Jurnal Pertambangan dan Lingkungan
Vol. 4, No.2, Desember 2023, pp. 65-75
ISSN 2775-1384

Analisis Kemantapan Penyangga Menggunakan Model Numerik pada Terowongan Endportal PLTA Kerinci Merangin Provinsi Jambi

Busthan Azikin[1]*, Apriadi Saputra[1], Syarifullah Bundang[2]
[1]Departemen Teknik Geologi, Universitas Hasanuddin, Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia
[2]Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Khairun, Ternate, Maluku Utara, Indonesia

* Corresponding author : bazikingeo@gmail.com
Received: Dec 15, 2023; Accepted: Dec 31, 2023.
DOI: doi.org/10.31764/jpl.v4i2.21090

Abstrak. Indonesia memiliki banyak potensi energi terbarukan, seperti tenaga air, panas bumi, biomassa, tenaga bayu dan surya yang bersih dan ramah lingkungan. Salah satu potensi energi baru terbarukan yaitu PLTA Kerinci Merangin yang berada di kabupaten kerinci, provinsi jambi. Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, PLTA ini menggunakan terowongan sebagai jalur air (*waterway*) sepanjang 12 km dengan beda *elevasi* awal terowongan sampai akhir terowongan *End Portal* adalah 400 meter dan ditargetkan akan menghasilkan tenaga listrik berkapasitas 350 MW (4 X 87,5 MW). Permasalahan yang dihadapi dalam konstruksi terowongan adalah potensi ketidakstabilan atap dan dinding terowongan yang akan mengakibatkan runtuhnya terowongan. yang berimbas pada keselamatan pekerja, kerusakan alat, kerusakan sistem penyangga hingga gagalnya beroperasi fungsi konstruksi. Lokasi pengambilan data pada area *End Portal* merupakan batuan slate yang diketahui memiliki struktur foliasi dan terbentuk dari suhu dan tekanan yang rendah. Hal ini yang menjadi tantangan bagi peneliti untuk memperoleh kestabilan pada terowongan. Pada penelitian ini analisis dilakukan menggunakan metode numerik bantuan perangkat lunak Phase2, pemodelan dilakukan dengan menggunakan 4 simulasi yaitu model dengan tanpa penyangga, model dengan penyanggaan actual, model untuk penyanggaan RMR, dan model dengan penyangga Q-System. Hasil pemodelan akan memberikan nilai tegangan yang berkerja pada dinding dan atap terowongan yang kemudian menjadi input untuk menghasilkan faktor keamanan.

Kata Kunci: *Tunnel Support Stability, Model Numerik, End Portal, PLTA Kerinci*

Abstract. *Indonesia has a lot of renewable energy potential, such as water energy, geothermal energy, biomass, wind and solar energy which are clean and environmentally friendly. One of the new renewable energy potentials is the Kerinci Merangin Hydroelectric Power Plant which is located in Kerinci Regency, Jambi Province. Based on studies that have been carried out, this hydroelectric power plant uses a tunnel as a 12 km waterway with a height difference from the start of the tunnel to the end of the End Portal tunnel of 400 meters and is targeted to produce electric power with a capacity of 350 MW (4 X 87.5 MW). The problem faced in tunnel construction is the potential for instability of the tunnel roof and walls which will result in tunnel collapse. which impacts worker safety, equipment damage, support system damage and failure to operate construction functions. The data collection location in the End Portal area is slate rock which is known to have a foliation structure and is formed from low temperatures and pressure. This is a challenge for researchers to obtain stability in the tunnel. In this research assistance, the analysis was carried out using the numerical method of Phase2 software, modeling was carried out using 4 simulations, namely a model with actual supports, a model with actual supports, a model with RMR supports, and a model with Q-System supports. The modeling results will provide stress values acting on the walls and roof of the tunnel which then become input to produce safety factors.*

Keywords**:** *Tunnel Support Stability, Numerical Model, End Portal, PLTA Kerinci*

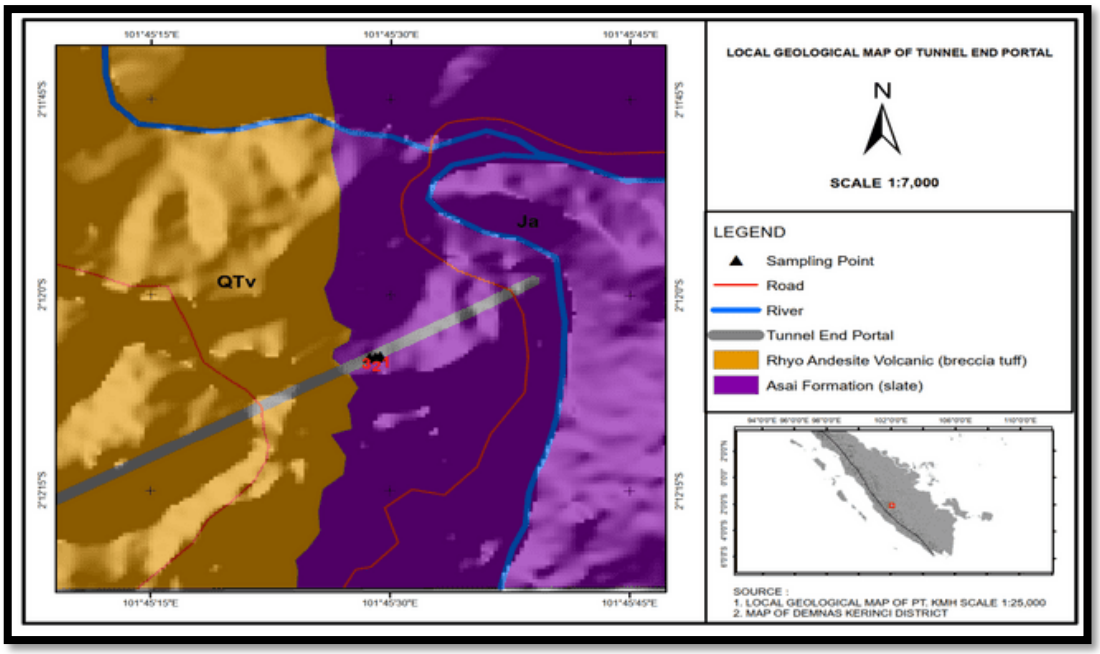
1. Pendahuluan

Indonesia memiliki banyak potensi energi terbarukan, seperti tenaga air, panas bumi, biomassa, tenaga bayu dan tenaga surya yang bersih dan ramah lingkungan (Rahardjo dan Fitriana, 2005). Salah satu potensi energi baru terbarukan yaitu PLTA Kerinci Merangin yang berada di Kabupaten Kerinci, Provinsi Jambi. Menurut Abdullah (2021) Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, PLTA ini menggunakan terowongan sebagai jalur air (*waterway*) sepanjang 12 km dengan beda *elevasi* awal terowongan sampai akhir terowongan *End Portal* adalah 400 meter dan ditargetkan akan menghasilkan tenaga listrik berkapasitas 350 MW (4 X 87,5 MW). Namun, permasalahan yang sering dihadapi dalam konstruksi terowongan adalah potensi ketidakstabilan atap dan dinding terowongan yang akan mengakibatkan runtuhnya terowongan yang berimbas pada keselamatan pekerja, kerusakan alat, kerusakan Sistem penyangga hingga gagalnya beroperasi fungsi konstruksi (Hoek et al, 1998; Koesnaryo, 1998 dalam Lama, 2017). Lokasi pengambilan data pada area *End Portal* merupakan batuan slate yang diketahui memiliki struktur foliasi dan terbentuk dari suhu dan tekanan yang rendah. Hal ini menjadi tantangan bagi peneliti untuk memperoleh kestabilan pada terowongan.

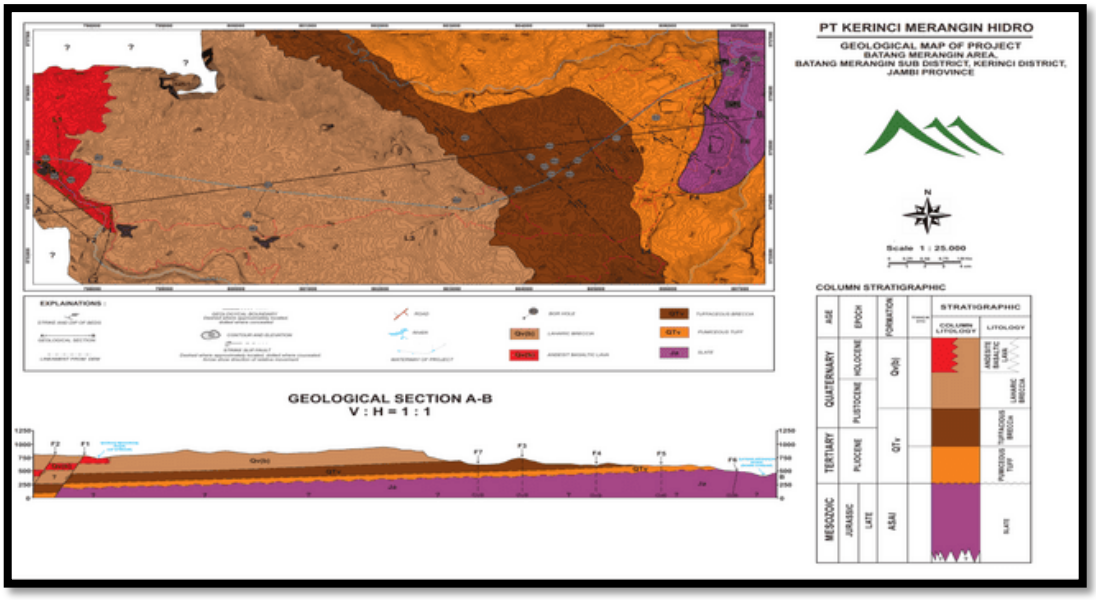
Ketidakstabilan terowongan menurut (Hoek and Brown, 1980) dapat disebabkan oleh struktur geologi yang merugikan, tegangan yang berlebihan pada batuan, pelapukan, swelling dan kondisi air tanah. Untuk mendapatkan kestabilan terowongan dilakukan dengan penerapan sistem penyangga pada terowongan. Pada penelitian ini kestabilan sistem penyangga dianalisis menggunakan pemodelan numerik dengan bantuan perangkat *Phase2*.

2. Metode Penelitian

Peta geologi lokasi penelitian menunjukkan jalur terowongan mengarah dari barat daya ke timur laut, dimana terdapat Rhyo Andesite Volcanic *(QTv)* meliputi breksi tuff yang terkonsolidasi dengan baik dengan breksi laharik. Lokasi sampling berada pada bagian akhir terowongan (*End Portal)* dengan Formasi Asai *(Ja)* yang merupakan interkalasi batu sabak dan metasandstone (Gambar 1). Pada (Gambar 2) Peta Geologi terowongan PLTA Kerinci Merangin menunjukkan bahwa sepanjang terowongan terdapat tujuh sesar dengan kode F1 sampai F7. Dimana terdapat dua sesar normal dengan kode F1 dan F2 dan lima sesar geser dengan kode F3 sampai F7. Lokasi *End Portal* terdapat dua sesar geser (*strike-slip*) dengan kode F5 dan F6.

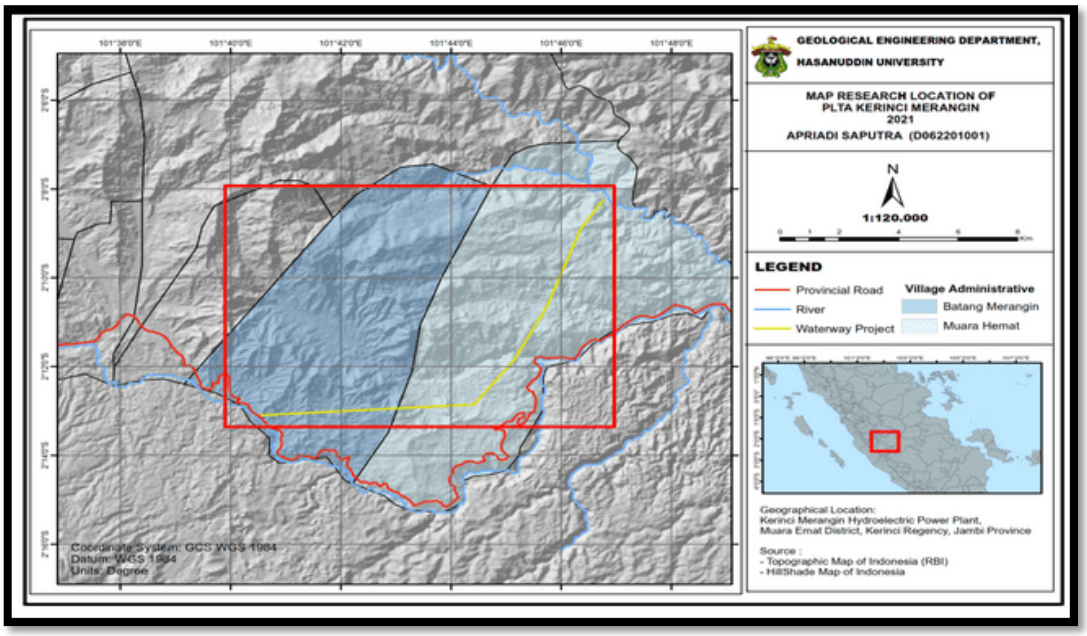


Gambar 1. *Geological Map of Tunnel End Portal (PT. KMH, 2021)*



Gambar 2. *Geological Map Tunnel Kerinci Hydropower (PT. KMH, 2021)*

Lokasi sampling dilakukan pada STA 8+869 – 8+881 m pada area *End Portal* terowongan, Desa Muara Hemat, Kecamatan Batang Merangin, Kabupaten Kerinci, Provinsi Jambi. Penelitian ini menggunakan pendekatan yang mengkombinasikan metode kuantitatif dan metode kualitatif. Adapun metode pengumpulan data pada penelitian ini meliputi data primer dan sekunder. Data primer berupa pengamatan batuan, pemetaan bidang diskontinu, pengambilan sampel, hasil penyangga actual dan pengukuran dimensi terowongan. Untuk data sekunder meliputi peta geologi daerah penelitian, pengujian sifat fisik dan mekanik, *properties* penyangga dan hasil pemboran.



Gambar 3. *Location Maps of Kerinci Hydropower.*

Data yang telah didapatkan digunakan untuk menentukan properties massa batuan dan kelas massa batuan yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penentuan sistem penyangga dengan metode RMR dan Q system. Hasil dari rekomendasi system penyangga akan dilakukan pemodelan secara numerik untuk mengetahui nilai keamanan dari masing-masing model. Adapun model yang dilakukan yaitu:

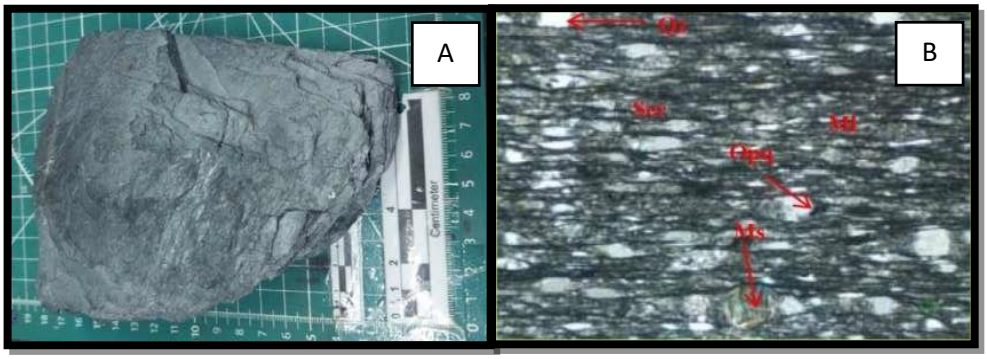
1. Model sebelum dilakukan penyanggaan
2. Model dengan penyangga aktual

3. Model dengan penyangga RMR
4. Model dengan penyangga Q-sistem

Model dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Phase2* dengan input properties massa batuan dari pengambilan data primer dan sekunder serta dari bantuan perangkat lunak *rocklab*.

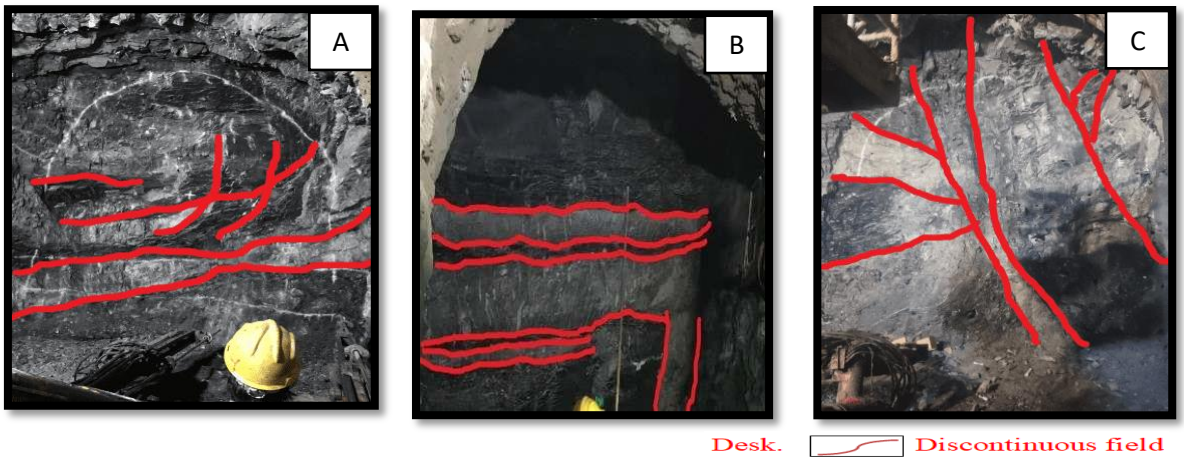
3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini pengujian petrografi dilakukan untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis batuan yang terdapat pada *face* terowongan tempat pengambilan data dilakukan. Identifikasi dilakukan dengan melakukan pengamatan secara makroskopis dan mikroskopis. Kenampakan makroskopis sampel *slate* gambar 4 (A) memiliki warna segar hitam agak keabu-abuan dan memiliki struktur berfoliasi sedangkan secara mikroskopis gambar 4 (B) menunjukkan sampel didominasi oleh mineral lempung sebanyak 50% dan mineral kuarsa 25%, serisit 10%, muskovit 10% dan opaq 5%.



Gambar 4. (A) Kenampakan makroskopis dan (B) Kenampakan mikroskopis sampel batuan

Hasil pengamatan dari 3 lokasi *face* terowongan seperti pada gambar 5 menyajikan kondisi bidang diskontinu pada *face* terowongan.



Gambar 5. (a). *Face* 1 STA 8+869, (b). *Face* 2 STA 8+875 dan (c). *Face* 3 STA 8+881

Hasil pengamatan STA 8+869 menunjukkan 6 bidang diskontinu dengan 2 set kekar, Pengamatan STA 8+872 menunjukkan 8 bidang diskontinu dengan 2 set kekar dan pada STA 8+879 menunjukkan 8 bidang diskontinu dengan 3 set kekar. Nilai kuat tekan pada penelitian ini didapatkan dari PT. Kerinci Merangin Hidro yang menunjukkan nilai kuat tekan adalah 32 (MPa) dan nilai *rock quality design* (RQD) didapatkan dari hasil pemboran yaitu 18 %.

3.1. Klasifikasi Massa Batuan

Klasifikasi massa batuan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan 2 sistem yaitu klasifikasi massa batuan *Rock Mass Rating (RMR)* Bieniawsky (1989) dan Q-System Barton

(1974). Hasil klasifikasi *RMR* dan Q-System didapatkan dari penelitain sebelumnya adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Klasifikasi Massa batuan berdasarkan *RMR* (Bieniawski, 1989)

Station	Rating	Rock class	Support		
			Rockbolt	***Shotcrete***	***Steelrib***
8+869	41	III	Sistematic bolts 4 m long, spaced 1,5-2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	none.
8+872	36	IV	Sistematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1,5 m in crown and wall with wire mesh.	100-150 mm in crown dan 100 mm in sides.	Spaced steel ribs 1,5 m where required
8+879	38	IV	Sistematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1,5 m in crown and wall with wire mesh.	100-150 mm in crown dan 100 mm in sides.	Spaced steel ribs 1,5 m where required

Hasil klasifikasi Q-System yang didapatkan pada penelitian sebelumnya adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Rekomendasi penyangga berdasarkan Q-Sistem (Barton,1974)

Q Rating	Quality	Span (m) [2.ESR.$(Q)^{0,4}$]	Dimensi Ekuivalen (m)	Support Categori	***Rockbolt***	***Shotcrete***
0,6	Very poor	1,47	7	6	- Long 3 m - Spasi 1,3 m	- Shotcrete 9-12 cm
0,8	Very poor	1,65	7	6	- Long 3 m - Spasi 1,3 m	- Shotcrete 9-12 cm
0,93	Very poor	1,75	7	6	- Long 3 m - Spasi 1,3 m	- Shotcrete 9-12 cm

3.2. Pemodelan numerik

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi numerik menggunakan metode element hingga bantuan perangkat lunak *Phase2* dengan input properties massa batuan dari pengambilan data primer dan sekunder serta dari bantuan perangkat lunak *rocklab*. Metode elemen hingga merupakan motode numerik yang bertujuan untuk mengetahui distribusi tegangan dan kondisi keamanan sebelum dan sesudah dipasang penyangga. Pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan empat macam model terowongan:

1. Model 1 terowongan tanpa penyangga.
2. Model 2 terowongan dengan penyangga aktual di lapangan.
3. Model 3 terowongan dengan metode penyanggan RMR.
4. Model 4 terowongan dengan metode penyanggan Q-System.

Pembuatan model dalam analisis kemantapan terowongan memerlukan parameter-parameter seperti:

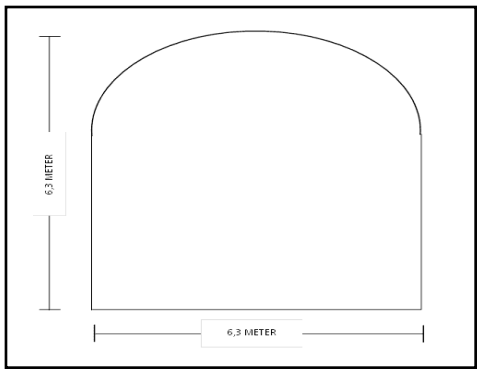
1. Model Geometri
   Terowongan dirancang dengan *U-shape* terbalik dengan lebar 6,3 meter dan tinggi 6,3 meter. Geometri terowongan dapat dilihat pada (Gambar 6).
2. Diskretisasi
   Perhitungan numerik pada penelitian ini menerapkan metode elemen hingga, sehingga perhitungannya dilakukan dengan pembagian (*discretization*) model menjadi elemen-elemen

yang lebih kecil dan saling berhubungan antar titik sehingga membentuk suatu jaringan (*mesh*).

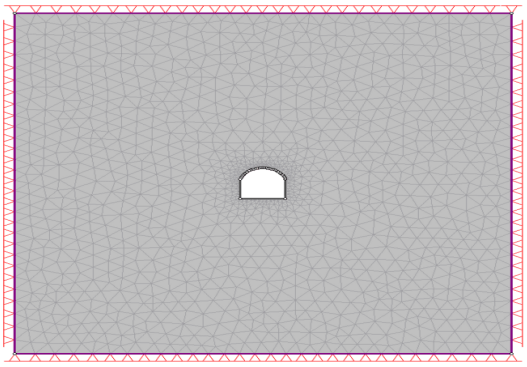
3. Kondisi Batas

Kondisi batas berfungsi untuk memberikan batas pada model untuk bergerak atau memberikan perpindahan pada sisi yang diinginkan. Model diberikan kondisi batas agar saat diberikan pembebanan model tetap pada posisinya (Gambar 7).

a. Batas kiri, kanan, dan bawah tidak terjadi perpindahan arah X dan Y.
b. Pada batas atas dan bawah tidak terjadi perpindahan arah X dan Y.



Gambar 6. Geometri terowongan



Gambar 7. Diskretisasi & Batas

Kondisi batas ini dilakukan dengan jarak dari terowongan ke batas luar (external boundary) sebesar lima kali lebar bukaan (5D), dimana pada jarak ini dianggap pengaruh terowongan sudah tidak ada lagi.

4. Pembebanan dan Kondisi Tegangan

Metode ini mendapatkan besar tegangan insitu dengan mengalikan bobot isi material terhadap kedalaman dari terowongan dengan mempertimbangkan pengaruh *body force* (beban material). Nilai k = 0,33; γ = 1,26 ton/m^3 and z = 63 m.

Hasil perhitungan tegangan insitu sebagai berikut:

$\sigma_V = \gamma z$
$= 1{,}26 \text{ ton/m}^3 \times 63 \text{ m}$
$= 102{,}06 \text{ ton/m}^2$ (1,01 MPa)

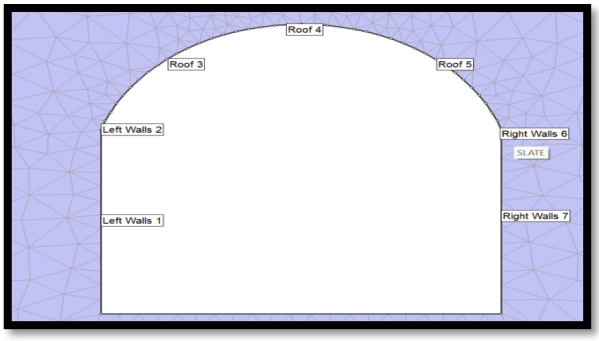
$\sigma_H = k \gamma z$
$= 0{,}33 \times 1{,}26 \text{ ton/m}^3 \times 63 \text{ m}$
$= 26{,}195 \text{ ton/m}^2$ (0,26 MPa)

5. Data Masukan Model

Nilai *input* untuk model *Phase2* menggunakan *properties intack rock* dari hasil pengujian laboratorium dan pengamatan lapangan yang kemudian dikonversi menggunakan *software rocklab*.

6. Hasil Permodelan Numerik

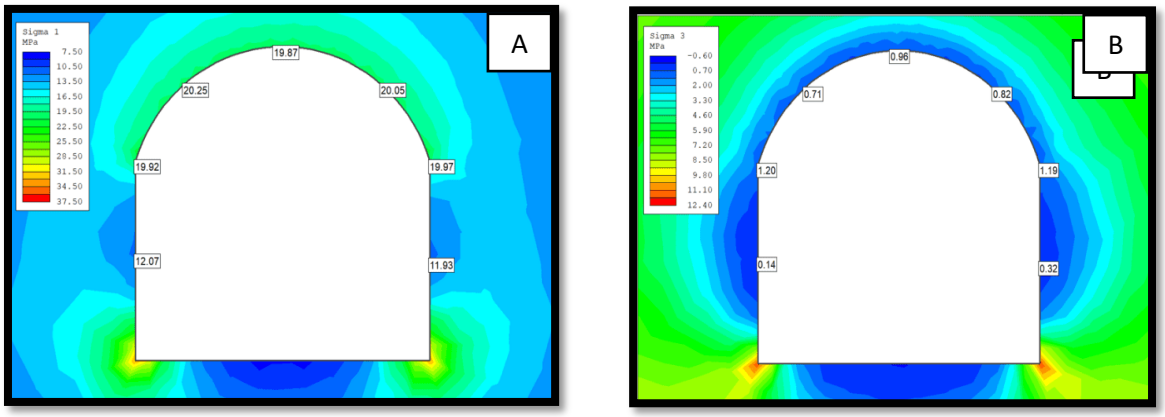
Untuk menganalisis kestabilan terowongan, dilakukan pengamatan terhadap 7 titik terowongan yang di anggap sebagai representatif dari dinding dan atap terowongan. Posisi titik-titik pengamatan tersebut antara lain masing-masing 2 (dua) titik pada dinding kiri, 3 (tiga) pada atap, dan 2 (dua) pada dinding kanan (Gambar 8).



Gambar 8. Titik pengamatan terowongan.

1. Simulai I model terowongan tanpa penyangga

Pada tahap ini permodelan numerik dilakukan saat terowongan belum di *supporting*. Nilai σ1 dan σ3 hasil permodelan numerik yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. (A) Nilai σ1 pada simulasi I dan (B) Nilai σ3 pada simulasi I

Hasil nilai σ1 dan σ3 selanjutnya digunakan untuk menghitung besarnya nilai faktor keamanan pada simulasi I berdasarkan metode *Mohr-Coulomb*. Hasil perhitungan faktor keamanannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi nilai σ1, σ3 dan hasil perhitungan Fs simulasi I

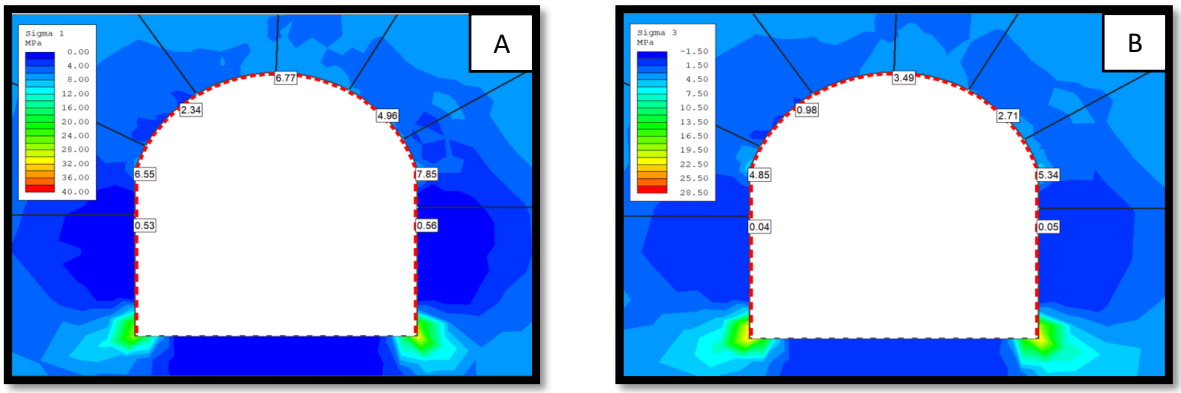
Titik Pengamatan	σ1 (MPa)	σ3 (MPa)	External angle friction (φ)	Cohesion (C) (Mpa)	A	B	Fs
Dinding Kiri 1	12,07	0,14	12,46	0,55	1,854	5,965	0,31
Dinding Kiri 2	19,92	1,20	12,46	0,55	2,815	9,360	0,30
Atap 3	20,25	0,71	12,46	0,55	2,798	9,770	0,29
Atap 4	19,87	0,96	12,46	0,55	2,784	9,455	0,29
Atap 5	20,25	0,82	12,46	0,55	2,810	9,715	0,29
Dinding Kanan 6	19,97	1,19	12,46	0,55	2,820	9,390	0,30
Dinding Kanan 7	11,93	0,30	12,46	0,55	1,856	5,815	0,32
Rata-rata							**0,30**

2. Simulai II model terowongan dengan penyangga aktual

Permodelan di tahap ini mengikuti sistem penyangga yang dilakukan dilapangan. Dengan Sistem penyangga yang digunakan yaitu menggunakan *rockbolt* dengan panjang 350 cm, spasi *rockbolt* 170 cm, dan menggunakan *shotcrete* pada atap dan dinding terowongan dengan ketebalan 8 cm. Nilai σ1 dan σ3 dapat dilihat pada Gambar 10.

Tabel 4. Rekapitulasi nilai σ1, σ3 dan hasil perhitungan FK simulasi II

Investigation point	σ1 (MPa)	σ3 (MPa)	External angle friction (φ)	Cohesion (C) (Mpa)	A	B	Fs
Left Wall 1	0,53	0,04	12,46	0,55	0,599	0,245	2,44
Left Wall 2	6,55	4,85	12,46	0,55	1,767	0,850	2,08
Crown 3	2,34	0,98	12,46	0,55	0,895	0,680	1,32
Crown 4	6,77	3,49	12,46	0,55	1,644	1,640	1,00
Crown 5	4,96	2,71	12,46	0,55	1,364	1,125	1,21
Right Wall 6	7,85	5,34	12,46	0,55	1,960	1,255	1,56
Right Wall 7	0,56	0,05	12,46	0,55	0,603	0,255	2,36
Average							**1,71**



Gambar 10. (A) Nilai σ1 pada simulasi II dan (B) Nilai σ3 pada simulasi II

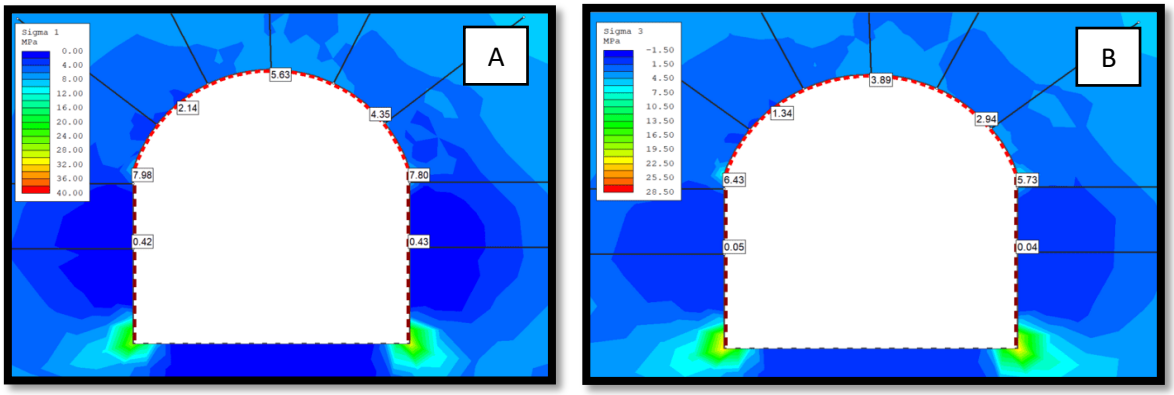
Hasil rekapitulasi faktor keamanan terowongan menggunakan penyanggaan actual menunjukkan bahwa nilai rata-rata Fs sebesar 1,71 (stabil). Akan tetapi nilai faktor keamanan pada atap empat (4) terowongan masih menunjukan nilai sebesar 1,00 yang berarti dalam kondisi kritis.

3. Simulai III model terowongan menggunakan penyangga RMR

Permodelan di tahap ini menggunakan system penyanggaan berdasarkan klasifikasi massa batuan *rock mass rating*. Dimana pada penentuan kelas massa batuan menunjukkan terowongan STA 8+869 masuk kedalam kelas III dan pada STA 8+875, 8+881 masuk kedalam kelas IV.

3.1 Terowongan STA 8+869 menggunakan penyangga RMR III

STA 8+869 masuk kedalam klasifikasi massa batuan RMR kelas III. dengan Sistem penyangga *rockbolt* sepanjang 400 cm, spasi *rockbolt* 150 cm pada dinding dan atap terowongan dengan menggunakan *wiremesh* pada atap. menggunakan *shotcrete* pada atap setebal 10 cm dan dinding terowongan dengan ketebalan 3 cm. Nilai σ1 dan σ3 hasil permodelan dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. (A) Nilai σ1 **S**TA 8+869 dan (B) Nilai σ3 **S**TA 8+869, RMR kelas III

Tabel 5. Rekapitulasi nilai σ1, σ3 dan hasil perhitungan Fs STA 8+869

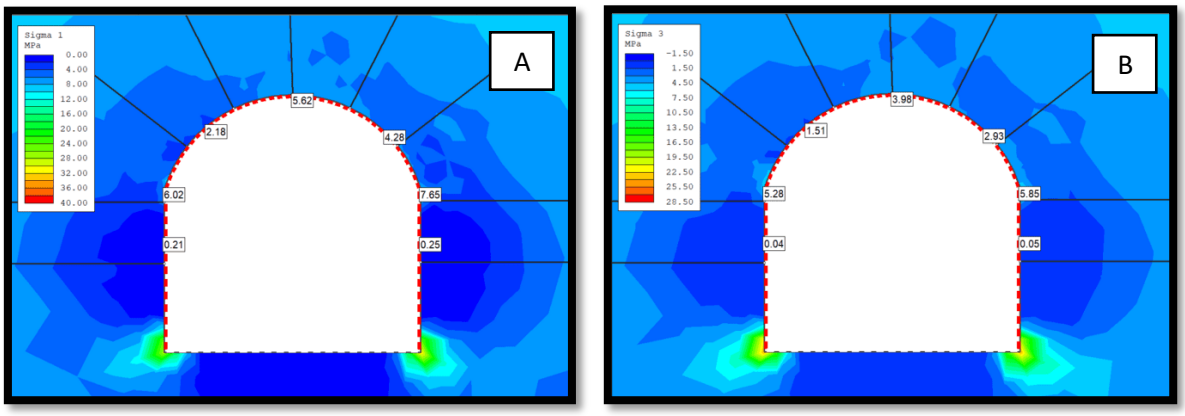
Titik Pengamatan	σ1 (MPa)	σ3 (MPa)	External angle friction (φ)	Cohesion (C) (Mpa)	A	B	Fs
Dinding Kiri 1	0,42	0,05	12,46	0,55	0,588	0,185	3,18
Dinding Kiri 2	7,98	6,43	12,46	0,55	2,092	0,775	2,70
Atap 3	2,14	1,34	12,46	0,55	0,912	0,400	2,28
Atap 4	5,63	3,89	12,46	0,55	1,564	0,870	1,80
Atap 5	4,35	2,94	12,46	0,55	1,323	0,705	1,88

Dinding Kanan 6	7,80	5,73	12,46	0,55	1,997	1,035	1,93
Dinding Kanan 7	0,43	0,04	12,46	0,55	0,588	0,195	3,01
Average							**2,40**

Hasil rekapitulasi faktor keamanan terowongan menggunakan penyangga RMR kelas III pada STA 8+869 menunjukkan nilai rata-rata FK sebesar 2,40 yang menandakan kondisi stabil.

3.2 Terowongan STA 8+875-8+881 menggunakan penyangga RMR IV

STA 8+875, 8+881 menggunakan sistem penyangga *rockbolt* sepanjang 400 cm, spasi *rockbolt* 150 cm dengan mengunakan *wiremesh* pada dinding dan atap terowongan. menggunakan *shotcrete* setebal 10 cm pada atap dan dinding terowongan. Nilai σ1 dan σ3 dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. (A) Nilai σ1 STA 8+875-8+881 dan (B) Nilai σ3 STA 8+875, 8+881

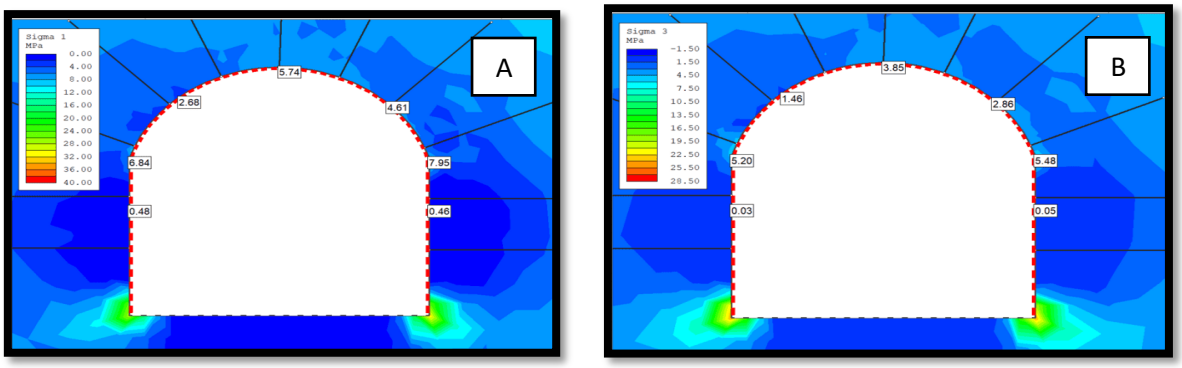
Tabel 6. Rekapitulasi nilai σ1, σ3 dan hasil perhitungan FK STA 8+875, 8+88

Titik Pengamatan	σ1 (MPa)	σ3 (MPa)	Sudut geser (φ)	Kohesi (C) Mpa)	A	B	FK
Dinding Kiri 1	0.21	0.04	12.46	0.55	0.564	0.085	6.64
Dinding Kiri 2	6.02	5.28	12.46	0.55	1.756	0.370	4.75
Atap 3	2.18	1.51	12.46	0.55	0.935	0.335	2.79
Atap 4	5.62	3.98	12.46	0.55	1.573	0.820	1.92
Atap 5	4.28	2.93	12.46	0.55	1.315	0.675	1.95
Dinding Kanan 6	7.65	5.85	12.46	0.55	1.993	0.900	2.21
Dinding Kanan 7	0.25	0.05	12.46	0.55	0.569	0.100	5.69
Rata-rata							**3.71**

Hasil rekapitulasi faktor keamanan terowongan menggunakan penyangga RMR kelas IV STA 8+875-8+881 menunjukkan bahwa nilai rata-rata FK sebesar 3,71 yang berarti berada pada kondisi stabil.

4. Simulai IV model terowongan menggunakan penyangga Sistem Q

Permodelan di tahap ini menggunakan system yaitu *rockbolt* dengan panjang 300 cm, spasi *rockbolt* 130 cm pada atap dan dinding terowongan, serta *shotcrete* pada atap dan dinding terowongan dengan ketebalan 10 cm. Nilai σ1 dan σ3 hasil permodelan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. (A) Nilai σ1 pada simulasi IV dan (B) Nilai σ3 pada simulasi IV

Tabel 7. Rekapitulasi nilai σ1, σ3 dan hasil perhitungan FK simulasi IV

Titik Pengamatan	σ1 (MPa)	σ3 (MPa)	Sudut geser (φ)	Kohesi (C) (Mpa)	A	B	FK
Dinding Kiri 1	0,48	0,03	12,46	0,55	0,592	0,225	2,63
Dinding Kiri 2	6,84	5,20	12,46	0,55	1,836	0,820	2,24
Atap 3	2,68	1,46	12,46	0,55	0,984	0,610	1,61
Atap 4	5,74	3,85	12,46	0,55	1,572	0,945	1,66
Atap 5	4,61	2,86	12,46	0,55	1,343	0,875	1,53
Dinding Kanan 6	7,95	5,48	12,46	0,55	1,986	1,235	1,61
Dinding Kanan 7	0,46	0,05	12,46	0,55	0,592	0,205	2,89
Rata-rata							**2,03**

Hasil rekapitulasi faktor keamanan terowongan menggunakan penyanggaan system Q menunjukkan bahwa nilai rata-rata FK sebesar 2,03 (stabil).

Tabel 8. Nilai faktor keamanan tiap model lubang bukaan

Models	Rockbolt (meter)	Shotcrete (cm)	Wiremesh	Steel sets	FK
Tanpa penyanggga	Long : - Spasi : -	Crown : - Wall : -	Crown : - Wall : -	-	0,30
Penyangga actual	Long : 3,5 Spasi : 1,7	Crown : 8 Wall : 8	Crown : - Wall : -	-	1,71
RMR STA 8+869	Long : 4 Spasi : 1,5	Crown : 10 Wall : 30	Crown : use Wall : -	-	2,40
RMR STA 8+869	Long : 4 Spasi : 1,5	Crown : 10 Wall : 10	Crown : use Wall : use	-	3,71
System Q	Long : 3 Spasi : 1,3	Crown : 10 Wall : 10	Crown : - Wall : -	-	2,03

Nilai Faktor Keamanan dengan pemodelan numerik pada setiap model terowongan. menghasilkan Model 1, terowongan tanpa penyangga didapatkan rata-rata FK pada titik pengamatan sebesar 0,30 (tidak stabil). Model 2, terowongan dengan penyangga aktual di lapangan menggunakan Sistem penyangga kombinasi *rockbolt* dengan panjang 350 cm, spasi *rockbolt* 1,7 cm, dan menggunakan shotcrete pada atap dan dinding terowongan dengan ketebalan 8 cm menunjukkan rata-rata FK pada titik pengamatan sebesar 1,70 (stabil). Model 3 terowongan dengan metode penyanggaan RMR pada STA 8+869 dengan Sistem penyangga *rockbolt* sepanjang 400 cm, spasi *rockbolt* 150 cm pada dinding dan atap terowongan dengan menggunakan *wiremesh* pada atap. menggunakan shotcrete pada atap setebal 10 cm dan dinding terowongan dengan ketebalan 3 cm. didapatkan rata-rata FK titik pengamatan sebesar 2,40 (stabil). pada STA 8+875, STA 8+881 dengan sistem penyangga *rockbolt* sepanjang 400 cm, spasi *rockbolt* 150 cm dengan mengunakan

wiremesh pada dinding dan atap terowongan. menggunakan *shotcrete* setebal 10 cm pada atap dan dinding terowongan didapatkan rata-rata FK pada titik pengamatan sebesar 3,71 (stabil). Model 4 terowongan dengan menggunakan metode Q-sistem sistem penyangga yang digunakan yaitu *rockbolt* dengan panjang 300 cm, spasi *rockbolt* 1,3 cm pada atap dan dinding terowongan, serta *shotcrete* pada atap dan dinding terowongan dengan ketebalan 10 cm. didapatkan rata-rata FK pada titik pengamatan sebesar 2,03 (stabil).

4. Kesimpulan

Berdasarkan pemodelan numerik untuk memperoleh system penyangga yang tepat pada tiap model di terowongan, diperoleh Model 1, terowongan tanpa penyangga diperoleh rata-rata FK pada titik pengamatan sebesar 0,30 (tidak stabil). Model 2, terowongan dengan penyangga actual di lapangan menggunakkan kombinasi penyangga *rockbolt* dan *shotcrete* diperoleh nilai rata-rata FK sebesar 1,70 (stabil). Model 3, terowongan dengan metode penyanggaan RMR dengan kombinasi penyangga *rockbolt, shotcrete* dan *wiremesh* diperoleh rata-rata FK pada *face* 1 sebesar 2,40 (stabil). dan pada *face* 2 dan 3 sebesar 3,71 (stabil). Model 4, terowongan dengan metode penyanggan Q-sistem dengan menggunakan kombinasi penyangga *rockbolt* dan *shotcrete* diperoleh rata-rata FK pada titik pengamatan sebesar 2,03 (stabil).

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada ALLAH SWT, Kepada kedua orang tua atas doa dan dukungannya, dan kepada Department Geologi Universitas Hasanuddin dan PLTA Kerinci Merangin.

Referensi

Abdullah, A., 2021. *Pengaruh Konstruksi Terowongan Penyangga terhadap Subsidens PLTA Kerinci Merangin. Tesis,* Yogyakarta: UPN.

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974. *Engineering Classification of ROck Masses for the Design of Tunnel Support.* Oslo: Norwegian Geotechnical Institute.

Bieniawsky, Z. T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification.* Pensylvania: Mining and Mineral Resources Research Institute. Pennsylvania State University.

Hoek, E. & Brown, 1980. *Underground Excavation in Rock.* London: The Institute of Mining and Metallurgy.

Hoek, E., Kaiser, P. K. & Bawden , W. F., 1998. *Support of Underground Excavation in Hard Rock.* Rotterdam: A.A. Balkema.

Koesnaryo, S., 1998. *Bahan Peledak dan Metode Peledakan*. Yogyakarta : Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

Lama, K. Z., 2017. *Analisis TIngkat Kecukupan Penyangga pada Terowongan Tambang Bijih Emas di Batuan Terkekarkan. Tesis.* Yogyakarta: UPN.

Rahardjo, I. & Fitriana, I., 2005. *Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Indonesia, PLTN, dan Energi Terbarukan, P3TKKE.* Jakarta: BPPT.