

Evaluasi Kestabilan Lubang Buka dan Sistem Penyanggaan dengan *RMR-System* pada Terowongan D-07 Tambang Batubara PT Dasrat Sarana Arang Sejati, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat

Ariq Jibrani*, Bambang Heriyadi

Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

* crosariq@gmail.com

Abstrak. PT. Dasrat Sarana Arang Sejati merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan batubara, dengan menggunakan metode penambangan tambang bawah tanah yang mana lebih berisiko terjadinya kecelakaan daripada metode tambang terbuka. Pada observasi ditemukan adanya kekar pada dinding terowongan yang berpotensi terjadinya runtuh. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan batuan, kelas massa batuan, potensi keruntuhan baji, kestabilan lubang bukaan, dan rekomendasi sistem penyangga yang tepat berdasarkan hubungan kelas massa batuan dan jarak penyangga yaitu metode klasifikasi *Rock Mass Rating (RMR-System)*. Dari hasil analisis yang dilakukan diketahui bahwa rata-rata kelas massa batuan pada *siltstone* adalah batuan kelas II (*Good Rock*) dengan nilai *RMR* 70 dengan *Stand Up Time* 32000 jam (± 6 bulan) jarak Span 4 m, pada batubara kelas massa batuan termasuk ke dalam kelas III (*Fair Rock*) dengan nilai *RMR* 47 dengan *Stand Up Time* 212,5 jam (± 9 hari) jarak Span 3 m. Berdasarkan hasil analisis pada nilai *RMR* 47 nilai *FK* $< 1,5$ dengan menggunakan jarak penyangga rata-rata 1,71 m, maka perlu dilakukan evaluasi jarak antar penyangga untuk mendapatkan nilai *FK* stabil ($\geq 1,5$). Dari hasil perhitungan untuk mencapai nilai *FK* stabil digunakan jarak penyangga rekomendasi $\pm 1,437$ m pada *RMR* 47.

Abstract. PT. Dasrat Sarana Arang Sejati is a company that operates in the coal mining sector, using the underground mining method which is more at risk of accidents than the open-pit mining method. During the observation, it was found that there were joints in the tunnel walls that had the potential for collapse. This research was conducted to determine rock strength, rock mass class, potential for wedge collapse, stability of opening holes, and recommendations for appropriate support systems based on the relationship between rock mass class and support distance, namely the *Rock Mass Rating (RMR-System)* classification method. From the results of the analysis carried out, it is known that the average rock mass class in *siltstone* is class II rock (*Good Rock*) with an *RMR* value of 70 with a *Stand Up Time* of 32,000 hours (± 6 months) Span distance of 4 m, in coal the rock mass class is included in class III (*Fair Rock*) with an *RMR* value of 47 with a *Stand Up Time* of 212.5 hours (± 9 days) Span distance of 3 m. Based on the results of the analysis of the *RMR* value of 47, the *FK* value is < 1.5 using an average Pillar distance of 1.71 m, it is necessary to evaluate the distance between supports to obtain a stable *FK* value (≥ 1.5). From the calculation results, to achieve a stable *FK* value, the recommended Pillar distance of $\pm 1,437$ m at *RMR* 47 is used.

Kata kunci: Sistem Penyanggaan, *Rock Mass Rating*, Rekomendasi Penyanggaan, Tambang Bawah Tanah Batubara

Tanggal Diterima: 21/05/24; Tanggal Direvisi: 21/05/24; Tanggal Disetujui: 27/05/24; Tanggal Dipublikasi: 27/05/24

1. Pendahuluan

PT. Dasrat Sarana Arang Sejati merupakan salah satu perusahaan swasta yang bergerak di bidang pertambangan batubara, dengan menggunakan metode penambangan tambang bawah tanah yang mana lebih berisiko terjadinya kecelakaan daripada metode tambang terbuka. Tambang bawah tanah sangat erat kaitannya dengan sistem penyanggaan yang berguna sebagai penahan material batuan untuk mempertahankan bentuk terowongan agar kegiatan penambangan dapat berjalan dengan baik.

Saat melakukan observasi penulis mengamati bahwa perusahaan menggunakan penyangga kayu dalam menerapkan sistem penyanggaannya, dari hasil pengamatan pada terowongan D-07 diketahui dimensi penyangga memiliki rata-rata jarak penyangga 2,01 m. Hal ini

telah melebihi SOP yang telah ditetapkan perusahaan yang mana jarak antar penyangga sebesar 1,5 m. Selain itu ditemukan adanya kekar pada dinding terowongan yang berpotensi terjadinya runtuh, ditemukan juga terdapat penyangga yang patah dan lapuk di beberapa tempat sepanjang kemajuan 100 m yang bisa membahayakan keselamatan para pekerja dan peralatan yang ada di dalam terowongan.

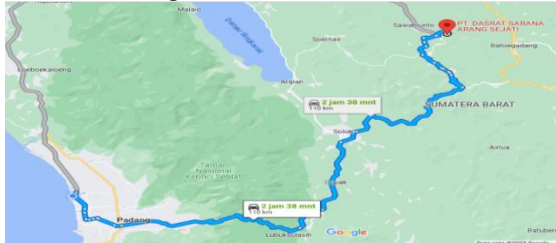
2. Kajian Pustaka

2.1 Lokasi Kesempaan Daerah

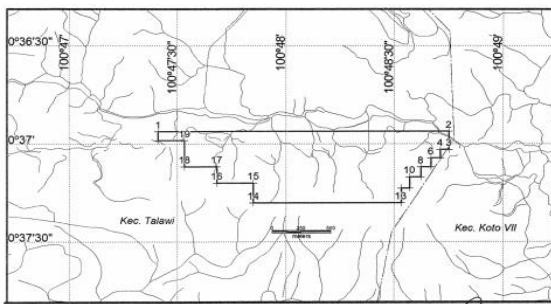
Jarak antara daerah penambangan dengan Kota Padang yaitu ± 100 km dengan menempuh jalan Lintas Sumatera melalui Padang, Kota Solok, dan Kota Sawahlunto dengan waktu tempuh dalam waktu ± 2 jam menggunakan kendaraan roda dua,

dan ± 2,5 – 3,5 jam menggunakan kendaraan roda empat.

Wilayah Operasi Produksi Batubara secara geografis berada pada koordinat 0000 36' 56,21" – 0000 36' 58,99" LS dan 1000 47' 24,39" – 1000 47' 24,39" BT, dengan luas 125,4 Ha.



Gambar 1. Peta Lokasi dan Kesampaian Daerah Kegiatan Operasi Produksi Batubara PT. Dasrat Sarana Arang Sejati



Gambar 2. Peta Wilayah IUP Operasi Produksi PT. Dasrat Sarana Arang Sejati

2.2 Sistem Klasifikasi Rock Mass Rating (RMR)

Sistem klasifikasi massa batuan dengan RMR dari Bieniawski (1973) menggunakan parameter-parameter untuk mengklasifikasikan kualitas massa batuan dengan menggunakan data permukaan, dalam rangka untuk memandu metode penggalian dan memberikan rekomendasi pendukung kegiatan pertambangan serta rentang yang tidak didukung dan stand-up time. Parameter tersebut diantaranya, yaitu:

2.2.1 Uniaxial Compressive Strength (UCS)

Uniaxial Compressive Strength (UCS) yaitu pengujian untuk mengetahui besar kekuatan dari kuat tekan batuan utuh, hal ini bisa diuji juga dengan Point Load Test (PLI). UCS menggunakan mesin tekan untuk menekan sampel batuan dari satu arah (uniaxial) untuk mengetahui kuat tekan uniaksial itu sendiri. Pengukuran kekuatan batuan utuh diidentifikasi sebagai salah satu kondisi, yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 1. Identifikasi Kekuatan Material Batuan Utuh – UCS

PLI (MPa)	UCS (MPa)	Deskripsi Kualitatif	Bobot
> 10	> 250	Sangat kuat sekali (<i>exceptionally strong</i>)	15
4 - 10	100 - 250	Sangat kuat (<i>very strong</i>)	12
2 - 4	50 - 100	Kuat (<i>strong</i>)	7
1 - 2	25 - 50	Sedang (<i>average</i>)	4
Penggunaan UCS lebih dianjurkan	5 - 25	Lemah (<i>weak</i>)	2
	1 - 5	Sangat lemah (<i>very weak</i>)	1
	< 1	Sangat lemah sekali (<i>extremely weak</i>)	0

2.2.2 Rock Quality Designation (RQD)

RQD didefinisikan sebagai persentase dari bagian inti yang utuh dengan panjang lebih dari 100 mm (10 cm) terhadap total kedalaman lubang bor (*core run*). Priest dan Hudson (1976) memberikan hubungan antara nilai RQD dengan jarak antar bidang diskontinyu yang ada di dalam massa batuan atau *joint spacing (Js)* dengan persamaan sebagai berikut:

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

Keterangan.

λ : rasio antara jumlah kekar dengan panjang *scanline* (kekar/meter).

e : konstanta euler (2,718)

Tabel 2. Indeks Rock Designation Quality

RQD	Kualitas Batuan	Bobot
90-100 %	Sempurna	20
75-90 %	Baik	17
50-75 %	Sedang	13
25-50 %	Jelek	8
< 25 %	Sangat jelek	3

2.2.3 Spasi Bidang Diskontinuitas

Spasi bidang diskontinuitas didefinisikan sebagai jarak tegak lurus antara dua diskontinuitas berurutan sepanjang garis pengukuran yang dibuat sembarang, Menurut Hudson (1989) Spasi Bidang Diskontinuitas merupakan jarak tegak lurus suatu bidang lemah, memberikan persamaan untuk menghitung rata-rata Spasi Bidang Diskontinuitas:

$$x = \frac{1}{\lambda} \quad \text{atau} \quad \lambda = \frac{1}{x} \quad (2)$$

keterangan:

λ = frekuensi kekar per meter

x = jarak rata-rata spasi bidang diskontinuitas

Tabel 3. Identifikasi Jarak Bidang Diskontinuitas

Deskripsi	Jarak	Bobot
Sangat lebar	> 2 m	20
Lebar	0.6 - 2 m	15
Sedang	0.2 - 0.6 m	10
Rapat	0.06 - 0.2 m	8
Sangat rapat	< 0.06	5

2.2.4 Kondisi Bidang Diskontinu

Ada beberapa parameter yang digunakan oleh Bieniawski dalam memperkirakan kondisi permukaan bidang diskontinu, yaitu:

- Kemenerusan (*persistence/continuity*), Merupakan pengukuran panjang diskontinuitas atau luas diskontinuitas, dapat dikuantifikasi melalui observasi panjang diskontinuitas pada permukaan batuan
- Bukaannya atau Rekahan (*separation/aperture*), Merupakan jarak tegak lurus antar dinding batuan yang berdekatan pada bidang diskontinu. Jarak ini biasanya diisi oleh material lainnya atau bisa juga diisi oleh air. Semakin besar jarak ini, maka semakin lemah bidang diskontinu tersebut

- *Infilling (gouge)*, Merupakan material yang mengisi pada rekahan atau jarak antar permukaan kekar tersebut
- Kekerasan permukaan bidang diskontinu (*roughness*), Merupakan tingkat kekasaran pada batuan. Semakin besar kekasaran dapat menambah kuat geser diskontinuitas dan dapat juga mengubah kemiringan pada bagian tertentu dari diskontinuitas tersebut
- Pelapukan (*weathering*), Merupakan tingkat pelapukan pada batuan. Seberapa besar tingkat pelapukan yang dialami oleh batuan dapat ditentukan dengan melihat perubahan warna pada butiran batuan dengan bantuan alat palu geologi

Tabel 4. Panduan Klasifikasi Kondisi Kekar

Parameter`	Bobot				
Panjang kekar	< 1 m	1-3m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Persistence/continuity	6	4	2	1	0
Jarak antar permukaan kekar (<i>separation/aperture</i>)	Tidak ada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm
	6	5	4	1	0
Kekasaran kekar (<i>roughness</i>)	Sangat kasar	Kasar	Sedikit kasar	Halus	Slicken sided
	6	5	3	1	0
Material pengisi (<i>infilling/gouge</i>)	Tidak ada	Keras		Lunak	
	6	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	6	4	2	2	0
Kelapukan (<i>weathering</i>)	Tidak lapuk	Sedikit lapuk	Lapuk	Sangat lapuk	Hancur
	6	5	3	1	0

2.2.5 Kondisi Air Tanah

Kondisi air tanah ditentukan dengan mengamati atap dan dinding lubang bukaan secara visual. Kemudian kondisi air tanah yang ditemukan dapat dinyatakan sebagai keadaan umum seperti kering (*completely dry*), lembab (*damp*), basah (*wet*), terdapat tetesan air (*dripping*), atau terdapat aliran air (*flowing*).

Tabel 5. Kondisi Air Tanah

Kondisi umum	Kering	Lembab	Basah	Terdapat tetesan air (<i>dripping</i>)	Terdapat aliran air (<i>flowing</i>)
Debit air tiap 10 m panjang terowongan (liter/menit)	Tidak ada	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125
Tekanan air pada kekar/tegangannya prinsipal mayor	0	< 0,1	0,1-0,2	0,1-0,2	> 0,5
Bobot	15	10	7	4	0

2.2.6 Orientasi Bidang Diskontinu

Orientasi bidang diskontinu merupakan kedudukan relatif dari bidang diskontinu terhadap sumbu lintasan terowongan. Orientasi bidang diskontinu dianggap menguntungkan jika berarah

tegak lurus terhadap sumbu lubang bukaan dan akan merugikan jika searah dengan sumbu lubang bukaan dan biasanya dinyatakan dalam strike/dip atau dip/dip direction.

Tabel 6. Kesesuaian Bidang Lemah atau Diskontinuitas

Penilaian arah kekar untuk	Sangat baik	Baik	Cukup	Tidak baik	Sangat tidak baik
Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
Fondasi	0	-2	-7	-15	-25
Le reng	0	-2	-25	-50	-60

Tabel 7. Efek Orientasi Diskontinuitas pada Terowongan

Strike tegak lurus arah kemajuan terowongan			
Searah dengan <i>dips</i>		Berlawanan arah dengan <i>dips</i>	
Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°
Sangat menguntungkan		Menguntungkan	Sedang
Sangat tidak menguntungkan		Tidak menguntungkan	
Strike sejajar arah kemajuan lubang bukaan			
Dip 45°-90°		Dip 20°-45°	
Sangat tidak menguntungkan		Sedang	Sedang
		Dip 0°-20° Irrespective of strike	

Berdasarkan uraian tersebut nilai *RMR* yang diperoleh pada perhitungan parameter-parameter di atas, maka dapat kita klasifikasi massa batuan menjadi 5 kelas dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 8. Kualitas Massa Batuan

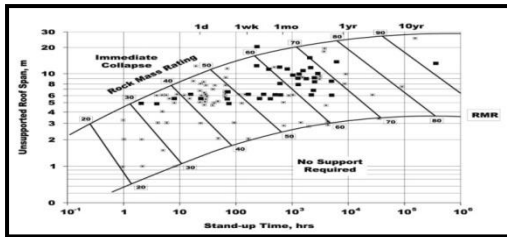
Parameter	Bobot				
Nilai <i>RMR</i>	81 – 100	61 - 80	41 – 60	21 – 40	< 20
Nomor Kelas <i>RMR</i>	I	II	III	IV	V
Nilai <i>GSI</i>	76 – 95	56 - 75	36 – 55	21 – 35	< 20
Kualitas Massa Batuan	Sangat baik	Baik	Sedang	Buruk	Sangat buruk

2.3 Analisis Klasisfikasi Rock Mass Rating

Penulis melakukan penelitian eksperimental yang disebut dengan penelitian kuantitatif. Sugiyono (2013: 23) mengartikan metode penelitian kuantitatif sebagai teknik penelitian berbasis positivis yang diterapkan pada populasi atau sampel tertentu. Data yang dapat dikuantifikasi atau bersifat kuantitatif digunakan dalam penelitian ini.

2.3.1 Stand-Up Time

Merupakan perbandingan hubungan antara kemajuan terowongan dengan lamanya batuan dalam menyangga dirinya sendiri berdasarkan nilai dari *RMR*-nya yang artinya *stand-up time* adalah lama waktu suatu massa batuan dapat menahan dirinya sendiri sebelum runtuh setelah dilakukan penggalian sebagaimana dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3. Hubungan antara Stand-up Time dan Span

2.3.2 Rekomendasi Sistem Penyanggaan

Bieniewski menentukan jenis, diameter, dan panjang dari baut batuan (*rockbolt*), jejaring besi (*steel set*), beton tembak (*shotcrete*), dan beton cor (*concrete*) sebagai rekomendasi sistem penyanggaan/penguatan massa batuan yang dijelaskan pada tabel di bawah ini

Tabel 9. Pedoman Penggalian & Penyanggaan Terowongan

Kelas RMR	Metode Penggalian	Baut Batuan/ Rock Bolt (diameter 20 mm, fully grouted)	Beton Tembak (Shotcrete)	Stell Set
I	Full face, dengan kemajuan 3 m.	Secara umum tidak membutuhkan penyangga		
II	Full face, dengan kemajuan 1.5 - 3 m. Pemasangan penyanggaan penuh 20 m dari face	Baut batuan pada atap panjang 3 m, spasi 2.5 m, dengan penambahan wire mesh	50 mm pada atap	Tidak Dibutuhkan
III	Top heading and bench 1.5 - 3 m kemajuan pada top heading, penyangga setelah peledakan. Penyanggaan penuh 10 m dari face	Baut batuan panjang 4 m, spasi 1.5 - 2 m pada dinding dan atap, serta pemasangan wire mesh	50 - 100 mm pada atap, dan 30 mm pada dinding	Tidak Dibutuhkan
IV	Top heading and bench 1 - 1.5 m kemajuan pada top heading. Penyanggaan sesegera pada saat penggalian. Penyanggaan penuh 10 m dari face	Baut batuan panjang 4 m, spasi 1 - 1.5 m pada dinding dan atap, serta pemasangan wire mesh	100 - 150 mm pada atap, 100 mm pada dinding.	Ringan s/d medium dengan spasi 1.5 m
V	Multiple drift kemajuan 0.5 - 1.5 m pada top heading. Pemasangan penyangga sesegera mungkin pada saat penggalian. Beton tembak sesegera mungkin setelah peledakan	Baut batuan panjang 5 - 6 m spasi 1 - 1.5 m pada dinding dan atap, serta pemasangan wire mesh	150 - 200 mm pada atap, 150 mm pada dinding, 50 mm pada face	Medium s/d berat dengan spasi 0.75 m. Forepolling jika dianggap perlu

2.3.2 Estimasi Runtuhan

Menurut Unal (1983) berdasarkan hasil klasifikasi geomekanik sistem RMR, tinggi runtuh (Ht) dan beban runtuh (PRMR) yang akan diterima oleh penyangga dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$Ht = \frac{(100-RMR)}{100} \times B \quad (3)$$

$$P_{RMR} = \frac{(100-RMR)}{100} \times \gamma \times B \quad (4)$$

$$v = Ht \times B \times \gamma \quad (5)$$

Keterangan.

Ht : Tinggi Runtuhan

B : Lebar Terowongan

P_{RMR} : Beban Runtuhan

γ : Densitas Batuan (ton/m³)

2.4 Evaluasi Penyangga

2.4.1 Tegangan Pada Cap

$$qt = \sigma t \times a \quad (6)$$

$$M_{max} = 0,125 \times qt \times L^2 \quad (7)$$

$$\sigma b = \frac{M_{max}}{W} \leq \sigma sf \quad (8)$$

$$W = \pi \cdot d^3 / 32 \quad (9)$$

$$W = b \cdot h^2 / 6 \quad (10)$$

Keterangan :

qt = beban per satuan panjang (ton/m)

σt = tekanan pada penyangga (ton/m)

a = jarak antar penyangga (m)

L = panjang "cap" (m)

σb = tegangan perengkungan

σsf = tegangan perlengkungan kayu yang diizinkan

M_{max} = momen perlengkungan maksimum (ton/m)

W = modulus tampang (m³)

d = diameter penampang kayu (m)

b = lebar penampang kayu (m)

h = tinggi penampang kayu (m)

2.4.2 Tegangan Pada Side Post

$$\sigma sf \geq \sigma n \pm \sigma b \quad (11)$$

$$\sigma sf \geq -w R / F \pm 0,85 M_{max} / W \quad (12)$$

$$F = 1/4 \pi dy^2 = 0,785 dy^2 \quad (13)$$

$$M_{max} = 0,125 qy Ly^2 \quad (14)$$

$$W = 0,098 dy^3 \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{4Lk}{dy} = \frac{4Ly}{dy} \quad (16)$$

$$\omega = (\lambda) \quad (17)$$

$$R \approx 0,5qt \quad (18)$$

$$\sigma sf \geq -0,637\omega qt \frac{L}{dy^2} \pm 1,084qt \frac{Ly^2}{dy^3} \quad (19)$$

Keterangan:

σn = tegangan normal (ton/m²)

ω = buckling factor

λ = angka kerampingan (slenderness)

R = beban reaksi (ton)

qy = beban samping (ton/m)

Ly = panjang side post (m)

dy = diameter side post (m)

Lk = Ly = panjang untuk penekukan (m)

2.4.3 Faktor Keamanan

Faktor Keamanan adalah perbandingan antara kekuatan kayu dengan tegangan yang timbul pada lereng ditambang terbuka maupun didalam terowongan tambang bawah tanah. Menurut Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K/ 30/ MEM 2018, lubang bukaan (terowongan) dikatakan aman jika FK \geq 1,5.

$$FK = \frac{\sigma sf}{\sigma b} \quad (19)$$

σsf = Tegangan izin kayu (kg/cm²)

σb = Tegangan perlengkungan pada Cap dan Side Post (kg/cm²)

3. Metodologi Penelitian

3.1 Desain Penelitian

Penelitian bertujuan untuk mendapatkan nilai faktor keamanan (*safety factor*) dari lubang bukaan dan penyangga kayu yang digunakan oleh PT. Dasrat Sarana Arang Sejati terowongan D-07. Hasil akhir dari penelitian ini adalah faktor keamanan lubang bukaan setelah di beri penyangga sesuai dari rekomendasi RMR System

menggunakan *software Unwedge* dan jarak penyangga kayu yang aman

3.2 Jenis Penelitian

Menurut tujuannya penelitian ini termasuk jenis penelitian terapan. Penelitian terapan (*applied research*) adalah penelitian yang diarahkan untuk mendapatkan informasi yang dapat digunakan untuk memecahkan masalah (Sugiono, 2010).

3.3 Objek Penelitian

Objek dari penelitian ini adalah lubang bukaan D-07. Dari hasil observasi yang dilakukan terdapat banyak penyangga yang patah dan lapuk, hal ini dikarenakan penyangga sudah tidak mampu menahan batuan atap terowongan yang bisa membahayakan para pekerja serta alat-alat yang ada di dalam lubang D-07 sehingga penulis tertarik membahas masalah penyangga lubang bukaan D-07 PT. Dasrat Sarana Arang Sejati.

3.4 Tahap Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dengan cara mengobservasi langsung di lapangan dan mengambil data yang terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer terdiri dari dimensi penyangga, sampel batuan, sampel kayu penyangga, dan data diskontinuitas lubang bukaan. Sedangkan data sekunder diambil dari arsip perusahaan yang terdiri dari peta IUP perusahaan, peta geologi perusahaan, dan layout penambangan lubang D-07.

3.5 Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan untuk memecahkan masalah yang ada dari data yang telah didapatkan. Tahapan penelitian ini dimulai dari analisis sifat fisik dan mekanik batuan, pembobotan kelas massa batuan menggunakan metode *RMR System*, analisis *safety factor*, analisis *span maximum* dan *stand up time*, menentukan penyangga berdasarkan *RMR System*, analisis berat jenis dan kekuatan kayu penyangga, analisis penyangga kayu berdasarkan dimensi aktual, dan analisis rekomendasi jarak penyangga yang aman

4. Hasil Pembahasan

4.1 Sifat Fisik & Mekanik Batuan

4.1.1 Sifat Fisik Batuan

Tabel 10. Hasil Analisis Sifat Fisik Batubara

Sampel	rata-rata
Massa Jenis Asli (gr/cm ³)	1,545
Massa Jenis Kering (gr/cm ³)	1,538
Massa Jenis Jenuh (gr/cm ³)	1,574
Apparent Spesific Gravity	1,538
True Spesific Gravity	1,602
Kadar Air Asli (%)	0,449
Kadar Air Jenuh (%)	2,185
Derajat Kejenuhan (%)	18,220
Porositas (%)	3,598
Angka Pori	0,038

Tabel 11. Hasil Analisis Sifat Fisik *Siltstone*

Sampel	rata-rata
Massa Jenis Asli (gr/cm ³)	2,683
Massa Jenis Kering (gr/cm ³)	2,681
Massa Jenis Jenuh (gr/cm ³)	2,694
Apparent Spesific Gravity	2,681
True Spesific Gravity	2,716
Kadar Air Asli (%)	0,080
Kadar Air Jenuh (%)	0,480
Derajat Kejenuhan (%)	18,358
Porositas (%)	1,287
Angka Pori	0,013

4.1.2 Sifat Mekanik Batuan

Tabel 12. Hasil Analisis Sifat Mekanik Batuan

Sampel	P (Kg)	IS (Kg/cm ²)	Is (MPa)	σc (MPa)
C1	43,85	1,168	0,115	2,63
C2	122,88	2,793	0,274	6,30
C3	50,48	1,077	0,106	2,43
C4	75,36	2,007	0,197	4,53
C5	156,93	3,726	0,365	8,40
S1	2278,05	49,627	4,867	111,93
S2	1608,09	35,032	3,435	79,02
S3	1859,04	39,665	3,890	89,47
S4	1141,98	27,116	2,659	61,16
S5	1870,06	39,900	3,913	90,00

4.2 Klasifikasi Massa Batuan *RMR-System*

4.2.1 Kuat Tekan Batuan

Tabel 13. Hasil Rata-rata Pengujian Kuat Tekan Batuan

Sampel	Point Load Index Is (Mpa)	Unconfined Compressive Strength UCS (MPa)
Coal	0,211	4,86
Siltstone	3,753	86,31

Dari hasil pengujian yang diperoleh, maka didapatkanlah nilai pembobotan *RMR-System* untuk batubara sebesar 1 dan siltstone sebesar 7.

4.2.2 Rock Quality Designation (RQD)

Tabel 14. Hasil Perhitungan RQD

Jarak/meter		Joint Frequency			RQD (%)		
Dari	Ke	Kiri	Atap	Kanan	Kiri	Atap	Kanan
0	1	5	4	7	90,98	93,84	84,42
1	2	4	5	5	93,84	90,98	90,98
2	3	6	3	9	87,81	96,31	77,25
3	4	8	4	6	80,88	93,84	87,81
4	5	7	2	5	84,42	98,25	90,98
5	6	6	4	9	87,81	93,84	77,25
6	7	5	3	7	90,98	96,31	84,42
7	8	7	5	6	84,42	90,98	87,81
8	9	4	2	4	93,84	98,25	93,84
9	10	5	3	5	90,98	96,31	90,98
10	11	5	4	8	90,98	93,84	80,88
11	12	8	4	5	80,88	93,84	90,98
12	13	10	2	6	73,58	98,25	87,81
13	14	5	3	6	90,98	96,31	87,81
14	15	6	4	4	87,81	93,84	93,84
Rata-rata					87,35	95,00	87,14

Dari hasil perhitungan RQD didapatkan rata-rata RQD lubang bukaan dinding kiri 87,35%, atap 94,56%, dan dinding kanan 87,14%. Dalam pembobotan *RMR* didapatkan bobot dinding kiri 17, atap 20, dan dinding kanan 17.

4.2.3 Spasi Bidang Diskontinuitas

Tabel 15. Hasil Perhitungan Spasi Bidang Diskontinuitas

Jarak/meter		Joint Frequency			Jarak Rata2 Kekar (cm)		
Dari	Ke	Kiri	Atap	Kanan	Kiri	Atap	Kanan
0	1	5	4	7	20,0	25,0	14,3
1	2	4	5	5	25,0	20,0	20,0
2	3	6	3	9	16,7	33,3	11,1
3	4	8	4	6	12,5	25,0	16,7

Jarak/meter		Joint Frequency			Jarak Rata2 Kekar (cm)		
Dari	Ke	Kiri	Atap	Kanan	Kiri	Atap	Kanan
4	5	7	2	5	14,3	50,0	20,0
5	6	6	4	9	16,7	25,0	11,1
6	7	5	3	7	20,0	33,3	14,3
7	8	7	5	6	14,3	20,0	16,7
8	9	4	2	4	25,0	50,0	25,0
9	10	5	3	5	20,0	33,3	20,0
10	11	5	4	8	20,0	25,0	12,5
11	12	8	4	5	12,5	25,0	20,0
12	13	10	2	6	10,0	50,0	16,7
13	14	5	3	6	20,0	33,3	16,7
14	15	6	4	4	16,7	25,0	25,0
Rata-rata					17,6	31,6	17,3

Dari hasil analisis diatas didapatkan hasil rata-rata dinding kiri 17,6 cm, atap 31,6 cm dan dinding kanan 17,3 cm. dalam pembobotan *RMR-System* didapatkan bobot dinding kiri 8, atap 10, dan kanan 8.

4.2.4 Kondisi Bidang Diskontinuitas

Tabel 16. Kondisi Bidang Diskontinu Dinding Kanan

Chainage		Kondisi Bidang Diskontinu				
Dari	Ke	Panjang Kekar (m)	Lebar Rongga (mm)	Kekasaran	Isian	Pelapukan
0	1	0,56	0,21	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
1	2	0,93	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
2	3	0,92	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
3	4	0,83	0,12	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
4	5	0,92	0,15	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
5	6	0,49	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
6	7	0,91	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
7	8	0,67	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
8	9	1,04	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
9	10	0,42	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
10	11	0,83	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
11	12	0,53	0,12	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
12	13	0,48	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
13	14	1,22	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
14	15	0,51	0,12	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
rata-rata		0,75	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
Bobot		6	4	5	6	5

Tabel 17. Kondisi Bidang Diskontinu Dinding Kiri

Chainage		Kondisi Bidang Diskontinu				
Dari	Ke	Panjang Kekar (m)	Lebar Rongga (mm)	Kekasaran	Isian	Pelapukan
0	1	0,54	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
1	2	0,97	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
2	3	0,97	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
3	4	0,91	0,16	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
4	5	0,96	0,17	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
5	6	1,11	0,15	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
6	7	1,18	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
7	8	1,00	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
8	9	0,59	0,15	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
9	10	1,04	0,12	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
10	11	0,79	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
11	12	0,91	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
12	13	1,06	0,13	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
13	14	1,28	0,12	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
14	15	1,18	0,16	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
Rata-rata		0,97	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
Bobot		6	4	5	6	5

Tabel 18. Kondisi Bidang Diskontinu Bagian Atap

Chainage		Kondisi Bidang Diskontinu				
Dari	Ke	Panjang Kekar (m)	Lebar Rongga (mm)	Kekasaran	Isian	Pelapukan
0	1	0,76	0,28	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
1	2	0,56	0,18	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
2	3	0,89	0,20	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
3	4	0,85	0,15	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
4	5	0,64	0,15	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
5	6	0,74	0,30	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
6	7	0,54	0,17	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
7	8	0,62	0,16	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
8	9	0,52	0,15	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
9	10	0,45	0,23	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
10	11	0,54	0,22	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
11	12	0,65	0,14	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
12	13	0,82	0,10	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
13	14	0,67	0,17	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
14	15	0,64	0,18	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
rata-rata		0,66	0,19	KASAR	NONE	Sedikit Lapuk
Bobot		6	4	5	6	5

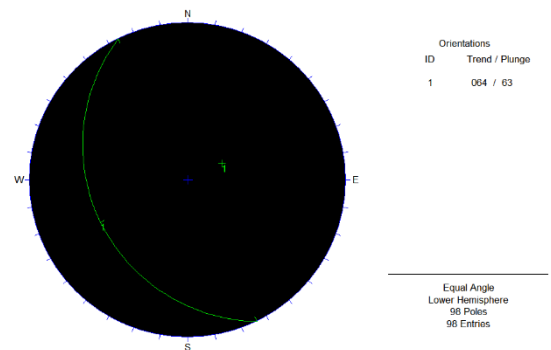
4.2.5 Kondisi Air Tanah

Pengamatan kondisi air tanah dilakukan secara megaskopis yaitu melihat dan meraba secara langsung objek penelitian tersebut. Pada lokasi penelitian batubara memiliki kondisi yang cenderung lembap ke basah sedangkan siltstone cenderung lembap sampai basah, terdapat genangan air dan terkadang ditemukan rekahan air melalui dinding terowongan. Melihat dari kondisi tersebut penulis mengambil kesimpulan bahwa kondisi lubang bukaan cenderung basah dan diberi bobot 7.

4.2.6 Orientasi Bidang Diskontinu

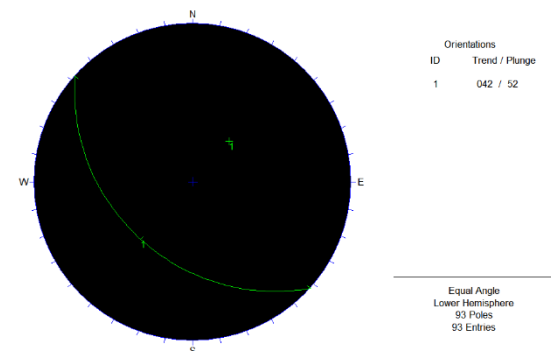
Penentuan arah kekar dominan dengan menggunakan Software Dips dengan cara menginput seluruh data strike & dip dari masing-masing dinding terowongan kedalam software.

Dari hasil perhitungan software Dips kekar dominan pada dinding kanan adalah N 64°E/63° dengan arah penambangan N 232° yang artinya arah kekar searah dengan arah terowongan dengan kemiringan rata-rata 63°, berdasarkan pada Tabel 12 kemiringan termasuk dalam kategori “sangat tidak menguntungkan” dan diberi bobot - 12.



Gambar 4. Arah Kekar Dominan Dinding Kanan

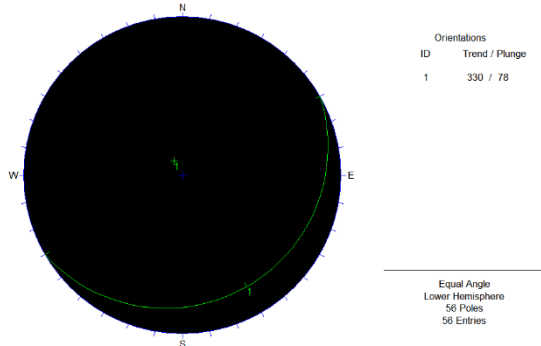
Dari hasil perhitungan software Dips kekar dominan pada dinding kiri adalah N 42°E/52° dengan arah penambangan N 232° yang artinya arah kekar searah dengan arah terowongan dengan kemiringan rata-rata 52°, berdasarkan pada Tabel 12 kemiringan termasuk dalam kategori “sangat tidak menguntungkan” dan diberi bobot - 12.



Gambar 5. Arah Kekar Dominan Dinding Kiri

Dari hasil perhitungan software Dips kekar dominan pada batuan atap adalah N

330°E/78° dengan arah penambangan N 232° yang artinya arah kekar berlawanan dengan arah terowongan dengan kemiringan rata-rata 78°, berdasarkan pada Tabel 12 kemiringan termasuk dalam kategori “sangat menguntungkan” dan diberi bobot 0.



Gambar 6. Arah Kekar Dominan Batuan Atap

4.2.7 Klasifikasi Massa Batuan

Tabel 19. Klasifikasi Massa Batuan Pada Dinding Kanan

Parameter Klasifikasi Massa Batuan RMR-System			
No	Parameter	Kondisi	Rating
1	Rock Strength (UCS)	4,86 MPa	1
2	Rock Quality Design (RQD)	87,14%	17
3	Spacing of Discontinuities	173 mm	8
	Persistence	0,75 m	6
	Aperture	0,14 mm	4
4	Condition	Kasar	5
	Infilling	Tidak Ada	6
	Weathering	Sedikit Lapuk	5
5	Ground Water	Basah	7
6	Strike and Dips of Joint Sets	Sangat Tidak Menguntungkan	-12
Total Rating			47
Kelas Massa Batuan			III Fair Rock

Tabel 20. Klasifikasi Massa Batuan Pada Dinding Kiri

Parameter Klasifikasi Massa Batuan RMR-System			
No	Parameter	Kondisi	Rating
1	Rock Strength (UCS)	4,86 MPa	1
2	Rock Quality Design (RQD)	87,35%	17
3	Spacing of Discontinuities	176 mm	8
	Persistence	0,97 m	6
	Aperture	0,14 mm	4
4	Condition	Kasar	5
	Infilling	Tidak Ada	6
	Weathering	Sedikit Lapuk	5
5	Ground Water	Basah	7
6	Strike and Dips of Joint Sets	Sangat Tidak Menguntungkan	-12
Total Rating			47
Kelas Massa Batuan			III Fair Rock

Tabel 21. Klasifikasi Massa Batuan Pada Batuan Atap

Parameter Klasifikasi Massa Batuan RMR-System			
No	Parameter	Kondisi	Rating
1	Rock Strength (UCS)	86,31 MPa	7
2	Rock Quality Design (RQD)	94,56%	20
3	Spacing of Discontinuities	316 mm	10
	Persistence	0,66 m	6
	Aperture	0,19 mm	4
4	Condition	Kasar	5
	Infilling	Tidak Ada	6
	Weathering	Sedikit Lapuk	5
5	Ground Water	Basah	7
6	Strike and Dips of Joint Sets	Sangat Menguntungkan	0
Total Rating			70
Kelas Massa Batuan			II Good Rock

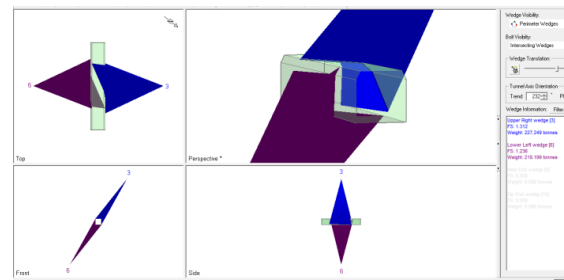
4.3 Kestabilan Terowongan Berdasarkan Potensi Keruntuhan Baji

Diperlukan pengolahan data menggunakan software undwedge, data-data yang diperlukan adalah sebagai berikut:

Tabel 22. Parameter Input Software Unwedge

No	Input Data	Keterangan
1	Bentuk Penampang Terowongan	Trapesium
2	Dimensi Terowongan	2,5 m x 3 m
3	Kekar Dominan	Kanan: N 64°E / 63° Atap: N 330°E / 78° Kiri: N 42°E / 52°
4	Kedalaman Lokasi Pengamatan	100 m
5	Bobot Isi	1,57 ton/m ²
6	Kohesi	12,85 ton/m ²
7	Sudut Geser Dalam	28,44°
8	Arah Penambangan	N 232°E
9	Kemiringan Terowongan	20°

Parameter pada tabel diatas akan dianalisis menggunakan software Unwedge yang akan menghasilkan nilai dari safety factor dan potensi runtuh baji, hasil analisis dari software unwedge dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 7. Hasil Analisis Software Unwedge

Berdasarkan hasil analisis pada gambar diatas dapat disimpulkan bahwa safety factor pada terowongan adalah:

Tabel 23. Hasil Analisis Software Unwedge

No	Bagian Pada Terowongan	Safety Factor
1	Upper Right Wedge	1,312
2	Lower Left Wedge	1,236

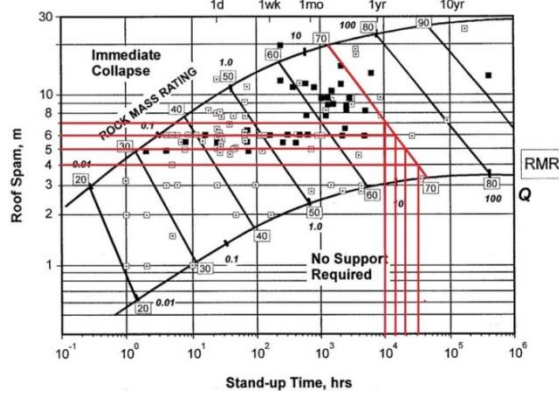
Berdasarkan hasil pada tabel diatas diketahui bahwa nilai safety factor sudah bernilai < 1,5 yang mana tidak memenuhi standar yang ditetapkan didalam Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K 30 MEM 2018 yaitu sebesar >1,5. Untuk menangani masalah ini perlu dilakukan perkuatan rekomendasi penyanggaan berdasarkan RMR-System yang akan diaplikasikan kedalam software Unwedge.

4.4 Rekomendasi Ground Support berdasarkan Klasifikasi RMR-System

Dalam operasi penambangan lapisan penutup, pola pembebanan yang digunakan adalah top loading, dimana peralatan pemuatan ditempatkan di atas peralatan pengangkut.

4.4.1 Nilai *Span Maximum & Stand-up Time*

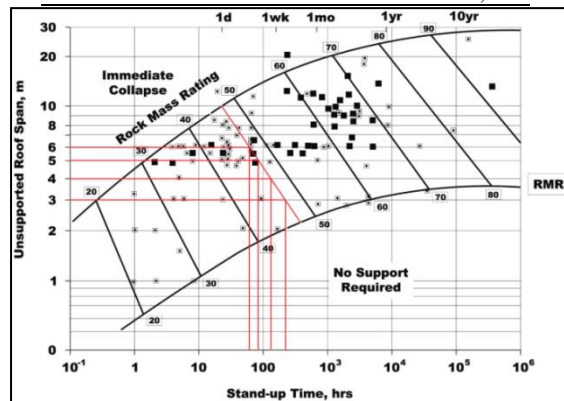
Stand-up time dihitung menggunakan grafik hubungan nilai antara *span maximum* dan stand-up time berdasarkan nilai *RMR*-nya. Dari hasil dari perhitungan nilai *RMR* diketahui bahwa nilai *RMR* pada batuan atap sebesar 70 dan kedua dinding sebesar 47, sehingga hasil dari *stand-up time & span maximum* adalah sebagai berikut:



Gambar 8. Kurva *stan-up time* pada batuan atap

Tabel 24. Analisis *Stand-up Time & Span Maximum RMR 70*

RMR	Span maximum (m)	Stand-up Time	
		Hours	Days
70	4	32000	1333,30
	5	21250	885,42
	6	15625	651,05
	7	10000	416,70



Gambar 9. Kurva *stan-up time* pada dinding batuan

Tabel 25. Analisis *Stand-up Time & Span Maximum RMR 47*

RMR	Span maximum (m)	Stand-up Time	
		Hours	Days
47	3	212,5	8,85
	4	128,125	5,34
	6	60,625	2,53

Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa terowongan dengan *RMR* batuan sebesar 47 dapat bertahan tanpa penyangga selama ± 8 hari dengan span minimal 3 meter dan terowongan dengan *RMR* 70 dapat bertahan selama ± 6 bulan tanpa penyangga dengan span minimal 4 meter.

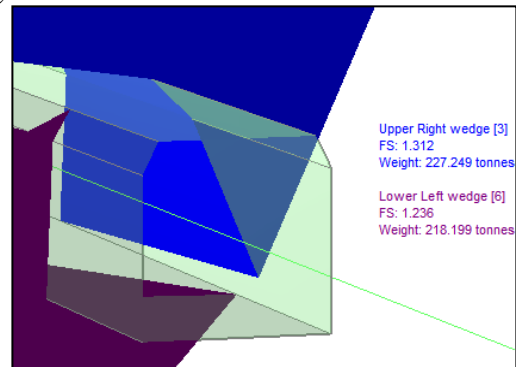
4.4.2 *Ground Support (GSR) Berdasarkan RMR-System*

Berdasarkan pada Tabel 10 dalam teori Bieniawski tentang pedoman penggalian & penyanggaan berdasarkan *RMR-System*, penulis menggunakan *RMR* terkecil dari analisis sebelumnya yaitu 47 yang termasuk dalam *RMR* kelas III, Rekomendasi penyanggaan dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

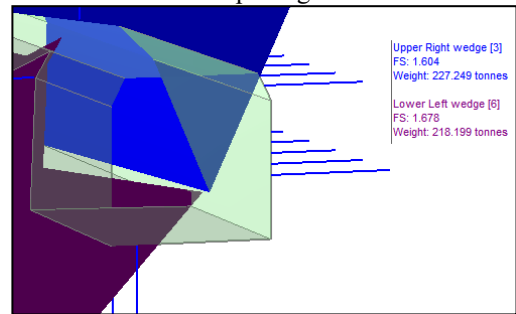
Tabel 26. Rekomendasi *Ground Support Berdasarkan RMR System*

Klasifikasi	Hasil
RMR 53	Batuan Kelas III (<i>Fair Rock</i>) Metode Penggalian menggunakan <i>Top heading and bench</i> 1,5-3 m kemajuan pada <i>top heading</i> , penyangga setelah peledakan. Penyanggaan penuh 10 m dari face <i>Rock Bolt</i> dengan panjang 4 m, spasi 1.5 - 2 m pada dinding dan atap, serta pemasangan <i>wire mash</i> <i>Shotcrete</i> dengan tebal 50 - 100 mm pada atap, dan 30 mm pada dinding <i>Stell Set</i> Tidak Dibutuhkan

4.4.2 *Ground Support (GSR) Berdasarkan RMR-System*

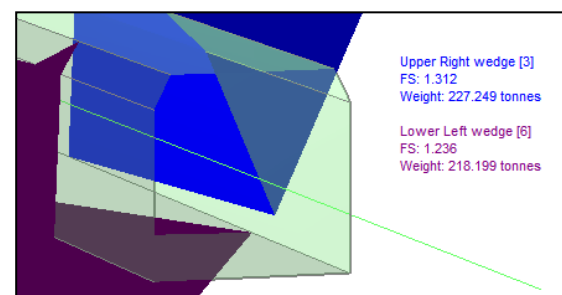


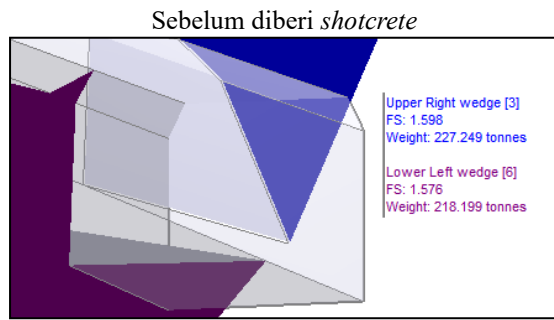
Sebelum dipasang *rock bolt*



Sesudah dipasang *rock bolt*

Gambar 10. Kondisi sebelum dan sesudah diberi *rock bolt*





Gambar 11. Kondisi sebelum dan sesudah diberi shotcrete

4.5 Tegangan pada Terowongan

Dengan total 31 data, waktu edar sebenarnya alat tersebut adalah 31 hari. Pada saat bucket menggali material, berayun sambil dimuati, membuang material, kemudian berayun kembali ke posisi awal, pada saat itulah diukur waktu sirkulasi alat *Dig-Load* (waktu ayunan kosong).

4.5.1 Tegangan Vertikal

- Prediksi Tinggi Runtuh (H_t)

$$H_{t \text{ Batubara}} = \frac{100 - RMR}{100} x B = \frac{100 - 47}{100} x 2,89 = 1,5317 \text{ m}$$

$$H_{t \text{ Siltstone}} = \frac{100 - RMR}{100} x B = \frac{100 - 70}{100} x 2,89 = 0,936 \text{ m}$$

- Prediksi Beban Runtuh (P_{RMR})

$$P_{RMR \text{ Batubara}} = H_t x \gamma = 1,5317 x 1,574 \times 2,411 \text{ ton/m}^2 = 0,2411 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_{RMR \text{ Siltstone}} = H_t x \gamma = 0,936 x 2,694 = 2,521 \text{ ton/m}^2 = 0,2521 \text{ Kg/cm}^2$$

- Volume Beban Runtuh

$$V_{\text{Batubara}} = H_t x B x \text{Density} = 1,5317 x 2,89 x 1,574 = 6,967 \text{ ton}$$

4.5.2 Tegangan Horizontal

- Batubara

$$K = \tan^2 \left(45 - \frac{\theta}{2} \right) = \tan^2 \left(45 - \frac{28,44}{2} \right) = 0,355 \sigma_h = K x \sigma_v = 0,355 x 2,411 = 0,856 \text{ ton/m}^2 = 0,0856 \text{ Kg/cm}^2$$

- Siltstone

$$K = \tan^2 \left(45 - \frac{\theta}{2} \right) = \tan^2 \left(45 - \frac{50,94}{2} \right) = 0,126 \sigma_h = K x \sigma_v = 0,126 x 2,521 = 0,318 \text{ ton/m}^2 = 0,0318 \text{ Kg/cm}^2$$

4.6 Evaluasi Penyangga Aktual

Waktu edar peralatan alat angkut juga dilaksanakan selama 31 hari agar mendapatkan 31 data yang menyesuaikan alat gali-muat. Jarak tempuh alat angkut dari *front* ke disposal berkisar 1,1 km dengan kecepatan laju sebagai berikut.

4.6.1 Tegangan Izin Kayu (σ_s)

Dalam melakukan perhitungan tegangan izin kayu dilakukan pengukuran berat jenis kayu kemudian dianalisis pada tabel kelas kayu. Parameter yang diperlukan adalah volume dan Massa kayu yang kemudian akan didapatkan berat jenis dari kayu. Pada pengujian ini dilakukan pengukuran volume dengan mencelupkan sampel ke dalam air untuk mendapatkan hasil volume akurat karena bentuk sampel tidak simetris dalam pemotongan. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 27. Hasil Analisis Berat Jenis Kayu

Sampel	Massa (gr)	Volume Awal (cm ³)	Volume Akhir (cm ³)	Volume Sampel (cm ³)	Berat Jenis (gr/cm ³)
k1	21,64	40	65	25	0,87
k2	22,36	40	66	26	0,86
k3	24,69	40	68	28	0,88
k4	22,34	40	66	26	0,86
k5	25,58	40	70	30	0,85
rata-rata	23,32	40	67	27	0,86

Berdasarkan pada tabel kelas kayu, kayu yang digunakan termasuk dalam kelas II karena berat jenis kelas kayu ini termasuk ke dalam rentang 0,90–0,60 gr/cm³. Selanjutnya menentukan kuat lengkung dan kuat tekan kayu yang dilakukan dengan interpolasi sebagai berikut:

Diketahui kelas kayu II memiliki range:

- Berat jenis kayu : 0,90 – 0,60 gr/cm³
- Kuat lengkung kayu : 1100–725 kg/cm²
- Kuat tekan kayu : 650–425kg/cm²

Diminta kuat lengkung dan kuat tekan yang diizinkan:

- X : 0,90 – 0,86 = 0,04
- Y : 0,86 – 0,60 = 0,26
- Z : 0,04 + 0,26 = 0,30
- M_{Lengkung} : 1100 – 725 = 375
- $M_{\text{Kuat tekan}}$: 650 – 425 = 225

$$\text{Kuat Lengkung Kayu} = 725 + \frac{Y}{Z} x M_{\text{Lengkung}} = 725 + \frac{0,26}{0,30} x 375 = 1050 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{Kuat Tekan Kayu} = 425 + \frac{Y}{Z} x M_{\text{Kuat tekan}} = 425 + \frac{0,26}{0,30} x 225 = 620 \text{ Kg/cm}^2$$

4.6.1 Tegangan pada Cap

Diketahui beban pada bagian atap terowongan (*cap*) adalah 0,2521 Kg/cm², untuk menghitung penyangga kayu diperlukan data sebagai berikut ini:

Diketahui:

- σ_v = 0,2521 Kg/cm²
- h = 192 cm

- L = 234 cm
- a = 171 cm
- d = 15,34 cm

Diminta: $\sigma_b = \dots$?

$$q_t = \sigma_v \times a = 0,2521 \times 171 = 43,1091 \text{ Kg/cm}$$

$$W = \frac{\pi \times d^3}{32} = \frac{3,14 \times 15,34^3}{32} = 354,21 \text{ cm}^3$$

$$M_{max} = 0,125 \times q_t \times L^2 = 0,125 \times 43,1091 \times 234^2 = 295060 \text{ Kgcm}$$

$$\sigma_{b \text{ cap}} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{295060}{354,21} = 833,01 \text{ Kg/cm}^2$$

Keterangan.

- σ_v = tekanan pada atap (Kg/cm²)
- a = jarak antar penyangga (cm)
- σ_b = kuat lengkung batuan utuh (Kg/cm²)
- d = diameter penampang kayu (cm)
- q_t = beban persatuan panjang (Kg/cm)
- M_{max} = momen maksimal (Kgcm)
- h = tinggi penampang kayu (cm)
- W = modulus tampang (cm³)
- L = panjang cap (cm)

4.6.1 Tegangan pada Side Post

Side post menerima tekanan dari samping dan reaksi panjang ujung cap, karena itu perancangan pada tegangan tekan dan tekanan perlengkungan harus dihitung dan diameter side post yang digunakan sama dengan cap yaitu 15,34 cm. Untuk menghitung tegangan pada side post menggunakan data sebagai berikut:

Diketahui:

- L_y = 194,5 cm
- L = 234 cm
- a = 171 cm
- dy = 15,34 cm
- σ_v = 0,2521 Kg/cm²
- σ_h = 0,0318 Kg/cm²

Diminta: $\sigma_b = \dots$?

$$\lambda = 4x \frac{ly}{dy} = 4x \frac{194,5}{15,34} = 12,68 \rightarrow \omega = 1,09$$

$$q_t = \sigma_h \times a = 0,0318 \times 171 = 5,4378 \text{ Kg/cm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b \text{ side post}} &= -0,637 \times \omega \times \left(\frac{\sigma_v \times a \times L}{dy^2} \right) \\ &\quad \pm 1,084 \times \left(\frac{\sigma_h \times a \times ly^2}{dy^3} \right) \\ &= 0,637 \times \omega \times \left(\frac{\sigma_v \times a \times L}{dy^2} \right) \\ &\quad + 1,084 \times \left(\frac{\sigma_h \times a \times ly^2}{dy^3} \right) \\ &= 0,637 \times 1,09 \times \left(\frac{43,1091 \times 234}{15,34^2} \right) \\ &\quad + 1,084 \times \left(\frac{5,4378 \times 194,5^2}{15,34^3} \right) \\ &= 0,637 \times 1,09 \times (42,87) + 1,084 \times (56,99) \\ &= 29,77 + 61,78 \\ &= 91,55 \text{ Kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Keterangan.

- σ_v = tegangan vertikal (Kg/cm²)

- a = jarak antar penyangga (cm)
- σ_h = tegangan horizontal (Kg/cm²)
- dy = diameter penampang kayu (cm)
- ly = panjang side post (cm)
- L = panjang cap (cm)
- σ_b = kuat tekan batuan runtuh (Kg/cm²)
- ω = Buckling Factor

4.7 Faktor Keamanan

4.7.1 Faktor Keamanan Cap Aktual

$$FK = \frac{\sigma_{sf}}{\sigma_b} = \frac{1050}{833,01} = 1,25$$

Dari hasil perhitungan diketahui nilai FK pada cap adalah 1,25 dimana hal ini tidak aman dan tidak memenuhi standar Kepmen ESDM Nomor 1827 K/ 30/ MEM 2018.

4.7.2 Faktor Keamanan Side Post Aktual

$$FK = \frac{\sigma_{sf}}{\sigma_b} = \frac{620}{91,55} = 6,77$$

Dari hasil perhitungan diketahui nilai FK pada side post adalah 6,4 dimana hal ini dapat dikatakan aman dan memenuhi standar Kepmen ESDM Nomor 1827 K/ 30/ MEM 2018 sehingga tidak perlu dilakukan evaluasi.

4.7.3 Evaluasi Penyangga Stabil

Setelah mengetahui bahwa nilai FK dari cap adalah 1,25, diperlukan evaluasi kembali yaitu dengan melakukan perubahan pada jarak antar penyangga kayu tersebut, berikut merupakan analisis jika FK pada cap adalah 1,5

$$FK = \frac{\sigma_{sf}}{\sigma_b} = \frac{1050}{833,01} = 1,25$$

$$\sigma_b = \frac{\sigma_{sf}}{FK} = \frac{1050}{1,5} = 700 \text{ Kg/cm}^2$$

Nilai M_{max} dengan nilai $\sigma_b = 700 \text{ Kg/cm}^2$

$$\sigma_b = \frac{M_{max}}{W}$$

$$M_{max} = \sigma_b \times W = 700 \text{ Kg/cm}^2 \times 354,21 \text{ cm}^3 = 247947 \text{ Kgcm}$$

Nilai q_t dengan nilai $M_{max} = 247947 \text{ Kgcm}$

$$\begin{aligned} M_{max} &= 0,125 \times q_t \times L^2 \\ q_t &= \frac{M_{max}}{0,125 \times L^2} = \frac{247947 \text{ Kgcm}}{0,125 \times (234 \text{ cm})^2} \\ &= 36,226 \text{ Kg/cm} \end{aligned}$$

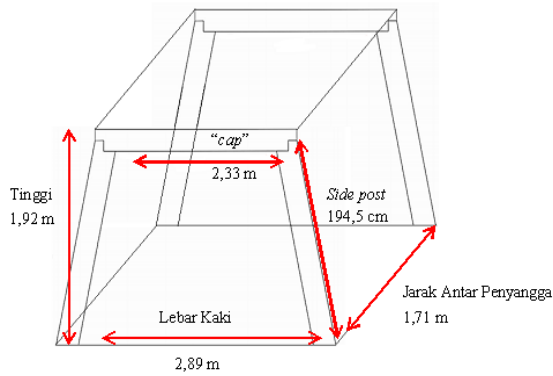
Nilai a dengan nilai $q_t = 36,226 \text{ Kg/cm}$

$$q_t = \sigma_v \times a$$

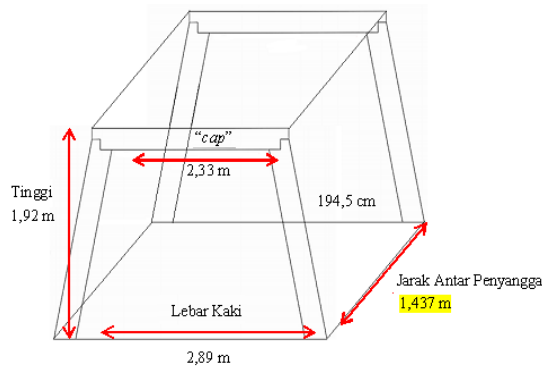
$$a = \frac{q_t}{\sigma_v} = \frac{36,226 \text{ Kg/cm}}{0,2521 \text{ Kg/cm}^2} = 143,7 \text{ cm} = 1,437 \text{ m}$$

Dari hasil analisis di atas didapatkan nilai $FK \geq 1,5$ dengan rekomendasi jarak antar penyangga 1,437 m.

4.7.4 Rekomendasi Penyangga Kayu



Sebelum diberi rekomendasi



Setelah diberi rekomendasi

Gambar 12. Rekomendasi Dimensi Penyangga Kayu Aktual Lapangan

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

1. Nilai dari sifat fisik pada batuan di lubang D-07:

Sifat fisik	Sampel	
	Batubara	Siltstone
Massa Jenis Asli (gr/cm ³)	1,545	2,683
Massa Jenis Kering (gr/cm ³)	1,538	2,681
Massa Jenis Jenuh (gr/cm ³)	1,574	2,694
Apparent Specific Gravity	1,538	2,681
True Specific Gravity	1,602	2,716
Kadar Air Asli (%)	0,449	0,08
Kadar Air Jenuh (%)	2,185	0,48
Derajat Kejenuhan (%)	18,22	18,358
Porositas (%)	3,598	1,287
Angka Pori	0,038	0,013

- Nilai dari sifat mekanik pada batuan di lubang D-07:

Sifat Mekanik	Sampel	
	Batubara	Siltstone
P (Kg)	89,9	1751,4
F	1,1582	1,1898
IS (Kg/cm ²)	2,1542	38,268
Is (MPa)	0,2114	3,7528
σc (MPa)	4,858	86,316

2. Berdasarkan dari pembobotan kelas massa batuan menggunakan metode *RMR-System* didapatkan hasil kelas massa batuan pada kedua dinding yang merupakan batubara memiliki nilai 47 (Kelas III, *Fair Rock*) dan kelas massa batuan atap yang merupakan *siltstone* memiliki nilai 70 (Kelas II, *Good Rock*). Nilai *stand up time* pada atap adalah 32000 jam atau 1333 hari dan pada batuan dinding memiliki nilai *stand up time* sebesar 212,5 jam atau 9 hari dengan *span* sepanjang 3-4 meter yang sesuai dengan rekomendasi dari *RMR System*.
3. Dari analisis FK dengan menggunakan *software unwedge* didapatkan nilai FK dinding kanan dan atap sebesar 1,312, dan nilai FK pada dinding kiri dan lantai sebesar 1,236 dimana disetiap sisi terowongan memiliki nilai FK di bawah kategori aman, maka dilakukan rekayasa penyangga berdasarkan *RMR-System*. Setelah dievaluasi menggunakan *software unwedge* FK setelah dipasang baut batuan sepanjang 4 m sebesar 1,604 dan 1,678 sedangkan FK setelah dipasang *shotcrete* setebal 50 mm sebesar 1,596 dan 1,576.
4. Hasil analisis FK penyangga kayu menggunakan jarak antar penyangga aktual sebesar 1,71 m didapatkan FK atap sebesar 1,25 dan FK dinding sebesar 6,77. FK atap memiliki nilai di bawah 1,5 yang dikategorikan tidak aman dan memerlukan evaluasi agar FK atap menjadi aman. Evaluasi jarak antar penyangga dilakukan untuk membuat FK aman, dari jarak penyangga aktual sebesar 1,71 m diubah menjadi 1,44 m dan didapatkan

5.2 Saran

1. Dari pengukuran jarak penyangga diketahui rata-rata jarak antar penyangga sebesar 1,71 m dimana hal ini melebihi SOP perusahaan yang menetapkan jarak antar penyangga sebesar 1,5m. Jarak rekomendasi yang penulis sarankan yaitu paling lebar sebesar 1,44 m sesuai hasil evaluasi dari penulis agar mencapai FK yang aman.
2. Pemasangan *ground support* disarankan memakai yang telah direkomendasikan melalui *RMR System*. Apabila perusahaan terkendala dengan biaya, alternatif penyangga bisa menggunakan penyangga kayu yang telah direkomendasikan.
3. Penelitian pada skripsi ini dilakukan pada pembahasan yang terbatas, karena itu perlu dilakukan penyelidikan lanjutan dikarenakan perubahan kondisi dari kedalaman lubang bukaan dan juga struktur geologi yang sewaktu-waktu dapat berubah.

Referensi

- [1] [1] Andrian, Yudi dan Bambang Heriyadi (2021) Evaluasi Kestabilan Lubang Bukaan

- Dan Sistem Penyanggaan Berdasarkan Klasifikasi Geomekanika Pada Tambang Batubara Bawah Tanah Sd-C2 Lori 1 Di PT. Nusa Alam Lestari, Kota Sawahlunto. Teknik Pertambangan, Universitas Negeri Padang.
- [2] Kockar, M.K. (2002) Methodology for tunnel and portal support design in mixed limestone, schist and phyllite conditions: a case study in Turkey. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 173–196.
- [3] Fernando, Recky (2015) Analisis Kestabilan Lubang Buka dan Pillar Dalam Rencana Pembuatan Tambang Bawah Tanah Batugamping Dengan Metode Room And Pillar Di Desa Sidorejo Kecamatan Lendah Kab. Kulonprogo Daerah Istimewa Yogyakarta. Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta.
- [4] Prengki, Ilep (2018) Analisis Beban Runtuh dan Evaluasi Lubang Buka Berdasarkan Metode Rock Mass Rating dan Q-System pada Tambang Bawah Tanah CV. Bara Mitra Kencana, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat. Teknik Pertambangan, Universitas Negeri Padang.
- [5] Akbar, M.D (2019) Analisis Kestabilan Tunnel Berdasarkan Klasifikasi Geomekanika (RMR-System) pada Penambangan Batubara Bawah Tanah Metoda Room and Pillar PT. Allied Indo Coal Jaya (AICJ) Sawahlunto. Teknik Pertambangan. Universitas Negeri Padang.
- [6] Alfantony, Frisky (2017) Evaluasi Teknis Sistem Penyanggaan Menggunakan Metode Rock Mass Rating (RMR) System pada Development Area (Ckn_Dc) Tambang Emas Bawah Tanah Pt. Cibaliung Sumberdaya.
- [7] P. H. S. W., Kulatilake, Qiong, W., Zhengxing, Y., Fuxing, J. (2013) Investigation of stability of a tunnel in a deep coal mine in China. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23, 579-589.
- [8] Sutanti, Ambar (2016) Rancangan Teknis Penyanggaan Berdasarkan Kelas Massa Batuan Dengan Menggunakan Metode RMR dan Q-System di Terowongan Gudang Handak dan Pasir Jawa UBPE Pongkor PT. Aneka Tambang Persero Tbk. Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta.
- [9] Karaman, K., Kaya, A., & Kesimal, A. (2015). Use of the point load index in estimation of the strength rating for the RMR system. *Journal of African Earth Sciences*, 106, 40-49.
- [10] Sutanti, Ambar (2018) Analisis Kestabilan Terowongan di Tambang Bawah Tanah Cross Cut 7 PT. Cibaliung Sumberdaya Pandeglang Banten. Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta.
- [11] Xing, Y., Kulatilake, P. H. S. W., & Sandbak, L. A. (2018). Effect of rock mass and discontinuity mechanical properties and delayed rock supporting on tunnel stability in an underground mine. *Engineering Geology*, 238, 62-75.
- [12] Rehman, H., Naji, A. M., Kim, J., & Yoo, H. (2019). *Extension of tunneling quality index and rock mass rating systems for tunnel support design through back calculations in highly stressed jointed rock mass: An empirical approach based on tunneling data from Himalaya. Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, 29–42.
- [13] Pratama, Aldo Surya dan Bambang Heriyadi (2023). Evaluasi Teknis Sistem Penyangga Berdasarkan Metode RMR-System Pada Lubang D-25 L3 Tambang Batubara Bawah Tanah Pt. Dasratsarana Arang Sejati (Pt. Dsas), Kota Sawahlunto, Sumatera Barat. Teknik Pertambangan, Universitas Negeri Padang.
- [14] Heriyadi, B., Prengki, I., & Prabowo, H. (2019, November). Analysis of Collapse Load and Open Hole Evaluation Based on Rock Mass Rating (RMR) Method in Underground Mining. In *Journal of Physics: Conference Series*.(Vol. 1387, No. 1, p. 012104). IOP Publishing.
- [15] Prabowo, H., Barlian, E., Syah, N., & Sastra, A. T. (2023, May). Slope stability analysis at coal mining sites in Central Kalimantan. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.(Vol. 1173, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.
- [16] Septian, R., Heriyadi, B., & Prabowo, H. (2018). Analisis kestabilan lereng jalan tambang di pt. Sumbar calcium pratama jorong atas halaban, nagari halaban, kecamatan lareh sago halaban, kabupaten lima puluh kota, provinsi sumatera barat. *Bina Tambang*, 3(2), 893-903.
- [17] Fikri, M. A., Heriyadi, B., & Prabowo, H. (2018). Analisis Stabilitas Lereng pada Pit Tambang Air Laya Barat Section C-C'pt Bukit Asam (Persero) Tbk., Sumatera Selatan. *Bina Tambang*, 3(2), 835-849.
- [18] Haryati, O. S., Kopa, R., & Prabowo, H. (2018). Pemetaan Kestabilan Lereng Pada Lokasi Penambangan Emas Pit Durian Pt J Resources Bolaang Mongondow Site Bakan Kecamatan Lolayan Kabupaten Bolaang Mongondow Sulawesi Utara. *Bina Tambang*, 3(1), 481-482.
- [19] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. Canada. Pennsylvania State University.
- [20] Rai, Made Astawa dkk. (2014). *Mekanika Batuan*. Bandung. Institut Teknologi Bandung.

- [21] Koppa, Raimon. (1990). Bahan Ajar Teknik Terowongan. Padang : FT UNP
- [22] Endri O, dkk. 2010. Penelitian K3 Penyanggaan pada Penambangan Long Wall Semi Mekanis Batubara Bawah Tanah dalam Rangka Mendukung Penyusunan Kebijakan K3 Tambang di Minerbapabum. Tekmira.
- [23] Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827 K 30 MEM Tahun 2018. Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik.
- [24] Roslee, Rodeano. dkk. (2020). Applicability Of The Geological Strength Index (Gsi)
- [25] Classification For The Trusmadi Formation At Sabah, Malaysia. 05-01-2024.
- [26] https://www.researchgate.net/figure/Rock-mass-classification-RMR-system-Bieniawski-1989-A-CLASSIFICATION-PARAMETERS-AND_tbl1_347400349
- [27] Sugiyono, Sugiyono. (2010). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung. Luigi T. De Luca, *Propulsion physics* (EDP Sciences, Les Ulis, 2009)