saat galian 1 jam – 9 jam inlet dan 6 jam – 65 jam outlet. Pemodelan numerik terhadap kestabilan terowongan pengelak-pelimpah dan seterusnya saat waktu tunggu (*stand up time*) sebelum dipasang penyangga memberikan hasil deformasi tertinggi pada STA 0+623 sisi *outlet* sebesar 3.8 cm pada dinding terowongan. Pada STA 0+623 sisi *outlet* dengan nilai *SF* sebesar 8.272 pada pemodelan. Pemodelan ini terkonfirmasi dengan perhitungan empirik yaitu nilai *SF* sebesar 0.75 pada titik deformasi dinding . Dengan demikian terowongan meninting mempunyai kestabilan rendah berkisar 0.75-20.22 dengan waktu tunggu (*stand up time*) < 24 jam, sehingga diperlukan pemasangan penyangga segera mungkin sebelum waktu tunggu (*stand up time*) terlampaui.

Saran

Sehubungan dengan kualitas massa batuan penyangga terowongan termasuk kategori buruk/jelek kelas IV , maka disarankan segera melakukan pemasangan penyangga primer dan dilanjutkan penyangga sekunder.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah1, Nirwal Mahdi. et al. 2017. *Analisis Deformasi Dan Retakan Struktur Terowongan Dengan Pemodelan Pseudoshell*.

- Agustawijaya, D.S., dan Syamsuddin, 2012. *Pengembangan metode analisis risiko bencana :sebuah studi kasus Pulau Lombok*. Dinamika Teknik Sipil No. 2 Vol. 12, P. 146-150.
- Agustawijaya, Didi S. et al. 2018. *Eatrhquake Forces on the Stability of the Meninting Diversion Tunnel Design Based on Cirrent Seismic Conditions of Lombok Island*. Mataram : Geo-Engineering Research Group, Department of Civil Engineering, University of Mataram.
- Agustawijaya, D.S.,2006. *Aspek -Aspek Geologi Teknik dan Kegempaan dalam Analisis Resiko Gempa Bumi*, Orasi Ilmiah dalam Rangka Dies Natalis Universitas Mataram ke-44. Mataram.
- Anonim, 2018, *Modul Praktikum Mekanika Tanah II*, Laboratorium Geoteknik dan Mekanika Tanah, Mataram.
- Alfredo. 2017. *Perilaku terowongan bor di bawah fondasi tiang rakit menggunakan Plaxis 8.6*.
- Amalia, Y., 2016. *Penerapan Metode Kriteria Runtuh Hoek-Brown dalam Menentukan Faktor Keamanan pada Analisis Kestabilan Lereng di Loop 2PT. Kaltim Batu Manunggal Kalimantan Timur*. UPN “Veteran” Yogyakarta, Yogyakarta.
- Balai Wilayah Sungai (BWS), 2017. *Sertifikasi Disain Bendungan Meninting di Kabupaten Lombok Barat. Laporan Utama*. Satuan Kerja Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I (in Indonesian).
- Balasubramanian, 2017. *Studi Karakteristik Deformasi Terowongan*, Unpar.

- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*, Pennsylvania State University, USA.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T., 1993. *Rock Mechanics for Underground Mining*, 2nd Edition, Chapman and Hall, London, 571pp.
- Brady B.H.G dan Brown E.T. 2005. *Rock Mechanics for Underground Mining*.
- Brady, B.H.G. and Brown, E. T. *Rock Mechanics for Underground Mining*, Chapman and Hall, London, 1993.
- Brinkgreve, R. B. J. Et al. 2007. *PLAXIS 2D-Versi 8*. Delft University of Technology and Plaxis. Belanda.
- Bowles, J.E. 1989. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Erlangga. Jakarta.
- Darmawan. 2018. *Perilaku terowongan sirkular akibat beban gempa dengan pemodelan elemen hingga pada terowongan MRT Jakarta dari Stasiun Istora sampai Stasiun Bendungan Hilir*.
- Douglas, Kurt John, 2002, *The Shear Strength of Rock Masses*, The University of New South Wales, Australia.
- Dutch Departement of Public Works and Water Management, 2007, *Plaxis versi 8 Manual Acuan*, Technical University of Delt, Belanda.
- Davis, H, E., 1982, *The Testing of Engineering Materials*, Mc Graw Hill Inc., Auckland.
- Hardiyatmo, H.C., 2006, *Mekanika Tanah I*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hatmoko 2017. *Stabilitas terowongan dengan perkuatan wiremesh dan rockbolt menggunakan metode elemen hingga pada proyek Pembangunan Jalur Gamda Kereta Api Notog, Purwokerto*.
- Hoek, E and Brown, E.T. 1980. *Empirical Strength Criterion for Rock Masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division: Proceedings of American Society of Civil Engineers*, Vol. 106.
- Hoek, E and Marinos, P. 2000. *GSI: Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. Proceeding of the International Conference Geotechnical and Geological Engineering: Melbourne*.
- Hardiman, Iman. 2007. *Analisis Sistem Perkuatan Pada Desain Terowongan Piyungan-Gading*. Tesis Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Harian Tempo, 2020, <https://www.hariantempo.com>
- Ira, Nurmaya Putri . at al. 2017. *Analisis Pengaruh Penyanggaan Pada Deformasi Terowongan Di Batuan Lemah Pada Pembangunan Double Terowongan Jalur Tol Cisumdawu (Cileunyi – Sumedang – Dawuan)*, Jawa Barat.
- Isworo, H., & Pathur, R. A. (2018). *Metode Elemen Hingga*. Universitas Lambung Mangkurat.

- Jaeger, J.C., Cook, N.G., dan Zimmerman, R.W., 2007, *Fundamental of Rock Mechanics.*, Blackwell Publishing, Amerika Serikat.
- Labuz, F.J. dan Zang, A., 2012, *Mohr-Coulomb Failure Criterion*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 975-979
- Labuz, J. F., & Zang, A. (2012). *Mohr-Coulomb failure criterion*. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: *Rock Mech Rock Eng* 45:975–979.
- Nugroho, N. R. A (2016), *Jurnal Geodesi Undip*. Universitas Diponegoro.
- Nugraha, D. P. (2018), *Analisis Stand Up Time Menggunakan Metode Rock Mass Rating Dan Faktor Keamanan Menggunakan Metode Finite Element Di Lubang Tambang CV. Bara Mitra Kencana 14 Kota Sawahlunto*. Sekolah Tinggi Teknologi Industri (STTIND), Padang.
- Putera, Chandra. et al. 2016 *Penggunaan Metode Empirik Sebagai Penentu Penyangga Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila*. PT Indra Karya Pesero. Supervisi Bendungan Beringin Sila. Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara 1. Nusa Tenggara Barat. Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman, 2011, *Desain Spektra Indonesia*, <http://puskim.pu.go.id> Tanggal 9 April 2020 Pukul 20:00 WITA.
- Rahardjo. Paulus P (2004), *Teknik Terowongan*. Bandung: Geotechnical Engineering Center, Parahyangan Catholic University.
- Pelaksana Design & Build, (2018). *Gambar Detail Pelaksanaan (As Built Drawing)*. PT. Indra Karya. Lombok.
- Prabawa, Bima Saddha. 2020. *Analisis Perbedaan Metode Numerik dan Analitik pada Perhitungan Tegangan di Sekitar Terowongan*. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rahmac, Andreanissa Elshinta 2020. *Analisis Tegangan Pada Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila*. Universitas mataram, Mataram.
- Rabcewicz , Sauer (1988), *An Insight into the New Austrian Tunnelling Method*. Jerman University.
- Redaksi, 2020, www.potronews.com.
- Railsystem Tunnel Boring Machine. (2015). Retrieved from Railsystem.
- Sunardi, B., Istikomah, M.U., Sulastri, 2017. *Analisis Seismotektonik dan Periode Ulang Gempa Bumi Wilayah Nusa Tenggara Barat Tahun 1973-2015*, Penelitian Seismik dan Periode Ulang Gempa, NTB.
- Singh, B., dan Goel, R.K., 1999, *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*, Roorke, India.

- Singh, B., dan Goel, R.K., 2011, *Engineering Rock Mass Classification*, Elsevier, Oxford, UK.
- Soedibyo. 2003. *Teknik Bendungan*. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Suhendra, 2015, <https://finance.detik.com>
- SZ Terratech, Salmon Arm. Pack dkk. 2001.
- Truesdell, C. and Noll, W., (2004), *The non-linear field theories of mechanics* : Third edition , Springer, p.48.
- Wardianti, G. 2019. *Analisis Nilai Stand Up Time, Rekomendasi Penggalian Serta Penyangga Menggunakan Metode Rock Mass Rating Di Lubang Produksi D07 Tunnel B PT. Dasrat Sarana Arang Sejati Di Desa Parambahan, Kec. Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat.. Sekolah Tinggi Teknologi Industri (STTIND), Padang.*
- Yunita, Yuyun, 2016 . *Analisis Sistem Penyangga Pada Terowongan Mila Di Rababaka Kompleks Kabupaten Dompu, Universitas Mataram, Mataram.*
- Yarrow, Stephen, 2022. <https://www.visitsydneyaustralia.com>
- Zan, wu (2005). *Deformasi*. Universitas Palangkaraya.