

KAJIAN TEKNIS KESTABILAN TEROWONGAN MENGGUNAKAN METODE EMPIRIS DAN NUMERIK

Idana Sobieski Tambunan¹, Ruth Meivera Siburian², Lismawaty³

Mahasiswa Prodi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Fakultas Teknologi,
Institut Sains dan Teknologi T.D Pardede¹

Dosen Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains dan Teknologi T.D Pardede²

Dosen Prodi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Institut Sains dan Teknologi T.D Pardede³
Jl. DR. TD. Pardede No. 8 Medan 20153, Sumatera Utara

¹idan sobieski@gmail.com, ²ruthmeivera@istp.ac.id, ³lismawaty@istp.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi kestabilan terowongan Sibaganding. Kondisi kestabilan terowongan didapatkan melalui kajian dengan metode empiris dan metode numerik. Pada metode empiris kajian dilakukan berdasarkan pengamatan secara langsung di terowongan berdasarkan klasifikasi kualitas massa batuan, yaitu *Rock Mass Rating* (RMR) dan *Q-System*, sedangkan berdasarkan metode numerik kajian dilakukan dengan teknik yang diformulasikan secara matematis dengan cara operasi hitungan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) melalui *software Unwedge* dan *Phase 2*. Bobot massa batuan pada terowongan Sibaganding menurut RMR adalah 46 termasuk dalam kelas III (sedang) dan menurut *Q-System* bobot yang diperoleh adalah 5,00 termasuk ke dalam kelas C (*fair*). Melalui *software Unwedge* diketahui bahwa terowongan Sibaganding memiliki 3 keruntuhan utama yang berada di atap sebelah kiri, atap sebelah kanan, dan dinding sebelah kanan terowongan dengan kondisi keruntuhan yang berada pada kondisi stabil. Pada *software Phase 2* didapatkan bahwa nilai *maximum total displacement* sebesar 0,007834 mm/hari, dan nilai Faktor Keamanan (FK) adalah 6,00. Ini menunjukkan bahwa terowongan Sibaganding memiliki kualitas massa batuan sedang (*fair*) dengan kondisi kestabilan yang stabil artinya terowongan Sibaganding tidak memerlukan adanya penguatan ataupun penyanggaan.

Kata Kunci : Terowongan, *Rock Mass Rating*, *Q-System*, *Unwedge*, *Phase 2*, *Displacement*, Faktor Keamanan

ABSTRACT

This research was conducted to determine the stability condition of the Sibaganding tunnel. Tunnel stability conditions were obtained through studies using empirical methods and numerical methods. In the empirical method, the study was carried out based on direct observations in the tunnel based on the classification of rock mass quality, namely Rock Mass Rating (RMR) and Q-System, while based on the numerical method the study was carried out using a technique formulated mathematically by means of the finite element method (FEM) through Unwedge and Phase 2 software. The weight of the rock mass in the Sibaganding tunnel according to RMR is 46 included in class III (medium) and according to the Q-System the weight obtained is 5.00 including class C (fair). Through the Unwedge software, it is known that the Sibaganding tunnel has 3 main failures which are on the left roof, the right roof, and the right wall of the tunnel with the collapse conditions being in a stable condition. In Phase 2 software, it is found that the maximum total displacement value is 0.007834 mm/day, and the

Jurnal Ruang Luar dan Dalam FTSP | 138

value of the Safety Factor (SF) is 6.00. This shows that the Sibaganding tunnel has moderate rock mass quality with stable stability conditions, meaning that the Sibaganding tunnel does not require any reinforcement or support.

Keywords : Tunnel, Rock Mass Rating, Q-System, Unwedge, Phasw 2, Displacement, Safety Factor

1. PENDAHULUAN

Terowongan Sibaganding yang berada di km 33 Jalan Pematangsiantar – Parapat atau di Desa Sibaganding, dibangun oleh Belanda pada tahun 1919 untuk jalan utama menuju ke Parapat. Pada saat itu semua alat transportasi yang menuju ke Parapat melalui terowongan tersebut, namun pada tahun 1967 dibangun jalan raya oleh pemerintah. Setelah dibangunnya jalan raya, terowongan tersebut hanya digunakan untuk pejalan kaki (warga setempat) dan kini telah dijadikan sebagai objek wisata. Terowongan ini berbentuk tapal kuda dan dari tahun 1919 hingga saat ini belum pernah dilakukan penguatan dan penyanggaan. Oleh karenanya perlu diketahui bagaimana kondisi kestabilan terowongan tersebut dan apakah terowongan tersebut dapat bertahan tanpa adanya penguatan dan penyanggaan.

Dalam rangka untuk mengetahui bagaimana kondisi kestabilan terowongan Sibaganding maka akan dilakukan kajian teknis kestabilan terowongan dengan menggunakan metode empiris yaitu, klasifikasi *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989), dan *Q System* (Barton, 1974). Kemudian untuk mengetahui berapa besaran nilai kestabilan terowongan dilakukan dengan metode numerik yang berbasis *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan *software Unwedge* dan *Phase 2*.

2. METODE

Mengacu pada jenis datanya, penelitian ini dikategorikan sebagai penelitian langsung, berdasarkan pengolahan data dan penarikan kesimpulan, penelitian ini dikategorikan sebagai penelitian dengan metode empiris dan metode numerik.

2.1 Metode Empiris

Suatu hal yang empiris berdasarkan pada pengalaman atau observasi secara langsung. Metode empiris adalah suatu pendekatan penelitian yang digunakan untuk menggambarkan kondisi yang dilihat di lapangan secara apa adanya. Metode empiris pada terowongan diperoleh melalui Klasifikasi Kualitas Massa Batuan, yaitu dengan *Rock Mass Rating* (RMR) dan *Q-System*. Metode empiris digunakan untuk mendapatkan nilai pembobotan mengenai kualitas massa batuan serta

rekomendasi penyanggaan yang akan diterapkan pada terowongan.

2.2 Rock Mass Rating (RMR)

Bieniawski, melalui bukunya memperkenalkan RMR sebagai suatu metode pengklasifikasian massa batuan berdasarkan beberapa parameter, yaitu kuat tekan batuan utuh, *Rock Quality Designation*, spasi diskontinuitas, kondisi bidang diskontinuitas dan kondisi air. Dimana setiap parameter akan diberikan pembobotan sesuai dengan kondisinya masing - masing. Hasil akumulasi dari pembobotan setiap parameter akan menunjukkan nilai kualitas massa batuan, kelas massa batuan dan rekomendasi penyanggaan pada terowongan.

2.3 Q-System

Klasifikasi *Q-System* dikembangkan oleh Barton 1974 di *Norwegian Geotechnical Institute* (NGI) Norwegia. *Q-System* dikenal juga dengan istilah *Rock Tunnel Quality Index* untuk keperluan perancangan penggalian bawah tanah. Pembobotan *Q-System* didasarkan atas penaksiran kualitas massa batuan berdasarkan 6 parameter, yaitu RQD, jumlah kekar (J_n), kekasaran kekar (J_r), *joint alteration number* (J_a), aliran air (J_w) dan faktor reduksi tegangan (SRF). Nilai Q dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

2.4 Metode Numerik

Metode numerik adalah teknik penyelesaian permasalahan yang diformulasikan secara matematis dengan cara operasi hitungan. Metode numerik dilakukan dengan operasi hitungan dalam jumlah yang banyak dan prosesnya berulang, sehingga dalam prakteknya perlu bantuan *software* untuk menyelesaikan hitungan tersebut. Adapun metode numerik yang digunakan adalah metode elemen hingga melalui bantuan *software Unwedge v.3.0* dan *Phase2 v.6.0*.

2.5 Unwedge

Unwedge adalah program analisis dan visualisasi stabilitas 3D untuk penggalian bawah tanah pada batuan yang mengandung diskontinuitas struktural

yang berpotongan. Faktor keamanan dihitung untuk baji yang berpotensi tidak stabil dan persyaratan penyanggaan dapat dimodelkan menggunakan berbagai jenis pola *bolting* dan *shotcrete*. *Unwedge* digunakan untuk memperoleh informasi dan memvisualisasikan keruntuhan yang mungkin terjadi pada terowongan. Adapun data yang dimasukkan adalah geometri terowongan, *joint orientation*, dan *joint properties* dari batuan penyusun terowongan.

2.6 Phase2

Phase2 menggunakan analisis 2D elastoplastik dengan analisis tegangan elemen hingga untuk penggalian bawah tanah atau permukaan batuan. Penggunaan *Phase2* dimaksudkan untuk memperoleh tegangan, *displacement* dan *strength factor* pada terowongan. Adapun data yang dimasukkan pada *Phase2* adalah geometri terowongan, *material properties*, dan *field stress* dengan kriteria keruntuhan Mohr Coulomb.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada Terowongan Sibaganding maka diperoleh hasil sebagai berikut :

3.1 Batuan

Berdasarkan peta geologi pada daerah penelitian, Terowongan Sibaganding didominasi oleh batugamping dengan Formasi Kualu (Mtk). Formasi kualu terdiri dari anggota batugamping sibaganding, serpih, batu pasir dan lanau.

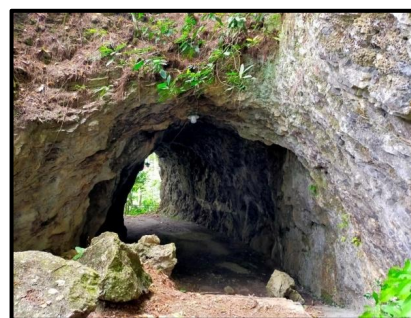


Gambar 3.1 Batugamping

3.2 Geometri Terowongan

Terowongan Sibaganding memiliki geometri sebagai berikut :

- Tunnel Axis : N 35° E
- Panjang : 21 meter
- Lebar : 6 meter
- Tinggi : 5,5 meter



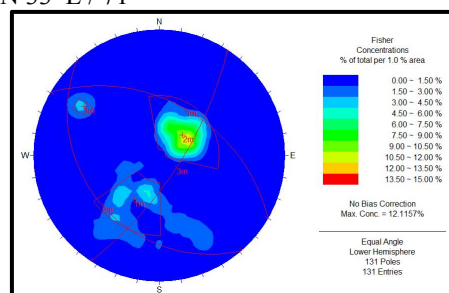
Gambar 3.2 Terowongan Sibaganding

3.3 Jurus dan Kemiringan Bidang Diskontinuitas

Jurus dan kemiringan bidang diskontinuitas diperoleh dari hasil pengukuran langsung dengan menggunakan Kompas Brunton. Hasil pengukuran diperoleh data sebanyak 131 data strike/dip dari bidang diskontinuitas.

Adapun arah umum yang diperoleh dari data tersebut setelah dimasukkan pada program *Dips* adalah

1. N N 300° E / 44°
2. N 139° E / 28°
3. N 33° E / 71°



Gambar 3.3 Arah Bidang Diskontinuitas

3.4 Jarak Diskontinuitas

Spasi diskontinuitas yang didapatkan pada terowongan Sibaganding berkisar antara 6 – 20 cm.



Gambar 3.4 Jarak Diskontinuitas

3.5 Kondisi Diskontinuitas

Setelah dilakukan pengamatan pada dinding terowongan Sibaganding didapatkan bahwa permukaan diskontinuitas kasar dengan separasi 1 – 5 mm.



Gambar 3.5 Kondisi Bidang Diskontinuitas

3.6 Kondisi Air Tanah

Kondisi air tanah pada terowongan Sibaganding adalah basah.



Gambar 3.6 Kondisi Air tanah

3.7 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

A. Bobot Isi Batuan (γ)

Nilai bobot isi batuan diperoleh dari pengujian sifat fisik batuan. Pengujian ini dilakukan sebanyak 6 kali dengan nilai rata – rata bobot isi (γ) adalah 27,58 kN/m³.

B. RQD

Perhitungan RQD pada terowongan dilakukan secara tidak langsung berdasarkan metode scanline oleh Poist E. Hudson, 1976, yaitu dengan persamaan sebagai berikut :

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0,1\lambda+1)$$

Dimana, λ = Jumlah kekar per meter (6)

$$RQD = 2,71^{-0,1 \times 6} \times 100 (0,1 \times 6 + 1)$$

$$RQD = 0,54 \times 100 (1,6)$$

$$RQD = 55 (1,6)$$

$$RQD = 88 \%$$

C. Kuat Tekan Uniaksial (σ_c)

Pengujian kuat tekan uniaksial dilakukan di Laboratorium Beton Universitas Sumatera Utara.



Gambar 3.7 Pengujian Kuat Tekan Uniaksial Batuan (σ_c)

Sebanyak 2 sampel batugamping telah di uji dan didapatkan hasilnya adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Nilai Kuat Tekan Uniaksial

No	σ_c (MPa)	Rata – Rata
1	28,92	31,54
2	34,16	

D. Modulus Young (E)

Nilai *Modulus Young* didapatkan dari pengujian kuat tekan uniaksial batuan, dimana *Modulus young* adalah perbandingan antara nilai *stress* dengan regangan axial. Nilai *Modulus Young* adalah sebesar 9645 MPa.

E. Poisson Ratio (ν)

Poisson Ratio adalah perbandingan antara regangan lateral dengan regangan axial. Data regangan diperoleh dari pengujian kuat tekan uniaksial batuan. Nilai *poisson ratio* adalah sebesar 0,3.

F. Kohesi (c)

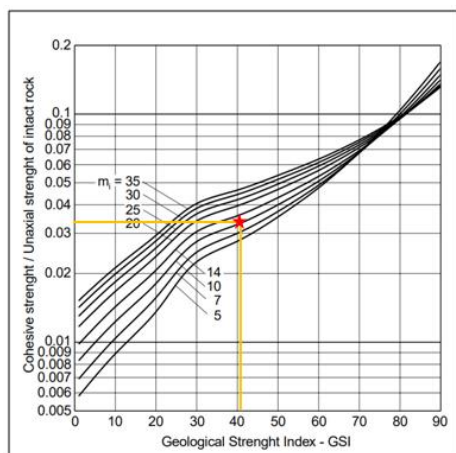
Nilai Kohesi diperoleh secara tidak langsung melalui kurva hubungan antara kohesi dengan *Geological*

Strength Index (GSI). Konstanta m_i untuk batugamping adalah 10.

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5$$

$$\text{GSI} = 46 - 5$$

$$\text{GSI} = 41$$



Gambar 3.8 Hubungan antara Kohesi dengan *Geological Strength Index*

Perhitungan nilai Kohesi :

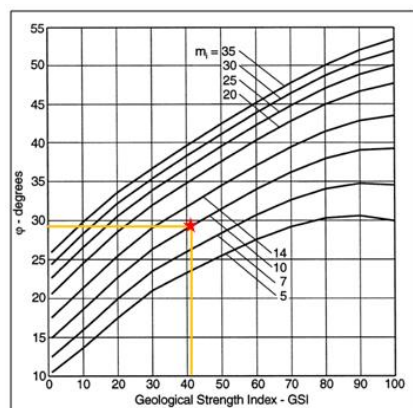
$$\frac{c}{\sigma_c} = 0,033$$

$$c = 0,033 \times 31,54 \text{ MPa}$$

$$c = 1,04 \text{ MPa}$$

G. Sudut Geser Dalam (ϕ)

Nilai sudut geser dalam diperoleh secara tidak langsung melalui kurva hubungan sudut geser dalam dengan *Geological Strength Index* (GSI).



Gambar 3.9 Hubungan antara Sudut Geser Dalam dengan GSI

Nilai sudut geser dalam (ϕ) yang didapatkan adalah 29° ,

H. *Tensile Strength* (σ_t)

3.9 *Q-System*

Dari pengamatan yang dilakukan di terowongan Sibaganding, maka diperoleh data hasil pembobotan *Q-System* sebagai berikut :

Nilai *Tensile Strength* (σ_t) diperoleh melalui persamaan $\text{UCS} = 9,944 \times \text{BTS}^{1,1349}$. UCS (*Uniaxial Compressive Strength*) dan BTS (*Brazilian Tensile Strength*).

$$\text{UCS} = 9,944 \times \text{BTS}^{1,1349}$$

$$31,54 \text{ MPa} = 9,944 \times \text{BTS}^{1,1349}$$

$$3,17 \text{ MPa} = \text{BTS}^{1,1349}$$

$$\text{BTS} = 2,76 \text{ MPa}$$

Tabel 3.2 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Parameter	Nilai
Bobot Isi (γ)	27,58 kN/m ³
RQD	88%
Kuat Tekan Uniaksial (σ_c)	31,54 MPa
<i>Modulus Young</i> (E)	9645 MPa
<i>Poisson Ratio</i> (ν)	0,3
Kohesi (c)	1,04 MPa
Sudut Geser Dalam (ϕ)	29°
<i>Tensile Strength</i> (σ_t)	2,76 MPa

3.8 *Rock Mass Rating* (RMR)

Berdasarkan tabel pembobotan *Rock Mass Rating* (RMR) Bieniawski 1989, maka diperoleh bobot RMR untuk terowongan Sibaganding adalah sebagai berikut :

Tabel 3.3 Pembobotan *Rock Mass Rating* (RMR)

No	Parameter	Nilai	Bobot
1	Kuat Tekan Batuan Uniaksial (UCS)	31,54 Mpa	4
2	RQD	88%	17
3	Spasi Rekahan	6 – 20 cm	8
4	Kondisi Rekahan	Separasi 1 – 5 mm	10
5	Kondisi Air Tanah	Basah	7
Total Pembobotan RMR			46

Hasil pembobotan *Rock Mass Rating* (RMR) menurut Bieniawski 1989 adalah sebesar 46 dan masuk pada kelas III (sedang), dengan dua jenis penyanggaan, yaitu *rock bolt* dan *shotcrete*. Untuk *rockbolt* dengan diameter 20 mm, panjang 4 m dengan spasi 1,5 – 2 m di atap dan di dinding, pada atap dibuat dengan *wire mesh*, dan untuk *shotcrete* dengan 50 – 100 mm di atap dan 30 mm di dinding.

Tabel 3.4 Data Hasil Pembobotan *Q-System*

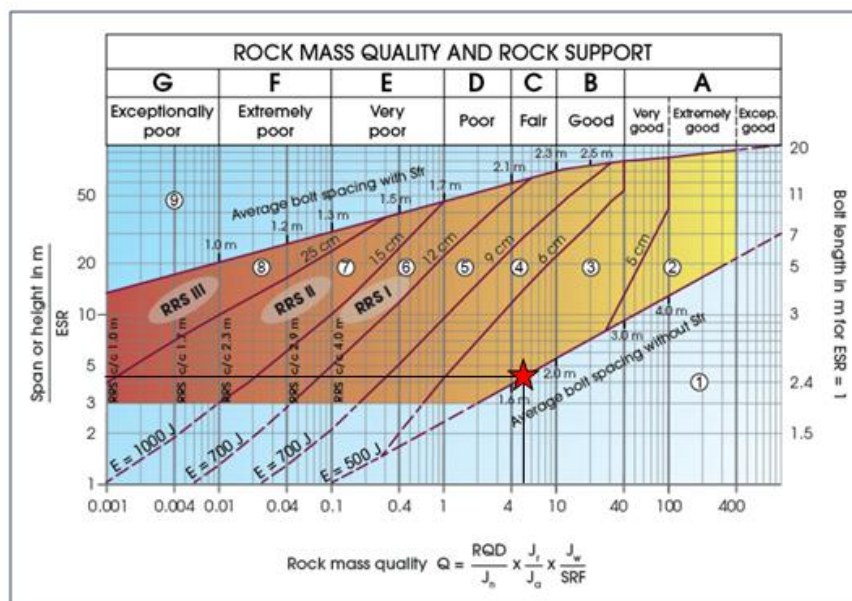
No	Jumlah Kekar	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	ESR	Q- System
1	8	88	2	3	6	1	2,5	1,3	8,8
2	7	88	2	3	6	1	2,5	1,3	8,8
3	4	88	2	3	6	1	2,5	1,3	8,8
4	2	88	2	2	8	1	2,5	1,3	4,4
5	6	88	2	3	6	1	2,5	1,3	8,8
6	6	88	4	3	6	1	2,5	1,3	4,4
7	4	88	2	3	6	1	2,5	1,3	8,8
8	7	88	4	3	6	0,66	2,5	1,3	2,9
9	5	88	4	3	6	0,66	2,5	1,3	2,9
10	4	88	6	3	8	0,66	2,5	1,3	1,45
11	6	88	6	3	6	0,66	2,5	1,3	1,94
12	4	88	6	3	6	0,66	2,5	1,3	1,94
13	8	88	6	1,5	8	0,66	2,5	1,3	0,73
14	6	88	4	3	8	0,66	2,5	1,3	2,18
15	9	88	2	2	6	0,66	2,5	1,3	3,87
16	6	88	2	3	8	0,66	2,5	1,3	4,36
17	7	88	2	3	8	0,66	2,5	1,3	4,36
18	4	88	4	3	6	1	2,5	1,3	4,4
19	8	88	3	3	6	1	2,5	1,3	5,87
20	9	88	2	3	8	1	2,5	1,3	6,6
21	6	88	2	3	6	1	2,5	1,3	8,8
Rata – Rata Nilai Q									5,0

Untuk menilai kemandapan dan kebutuhan penyanggaan pada terowongan yang nantinya akan dimasukkan pada gambar grafik penyanggaan *Q-System*, maka Barton dkk (1974) mendefinisikan persamaan sebagai berikut :

$$De = \frac{\text{bentang lubang bukaan atau tinggi (m)}}{\text{Excavation Support Ratio (ESR)}}$$

$$De = \frac{5,5}{1,3}$$

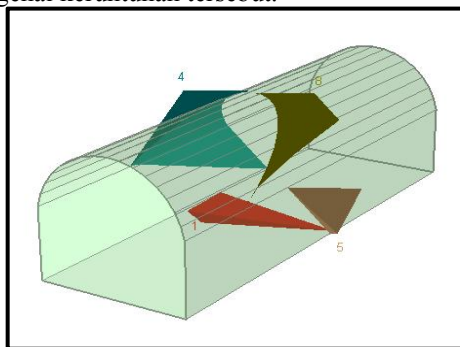
$$De = 4,23$$

Gambar 3.10 Grafik Rekomendasi Penyanggaan pada *Q-System*

Menurut klasifikasi *Q-System* terowongan Sibaganding memiliki bobot sebesar 5 yang masuk pada kelas massa batuan C (*fair*). Artinya terowongan Sibaganding berada pada kelas massa batuan yang cukup baik namun apabila terowongan Sibaganding memerlukan adanya penyanggaan maka penyanggaan yang disarankan menurut *Q-System* adalah dengan menerapkan *systematic bolting* ataupun *fibre reinforced sprayed concrete* dengan tebal 5 – 6 cm.

3.10 Keruntuhan

Hasil pengukuran bidang diskontinuitas yang berupa arah dari bidang diskontinuitas memberikan gambaran mengenai kemungkinan terjadinya keruntuhan dan bentuk keruntuhan pada terowongan. Keruntuhan yang terjadi pada terowongan Sibaganding dapat disimulasikan dengan bantuan *software Unwedge*. Hasil yang didapatkan dari *Unwedge* berupa model 3D dari bentuk keruntuhan yang terjadi pada terowongan serta informasi mengenai keruntuhan tersebut.



Gambar 3.11 Keruntuhan pada terowongan

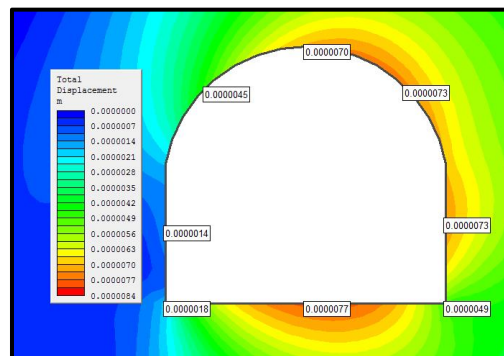
Tabel 3.5 Unwedge Analysis Information

Wedge Information				
Wedge	Factor Safety	WV (m3)	WW (tonnes)	SD (trend, plunge)
Floor wedge (1)	Satble	2,023	5,463	-
Upper Left Wedge (4)	296,944	4,935	13,325	122 , 81
Lower Right Wedge (5)	7693,471	0,558	1,507	302 , 8
Upper Right Wedge (8)	409,844	2,021	5,458	0 , 90

Bentuk keruntuhan yang terdapat pada terowongan Sibaganding adalah keruntuhan baji dengan jumlah 3 (4,5,8 pada Gambar 3.11) baji yang berada di atap sebelah kiri, atap sebelah kanan, dan dinding sebelah kanan dengan kondisi yang stabil. Keruntuhan baji 1 pada Gambar 3.11 tidak dianggap karena berada pada lantai terowongan.

3.11 Displacement

Untuk mendapatkan nilai *displacement* pada terowongan Sibaganding maka dilakukan analisa dengan bantuan *software Phase2*.



Gambar 3.12 Displacement pada terowongan

Dari Gambar 3.12 menunjukkan bahwa nilai *displacement* pada terowongan Sibaganding berkisar antara 0,0000014 – 0,0000077 m. Berdasarkan letaknya nilai *displacement* pada terowongan dapat diketahui sebagai berikut :

- Roof : 0,0000070 m
- Right Curve : 0,0000073 m
- Left Curve : 0,0000045 m
- Right Wall : 0,0000073 m
- Leftwall : 0,0000014 m
- Right Corner : 0,0000049 m
- Left Corner : 0,0000018 m
- Floor : 0,0000077 m

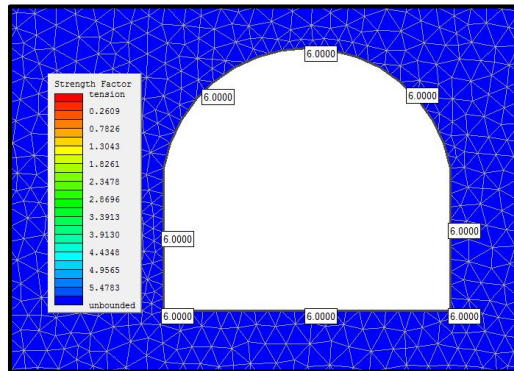
Nilai *maximum total displacement* yang diperoleh untuk terowongan Sibaganding adalah 0.000007834 m/hari atau 0,007834 mm/hari. Terowongan Sibaganding sudah ada selama 103 tahun (sejak tahun 1919) dan jika dihitung nilai *total displacement* yang bekerja pada terowongan Sibaganding selama waktu tersebut adalah 0,249 m.

Sampai saat ini terowongan Sibaganding masih dapat bertahan artinya dengan nilai tegangan dan nilai *total displacement* yang bekerja pada terowongan masih berada pada batas elastis (tidak menyebabkan adanya perubahan bentuk) dari batuan penyusun terowongan, hal tersebut dapat terjadi karena batuan memiliki sifat elastoplastis. Dan jika dilihat dari nilai *maxium total displacement* pada terowongan sebesar

0,007834 mm/hari, ini menunjukkan bahwa terowongan Sibaganding masuk pada kategori stabil menurut Zhenxiang, 1984 karena nilainya $< 0,2$ mm/hari.

3.12 Faktor Keamanan

Nilai faktor keamanan bisa didapatkan melalui *software Phase 2*, nilai faktor keamanan pada *Phase 2* diwakilkan melalui nilai *Strength Factor*.



Gambar 3.13 *Strength Factor* pada Terowongan

Dari Gambar 3.13 diketahui bahwa nilai *strength factor* pada terowongan Sibaganding sama di setiap sisinya baik itu di atap, *curve*, dinding, *corner* dan lantai terowongan yaitu 6,00. Ini menunjukkan bahwa terowongan Sibaganding berada dalam kondisi yang stabil ($FK > 1,3$ menurut Event Hoek 1995), sehingga dapat disimpulkan terowongan Sibaganding dapat bertahan tanpa adanya penguatan (*reinforcement*) ataupun penyanggaan (*supporting*).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Dari hasil pengamatan, penelitian dan perhitungan terhadap kestabilan terowongan Sibaganding, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Bobot *Rock Mass Rating* (RMR) untuk terowongan Sibaganding adalah 46, artinya terowongan masuk pada kelas III (sedang) dengan dua jenis rekomendasi penyanggaan, yaitu *rock bolt* (diameter 20 mm, panjang 4m, spasi 1,5 – 2,0 m di atap dan dinding, pada atap dibuat dengan *wire mesh*) dan *shotcrete* (tebal 50 – 100 mm diatap dan 30 mm di dinding).
2. Bobot *Q-System* untuk terowongan Sibaganding adalah 5 dan masuk pada kelas massa batuan C (*fair*) dengan rekomendasi penyanggaan *systematic bolting* ataupun *fibre reinforced concrete* dengan tebal 5 – 6 cm
3. Terowongan Sibaganding memiliki 3 keruntuhan baji (*wedge*) yang berada di atap sebelah kiri, atap sebelah kanan, dan dinding sebelah kanan terowongan dengan kondisi stabil,

4. Nilai *maximum total displacement* sebesar 0,007834 mm/hari, artinya terowongan Sibaganding masuk dalam kategori stabil menurut Zhenxiang 1984, karena nilainya $< 0,2$ mm/hari,
5. Nilai Faktor Keamanan (FK) pada terowongan Sibaganding adalah 6,0. Ini menunjukkan bahwa terowongan Sibaganding dalam kondisi yang stabil sehingga terowongan Sibaganding dapat bertahan tanpa adanya penguatan ataupun penyanggaan.

4.2 Saran

Penelitian pada tugas akhir ini dilakukan terbatas, oleh sebab itu maka diperlukan penyelidikan lebih lanjut mengenai lapisan batuan dan sifat mekanik batuan penyusun terowongan Sibaganding.

DAFTAR PUSTAKA

- Barton. N., Lien. R., Lunde. J., 1974, *Engineering Classification of Rock Masses for The Design of Tunnel Support*, Rock Mechanics 6, 189 – 236.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering Rock Mass Clasifications*, John Wiley & Sons, New York, p. 251.
- Deere, D.U., and Deere, D.W., 1988, *The Rock Quality Designation (RQD) Indexin Practice, Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM STP 984, pp. 91 – 101.
- Febri Yance, D., Adi Nata, R., Carter Eka Putra, J., 2020, *Analisis Kestabilan Terowongan Menggunakan Metode Rock Tunneling Quality Index (Q-System) Di Tambang Batubara PT. Allied Indo Coal Jaya Kota Sawahlunto*.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980, *Underground Excavation in Rock., Institution of Mining and Metallurgy*, London, p. 527.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1995, *Rock Support for Underground Excavations in Hard Rock.*, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 215.
- Hoek, E., Marinos, P., & Benissi, M., 1998, *Applicability of The Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses.*, *The case of the Athens Schist Formation.*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57(2), 151–160. <https://doi.org/10.1007/s100640050031>

- NGI., 2022, *Using The Q-System, Rock Mass Clasification and Support Design*, Handbook.
- Phase 2, *2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations User's Guide*, 1998 – 2001, Rocscience Inc.
- Priest, S.D., and Hudson, J.A., 1976, *Discontinuity Spacing in Rock.*, *International Journal of Rock Mechanics and Mineraling Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13: 135 – 148.
- Rahman, A., Muhyiddin, N., 2018, *Uji Laboratorium Mekanika Batuan Menggunakan Metode Unconfined Compressive Strength (UCS) pada Batuan Inti (Core) Batu Pasir* (Vol. 2, Issue 2), Akademi Minyak dan Gas Balongan Indramayu.
- Rocscience. 2013. *DIPS User's Guide.*, Toronto USA : Rocscience inc.
- SNI (Standar Nasional Indonesia) 2825:2008, *Cara uji kuat tekan batu uniaksial*, Indonesia.
- Zhenxiang, X, A., 1984, *Tunnel Design Methode Using Field Measured Data. Proceeding of ISRM Symposium Design And Peformance of Underground Excavation*, London