

ARTIKEL ILMIAH

**OPTIMASI STRUKTUR PENYANGGA TEROWONGAN
IRIGASI BENDUNGAN BINTANG BANO BERDASARKAN
RMR**

Tugas Akhir

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat sarjana S-1 Jurusan Teknik Sipil



Oleh:

Mohamad Arvy Ananta Qolbu

F1A018141

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MATARAM**

2023

ARTIKEL ILMIAH
OPTIMASI STRUKTUR PENYANGGA TEROWONGAN
IRIGASI BENDUNGAN BINTANG BANO BERDASARKAN
RMR

Oleh:

MOHAMAD ARVY ANANTA Q.

FIA 018 141

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 Sulistyowati, ST., MT.
NIP. 19730202 199802 2 001

Tanggal:

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Mataram



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

ARTIKEL ILMIAH
OPTIMASI STRUKTUR PENYANGGA TEROWONGAN IRIGASI
BENDUNGAN BINTANG BANO BERDASARKAN RMR

Oleh:
Mohamad Arvy Ananta Qolbu
FIA 018 141

Telah diujikan di depan Tim Penguji
Pada tanggal 24 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat derajat Sarjana (S-1)
Jurusan Teknik Sipil

Susunan Tim Penguji

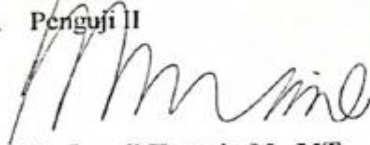
1. Penguji I



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

Tanggal: Februari 2023

2. Penguji II



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

Tanggal: Februari 2023

3. Penguji III



Dr. Ngudivono, S.T., M.T.
NIP. 19740505 199903 1 003

Tanggal: Februari 2023

Mataram, Februari 2023

Dekan Fakultas Teknik Universitas Mataram



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

OPTIMASI STRUKTUR PENYANGGA TEROWONGAN IRIGASI BENDUNGAN BINTANG BANO BERDASARKAN RMR

Mohamad Arvy Ananta Qolbu¹, 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

Terowongan merupakan sebuah tembusan di bawah permukaan tanah atau gunung. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkaran luar. Terowongan dibangun dengan berbagai macam tujuan dan fungsi, seperti untuk keperluan lalu lintas, pertambangan, dan saluran air. Terowongan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah Terowongan Irigasi Bendungan Bintang Bano di Kabupaten Sumbawa Barat. Terowongan ini merupakan saluran air tertutup sepanjang 1200 meter karena saluran terhalang bukit sehingga tidak mungkin dilakukan penggalian untuk saluran terbuka (Agustawijaya, 2016). Terowongan Irigasi Bintang Bano adalah bagian dari proyek infrastruktur sumber daya air yang sedang dibangun di Kabupaten Sumbawa Barat. Secara umum proyek infrastruktur ini dibangun pada batuan lunak vulkanik batupasir tuf dan intrusi adesit di perbukitan dengan elevasi 220 m di atas muka laut.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu melakukan pengklasifikasian massa batuan dengan metode *RMR (Rock Mass Rating)*, kemudian berdasarkan hasil pengklasifikasian tersebut dapat dilakukan perhitungan tegangan sekitar terowongan dengan *Kirsch Solution* serta kekuatan dan tegangan maksimum yang dihasilkan oleh penyangga yang dipasang sesuai dengan NATM. Selanjutnya dihitung factor aman untuk mengetahui apakah pemasangan struktur penyangga dengan variasi yang ada untuk melihat terowongan irigasi bendungan bintang bano masih dalam keadaan aman atau tidak, kemudian dilakukan optimasi secara nilai ekonomis dengan memperhatikan nilai factor aman.

Analisis *RMR* pada terowongan irigasi bendungan Bintang Bano menghasilkan nilai 61 pada STA+206, 47 pada STA+780, dan 59 pada STA 1+132. Selanjutnya dilakukan perhitungan tegangan sekitar terowongan dan menghasilkan nilai-nilai tegangan yang digunakan untuk menghitung kekuatan dan tegangan maksimum penyangga terowongan selanjutnya menghasilkan nilai factor aman yang digunakan sebagai pertimbangan untuk melakukan optimasi secara ekonomis. Pengoptimasian tersebut menghasilkan penurunan biaya konstruksi terowongan yang awalnya sebesar Rp. 5.426.994.325 dapat dioptimasi menjadi sebesar Rp. 2.717.364.325 dengan konstruksi yang masih dalam batas aman.

Kata kunci: Terowongan Irigasi, Bendungan, *RMR*, Penyangga, Bintang Bano

OPTIMIZATION OF SUPPORT STRUCTURES FOR THE BINTANG BANO IRRIGATION TUNNEL BASED ON RMR

Mohamad Arvy Ananta Qolbu¹, Didi S. Agustawijaya², Tri Sulistyowati²

¹Civil Engineering student, Faculty of Engineering, Mataram University

²Civil Engineering lecturer, Faculty of Engineering, Mataram University, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mataram University.

ABSTRACT

Tunnel is a passage beneath the ground or mountain. Tunnels are usually enclosed on all sides except for both open ends which lead to the outer circle. Tunnels are built for various purposes and functions, such as for traffic, mining, and water channels. The tunnel discussed in this final project is the Bintang Bano Irrigation Tunnel in West Sumbawa Regency. This tunnel is a closed water channel that stretches for 1200 meters because the channel is blocked by hills, making it impossible to excavate an open channel (Agustawijaya, 2016). The Bintang Bano Irrigation Tunnel is part of a water resources infrastructure project currently being built in West Sumbawa Regency. Generally, this infrastructure project is built on soft volcanic rock, tuff sandstone, and adesite intrusion in hills with an elevation of 220 meters above sea level.

The method used in this study is to classify rock masses using the RMR (Rock Mass Rating) method, then based on the classification results, stress calculations around the tunnel are performed using the Kirsch Solution, as well as the strength and maximum stress generated by the supports installed according to NATM. Next, a safety factor is calculated to determine whether the installation of support structures with the existing variations to see if the Bintang Bano Irrigation Tunnel is still in a safe condition or not, then optimization is carried out economically by considering the value of the safety factor.

The RMR analysis of the Bintang Bano Irrigation Tunnel resulted in a value of 61 at STA+206, 47 at STA+780, and 59 at STA 1+132. Next, stress calculations around the tunnel are performed, resulting in stress values that are used to calculate the strength and maximum stress of the tunnel support, which then produces a safety factor used as a consideration for economic optimization. The optimization resulted in a reduction in tunnel construction costs from the initial Rp. 7.407.192.650 to Rp. 3.711.192.650, with construction still within safe limits.

Keywords: Irrigation Tunnel, Dam, RMR, Supports, Bintang Bano

PENDAHULUAN

LATAR BELAKANG

Terowongan merupakan sebuah tembusan di bawah permukaan tanah atau gunung. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkaran luar. Terowongan dibangun dengan berbagai macam tujuan dan fungsi, seperti untuk keperluan lalu lintas, pertambangan, dan saluran air. Terowongan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah Terowongan Irigasi Bendungan Bintang Bano di Kabupaten Sumbawa Barat. Terowongan ini merupakan saluran air tertutup sepanjang 1200 meter karena salsuran terhalang bukit sehingga tidak mungkin dilakukan penggalian untuk saluran terbuka (Agustawijaya, 2016).

Terowongan Irigasi Bintang Bano adalah bagian dari proyek infrastruktur sumber daya air yang sedang dibangun di Kabupaten Sumbawa Barat. Secara umum proyek infrastruktur ini dibangun pada batuan lunak vulkanik batupasir tuf dan intrusi adesit di perbukitan dengan elevasi 220 m di atas muka laut. Terowongan yang dibangun untuk masyarakat umum ini dituntut untuk memiliki faktor keamanan yang tinggi. Hal ini disebabkan bahwa setiap ketidak stabilan yang terjadi pada bangunan tersebut bisa jadi tidak diizinkan. Sehingga pembangunan infrastruktur tersebut sesungguhnya adalah perancangan pemasangan sistem penyangga. Sebuah terowongan memerlukan sebuah penyangga manakala terowongan tersebut dikategorikan tidak aman. Penyangga tersebut dipasang untuk menopang atau menyangga massa batuan di sekeliling terowongan. Desain sistem penyangga memperhitungkan kemampuan massa batuan untuk menyangga dirinya sendiri tanpa penyangga, tapi jika batuan di sekitar

terowongan tidak mampu menyangga dirinya sampai melampaui batas berdirinya maka penyangga bantuan harus dipasang. Penyangga yang dipasang berupa anker baja, jala baja dengan mortar, rangka baja, dan beton (PT. Nindya Karya, 2022).

Pelaksanaan pembuatan terowongan irigasi bendungan Bintang Bano dikerjakan dengan metode peledak (*blasting*) yakni melakukan peledakan untuk mendapatkan lubang terowongan. Proses tersebut dilakukan dengan metode peledak dari dua sisi yakni jalur masuk (*inlet*) dan jalur keluar (*outlet*) terowongan. Keamanan terowongan dihitung berdasarkan perhitungan keteguhan massa batuan dan gaya-gaya yang bekerja di sekitar terowongan. Dengan demikian perhitungan tersebut memerlukan optimasi perhitungan untuk terowongan yang aman.

Dari berbagai latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka diangkat menjadi judul tugas akhir yaitu, “**Optimasi Struktur Penyangga Terowongan Irigasi Bendungan Bintang Bano Berdasarkan RMR.**”.

RUMUSAN MASALAH

- 1) Berapa nilai keteguhan massa batuan pada Terowongan Irigasi Bintang Bano menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR)?
- 2) Berapa nilai faktor aman serta nilai ekonomis yang didapatkan dengan optimasi yang dilakukan pada Terowongan Irigasi Bintang Bano?

BATASAN MASALAH

Untuk menghindari meluasnya lingkup bahasan, maka perlunya batasan-batasan masalah antara lain:

- 1) Penelitian hanya dilakukan pada terowongan irigasi bendungan Bintang Bano

- 2) Pada penelitian ini hanya dilakukan pengoptimasian struktur penyangga pada terowongan irigasi bendungan Bintang Bano
- 3) Melakukan perhitungan keteguhan massa batuan

TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan utama dilakukan penelitian ini adalah:

- 1) Menghitung keteguhan massa batuan menggunakan metode *Rock Mass Rating (RMR)*,
- 2) Menentukan nilai ekonomis dengan melakukan optimasi pada Terowongan Irigasi Bintang Bano berdasarkan nilai faktor aman.

MANFAAT PENELITIAN

Adapun beberapa manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

- 1) Memberi informasi dari sistem penyangga dalam mengoptimalkan jumlah penyangga yang akan dipasang sepanjang terowongan.
- 2) Memberikan tambahan wawasan pengetahuan kepada mahasiswa terkait optimasi terowongan.

DASAR TEORI

TINJAUAN PUSTAKA

Sukapakerti (2020), dalam “Analisis Pengaruh Kuat Geser Massa Batuan Terhadap Waktu Tunggu (*Stand-up Time*) Terowongan Pengelak Beringin Sila, Kabupaten Sumbawa” melakukan penelitian dengan menggunakan kriteria Mohr-Coloumb dan Hoek-Brown untuk menentukan kuat geser batuan. Sedangkan untuk mengetahui *stand-up time* terowongan ditentukan dengan klasifikasi massa batuan. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan bahwa kuat geser massa batuan pada masing-masing lokasi pada terowongan pengelak Beringin Sila adalah 0.093 MPa untuk STA +240,

0.218MPa untuk STA +520, 0.241 untuk STA +660, dan 0.075 untuk STA +800. Sedangkan untuk waktu tunggu (*stand-up time*) yaitu lama waktu bukaan terowongan runtuh adalah 6 jam untuk STA +240, 70 jam untuk STA +520, 150 jam untuk STA +660, dan 2 jam untuk STA +800. Dari uraian tersebut, dapat diketahui pengaruh kuat geser massa batuan terhadap waktu tunggu (*stand-up time*) bukaan terowongan. Dimana, waktu tunggu bukaan terowongan (*Stand-up Time*) akan semakin lama seiring besarnya nilai kuat geser massa batuan penyusunnya.

Aeni (2014) melakukan penelitian “Perilaku Tegangan Pada Massa Batuan Yang Menggunakan Sistem Penyangga Grouting Pada Terowongan Pengelak Bendungan Pandan Duri Swangi di Lombok Timur”, mendapatkan nilai tegangan vertikal antara 0.283 MPa sampai 0.625 MPa pada masing-masing blok, tegangan horizontal 0.122 MPa sampai 0.67 MPa dan nilai tegangan penyangga internal sebesar 0.01 MPa. Tegangan maksimum *grouting* pada sisi *inlet* adalah 1.4 MPa sampai 3.1 MPa dan pada sisi outlet yaitu 1.4 MPa sampai 3.1 Mpa. Sedangkan kekakuan yang diberikan oleh sistem penyangga *grouting* pada sisi *inlet* adalah antara 475 MPa/m. tegangan maksimum dan kekakuan sistem penyangga *concrete lining* secara berurutan adalah 5.0418 MPa/m dan 4002 MPa/m, baik pada sisi *inlet* dan *outlet*.

Hoek (1998) melakukan penelitian berjudul “*Tunnel Support in Weak Rock*”. Stabilitas terowongan pada batuan lunak dikendalikan oleh rasio uniaxial compressive strength dengan tegangan maksimum residu. Rasio ini memberi petunjuk kepada estimasi awal persyaratan penyangga untuk mengontrol regangan untuk mengontrol regangan ke level yang

telah ditentukan. Analisa numerik dari respon instalasi penyangga dan akibat dari proses pengerukan sangat tepat dilakukan untuk mendapatkan design struktur penyangga yang optimal dan ekonomis.

LANDASAN TEORI

Terowongan Irigasi

Terowongan irigasi adalah suatu konstruksi yang dibangun untuk mengaliri air irigasi melewati bukit atau pegunungan agar sesuai dengan elevasi yang sudah direncanakan. Sistem pembangunan terowongan tentunya memiliki resiko seperti salah satunya adalah kestabilan terowongan. Dengan memerhatikan kestabilan terowongan maka perlunya struktur penyangga dengan jumlah yang optimal. Tentunya dengan adanya penyangga terowongan yang tepat sasaran atau optimal mampu menguntungkan dalam pembangunan terowongan baik dari segi keamanan maupun biaya.

Sistem Penyangga Terowongan

Akibat dari suatu penggalian, umumnya terjadi degradasi tegangan pada batuan/tanah di sekitarnya. Penurunan tegangan yang berkelanjutan membawa efek yang merugikan bagi kestabilan terowongan. Untuk mencegah hal dibutuhkan suatu sistem penyangga permukaan terowongan. Sistem penyangga yang biasanya digunakan dalam pelaksanaan terowongan adalah ankur (*rockbolt*), kerangka baja (*steel support*), mortar semprot (*shotcrete*), beton (*concrete lining*), dan *grouting*.

Sifat Batuan

1) Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan adalah sifat yang terdapat pada suatu batuan setelah dilakukan pengujian tanpa melakukan

pengrusakan. Setelah batuan selesai dipersiapkan kemudian setiap sampel yang diperoleh diukur diameter dan tingginya kemudian dihitung luas permukaan dan volumenya. Adapun sifat fisik pada batuan meliputi :

- a. Bobot isi
Bobot isi adalah perbandingan antara berat batuan dengan volume batuan:
 - Bobot isi asli, yaitu berat batuan asli dan dengan volume batuan
 - Bobot isi kering, yaitu perbandingan antara berat batuan kering dengan volume batuan.
- b. *Specific Gravity*
Specific gravity yakni perbandingan yang memperhatikan bobot isi dan bobot air. *Specific gravity* diklasifikasikan menjadi dua, *Apparent Specific Gravity*, yaitu perbandingan antara bobot isi basah batuan dengan bobot isi air dan *True Specific Gravity*, yaitu perbandingan antara bobot isi basah batuan dengan bobot isi air.
- c. Kadar Air
Kadar air adalah perbandingan antara berat air yang ada di *dalam* batuan dengan berat butiran batuan itu sendiri yang terbagi menjadi :
 - Kadar air asli, yaitu perbandingan antara berat air asli yang ada dalam batuan dengan berat butiran batuan itu sendiri dalam persen (%),
 - Kadar air jenuh, yaitu perbandingan antara berat air jenuh yang ada dalam batuan dengan berat butiran batuan itu sendiri dalam persen (%).
- d. Porositas
Porositas didefinisikan sebagai perbandingan volume pori-pori atau rongga batuan terhadap volume total batuan yang dinyatakan dalam persen (%).

e. Angka Pori
 Angka pori adalah perbandingan antara volume pori-pori dalam batuan dengan volume batuan.

f. Derajat Kejenuhan
 Derajat kejenuhan adalah perbandingan antara kadar air asli dengan kadar air jenuh yang dinyatakan dalam persen (%).
 kadar air jenuh yang dinyatakan dalam persen (%).

2) Sifat Mekanik Batuan

a. Pengujian Kuat Tekan Bebas
(Unconfused Compression Test)

Pengujian Kuat Tekan Bebas *(Unconfused Compression Test)* adalah bentuk tes yang diberikan dengan memberi beban secara *axial* pada sampel. Dengan demikian, sampel tanah/batuan hanya menerima beban tekan satu arah.

b. Kuat Tekan Batuan

Kekuatan Tekan Batuan *(Compressive Strength)*, σ_c diperlihatkan dalam bentuk rasio antara beban saat runtuh dan luas awal sampel. Pada tes ini permukaan sampel dibuat rata agar beban dapat diteruskan merata pada semua permukaan. Kekuatan batuan dirumuskan :

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

σ_c = kekuatan tekan (kN/m²)

P = beban aksial (kN)

A = luas awal sampel (m²)

c. Modulus *Young*

Modulus *young* atau modulus elastisitas merupakan faktor penting dalam mengevaluasi deformasi batuan pada kondisi pembebanan yang bervariasi. Nilai modulus elastisitas batuan bervariasi dari satu contoh

batuan dari satu daerah geologi ke daerah geologi lainnya karena adanya perbedaan dalam hal formasi batuan dan genesa atau mineral pembentukannya.

d. *Poisson Ratio*

Poisson ratio didefinisikan sebagai perbandingan negative antara regangan lateral dan regangan aksial. *Poisson ratio* menunjukkan adanya pemanjangan ke arah lateral (*lateral expansion*) akibat adanya tegangan dalam arah aksial.

Rock Mass Rating System

Sistem kasifikasi massa batuan RMR menggunakan enam parameter dimana *rating* setiap parameter dijumlahkan untuk memperoleh nilai total dari RMR. Parameter-parameter yang digunakan, yaitu:

1) Kuat Tekan Batuan Utuh *(Strength of Intact Rock Material)*

Pada perhitungan nilai RMR, parameter kekuatan batuan utuh diberi bobot berdasarkan nilai UCS *(Uniaxial Compressive Strength)* atau nilai PLI *(Point Load Index)* seperti tertera pada **Tabel 1**

Tabel 1 Kekuatan material batuan utuh

Parameter		Nilai						
Kekuatan material intact (MPa)	<i>Point-Load Strength Index</i>	>8	4-8	2-4	1-2	Pengujian UCS lebih dianjurkan		
	<i>Uniaxial Compressive Strength</i>	>200	100-200	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
<i>Rating</i>		15	12	7	4	2	1	0

(Sumber: Agustawijaya, 2019)

Data UCS (Uniaxial Compressive Strength) diperoleh dari nilai kekasaran batuan yang dikonversi menjadi nilai kekuatan batuan dengan persamaan

$$U_{\text{RMR}} = \exp (0.818 + 0.059 U_{\text{CS}}) \quad (2)$$

UCS = *Uniaxial Compressive Strength*

N = Nilai rebound palu Schmidt

2) *Rock Quality Designation (RQD)*

Pada perhitungan nilai RMR, parameter *Rock Quality Designation (RQD)* berdasarkan nilai RQD-nya yang dihitung menggunakan persamaan:

$$RQD = 100(0.1\lambda + 1)e^{-0.1\lambda} \quad (3)$$

RQD = *Rock Quality Designation*

λ = frekuensi diskontinuitas

Selanjutnya diberikan bobot berdasarkan nilai RQD seperti tertera pada **Tabel 2**.

Tabel 2 *Rock Quality Designation (RQD)*

Rock core quality RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
Rating	20	17	13	8	3

(Sumber: Agustawijaya, 2019)

3) Jarak Antar (spasi) Kekar (*Spacing of Discontinuities*)

Jarak antar (spasi) kekar didefinisikan sebagai jarak tegak lurus antara dua kekar berurutan sepanjang garis pengukuran yang dibuat sembarang. Pada perhitungan nilai RMR, parameter jarak antar (spasi) kekar diberi bobot berdasarkan nilai spasi kekar-nya seperti tertera pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Jarak (spasi antar kekar)

Jarak (spasi) antar kekar (m)	>3	1-3	0,3-1	0,05-0,3	<0,05
Rating	30	25	20	10	5

(Sumber: Agustawijaya, 2019)

4) Kondisi kekar (*condition of discontinuities*)

Ada lima karakteristik kekar yang masuk dalam pengertian kondisi kekar, meliputi kemenerusan (*persistence/continuity*), jarak antar permukaan kekar atau celah (*separation/aperture*), kekasaran kekar (*roughness*), material pengisi

(*infilling/gouge*) dan tingkat kelapukan (*weathering*). Pemberian bobot kondisi kekar (*condition of discontinuities*) dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Kondisi kekar

Kondisi Kekar	Rating
Permukaan sangat kasar, tidak menerus, tidak ada celah antar kekar dan dinding batuan tidak terlapukkan.	25
Permukaan sedikit kasar, jarak celah antar kekar <1mm dan dinding sedikit terlapukkan.	20
Permukaan sedikit kasar, jarak antar celah <1mm dan dinding sangat terlapukkan.	12
Permukaan licin berlapis atau tebal material pengisi <5mm atau jarak antar celah 1-5mm dan menerus.	6
Tebal material pengisi halus >5mm atau jarak antar celah >5mm dan menerus.	0

(Sumber: Agustawijaya, 2019)

5) Kondisi air tanah (*groundwater conditions*)

Debit aliran air tanah atau tekanan air tanah akan mempengaruhi kekuatan massa batuan. Oleh sebab itu perlu diperhitungkan dalam klasifikasi massa batuan. Kondisi air tanah yang ditemukan pada pengukuran kekar didefinisikan sebagai salah satu kondisi berikut: kering (*completely dry*), lembab (*damp*), basah (*wet*), terdapat tetesan air (*dripping*) dan terdapat aliran air (*flowing*). Pada perhitungan nilai RMR, parameter kondisi air tanah (*ground water conditions*) diberi bobot berdasarkan **Tabel 5** di bawah ini:

Tabel 5 Kondisi air tanah

Kondisi air tanah	Inflow setiap 10m panjang terowongan (l/menit)	Tidak ada	< 25	25 - 125	>125
	Perbandingan tekanan air pada kekar/major principal stress	0	0,0 – 0,2	0,2-0,5	>0,5
Kondisi Umum	Kering (complete dry)	Lembab (moist only)	Water under moderate pressure	Masalah air yang parah (severe water problems)	
Rating	10	7	4	0	

(Sumber: Agustawijaya, 2019)

6) Orientasi Kekar (*Orientation of Discontinuities*)

Orientasi bidang diskontinuitas digambarkan oleh jurus dan kemiringan. Jurus dicatat dengan mengacu pada kutub utara magnet bumi, sedangkan kemiringan adalah sudut yang dibentuk antara bidang horixontal dengan bidangkekar searah dengan bidang kemiringan. Bidang kekar yang menguntungkan dalam terowongan, jika jurus kekar relative tegak lurus terhadap arah sumbu aksis terowongan, sedangkan jika jurus relative sejajar terhadap arah sumbu aksis terowongan maka kondisi ini dikatakan tidak menguntungkan.

Tabel 6 Penyesuaian pembobotan orientasi diskontinuitas

Jurus dan kemiringan orientasi diskontinuitas		Sangat Aman	Aman	Sedang	Tidak Aman	Sangat tidak Aman
Pembobotan	Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
	Pondasi	0	-2	-7	-15	-25
	Lereng	0	-5	-25	-50	-60

(Sumber : Agustawijaya, 2019)

Nilai RMR dihitung dari penjumlahan *rating* enam parameter di atas.

$$RMR = \sum Parameter (a+b+c+d+e+f) \quad (2.6)$$

Tabel 7 Kelas massa batuan berdasarkan nilai RMR

Parameter	Deskripsi				
<i>Rating</i>	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Kelas massa batuan	Sangat Baik (I)	Baik (II)	Sedang (III)	Buruk (IV)	Sangat buruk (V)
<i>Stand-up time</i> rata-rata	10 tahun untuk <i>span</i> 5m	6 bulan untuk <i>span</i> 4m	1 minggu untuk <i>span</i> 3m	5 jam untuk <i>span</i> 1,5m	10 menit untuk <i>span</i> 0,5m
Kohesi (kPa)	> 300	200 - 300	150 - 200	100 - 150	< 100
Sudut geser dalam	> 45°	40° - 45°	35° - 40°	30° - 35°	< 30°

(Sumber: Agustawijaya, 2019)

New Australian Tunneling Method (NATM)

Hardjomuljadi (2010), *New Austrian Tunneling Method* adalah suatu pendekatan berupa idea yang didasari oleh sifat-sifat massa batuan dan pemantauan dari kelakuan galian bawah tanah selama pelaksanaan. *Method* disini merupakan suatu konsep dasar pendekatan empiris dengan dasar teori hubungan antara tegangan (*stress*) dan deformasi (*deformation*) di sekeliling terowongan yang digali.

Dalam NATM, penyangga yang dipakai adalah penyangga yang *flexible*, bukan penyangga yang kaku (*rigid*). Jadi penggunaan kombinasi *rockbolt*, *wiremesh* dan *shotcrete* lebih sesuai daripada penggunaan beton yang tebal. Penyangga awal sebenarnya adalah penyangga total dan penyangga kedua (*secondary support*) nantinya akan lebih tergantung kepada hasil pemantauan.

Sesudah penggalian terowongan perlu dipasang penyangga awal, untuk mencegah terjadinya *rock loosening*, karena sekali batuan mengalami *loosening* maka keruntuhan akan sangat sulit untuk dicegah lagi. Oleh karena itu perlu dipasang penyangga awal yang disesuaikan dengan *stand up time* dari masing- masing jenis batuan. Berikut adalah material penyangga awal (*primary support*) dan penyangga kedua (*secondary support*) (Hardjomuljadi, 2010):

1) Baut Batuan (*Rockbolt*)

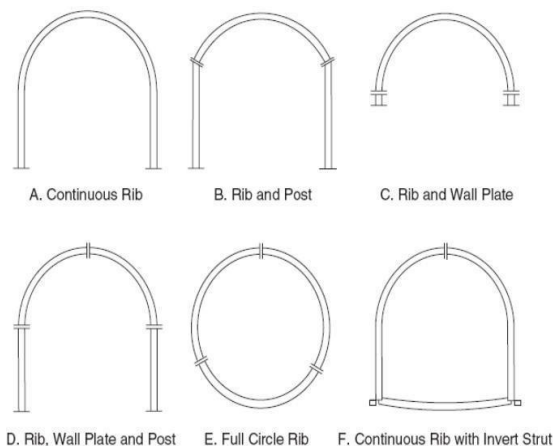
Rockbolt adalah unsur penyangga awal yang sangat penting, karena disamping fungsi utamanya untuk mencegah terjadinya *loosening* dari batuan disekeliling terowongan.

2) Beton Semprot (*Shotcrete*)

Beton semprot (*shotcrete*) adalah campuran beton yang pemasangannya dilaksanakan dengan menyemprotkan campuran tersebut ke dinding batuan yang akan disangga atau dilindungi. Dalam *tunneling*, *shotcrete* diterapkan untuk menutup permukaan yang terbuka akibat pengeboran dan untuk mendukung rongga. *Shotcrete* berfungsi sebagai kombinasi dengan unsur penyangga awal yang lain seperti *wire mesh* dan *steel support* adalah sebagai penyangga fleksibel untuk mencegah keruntuhan batuan setelah peledakan.

3) Penyangga Baja (*Steel Support*)

Steel support berupa baja profil dengan dimensi tertentu. *Steel support* ini dipergunakan pada tempat-tempat dimana kondisi batuan sangat jelek (kondisi mudah runtuh). Pemasangan *steel support* ini memberikan pengaruh pada kestabilan terowongan dengan dipasangkan pengaku lateral (rod) antara *steel support* yang satu dan lainnya.



Gambar 1. Tipe Steel Rib

(Sumber: Singh dan Rajnish, 2006)

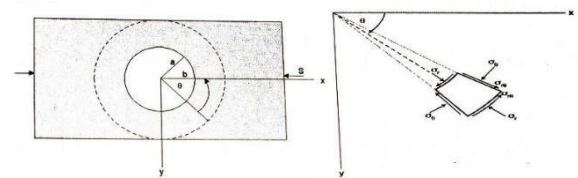
Kuat Massa Batuan

Martin, Kaiser dan McCreath (1998) dalam Munawar (2007), keruntuhan pada

galian terowongan dipengaruhi besarnya tegangan pada massa batuan. Tegangan massa batuan yang kecil, keruntuhannya dikontrol oleh *continuity* dan retakan pada massa batuan. Keruntuhan sering disebabkan perubahan tegangan pada *crown*, *sidewall* dan *invert* terowongan setelah dilakukan galian. Pada kedalaman sedang, terjadi keruntuhan lokal di sekitar batas galian terowongan, tetapi pada kedalaman cukup dalam keruntuhan terjadi di sekitar galian terowongan.

Tegangan di Sekitar Terowongan

Tegangan di sekitar terowongan yang berbentuk lingkaran akan disebar di seluruh lingkaran secara seragam, dan akan tergantung pada radius dari lingkaran tersebut. Pada radius b , tegangan akan sama dengan tegangan asal S . hal ini sesuai dengan prinsip Saint-Venant. Jadi jika terowongan seperti pada gambar 2.15 tegangan yang terjadi dari asal tegangan s akan dapat dihitung sebagai berikut :



Gambar 2. Tegangan Asal S untuk Terowongan

(Sumber : Agustawijaya, 2018)

Analisis Perilaku Tegangan

Persamaan tegangan maksimum dari masing-masing sistem penyangga terowongan:

1. Tegangan dan kekakuan maksimum *rockbolt*, menggunakan persamaan sebagai berikut (Hoek, 2008):

$$P_{sbmax} = \frac{T_{bf}}{S_l S_c}$$

$$K_{sb} = \frac{E_{sb} \pi d_b^2}{4 l S_l S_c}$$

keterangan:

d_b = diameter *rockbolt* (m)

l = panjang *rockbolt* (m)

E_{sb} = Modulus elastisitas *rockbolt* (MPa)

S_c = Jarak pemasangan *rockbolt* (m)

S_l = Jarak *rockbolt* secara longitudinal (m)

T_{bf} = Kuat tekan *rockbolt* (MPa)

2. Tegangan dan kekakuan maksimum sistem penyangga shotcrete, menggunakan persamaan sebagai berikut (Hoek dan Brown, 1980):

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

sedangkan untuk menentukan kekakuan (*stiffness*) dari *shotcrete* dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$K_{sc} = \frac{E_c (r_i^2 - (r_i - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2) (r_i - t_c) r_i^2}$$

dengan:

P_{smax} = Tegangan maksimum penyangga (MPa)

σ_{cc} = *Uniaxial compressive strength of the concrete* (MPa)

r_i = Radius terowongan (m)

t_c = Tebal *shotcrete* (m)

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

ν = Rasio poisson (m)

3. Tegangan maksimum sistem penyangga baja (*steel support*), menggunakan persamaan sebagai berikut (Hoek dan Brown, 1980):

$$P_{smax} = \frac{3 A_s I_s \sigma_{ys}}{2 S r_i \theta \left[3 I_s + X A_s \left(r_i - \left(t_B + \frac{1}{2} X \right) \right) (1 - \cos \theta) \right]}$$

sedangkan untuk menentukan kekakuan (*stiffness*) dari *steel support*, dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$K_{sc} = \frac{E_s A_s}{S r_i^2}$$

dengan:

σ_{ys} = *Uniaxial compressive strength of the steel* (MPa)

I_s = Momen inersia *steel* (m⁴)

E_s = Modulus elastisitas *steel* (MPa)

A_s = Luasan penampang *steel section* (m²)

S = Spasi antara *steel* (m)

r_i = Radius terowongan (m)

θ = Setengah sudut diameter titik

X = Tinggi baja/kedalaman baja (m)

t_B = Ketebalan blok (m)

W = Lebar blok (m)

Faktor Aman

Menurut Mohr-Coulomb faktor merupakan perbandingan keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut. Faktor keamanan dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut (Wisafitri, 2011):

$$SF = \frac{K_e \sigma_{cc} \left(1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right)}{P}$$

Faktor keamanan atau *safety factor* (SF) adalah perbandingan antara gaya yang menahan dan gaya yang menggeser/menggerakkan. Umumnya, factor aman lebih besar atau sama dengan 1.5 (SF ≥ 1.5) (Hardiyanto, 2010).

Analisis Ekonomi Teknik

Analisis ekonomi teknik sendiri memiliki peranan yang besar dalam perencanaan suatu proyek pembangunan. Analisis ekonomi proyek merupakan suatu

kajian secara ekonomi apakah suatu ide, sasaran, atau rencana suatu proyek akan dapat diwujudkan dengan porsi yang layak secara ekonomi (Kodoatie,2001).

Ekonomi teknik (*Engineering economy*) adalah disiplin ilmu yang berkaitan dengan aspek-aspek ekonomi dalam teknik, yang terdiri dari evaluasi sistematis dari biaya-biaya dan manfaat-manfaat usulan proyek-proyek teknik. Prinsip-prinsip dan metodologi ekonomi teknik merupakan bagian integral dari manajemen sehari-hari dan operasi perusahaan-perusahaan swasta dan koperasi, pengaturan utilitas publik yang diregulasi, badan-badan atau agen-agen pemerintah, dan organisasi-organisasi nirlaba. Prinsip-prinsip ini dimanfaatkan untuk menganalisis penggunaan-penggunaan alternatif terhadap sumber daya uang. Bidang studi ekonomi teknik berurusan dengan evaluasi sistematis terhadap manfaat dan biaya proyek-proyek yang melibatkan analisis keteknikan (DeGarmo dkk,1997).

Analisis ekonomi teknik pada suatu proyek pembangunan mengarahkan para perencana dalam menentukan pilihan terbaik dari beberapa alternatif hasil perencanaan yang dipilih. Penentuan alternatif mempunyai bentuk yang bermacam-macam. Alternatif ini bisa berupa perbandingan biaya dari beberapa pilihan yang direkomendasi, dapat pula analisis ekonomi melibatkan unsur resiko yang mungkin bisa terjadi. Sehingga dalam sebuah proyek konstruksi biasanya selalu dibutuhkan perbandingan agar pengambilan keputusan dalam proyek konstruksi dapat menghasilkan hasil yang optimal.

Analisis ini digunakan sebagai suatu dasar untuk menyusun perhitungan harga perkiraan sendiri (HPS) atau *owner's*

estimate (OE) dan harga perkiraan perencana (HPP) atau *engineering's estimate* (EE) yang dituangkan sebagai mata pembayaran suatu Analisis harga satuan dapat diproses secara manual atau menggunakan perangkat lunak. Analisis HSP ini adalah sebagai bagian dari dokumen kontrak harga satuan, dan harus disertakan dengan rinciannya sebagai lampiran yang tidak terpisahkan, serta sebagai alat untuk menilai kewajaran penawaran. Nilai total HPS bersifat terbuka dan tidak rahasia, serta digunakan untuk menetapkan besaran nilai tertinggi penawaran yang sah.

Kontrak harga satuan adalah kontrak pekerjaan yang nilai kontraknya didasarkan atas harga satuan pekerjaan (HSP) yang pasti dan mengikat atas setiap jenis pekerjaan masing-masing. Nilai kontrak adalah jumlah perkalian HSP dengan volume masing-masing jenis pekerjaan yang sesuai dengan daftar kuantitas dan harga (bill of quantity, BOQ) yang terdapat dalam dokumen penawaran.

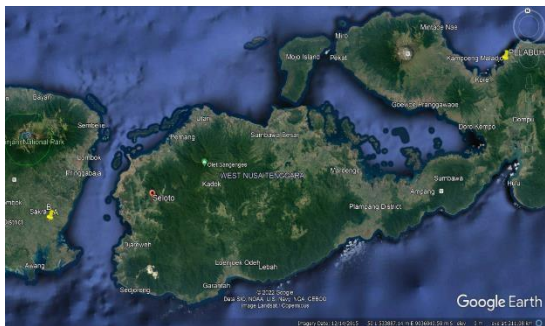
Analisis harga satuan ini menguraikan suatu perhitungan harga satuan upah, tenaga kerja, dan bahan. serta pekerjaan yang secara teknis dirinci secara detail berdasarkan suatu metode kerja dan asumsi-asumsi yang sesuai dengan yang diuraikan dalam suatu spesifikasi teknik, gambar desain dan komponen harga satuan. baik untuk kegiatan rehabilitasi/pemeliharaan. maupun peningkatan infrastruktur ke-PU-an.

Komponen biaya tidak langsung terdiri atas biaya umum atau overhead dan keuntungan. Biaya overhead dan keuntungan belum termasuk pajak-pajak yang harus dibayar, besarnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi Penelitian

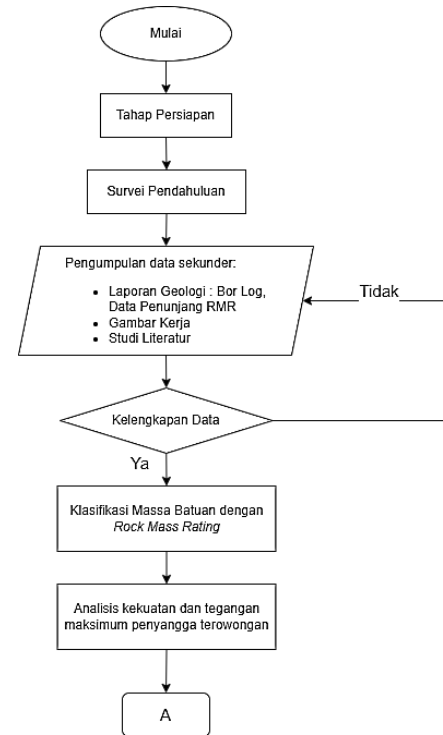
Penelitian ini dilakukan pada Terowongan Irigasi Bintang Bano di Desa Seloto, Kecamatan Taliwang, Kabupaten Sumbawa Barat, Provinsi Nusa Tenggara Barat. lokasi terowongan berada pada daerah perbukitan dengan elevasi 220 meter di atas permukaan laut dan membutuhkan waktu kurang lebih 15 menit jika ditempuh menggunakan sepeda motor dari pusat kota Taliwang. Secara geografis terletak pada 116°48'26" Bujur Timur dan 8°25'06" Lintang Selatan.



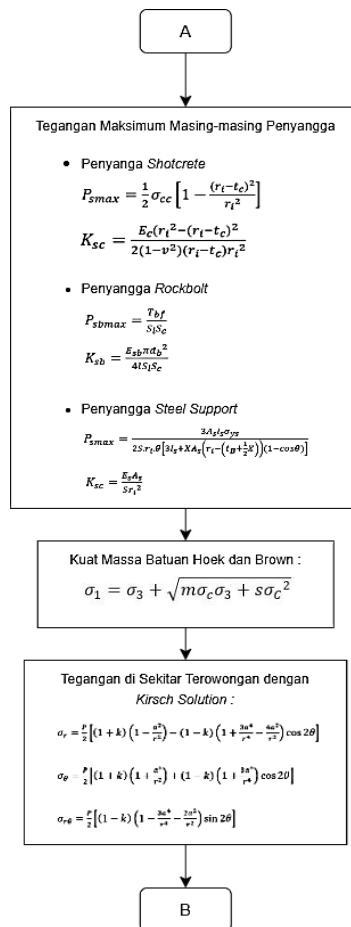
Gambar 3. Lokasi Penelitian (Sumber: www.googleearth.com, 2022)

Pelaksanaan Penelitian

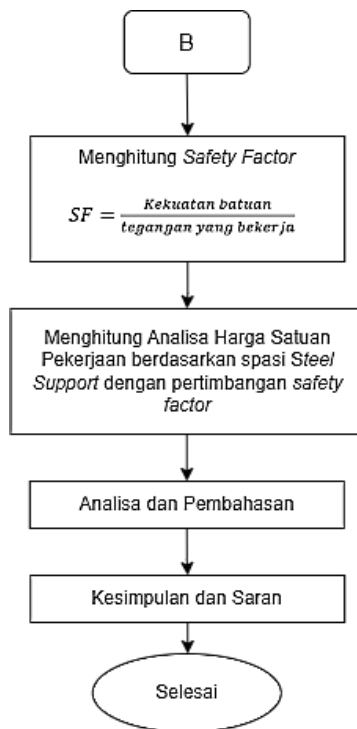
Metode penelitian adalah langkah ilmiah untuk mendapatkan data dengan tujuan dan kegunaan tertentu. Langkah ilmiah harus berpedoman pada suatu ilmu pengetahuan untuk suatu tujuan dan kegunaan tertentu. Berbagai cara agar peneliti mencapai kesimpulan suatu yang luar biasa. Ada yang menyajikan dengan data angka, ada yang mengutip teori terdahulu hingga saat ini dan sebagainya. Jenis metode penelitian kali ini adalah metode kuantitatif yang bersifat sistematis dan menggunakan model-model dan persamaan matematika. Tahapan penelitian dapat dilihat pada bagan alir di bawah ini



Gambar 4a Bagan Alir



Gambar 4b Bagan Alir

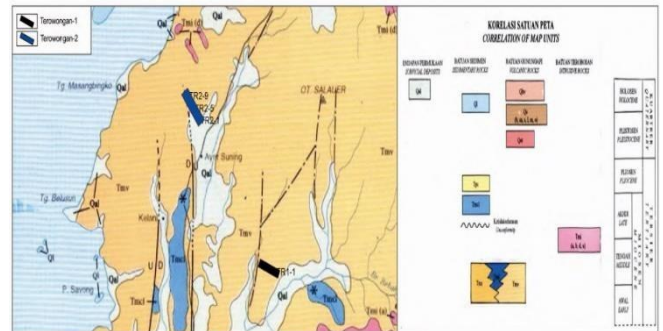


Gambar 4c Bagan Alir

HASIL DAN PEMBAHASAN Batuan Penyangga Terowongan

Pembangunan bendungan Bintang Bano dilaksanakan mulai dari tahun 2015, dalam melakukan perencanaan pembangunan tersebut diperlukan adanya informasi mengenai kondisi geologi pada lokasi pembangunan, khususnya bila ingin membangun struktur bawah tanah seperti terowongan irigasi yang dibangun di Bendungan Bintang Bano. Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa regional daerah proyek, stratigrafi batuan daerah proyek terdiri dari empat unit atuan dari umur muda ke tua yaitu :

- Qal (Aluvium dan Endapan Pantai)
- Tmcl (Batugamping Koral)
- Tmi (Batuan Terobosan)
- Tmv (Satuan Breksi-Tufa)



Gambar 5. Peta Geologi Lembar Sumbawa) yang masuk kedalam daerah pelaksanaan proyek

Sumber : (Modifikasi A. Sudrajat, S. Andi Mangga dan N. Suwarna, 1998)

Dalam melakukan perencanaan sebuah proyek konstruksi, sebaiknya perlu dilakukan optimasi agar konstruksi yang dikerjakan dapat mendapatkan hasil yang optimal.

Hasil

Rock Mass Rating (RMR)

Klasifikasi massa batuan *Rock Mass Rating* (RMR) merupakan cara untuk mengetahui kualitas massa batuan. Klasifikasi RMR didasarkan pada enam parameter yaitu kuat tekan batuan/*Uniaxial Compression Strength* (UCS), *Rock Quality Designation* (RQD), jarak kekar, kondisi kekar, kondisi air tanah, dan orientasi kekar. Objek batuan yang diteliti merupakan objek batuan yang berada di terowongan irigasi Bintang Bano. Penelitian dilakukan pada beberapa titik lokasi yaitu pada STA +206, STA +780, dan STA 1+132.

Tabel 8. Nilai *Rock Mass Rating (RMR)* pada STA +206

Parameter	Nilai	Rating
UCS (Mpa)	25-50	4
RQD (%)	83	17
Jarak kekar (mm)	0.35	10
Kondisi kekar	permukaan rata dan licin	20
Ground water	kering	15
Orientasi kekar	menguntungkan	-5
Total RMR		61

Tabel 9. Nilai *Rock Mass Rating (RMR)* pada STA +780

Parameter	Nilai	Rating
UCS (Mpa)	25-50	4
RQD (%)	95.18	20
Jarak kekar (mm)	0.18	8
Kondisi kekar	permukaan rata dan licin	10
Ground water	lembab	10
Orientasi kekar	menguntungkan	-5
Total RMR		47

Tabel 10. Nilai *Rock Mass Rating (RMR)* pada STA 1+132

Parameter	Nilai	Rating
UCS (Mpa)	25-50	4
RQD (%)	95.18	17
Jarak kekar (mm)	0.07	8
Kondisi kekar	permukaan sedikit kasar	25
Ground water	lembab	10
Orientasi kekar	menguntungkan	-5
Total RMR		59

Dengan mengetahui konstanta massa batuan, maka kekuatan massa batuan utuh dapat dihitung. Adapun nilai dari kekuatan massa batuan utuh yang didapatkan sebagai berikut:

Tabel 11. Nilai kuat massa batuan utuh terowongan irigasi Bintang Bano

	STA +206	STA +780	STA 1+132
m_b	1,17	0,43	1,02
s	0,001503439	0,000145791	0,001077261
σ_1 (1)	309,343	309,343	309,343
σ_1 (1.5)	280,801	280,801	280,801
σ_1 ()	312,271	312,271	312,271

Tegangan Massa Batuan

Suatu terowongan merupakan sebuah struktur yang dibangun dengan cara penggalian. Penggalian terowongan pada massa batuan mengakibatkan timbulnya tegangan di sekitar terowongan tersebut yang dinamakan tegangan terinduksi. Akibat dari suatu panggilan terowongan, terjadi perubahan tegangan pada batuan/tanah di sekitar terowongan.

Tabel 12. Nilai Tegangan Sekitar Terowongan dengan *Kirsch Solution*

LOKASI	ATAP			ATAP B			DINDING		
	σ_r	σ_θ	σ_ϕ	σ_r	σ_θ	σ_ϕ	σ_r	σ_θ	σ_ϕ
STA +206	0,29	0,11	0,02	0,27	0,06	0,00	0,25	0,01	0,00
STA +780	1,14	0,42	0,09	1,03	0,23	0,00	0,92	0,03	0,00
STA 1+132	0,35	0,13	0,03	0,32	0,07	0,00	0,29	0,01	0,00

Untuk menghitung kebutuhan akan penyangga terowongan, perlu dipastikan dahulu *Safety Factor* terowongan tanpa penyangga, nilai *safety factor* terowongan tanpa penyangga dapat dilihat pada **Tabel 4.8** di bawah ini

Tabel 4.8 Nilai *Safety Factor* terowongan tanpa penyangga

LOKASI	-	ATAP	ATAP B	DINDING
STA +206	σ_r	5,08676	5,61020	6,17481
	σ_θ	13,77981	25,28202	163,50907
	σ_ϕ	63,80175	0,00000	0,00000
STA +780	σ_r	1,55054	1,72022	1,92587
	σ_θ	4,20034	7,75206	50,99701
	σ_ϕ	19,44793	0,00000	0,00000
STA 1+132	σ_r	3,84199	4,24518	4,69702
	σ_θ	10,40778	19,13066	124,37711
	σ_ϕ	0,00000	0,00000	0,00000

Berdasarkan nilai *safety factor* di atas dapat disimpulkan bahwa terowongan irigasi bintang bano memerlukan sistem penyangga.

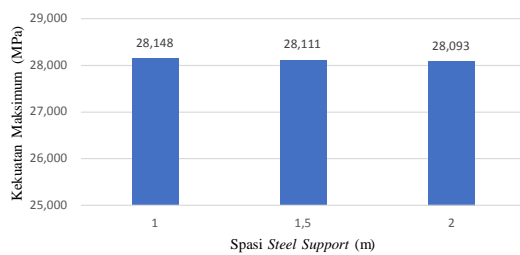
Analisis Tegangan dan Kekuatan Maksimum Sistem Penyangga

Dari hasil perhitungan, kekuatan dan tegangan total yang dihasilkan oleh system penyangga dapat dilihat pada **Tabel 14.** di bawah ini:

Tabel 14 Tabel Rekapitulasi Kekuatan dan Tegangan Total Sistem Penyangga Terowongan

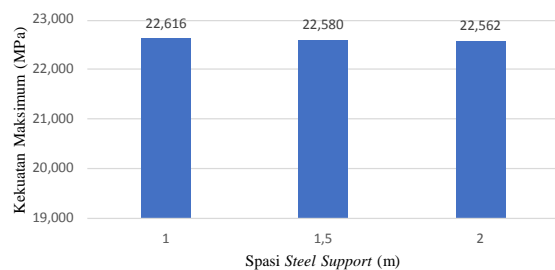
	STA +206			STA +780			STA 1+132		
	Atap	Atap B	Dinding	Atap	Atap B	Dinding	Atap	Atap B	Dinding
RMR	61			47			59		
mb	0,802			0,295			0,695		
s	0,002			0,000			0,001		
σ _{total} (⊕ 1)	28,148			22,616			22,705		
σ _{total} (⊕ 1.5)	28,111			22,580			22,668		
σ _{total} (⊖)	28,093			22,562			22,650		
σ ₃ (⊕ 1)	0,077	0,079	0,082	0,300	0,301	0,305	0,092	0,093	0,096
σ ₃ (⊕ 1.5)	0,077	0,079	0,082	0,300	0,301	0,305	0,092	0,093	0,096
σ ₃ (⊖)	0,077	0,079	0,082	0,300	0,301	0,305	0,092	0,093	0,096
σ ₁ (⊕ 1)	1,398	1,410	1,446	1,714	1,718	1,731	1,296	1,304	1,330
σ ₁ (⊕ 1.5)	1,398	1,409	1,445	1,713	1,717	1,729	1,295	1,303	1,329
σ ₁ (⊖)	1,397	1,409	1,445	1,712	1,716	1,729	1,294	1,303	1,329

Kuat Tekan Batuan Setelah Ditambahkan Penyangga Terowongan pada STA +206



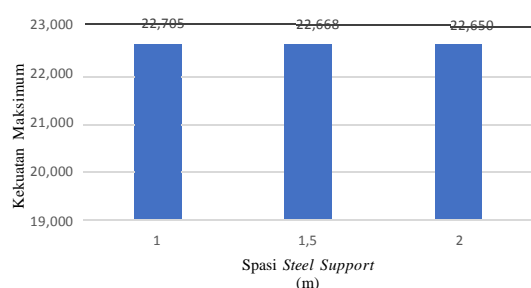
Gambar 6 Kuat Tekan Batuan Setelah Ditambahkan Penyangga Terowongan pada STA +206

Kuat Tekan Batuan Setelah Ditambahkan Penyangga Terowongan pada STA +780

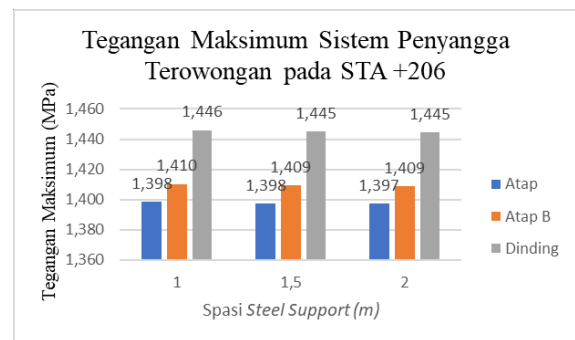


Gambar 7 Kuat Tekan Batuan Setelah Ditambahkan Penyangga Terowongan pada STA +780

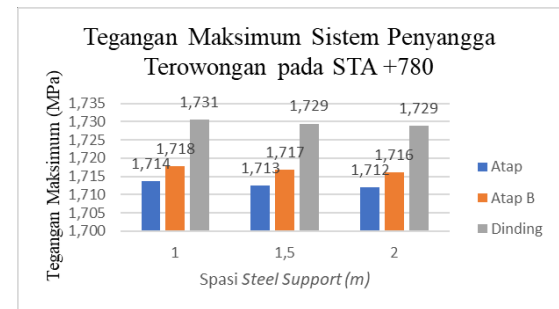
Kuat Tekan Batuan Setelah Ditambahkan Penyangga Terowongan pada STA 1+132



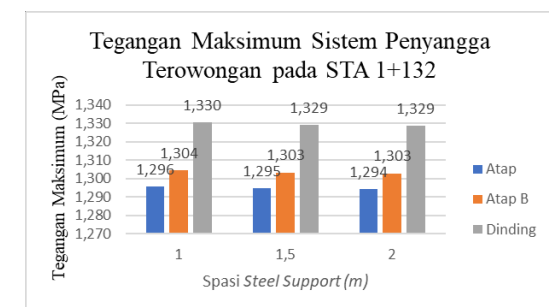
Gambar 8 Kuat Tekan Batuan Setelah Ditambahkan Penyangga Terowongan pada STA 1+132



Gambar 9 Tegangan Maksimum Sistem Penyangga Terowongan pada STA +206



Gambar 10 Tegangan Maksimum Sistem Penyangga Terowongan pada STA +780



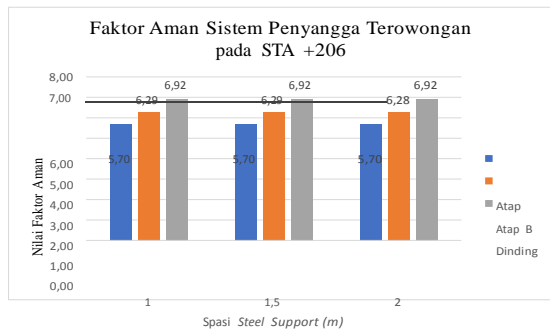
Gambar 11 Tegangan Maksimum Sistem Penyangga Terowongan pada STA 1+132

Setelah menghitung tegangan sekitar terowongan, perlu dihitung juga nilai faktor aman untuk memastikan keamanan penyangga terowongan irigasi bendungan bintang bano, hasil perhitungan nilai faktor

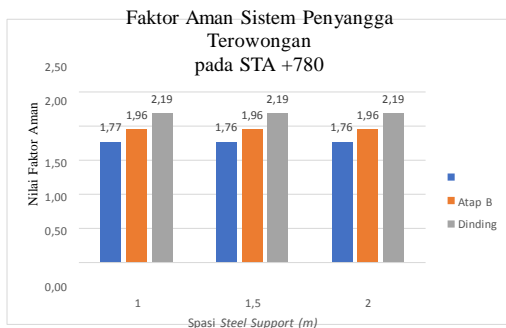
aman dapat dilihat pada **Tabel 13** di bawah ini:

Tabel 13. Nilai Faktor Aman Sistem Penyangga Terowongan

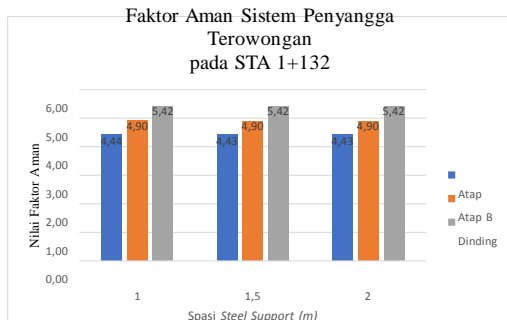
LOKASI		ATAP			ATAP B			DINDING		
		(S=1)	(S=1.5)	(S=2)	(S=1)	(S=1.5)	(S=2)	(S=1)	(S=1.5)	(S=2)
STA +206		5,70338	5,69987	5,69811	6,28998	6,28612	6,28418	6,92197	6,91782	6,91569
	θ	15,45020	15,44070	15,43594	28,34542	28,32799	28,31927	183,29391	183,18389	183,12756
	θ	71,53584	71,49183	71,46981	0E+00	0E+00	0E+00	0,00	0,00	0,00
STA +780		1,76591	1,76471	1,76410	1,95908	1,95774	1,95707	2,19100	2,19150	2,19075
	θ	4,78378	4,78051	4,77888	8,82847	8,82244	8,81943	58,07066	58,03104	58,01122
	θ	22,14933	22,13420	22,12663	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
STA 1+132		4,43784	4,43450	4,43283	4,90328	4,89959	4,89775	5,42422	5,42015	5,41811
	θ	12,02191	12,01287	12,00834	22,09632	22,07970	22,07139	143,63347	143,52559	143,47161
	θ	55,66254	55,62067	55,59972	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Gambar 12. Faktor Aman Sistem Penyangga Terowongan pada STA +206



Gambar 13. Faktor Aman Sistem Penyangga Terowongan pada STA +780



Gambar 14. Faktor Aman Sistem Penyangga Terowongan pada STA 1+132

Optimasi Harga Satuan Pekerjaan dengan Pertimbangan nilai Faktor Aman

Berdasarkan hasil Analisa faktor aman yang dilakukan, didapatkan fakta bahwa penggunaan *steel support* dengan spasi 2 m masih menunjukkan angka yang relatif aman sehingga dapat dilakukan perhitungan nilai ekonomis sebagai bahan pertimbangan untuk mengoptimasikan biaya konstruksi. Berdasarkan data yang didapatkan (Indra Karya, 2022) panjang terowongan irigasi bendungan Bintang

Bano adalah sepanjang 1200 m. berdasarkan panjang terowongan dapat dihitung analisis harga satuan pekerjaan pemasangan *steel support*.

Tabel 4.11 Analisis Harga Satuan Pekerjaan Pemasangan *Steel Support*

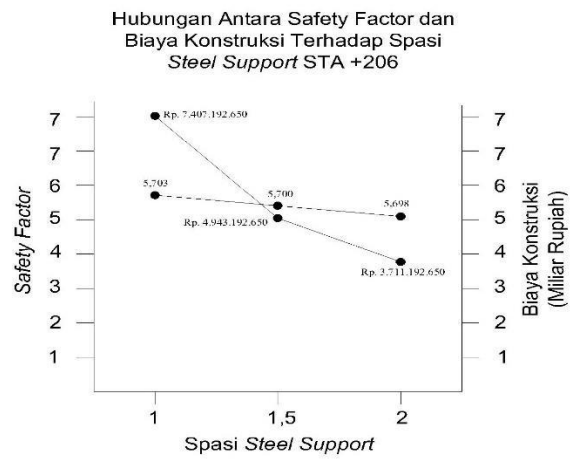
ANALISIS HARGA SATUAN PEKERJAAN PEMASANGAN STEEL SUPPORT					
PEMASANGAN SATU STEEL SUPPORT					
NO	URAIAN PEKERJAAN	SATUAN	KOEFISIEN	HARGA SATUAN	JUMLAH
I	Pekerjaan Persiapan dan Mobilisasi Alat	LS	1	Rp5.000.000	Rp5.000.000
Jumlah Total Biaya Persiapan					Rp5.000.000
II	Tenaga				
1.	Pekerja	OH	0,7	Rp110.000	4
2.	Tukang Besi	OH	0,7	Rp120.000	2
3.	Kepala Tukang	OH	0,7	Rp125.000	1
4.	Mandor	OH	0,7	Rp125.000	1
Jumlah Total Biaya Tenaga					Rp651.000
III	Bahan				
1.	Baja WF 300.150.6.5.9	kg	0,7	Rp20.000	440
2.	Biaya Pemasangan dan Alat	Ls	0,7	Rp2.000.000	
Jumlah Total Biaya Bahan					Rp7.560.000
IV	Total Jumlah (I+II+III)				Rp13.211.000
V	Keuntungan (15%*IV)				Rp1.981.650
VI	Harga Satuan Pekerjaan (IV+V)				Rp15.192.650

Tabel 4.12 Rekapitulasi Nilai *Safety Factor* dan harga pemasangan *steel support*

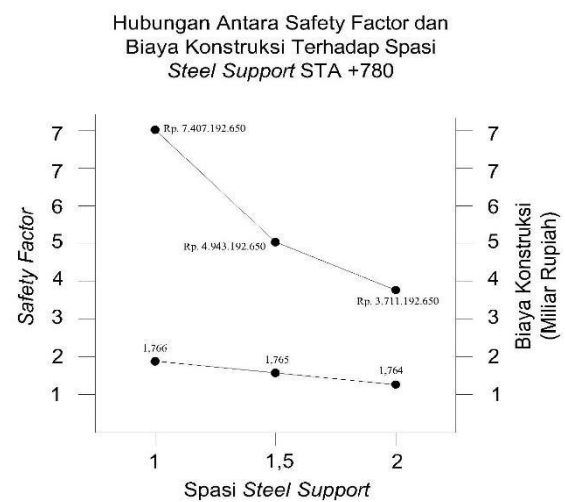
sepanjang terowongan irigasi Bendungan Bintang Bano.

STA	Spasi	Nilai <i>Safety Factor</i>			K E T E R A N G A N
		ATAP	ATAP B	DINDING	
STA +206	1	5,7034	6,2900	6,9220	Harga Pemasangan <i>Steel Support</i> dengan Spasi 1 m, dan jumlah <i>Steel Support</i> sebanyak 1201 Rp7.407.192.650
	1,5	5,6999	6,2861	6,9178	
	2	5,6981	6,2842	6,9157	
STA +780	Nilai <i>Safety Factor</i>				
	Spasi	ATAP	ATAP B	DINDING	Harga Pemasangan <i>Steel Support</i> dengan Spasi 1,5 m, dan jumlah <i>Steel Support</i> sebanyak 801 Rp4.943.192.650
	1	1,7659	1,9591	2,1930	
1,5	1,7647	1,9577	2,1915		
STA 1+132	Nilai <i>Safety Factor</i>				
	Spasi	ATAP	ATAP B	DINDING	Harga Pemasangan <i>Steel Support</i> dengan Spasi 2 m, dan jumlah <i>Steel Support</i> sebanyak 601 Rp3.711.192.650
	1	4,4378	4,9033	5,4242	
1,5	4,4345	4,8996	5,4201		
	2	4,4328	4,8977	5,4181	

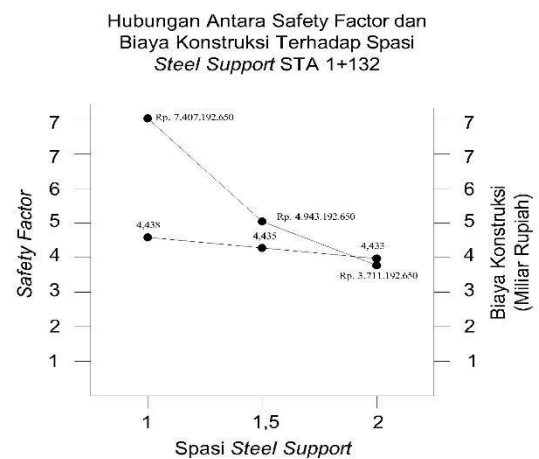
Berdasarkan perhitungan Analisa harga satuan pekerjaan pemasangan *steel support* dengan spasi 1 m, 1,5 m, dan 2 m. didapatkan bahwa pengoptimasian biaya konstruksi dengan acuan SSH Pemprov NTB tahun 2022 dapat menghemat biaya sebesar Rp. 3.696.200.000 (tiga milyar enam ratus sembilan puluh enam juta dua ratus ribu rupiah). Hasil pengoptimasian didapatkan berdasarkan perhitungan jumlah *steel support* yang berkurang dikarenakan faktor aman dengan spasi *steel support* sepanjang 2 m masih memungkinkan, dimana hasil perhitungan factor aman (*Safety Factor*) pada STA +206 dengan spasi *Steel Support* 1 m, 1,5 m, dan 2 m memperoleh nilai 5,703, 5,769, dan 5,698 untuk Atap, pada Atap B memperoleh nilai 6,290, 6,286, dan 6,284, sedangkan untuk Dinding memperoleh nilai 6,922, 6,918, dan 6,915. Pada STA +780 dengan spasi *Steel Support* 1 m, 1,5 m, dan 2 m memperoleh nilai 1,765, 1,764, dan 1,764 untuk Atap, pada Atap B memperoleh nilai 1,959, 1,957, dan 1,957, sedangkan untuk Dinding memperoleh nilai 2,193, 2,191, dan 2,190. Pada STA 1+132 dengan spasi *Steel Support* 1 m, 1,5 m, dan 2 m memperoleh nilai 4,437, 4,434, dan 4,432 untuk Atap, pada Atap B memperoleh nilai 4,903, 4,899, dan 4,897, sedangkan untuk Dinding memperoleh nilai 5,424, 5,420, dan 5,418.



Gambar 4.17 Grafik Hubungan *Safety Factor* dan Biaya Konstruksi Terhadap Spasi *Steel Support* STA +206



Gambar 4.18 Grafik Hubungan *Safety Factor* dan Biaya Konstruksi Terhadap Spasi *Steel Support* STA +780



Gambar 4.19 Grafik Hubungan *Safety Factor* dan Biaya Konstruksi Terhadap Spasi *Steel Support* STA 1+132

Pembahasan

Berdasarkan hasil Analisa yang dilakukan pada tiga lokasi pada terowongan irigasi Bintang Bano yaitu pada STA +206, STA+780, dan STA 1+132 didapatkan parameter kuat massa batuan (*Rock Mass Rating*) yang berbeda-beda meskipun jenis batuan penyusunnya sama yaitu breksi tuff. Dimana nilai RMR untuk terowongan pada STA +206, STA +780, dan STA 1+132 berturut-turut adalah 61, 47, dan 59. Dari hasil Analisa tersebut didapatkan bahwa nilai klasifikasi massa batuan (RMR) yang paling besar dimiliki oleh massa batuan yang berada pada STA +206. Hasil dari parameter RMR menunjukkan bahwa massa batuan penyusun STA +206 dan STA 1+132 termasuk kedalam golongan III yaitu batuan sedang atau *fair rock*, sedangkan untuk STA +780 termasuk ke dalam golongan IV yang merupakan jenis batuan buruk *poor rock*. Hal ini mengindikasikan bahwa batuan tersebut merupakan batuan yang berperilaku seperti tanah dikarenakan massa batuan yang masuk dalam kategori buruk dan sedang.

Untuk perhitungan kuat geser massa batuan, Analisa dilakukan pada dua titik di bagian atap dan satu titik di dinding terowongan. Pemilihan Analisa pada bagian atap dan dinding dikarenakan massa batuan berpotensi runtuk pada bagian tersebut. Sehingga diperlukan perhitungan kuat geser sebagai parameter kekuatan massa batuan. Untuk menentukan kuat geser massa batuan, harus ditentukan parameter kuat geser massa batuan yaitu kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan tegangan normal (σ). Nilai dari parameter kuat geser massa batuan tersebut didapat dari cara Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb sehingga didapatkan hasil seperti yang telah dirincikan pada subbab Hasil.

Secara umum dasar dari penentuan kombinasi system penyangga yang digunakan pada terowongan irigasi Bintang Bano yaitu berdasarkan harga klasifikasi massa batuan menggunakan *RMR System* itu sendiri. Jenis batuan di sekitar terowongan seperti sudah disebutkan sebelumnya dikategorikan sebagai batuan lunak yang berperilaku seperti tanah, sehingga diperlukan kombinasi penyanggaan yang mampu menahan massa batuan di atasnya. Keseluruhan sistem penyangga yakni *Shotcrete*, *Rockbolt*, dan *Steel Rib/Steel Suport*.

Sistem penyangga yang pertama kali dipasang ialah penyangga mortar semprot atau *shotcrete*. Tegangan maksimum *shotcrete* adalah tegangan yang terdiri dari beberapa parameter kuat tekan campuran, radius atau jari-jari terowongan dan tebal *shotcrete* dari terowongan. Perhitungan penyangga *shotcrete* pada atap dengan jari-jari terowongan 2,00 m dan ketebalan *shotcrete* 15 cm. sistem penyangga *shotcrete* menghasilkan tegangan maksimum penyangga yaitu sebesar 5,25 MPa, dinding terowongan pada bentuk tapal kuda umumnya adalah bagian terlemah pada terowongan. Pada bagian ini dapat terjadi tungan kompresi, berbeda dengan atap yang terjadi penyebaran Tarik di seluruh permukaan lengkung atap terowongan. Pada bagian dinding rawan terjadi keruntuhan geser, sehingga massa batuan sangat tergantung pada kuat geser massa batumannya.

Sistem penyangga yang dipasang selanjutnya yaitu *rockbolt*, dipasang setelah penyangga *shotcrete*. Diameter *rockbolt* yang digunakan 25 mm sepanjang 3,8m sebanyak 5 buah di sekitar atap terowongan. Untuk satu buah *rockbolt* mampu memebrikan tegangan sebesar 0,667 MPa dengan kekakuan 2 MPa/m,

maka untuk 5 buah *rockbolt* tegangan menjadi 2,667 MP dengan kekakuannya menjadi 10,908 Mpa/m.

Selanjutnya pemasangan penyangga atau *steel support* menggunakan profil WF 300.150.6,5.9 dengan jarak pemasangan divariasikan sepanjang 1 m, 1,5 m, dan 2 m menghasilkan kekuatan dan tegangan maksimum yang dapat dilihat pada **Tabel 14** pemasangan baja dengan spasi 1,5 m dan 2 m tidak menurunkan faktor aman terhadap penyangga baja dengan spasi 1,0 m, maka dari itu untuk menghemat biaya konstruksi dapat digunakan spasi 2,0 m.

Faktor aman yang didapatkan dari ketiga penyangga terowongan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 13** perhitungan faktor aman didasarkan pada jarak spasi *steel support* dan menghasilkan kondisi struktur yang aman untuk spasi *steel support* sepanjang 2,0 m, sehingga biaya konstruksi terowongan yang awalnya sebesar Rp. 7.407.192.650 dapat dioptimasi menjadi sebesar Rp. 3.711.192.650 dengan konstruksi yang masih dalam batas aman.

Perhitungan-perhitungan sistem penyangga ini menerapkan mutu-mutu penyangga standar, baik *shotcrete*, *rockbolt*, dan *steel support*. Jika mutu-mutu penyangga ini berkurang dari mutu standar, maka tegangan penyangga yang diberikan oleh masing-masing penyangga akan berkurang, sehingga menyebabkan faktor aman yang berkurang pula

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1) Sistem penyangga diperlukan di terowongan irigasi Bintang Bano karena batuan pada terowongan Bintang Bano dikategorikan batuan lunak yang berperilaku seperti tanah sehingga

memerlukan penyangga seperti yang dijelaskan pada metode NATM (*New Austrian Tunneling Method*).

2) Dari perhitungan matematis, tegangan total yang dihasilkan oleh penyangga terowongan pada STA +206, STA +780, dan STA 1+132 digunakan untuk menghitung sehingga menghasilkan nilai faktor aman yang menjadi dasar untuk mengoptimasi spasi dari *steel support* menjadi 2,0 m dengan faktor aman masih dalam batas aman ($\geq 1,5$) sebagai upaya untuk mengoptimasi biaya konstruksi sebesar Rp. 3.696.200.000 (tiga milyar enam ratus sembilan puluh enam juta dua ratus ribu rupiah), Sehingga terowongan irigasi Bintang Bano dapat dikatakan aman dan optimal.

Saran

Dari seluruh rangkaian pengerjaan tugas akhir ini, penulis menyarankan untuk:

1. Dalam melakukan perencanaan ataupun pelaksanaan proyek konstruksi, diperlukan adanya pengoptimasian agar seluruh proses konstruksi yang panjang dapat menghasilkan bangunan yang aman dan optimal.
2. Bagi peneliti selanjutnya yang ingin mengambil penelitian serupa, disarankan untuk melakukan pengujian laboratorium terlebih dahulu agar data yang dipakai dapat dipastikan benar tidaknya.

DAFTAR PUSTAKA

Aeni, Quratu', 2014, Perilaku Tegangan Pada Massa Batuan yang Menggunakan Sistem Penyangga Grouting Pada Terowongan Pengelak Bendungan PandanDuri

- Swangi di Lombok Timur, Fakultas Teknik Universitas Mataram, Mataram.
- Agustawijaya, D.S., 2011, The Influence of Rock Properties and Size into Strength Criteria: A Proposed Criterion for Soft Rock Masses, *Civil Engineering Dimention*, Vol 13, No.2.
- Agustawijaya, D.S., 2016, Mekanika Batuan Untuk Terowongan dan Struktur Bawah Permukaan, Fakultas Teknik Sipil Universitas Mataram.
- Agustawijaya, D.S., 2019, Geologi Teknik, Penerbit Andi, Yogyakarta
- Agustawijaya, D,S,M 2020 *Aplication of Mohr-Coulomb Parameters Determined from Hoek-Brown Criterion for Tunnel Stability Analysis : A Study Case at Beringin Sila Diversion Tunnel in Sumbawa Island Indonesia*, Mataram.
- Anonim, 2002, Pedoman Pekerjaan Terowongan Pegunungan, Clinical Institute for Tunnels and Tunneling- Yamaguchi University (CITY-YU), Jakarta.
- Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. John Willey and Sons, Inc: Canada.
- Hoek, Evert, 1998, *Tunnel Support in Weak Rock*, Taipei, Taiwan.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015, Pedoman Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan pada Media Campuran Tanah Batuan.
- Sakapakerti, Anggiet Roro. 2020. Analisis Pengaruh Kuat Geser Massa Batuan terhadap Waktu Tunggu (*Stand-up Time*) Terowongan Pengelak Beringin Sila, Kabupaten Sumbawa. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram, Mataram.
- Singh, B., dan Goel, R.K., 2011, *Engineering Rock Mass Classification*, Elsevier, Oxford, UK.
- Wally, Junaida, 2014, Pemodelan Terowongan pada Batuan dengan Metode Finite Element, Fakultas Teknik Universitas Komputer Indonesia, Bandung.