

## Perencanaan Sistem Penyangga pada Terowongan Pengelak (Studi kasus pembangunan Bendungan Beringin Sila Utan Kab. Sumbawa)

Muhammad Jayyid<sup>1,\*</sup>, Dedy Dharmawansyah<sup>1</sup>, Dinda Fardila<sup>1</sup>

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Teknologi Sumbawa, Nusa Tenggara Barat<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [dedy.dharmawansyah@uts.ac.id](mailto:dedy.dharmawansyah@uts.ac.id)

Info Artikel		Abstract
Diajukan	31 Juli 2022	<i>The excavation process caused the rocks around the Beringin Sila tunnel to be disturbed so that an initial support was needed in the form of steel supports. This study uses empirical methods, namely analysis of rock mass classification with the Rock Mass Rating (RMR) system and mathematical calculations of stress and stiffness of steel supports to determine the safety factor with steel spacing 1.5m, 2m and 3m. Based on the results of rock mass classification on the inlet and outlet sides are 37 and 27 which are classified as poor rock (rock class IV). The safety factor in the combination of steel set, shotcrete, and rockbolt, obtained at the inlet side of 0.84 on the roof and 2.03 on the wall at a distance of 1.5 m, at a distance of 2 m obtained a safety factor of 0.81 on the roof. and 1.93 on the wall, and at a distance of 3 m by 0.77 on the roof and 1.84 on the wall. The above information proves that the roof of the tunnel is still in the unsafe criteria. On the outlet side, the safety factor is 5 on the roof and 8.56 on the walls at a distance of 1.5 m, at a distance of 2 m, the safety factor is 4.74 on the roof and 8.13 on the walls, and at a distance of 3 m. of 4.52 on the roof and 7.75 on the walls. So that the outlet side at a distance of 3 meters is still categorized as safe.</i>
Diperbaiki	24 Februari 2023	
Disetujui	27 Februari 2023	

*Keywords: steel support, rock mass rating, beringin sila, safety factor.*

**Abstrak**  
Proses galian menyebabkan batuan di sekitar terowongan Beringin Sila terganggu sehingga diperlukan penopang awal berupa penopang baja. Penelitian ini menggunakan metode empiris yaitu analisis klasifikasi massa batuan dengan sistem *Rock Mass Rating* (RMR) dan perhitungan matematis tegangan dan kekakuan penyangga baja untuk menentukan faktor keamanan dengan menentukan jarak baja 1,5m, 2m dan 3m. Berdasarkan hasil klasifikasi massa batuan pada sisi *inlet* dan *outlet* adalah 37 dan 27 yang termasuk dalam batuan kelas IV yaitu batuan buruk. Faktor keamanan pada kombinasi *steel set*, *shotcrete*, dan *rockbolt*, diperoleh pada sisi *inlet* sebesar 0,84 pada atap dan 2,03 pada dinding pada jarak spasi 1,5 m, pada jarak spasi 2 m memperoleh faktor keamanan sebesar 0,81 pada atap dan 1,93 pada dinding, serta pada jarak 3 m sebesar 0,77 pada atap dan 1,84 pada dinding. Hal ini membuktikan bahwa pada atap terowongan masih dalam kriteria tidak aman. Pada sisi *outlet* mendapatkan faktor keamanan sebesar 5 pada atap dan 8,56 pada dinding pada jarak spasi 1,5 m, pada jarak spasi 2 m memperoleh faktor keamanan sebesar 4,74 pada atap dan 8,13 pada dinding, serta pada jarak 3 m sebesar 4,52 pada atap dan 7,75 pada dinding. Sehingga pada sisi *outlet* pada jarak 3 meter pun masih dikategorikan aman.

*Kata kunci: steel support, rock mass rating, beringin sila, angka keamanan*

### 1. Pendahuluan

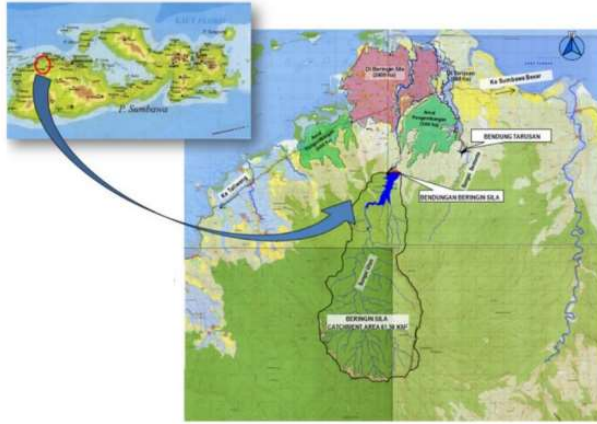
Dalam konstruksi bendungan, peranan terowongan sangat penting dalam menunjang kinerja dari salah satu bangunan air ini. Terowongan berfungsi sebagai pengalih air sungai selama pembangunan tubuh bendungan (*main dam*) serta sebagai saluran air irigasi dan PDAM. Terowongan adalah sebuah tembusan dibawah permukaan tanah atau gunung yang umumnya dibuat melalui berbagai jenis lapisan tanah dan bebatuan sehingga metode konstruksi pembuatan terowongan tergantung dari massa batuan dan kondisi geologi [1].

Terowongan yang tidak stabil biasanya disebabkan oleh adanya berbagai gangguan seperti gejala-gejala geologi, pelapukan, *swelling* batuan, tekanan dan aliran air tanah yang

berlebihan, tegangan yang berada disekitar terowongan dan aktivitas seperti galian pada terowongan yang mengakibatkan adanya deformasi batuan disekitarnya. Pembuatan lubang bukaan bawah tanah akan mengakibatkan perubahan distribusi tegangan terutama pada daerah sekitar lubang bukaan. Sehingga setelah proses penggalian diperlukan sistem penyangga (*Support System*) sebagai konstruksi pendukung agar terowongan tidak mengalami keruntuhan.

Terowongan pengelak pada penelitian ini merupakan pekerjaan Paket I proyek pembangunan Bendungan Beringin Sila Kec. Utan Kabupaten Sumbawa (**Gambar 1**). Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sudrajat [2] bahwa infrastruktur ini dibangun pada batuan breksi tuf dengan

pelapukan yang tinggi, sehingga batuan tergolong tidak stabil dan dikategorikan batuan jelek (*poor rock*).



**Gambar 1.** Lokasi Bendungan Beringin Sila [3]

Analisis kestabilan terowongan batuan menggunakan sistem *Rock Mass Rating* (RMR) sebagai klasifikasi dasar untuk mengetahui jenis batuan yang berada dilokasi bukaan, serta pengklasifikasian massa batuan untuk menentukan kelas massa batuan agar dapat memberikan rekomendasi penyanggaan yang sesuai dengan parameter-parameter pemilihan tipe penyangga batuan dan mendapatkan faktor keamanan yang sesuai standar yang direncanakan. Selain itu, pemilihan sistem penyangga dapat dilakukan seefisien mungkin, sehingga lebih ekonomis. Pada Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila saat ini telah terpasang penyangga *steel support* dengan jarak 1 m.

Oleh karena itu, untuk menghindari penggunaan sistem penyangga pada *Steel Support* yang tidak efisien, maka perlu dilakukan analisis ulang sebagai alternatif untuk meninjau dan mengetahui penggunaan *Steel Support* yang efektif dengan memperbesar jarak antar penyangga *Steel Support* pada lokasi bukaan terowongan pengelak Bendungan Beringin Sila.

## 2. Metode

### 2.1. Sistem *Rock Mass Rating*

*Rock Mass Rating* (RMR) atau dikenal dengan *Geomechanical Classification* yang dikembangkan oleh Bieniawski 1973 – 1989 dengan adanya penambahan data masukan sehingga membuat perubahan nilai *rating* pada parameter sesuai dengan pengalaman Bieniawski. Metode ini digunakan sebagai parameter penting dalam perancangan terowongan untuk dijadikan sebagai dasar perkiraan jenis penyanggaan. Adapun sistem RMR ini menggunakan enam parameter, dimana setiap parameter dijumlahkan untuk mendapatkan *total rating* tersebut [4], yaitu:

1. Kuat tekan batuan utuh (*Uniaxial Compressive Strength/UCS*)
2. *Rock Quality Designation* (RQD)
3. Jarak antar kekar (*spacing of discontinuities*)
4. Kondisi kekar (*condition of discontinuities*)
5. Kondisi air tanah (*groundwater condition*)
6. Orientasi ketidakmenerusan (*orientation of discontinuities*)

Acuan dalam memberikan *rating* berdasarkan 6 (enam) parameter ini diperoleh dari **Tabel 1**. Langkah selanjutnya, menentukan kondisi massa batuan berdasarkan kelas batuan sesuai dengan **Tabel 2** dan rekomendasi penyangga berdasarkan **Tabel 3**.

**Tabel 2.** Klasifikasi kelas massa batuan [4]

Parameter	Deskripsi				
<b>Rating</b>	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
<b>Kelas massa batuan</b>	Sangat baik (I)	Baik (II)	Sedang (III)	Buruk (IV)	Sangat Buruk (V)
<b>Stand-up time rata-rata</b>	20 tahun untuk span 15m	1 tahun untuk span 10m	1 minggu untuk span 5m	10 jam untuk span 2,5m	30 menit untuk span 1m
<b>Kohesi (MPa)</b>	>0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	<0.1
<b>Sudut geser dalam batuan</b>	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°

### 2.2. Kuat Massa Batuan

Analisis kuat massa batuan merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menentukan faktor aman pada terowongan. Kriteria empiris yang akan digunakan adalah kriteria usulan dari Agustawijaya [5], merupakan modifikasi kriteria Coulomb yang dihitung menggunakan persamaan 1, persamaan 2 dan persamaan 3. Kriteria ini didasarkan pada data hasil pengujian kompresi batuan lunak lebih dari 150 sampel.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + \mu\sigma_3 \quad (1)$$

$$\sigma_{cm} = \rho \cdot \sigma_{ci} \quad (2)$$

$$\mu = \tan^2 \alpha = \frac{1 + \sin \phi_b}{1 - \sin \phi_b} \quad (3)$$

Keterangan:

$$\sigma_1 = \text{Tegangan utama mayor (kN/m}^2\text{)}$$

$$\sigma_3 = \text{Tegangan utama minor (kN/m}^2\text{)}$$

$$\mu = \text{Kemiringan linier antara } \sigma_1 \text{ dan } \sigma_3$$

$$\sigma_{cm} = \text{Kuat tekan massa batuan (kN/m}^2\text{)}$$

$$\sigma_{ci} = \text{Kuat tekan material batuan utuh (kN/m}^2\text{)}$$

$$\phi_b = \text{Sudut gesek dasar (}^\circ\text{)}$$

$$\rho = \text{Rasio kuat tekan}$$

**Tabel 1. Rock Mass Rating [4]**

Parameter Klasifikasi		Nilai Rating							
1.	<b>Kuat Tekan Batuan Utuh</b> Rating	<b>PLI (MPa)</b>	>10	4-10	2-4	1-2	Kuat Tekan Rendah Perlu UCS		
		<b>UCS (MPa)</b>	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
			15	12	7	4	2	1	0
2.	<b>RQD (%)</b> Rating		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
			20	17	13	8	3		
3.	<b>Jarak antar kekar</b> Rating		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
			20	15	10	8	5		
4.	<b>Kondisi Kekar</b>	<b>Panjang kekar</b> Rating	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m		
			6	4	2	1	0		
		<b>Jarak antar kekar</b> Rating	Tidak ada	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	>5 mm		
			6	5	4	1	0		
		<b>Kekasaran kekar</b> Rating	Sangat kasar	Kasar	Sedikit kasar	Halus	Licin		
	6	5	3	1	0				
5.	<b>Kondisi Air Tanah</b>	<b>Material pengisi</b> Rating	Tidak ada	Keras		Lunak			
			6	<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm		
			6	4	2	2	0		
		<b>Pelapukan</b> Rating	Tidak lapuk	Sedikit lapuk	Lapuk	Sangat lapuk	Hancur		
			6	5	3	1	0		
6.	<b>Jurus dan Kemiringan Orientasi Diskontinuitas</b> Rating	<b>Inflow setiap 10m panjang terowongan (l/menit)</b>	Tidak ada	<10	10-25	25-125	>125		
		<b>Perbandingan tekanan air pada kekar/major principal stress (kPa)</b>	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	>0,5		
		<b>Kondisi umum</b> Rating	Kering (Completely dry)	Lembab (Damp)	Basah (Wet)	Menetes (Dripping)	Mengalir (Flowing)		
	15	10	7	4	0				
6.	<b>Jurus dan Kemiringan Orientasi Diskontinuitas</b> Rating		Sangat Menguntungkan	Menguntungkan	Sedang	Tidak Menguntungkan	Sangat tidak menguntungkan		
		<b>Terowongan</b>	0	-2	-5	-10	-12		
		<b>Pondasi</b>	0	-2	-7	-15	-25		
		<b>Lereng</b>	0	-5	-25	-50	-60		

Tabel 3. Rekomendasi Jenis Penyangga [4]

Kelas RMR	Teknik Penggalian	Rock Bolt	Shotcrete	Steel Sets
I	Full face, 3 m kedalam	Umumnya penyangga tidak diwajibkan kecuali ada sedikit bolting		
II	Full face, 1 – 1.5 m ke dalam. Penyangga lengkap 20 m dari muka	Di tempat itu, bolt pada crown sepanjang 3 m, jarak 2.5 m dengan wire mesh.	50 mm pada crown di tempat yang diharuskan.	Tidak ada
III	Top heading and bench 1.5 – 3 m ke dalam. Diperiksa setiap selesai peledakan. Penyangga lengkap 10 m dari muka.	Bolt sistematis sepanjang 4 m dengan jarak 1.5 – 2 m pada crown dan dinding dengan wire mesh pada crown.	50 – 100 mm pada crown dan 30 mm pada sisinya.	Tidak ada
IV	Top heading and bench 1.0 – 1.5 m ke dalam. Pemasangan penyangga bersamaan dengan penggalian, 10 m dari muka.	bolt sistematis sepanjang 4 – 5 m jarak 1 – 1.5 m pada crown dan dinding dengan wire mesh pada crown.	100 – 150 mm pada crown dan 100 mm pada sisinya.	Ringan s/d medium dengan spasi 1,5 m
V	Multiple drifts 0.5 – 1.5 m ke dalam. Pemasangan penyangga bersamaan dengan penggalian. Shotcrete sesegera mungkin setelah peledakan.	bolt sistematis sepanjang 4 – 5 m jarak 1 – 1.5 m pada crown dan dinding dengan wire mesh pada crown.	140 – 200 mm pada crown, 150 mm pada sisinya dan 50 mm di muka.	Medium s/d berat, dengan spasi 0.75 m, forepolt jika diharuskan.

### 2.3. Tegangan pada atap dan dinding terowongan

Persamaan 4 dan Persamaan 5 digunakan untuk menganalisis tegangan pada atap dan dinding terowongan yang diusulkan oleh Brady and Brown [6].

$$\sigma_v = \gamma h \quad (4)$$

$$\sigma_h = K \sigma_v \quad (5)$$

Keterangan:

$\sigma_v$  = Tegangan vertikal (MPa)

$\sigma_h$  = Tegangan horisontal (MPa)

$\gamma$  = Berat isi batuan (MN/m<sup>3</sup>)

$h$  = Kedalaman (m)

$K$  = Koefisien tegangan lateral

### 2.4. Tegangan dan kekakuan maksimum pada primary supporting

Penelitian ini menggunakan sistem penyangga *rockbolt*, *shotcrete* dan *blocked steel sets*. Brady and Brown [6] dan Hoek and Brown [7] memberikan persamaan untuk menghitung tegangan maksimum pada sistem penyangga untuk terowongan.

#### a. Sistem penyangga *rockbolt*

Kekakuan sistem penyangga *rockbolt* dihitung menggunakan persamaan 6.

$$\frac{1}{k_b} = \frac{s_c s_l}{r_i} \left( \frac{4l}{\pi d_b^2 E_b} + Q \right) \quad (6)$$

Tegangan sistem penyangga *rockbolt* dihitung menggunakan persamaan 7.

$$P_{sb \max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_l} \quad (7)$$

Keterangan:

$d_b$  = diameter *rockbolt* (m),

$l$  = panjang *rockbolt* (m),

$E_b$  = modulus elastisitas *rockbolt* (MPa)

$r_i$  = radius internal terowongan (m)

$s_c$  = Jarak *rockbolt* secara sirkumferensial (m)

$s_l$  = Jarak *rockbolt* secara longitudinal (m)

$T_{bf}$  = kuat tekan *rockbolt* (MPa)

$Q$  = deformasi beban

#### b. Sistem penyangga *shotcrete*

Kekakuan sistem penyangga *shotcrete* dihitung menggunakan persamaan 8.

$$K_c = \frac{E_c (r_i^2 - (r_i - t_c)^2)}{(1 + \nu_c) [(1 - 2\nu_c) r_i^2 + (r_i - t_c)^2]} \quad (8)$$

Tegangan sistem penyangga *shotcrete* dihitung menggunakan persamaan 9.

$$P_{sc \max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[ 1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (9)$$

Keterangan:

$P_{smax}$  = Tegangan maksimum penyangga (MPa),

$\sigma_{cc}$  = UCS of the *shotcrete* (MPa)

$r_i$  = Radius internal terowongan (m)

$t_c$  = Tebal *shotcrete* (m)

$K_{sc}$  = Kekakuan *shotcrete* (MPa/m)

$E_c$  = Modulus elastisitas *shotcrete* (MPa)

$\nu$  = Poisson rasio (m)

#### c. Sistem penyangga *steel sets*

Kekakuan *steel set* dihitung menggunakan persamaan 10.

$$\frac{1}{k_s} = \frac{s_r i}{E_s A_s} + \frac{s_r i^3}{E_s I_s} \left[ \frac{\theta(\theta + \sin \theta \cos \theta)}{2 \sin^2 \theta} - 1 \right] + \frac{2S\theta t_B}{E_B W^2} \quad (10)$$

Tegangan *steel set* dihitung menggunakan persamaan 11.

$$P_{ss \max} = \frac{3A_s I_s \sigma_{ys}}{2S r_i \theta \{3I_s + X A_s [(r_i - (t_B + 0.5X))(1 - \cos \theta)]\}} \quad (11)$$

Keterangan:

- $\sigma_{ys}$  = UCS of the steel (MPa)
- $I_S$  = momen inersia steel (m<sup>4</sup>)
- $E_S$  = modulus elastisitas steel (MPa)
- $A_S$  = luas penampang steel (m<sup>2</sup>)
- S = spasi antar steel (m)
- $r_i$  = radius internal terowongan (m)
- $\theta$  = setengah sudut diameter titik (°)
- X = tinggi baja/kedalaman baja (m)
- $t_B$  = ketebalan blok (m)
- W = lebar blok (m)

**2.5. Faktor Keamanan**

Penentuan faktor keamanan dilakukan berdasarkan teori dari Mohr-Coulomb menggunakan persamaan 12. Teori ini menyatakan bahwa faktor keamanan merupakan perbandingan keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut.

$$SF = \frac{\text{kekuatan}}{\text{tegangan yang bekerja}} \quad (12)$$

Parameter kekuatan terdiri atas kuat massa batuan dan tegangan dari setiap sistem penyangga yang digunakan. Sedangkan parameter tegangan yang bekerja menggunakan tegangan vertikal.

Hasil perhitungan faktor keamanan ini selanjutnya disandingkan dengan kriteria keamanan, apabila SF < 1,0 maka batuan dianggap tidak stabil, SF = 0 maka dianggap seimbang namun akan segera longsor ketika ada gangguan sedikit saja dan SF > 1 maka batuan dianggap stabil.

**3. Hasil dan Pembahasan**

**3.1. Pengujian Batuan**

Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian batuan menggunakan metode empiris pada klasifikasi Rock Mass Rating (RMR). Uji kuat tekan batuan (Uniaxial Compressive Strength / USC) yang dilakukan dengan alat Point Load Index (PLI) dalam menentukan kualitas massa batuan utuh.

**Tabel 4.** Hasil Pengujian Batuan

Stationing	No. LB* Kedalaman (m – m)	Jenis Batuan	Berat Isi Batuan (kN/m <sup>3</sup> )	Kuat Tekan (MPa)
<b>Inlet</b> (Sta 0+180 – 0+360)	B5-6 (45,00-46,00)	Breksi tuff 2 lapuk ringan	16,13	51,9
<b>Outlet</b> (Sta 0+720 – 0+880)	B5-9 (19,00-20,00)	Breksi tuff 1 segar (boulder)	17,79	23

Ket \* LB = Lubang Bor

Berdasarkan hasil pemboran inti, terowongan pengelak melalui batuan kolovial, breksi tuff 2 lapuk ringan dan breksi tuff 1 segar dengan nilai kuat tekan batuan sebesar 51,9 MPa pada bagian inlet dan 23 MPa pada bagian outlet. Berdasarkan nilai kuat tekan pada Tabel 4, batuan pada terowongan pengelak termasuk dalam weak to medium strong rock [8]. Ilustrasi jenis batuan pada lokasi terowongan pengelak Bendungan Beringin Sila dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Hasil Pemboran inti

**3.2. Hasil Klasifikasi Massa Batuan**

Klasifikasi massa batuan berdasarkan 6 (enam) parameter dilakukan pada massa batuan di inlet dan outlet dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6. Sedangkan rekomendasi penyangga berdasarkan Rock Mass Rating dapat dilihat pada Tabel 7.

**Tabel 5.** Klasifikasi massa batuan pada inlet

No.	Parameter	Nilai	Rating
1.	Kuat tekan batuan utuh	51,9 MPa	7
2.	RQD	25-50 %	8
3.	Jarak antar (spasi) kekar	200-600 mm	10
4.	Kondisi kekar	Permukaan rata dan licin	10
5.	Kondisi air tanah	Basah	7
6.	Orientasi Ketidakmenerusan	Sedang	-5
<b>Total score</b>			<b>37</b>

Ket: Batuan yang dipakai dengan nomor pemboran B5-6 (45,00-46,00 m)

**Tabel 6.** Klasifikasi massa batuan pada outlet

No.	Parameter	Nilai	Rating
1.	Kuat tekan batuan utuh	23 MPa	2
2.	RQD	10-25 %	3
3.	Jarak antar (spasi) kekar	200-250 mm	10
4.	Kondisi kekar	Permukaan sedikit kasar	10
5.	Kondisi air tanah	Basah	7
6.	Orientasi Ketidakmenerusan	Sedang	-5
<b>Total score</b>			<b>27</b>

Ket: Batuan yang dipakai dengan nomor pemboran B5-9 (19,00-20,00 m)

**Tabel 5** dan **Tabel 6** menunjukkan bahwa klasifikasi massa batuan pada bagian *inlet* diperoleh nilai sebesar 37 dan pada bagian *outlet* diperoleh nilai sebesar 27. Berdasarkan **Tabel 2**, kualitas massa batuan pada bagian *inlet* dan *outlet* terowongan ini memiliki kualitas massa batuan yang masuk dalam kelas batuan IV batuan buruk atau *poor rock* (RMR = 21-40), sehingga rekomendasi penyangga *rockbolt*, *shotcrete* dan *steel sets* yang digunakan berdasarkan RMR sesuai **Tabel 7**.

**Tabel 7.** Rekomendasi Penyangga berdasarkan RMR

Kelas Massa Batuan	Teknik Penggalian
Batuan Buruk (IV) 21-40	<i>Top heading and bench</i> 1.0 – 1.5 m kedalam. Pemasangan penyangga bersamaan dengan penggalian, 10 m dari muka.
Penyangga	<b>Rockbolt</b> Bolt sepanjang 4 – 5m jarak 1 – 1.5 m pada <i>crown</i> dan dinding dengan <i>wire mesh</i> pada <i>crown</i> .
	<b>Shotcrete</b> 100 – 150 mm pada <i>crown</i> dan 100 mm pada sisinya. Sebaiknya menggunakan <i>medium ribs</i>
	<b>Steel Sets</b> jarak 1.5 m di tempat yang diharuskan.

**3.3. Kuat Massa Batuan**

Kuat Mass Batuan digunakan untuk menentukan faktor keamanan pada terowongan. Analisis kuat massa batuan ditentukan berdasarkan kriteria empiris dari perhitungan persamaan Coulomb sesuai persamaan 1, diperoleh hasil seperti pada **Tabel 8**.

**Tabel 8.** Hasil analisis kuat massa batuan

Lokasi	Kuat Massa Batuan (MPa)	
	Atap	Dinding
<i>Inlet</i>	0,45	0,43
<i>Outlet</i>	0,40	0,42

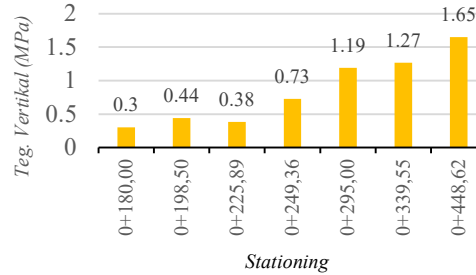
Berdasarkan **Tabel 8**, kuat massa batuan pada bagian *inlet* sebesar 0,45 MPa (atap), 0,43 MPa (dinding), sedangkan pada bagian *outlet* sebesar 0,40 MPa (atap), 0,42 MPa (dinding).

**3.4. Tegangan pada atap dan dinding terowongan**

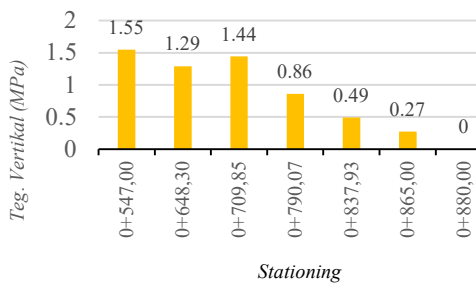
Analisis ini didasarkan pada persamaan 4 dan 5 untuk meninjau tegangan pada arah vertikal dan horisontal. **Gambar 3** s.d. **Gambar 6** adalah hasil tegangan yang terjadi di setiap *stationing* pada bagian *inlet* dan *outlet*.

Hasil analisis berdasarkan **Gambar 3** dan **Gambar 4** menunjukkan bahwa besar tegangan vertikal pada suatu titik

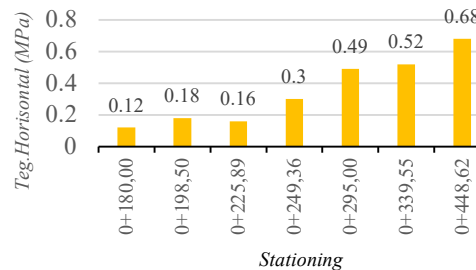
dibawah permukaan merupakan fungsi dari densitas batuan (pengaruh kerapatan pada tiap pori batuan) diatas titik tersebut serta pengaruh kedalaman tembusan lubang bukaan. Karena batuan dianggap homogen (densitasnya dianggap konstan) maka besar tegangan vertikal berbeda-beda yang dipengaruhi oleh kedalaman lubang bukaan, semakin besar kedalaman maka semakin besar tegangan yang diterima oleh terowongan.



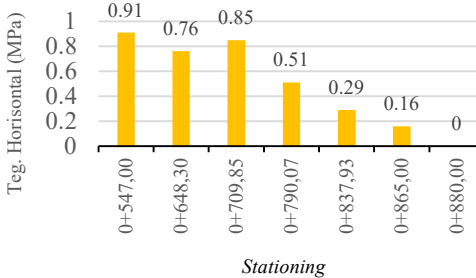
**Gambar 3.** Tegangan vertikal pada sisi *Inlet*



**Gambar 4.** Tegangan vertikal pada sisi *outlet*



**Gambar 5.** Tegangan horizontal pada sisi *Inlet*



**Gambar 6.** Tegangan horizontal pada sisi *Outlet*

Kemudian, tegangan horisontal ditentukan oleh parameter koefisien tegangan lateral (K) dan tegangan vertikal ( $\sigma_v$ ), dimana semakin besar tegangan vertikal yang dihasilkan oleh lubang bukaan terowongan maka semakin besar pula tegangan horisontal yang bekerja pada terowongan, karena sifat batuan mempengaruhi besar tegangan tersebut (**Gambar 5** dan **Gambar 6**).

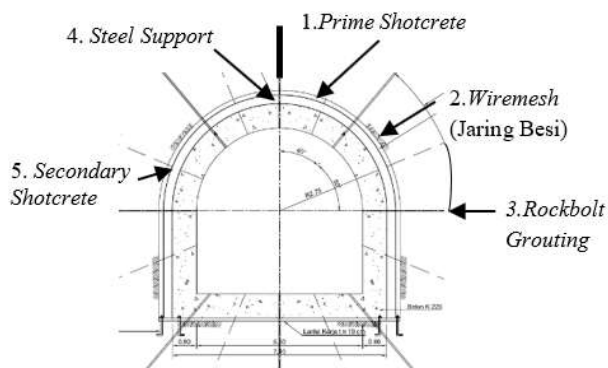
Rekapitulasi tegangan vertikal dan horisontal pada *inlet* dan *outlet* yang akan digunakan dalam perhitungan faktor keamanan terowongan dapat dilihat pada **Tabel 9**.

**Tabel 9.** Tegangan Vertikal dan Horisontal

Tegangan (MPa)	Stationing	
	Inlet 0+448,62	Outlet 0+865,00
Tegangan Vertikal	1,65	0,27
Tegangan Horisontal	0,68	0,16

**3.5. Analisis tegangan dan kekakuan maksimum pada primary supporting**

Pada perencanaan sistem penyangga terowongan diperlukan penyangga awal (*primary supporting*) sebagai penyangga awal untuk menahan beban runtuh batuan akibat proses penggalian, sehingga proses pembuatan terowongan berjalan dengan baik dan aman. Perhitungan ini didasarkan pada rekomendasi pada **Tabel 7** dan dibutuhkan setelah penggalian yang memerlukan adanya perkuatan penyangga *rockbolt* untuk memperbaiki dan mengisi rekahan yang terjadi di sekeliling lubang bukaan akibat penggalian. Lalu diikuti dengan perkuatan *shotcrete* sehingga dapat mendukung sistem penyangga *steel support* dalam meningkatkan faktor keamanan dan memperkuat sistem perkuatan terowongan. **Gambar 7** menunjukkan urutan perkuatan pada setiap penyangga bukaan terowongan.



**Gambar 7.** Urutan Pemasangan Perkuatan pada Terowongan

Lapisan pertama (*prime shotcrete*) disemprotkan setelah pekerjaan *scalling* (pengangkutan material penggalian)

selesai. Lalu diikuti dengan pemasangan *wiremesh* untuk menutupi seluruh bagian batuan. Selanjutnya memasang *rockbolt grouting* (penyuntikan beton) lalu pemasangan *steel support* dan terakhir penyemprotan *secondary shotcrete* untuk memperkuat seluruh penyangga.

Hasil analisis perhitungan kekakuan dan tegangan pada setiap sistem penyangga awal dengan persamaan 6 s.d. persamaan 11 dapat dilihat pada **Tabel 10** yang digunakan sebagai parameter perhitungan faktor keamanan terowongan.

**Tabel 10.** Kekakuan dan Tegangan Sistem Penyangga

Penyangga	Spasi (m)	Kekakuan (MPa/m)	Tegangan (MPa)
<i>Rockbolt</i>	-	5,94	0,40
<i>Shotcrete</i>	-	407,06	0,29
<i>Steel set</i>	1,5	881,54	0,26
	2	661,16	0,19
	3	440,77	0,13

**3.6. Faktor Keamanan**

Perhitungan faktor keamanan dilakukan menggunakan persamaan 12 dengan contoh perhitungan pada sisi *inlet* bagian atap (STA 0+448,62) sebagai berikut:

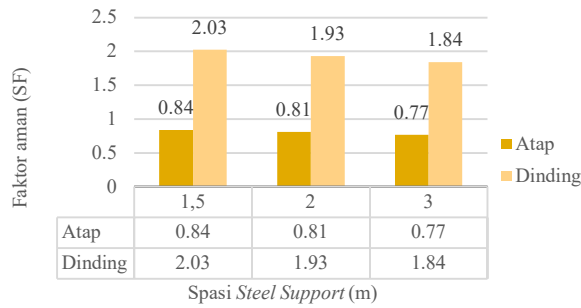
Diketahui:

- Kuat Massa Batuan (Tabel 8) = 0,45 MPa
- Tegangan vertikal (Tabel 9) = 1,65 MPa
- Teg. *Rockbolt* ( $P_{ss \text{ max I}}$ ) (Tabel 10) = 0,4 MPa
- Teg. *Shotcrete* ( $P_{ss \text{ max II}}$ ) (Tabel 10) = 0,29 MPa
- Teg. *Steel set*,  $s = 1,5 \text{ m}$  ( $P_{ss \text{ max III}}$ ) (Tabel 10) = 0,26 MPa

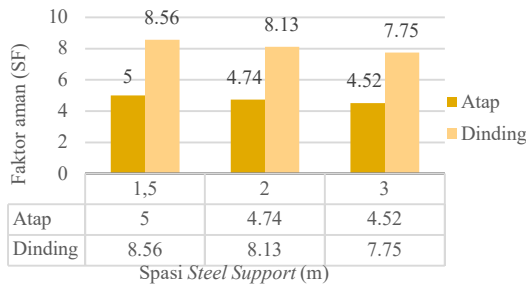
$$SF \text{ atap} = \frac{\text{Kekuatan}}{\text{Tegangan yang bekerja}} = \frac{\text{Kuat Massa Batuan} + P_{ss \text{ max I}} + P_{ss \text{ max II}} + P_{ss \text{ max III}}}{\text{Tegangan Vertikal}} = \frac{0,45 + 0,40 + 0,29 + 0,26}{1,65} = 0,84$$

Adapun hasil analisis faktor keamanan pada sisi *inlet* dan *outlet* untuk bagian atap dan dinding terowongan dapat dilihat pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**.

Berdasarkan **Gambar 8**, angka keamanan yang dihasilkan pada bagian atap  $SF < 1$  (tidak aman) sehingga perlu dilakukan penambahan perkuatan. Sedangkan pada bagian dinding  $SF > 1$  sehingga dinyatakan aman. Sedangkan pada **Gambar 9** menunjukkan bahwa  $SF$  yang dihasilkan  $> 1$  baik pada bagian atap maupun dinding sehingga dianggap aman.



**Gambar 8.** Faktor keamanan pada penyangga awal dengan perbedaan spasi *Steel Support* sisi *Inlet*.



**Gambar 9.** Faktor keamanan pada penyangga awal dengan perbedaan spasi *Steel Support* sisi *Outlet*

#### 4. Simpulan

Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil klasifikasi massa batuan menggunakan enam parameter dari metode *Rock Mass Rating* (RMR) diperoleh total *score* bagian *inlet* sebesar 37 dan bagian *outlet* sebesar 27. Hasil bobot total klasifikasi ini menunjukkan kualitas massa batuan pada bagian *inlet* dan *outlet* terowongan memiliki kelas batuan IV yaitu batuan jelek atau *poor rock* (RMR = 21-40). Dengan hasil kelas massa batuan ini mendapatkan rekomendasi penyangga berupa penyangga *rockbolt* dengan panjang (l) 4 -5 m dengan jarak 1-1,5 m pada atap (*crown*) dan dinding dengan *wiremesh* pada *crown*, untuk penyangga *shotcrete* dengan tebal 100-150 mm pada *crown* dan 100 mm pada sisinya, serta penyangga *steel set* dipasang dengan jarak 1,5 m.
2. Hasil tegangan dan kekakuan maksimum pada penyangga awal (*primary supporting*) yaitu pada penyangga *rockbolt* mendapatkan tegangan sebesar 0,40 MPa dan kekakuan 5,94 MPa, untuk penyangga *shotcrete* mendapatkan tegangan sebesar 0,29 MPa dan kekakuan 407,06 MPa, dan pada penyangga *steel set* mendapatkan nilai 0,26 MPa dan kekakuan sebesar 881,54 MPa pada jarak spasi 1,5 m, pada jarak 2 m menghasilkan tegangan sebesar 0,19 MPa dan kekakuan sebesar 661,16 MPa, serta pada

jarak spasi 3 m menghasilkan tegangan sebesar 0,13 MPa dan kekakuan sebesar 440,77 MPa.

3. Tegangan yang dihasilkan pada kombinasi penyangga awal (*Primary Supporting*) seperti penyangga *rockbolt*, *shotcrete*, dan *steel set* mendapatkan faktor aman pada sisi inlet sebesar 0,84 pada atap dan 2,03 pada dinding pada jarak spasi 1,5 m, pada jarak spasi 2 m memperoleh faktor aman sebesar 0,81 pada atap dan 1,93 pada dinding, serta pada jarak 3 m sebesar 0,77 pada atap dan 1,84 pada dinding. Hal ini membuktikan bahwa pada atap terowongan masih dalam kriteria tidak aman. Pada sisi *outlet* mendapatkan faktor aman sebesar 5 pada atap dan 8,56 pada dinding pada jarak spasi 1,5 m, pada jarak spasi 2 m memperoleh faktor aman sebesar 4,74 pada atap dan 8,13 pada dinding, serta pada jarak 3 m sebesar 4,52 pada atap dan 7,75 pada dinding. Sehingga pada sisi *outlet* pada jarak 3 meter pun masih dikategorikan aman.

#### Daftar Pustaka

- [1] B. Kharisma, D. S. Agustawijaya, and T. Sulistyowati, "Interaksi Sistem Penyangga dengan Massa Batuan pada Terowongan milu di Rababaka Kompleks, Kabupaten Dompu," Universitas Mataram, 2016.
- [2] C. Sudrajat, "Analisis Sistem Penyangga pada Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila di Kabupaten Sumbawa," Universitas Mataram, 2020.
- [3] N. Aulia, V. Dermawan, and E. N. Cahya, "Kajian Hidrolika Aliran Bangunan Pelimpah Samping (Side Channel Spillway) Bendungan Beringin Sila Kabupaten Sumbawa," *J. Teknol. dan Rekayasa Sumber Daya Air*, vol. 1, no. 2, pp. 711–721, 2021.
- [4] Z. T. Bieniawski, *Engineering Rock Mass Classifications A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. Canada: A Wiley Interscience Publication, 1989.
- [5] D. S. Agustawijaya, "The Influence of Rock Properties and Size into Strength Criteria: A Proposed Criterion for Soft Rock Masses.," *Civ. Eng. Dimens.*, vol. 13, no. 2, pp. 75–81, 2011.
- [6] B. H. G. Brady and E. T. Brown, *Rock Mechanics for underground mining*, 3rd ed. United States of America: Kluwer Academic Publisher, 2005.
- [7] E. Hoek and E. T. Brown, *Underground Excavations in Rock*, Revised fi. New York: CRC Press, 1982.
- [8] B. Singh and R. K. Goel, *Engineering Rock Mass Classification*. United State of America: Butterworth-Heinemann-Elsevier, 2011



